

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA TORRE DE LINHA DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Marcos Wilson Ogata

Porto Alegre
2022

Marcos Wilson Ogata

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA TORRE DE LINHA DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre
2022

CIP - Catalogação na Publicação

Ogata, Marcos Wilson

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA TORRE DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / Marcos Wilson

Ogata. -- 2022.

108 f.

Orientador: Herbert Martins Gomes.

Coorientador: Felipe Schaedler de Almeida.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. otimização estrutural. 2. torres de linhas de transmissão. 3. estruturas metálicas. 4. algoritmos metaheurísticos I. Martins Gomes, Herbert, orient. II. Almeida, Felipe Schaedler de coorient. III. Título.

Marcos Wilson Ogata

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA TORRE DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Estruturas e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 3 de novembro de 2022

Prof. Herbert Martins Gomes (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Felipe Schaedler de Almeida

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

Prof. Lucas Festugato

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Afonso Celso de Castro Lemonge (UFJF)

Dr. pelo COPPE/UFRJ

Prof. Alexandre Luis Braun

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Moacir Kripka (UPF)

Dr. pela EESC/USP

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria de Lourdes, e à
minha falecida tia Leda, pelo apoio e por sempre estarem
ao meu lado nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – CAPES, pela bolsa de estudos que possibilitou a minha dedicação aos meus estudos.

Agradeço ao Professor Herbert Martins Gomes, pela excelente orientação, apoio e paciência, e ao Professor Felipe Schaedler de Almeida, pela ótima coorientação.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, pelos conhecimentos compartilhados.

À minha mãe, a Sra. Maria de Lourdes Correa, por todo apoio, carinho e estímulo para a conclusão deste trabalho.

Por fim, quero deixar meus agradecimentos aos meus colegas, amigos e todos que direta ou indiretamente contribuíram para elaboração dessa dissertação.

O mundo te respeitará na exata proporção que você não tiver medo dele. Porque tudo é só uma relação de forças.

Clóvis de Barros Filho

RESUMO

OGATA, M. W. **Otimização estrutural de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

O projeto estrutural de torres de linhas de transmissão engloba vários aspectos, que exigem do projetista atenção especial. A segurança destas torres, geralmente estruturadas em aço, passa pelo seu correto dimensionamento, considerando cargas e combinações de ações adequadas. Como parte integrante e essencial de um sistema de distribuição de energia elétrica, a redução de custos na produção de cada torre, aliada à sua segurança e baixa necessidade de manutenção, pode levar a ganhos consideráveis de recursos, minimizando perdas. Portanto, o trabalho investiga a otimização estrutural de uma dessas torres, sob diversos aspectos e abordagens, visando economia e segurança. O objetivo é desenvolver uma metodologia para a incorporação das técnicas de otimização ao projeto estrutural de torres de linhas de transmissão. São apresentados estudos empregando os algoritmos: *Differential Evolution* (DE), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Quantum Particle Swarm Optimization* (QPSO) e *Generalized Normal Distribution Optimization* (GNDO). Neste trabalho, os esforços e deslocamentos são determinados por análise linear estática, utilizando elementos de pórtico espacial, e as condições de segurança são avaliadas com base nos requisitos normativos. Assim sendo, o algoritmo que teve melhor desempenho foi o GNDO, gerando uma solução ótima com 9,778 toneladas, que respeita todos os critérios de projeto e restrições adotados. Além disto, evidenciou-se que a escolha adequada da velocidade básica do vento é crítica para o peso final da torre, sendo que pequenas alterações nesta variável geram impactos significativos na solução ótima. Porém, considerar direções de vento além de 0°, 45° e 90° não traz grande melhoria na solução ótima do projeto estudado. Por fim, mostrou-se que, para a torre analisada, não é necessário adotar um número excessivo de variáveis de projeto, deste que estas sejam definidas adequadamente, e não de forma arbitrária.

Palavras-chave: *otimização estrutural; torres de linhas de transmissão; estruturas metálicas; algoritmos metaheurísticos.*

ABSTRACT

OGATA, M. W. **Structural optimization of a power transmission line tower.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

The design of electric power transmission line towers includes several technical and practical aspects, which require special attention from the engineer. The safety of these towers, which are usually designed as metallic structures, depends on their correct design, as well as appropriate consideration of load cases and combinations. As an integral and essential part of a distribution system, cost savings combined with safety and low maintenance requirements in each tower unit can lead to considerable gains in precious resources, minimizing losses. Therefore, the work investigates the structural optimization of these towers, under different aspects and approaches, aiming at economy and safety of the structure. The objective is to develop a methodology for the incorporation of optimization techniques to the structural design of transmission line towers. Studies using the following algorithms are presented: Differential Evolution (DE), Particle Swarm Optimization (PSO), Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO) and Generalized Normal Distribution Optimization (GNDO). In this work, internal forces and displacements are determined by linear static analysis, and safety conditions are evaluated based on regulatory requirements. Thus, the algorithm that had the best performance was GNDO, generating an optimal solution with 9,778 tons, which respects all the design criteria and restrictions adopted. In addition, it was evidenced that the adequate choice of basic wind speed is critical for the final weight of the tower, and small changes in this variable generate significant impacts on the optimal solution. However, considering wind directions beyond 0° , 45° and 90° does not generate a great improvement in the optimal solution of the studied project. Finally, it was shown that, for this project, it is not necessary to adopt a high number of design variables, as long as they are modeled properly, and not arbitrarily and without criteria.

Keywords: *structural optimization; transmission line towers; structural design; steel structures; metaheuristics algorithms.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Componentes de uma linha de transmissão.	29
Figura 3.2 – Tipos de torres, de acordo com sua função na LT.	30
Figura 3.3 – Tipos de geometria para torres de linhas de transmissão.	31
Figura 4.1 – Ações permanentes devidas ao peso próprio do cabo.	33
Figura 4.2 – Cabo suspenso entre dois apoios desnivelados 1 e 2.	34
Figura 4.3 – Graus de liberdade do elemento de pórtico espacial.	36
Figura 4.4 – Sistema de coordenadas local e global, com os respectivos vetores unitários.	37
Figura 5.1 – Carregamento usual de torres de LT do tipo suspensão.	41
Figura 5.2 – Comparação entre os perfis de velocidade EPS e TS.	43
Figura 5.3 – Efeito da pressão do vento sobre os cabos condutores.	45
Figura 5.4 – Esbeltez da aba de cantoneiras, conforme a NBR 8800 e a ASCE 10 (2015).	49
Figura 5.5 – Distância entre furos em cantoneiras tracionadas.	53
Figura 6.1 – Tipos de otimização estrutural.	55
Figura 6.2 – Processo evolucionário do algoritmo DE.	57
Figura 6.3 – Ilustração do processo de mutação em um espaço 2D paramétrico.	58
Figura 6.4 – Processo de recombinação de vetores.	59
Figura 6.5 – Fluxograma do programa de otimização.	66
Figura 7.1 – Geometria da estrutura (dimensões em centímetros).	68
Figura 7.2 – Vista superior, com orientação dos eixos coordenados.	69
Figura 7.3 – Disposição do feixe de cabos condutores para cadeia III (E) e IVI (D).	69
Figura 7.4 – Dimensões e eixos do perfil cantoneira.	72
Figura 8.1 – Convergência do algoritmo DE, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.	81
Figura 8.2 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo DE.	82
Figura 8.3 – Convergência do algoritmo PSO, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.	83
Figura 8.4 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo PSO.	83
Figura 8.5 – Convergência do algoritmo GNDO, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.	84
Figura 8.6 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo GNDO.	85
Figura 8.7 – Convergência do algoritmo QPSO, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.	86
Figura 8.8 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo QPSO.	86
Figura 8.9 – Gráfico de combinações críticas.	88
Figura 8.10 – Gráfico de restrições críticas acumulado (E) e de cada elemento (D).	88

Figura 8.11 – Grau de violação da restrição crítica de cada elemento (E) e acumulada (D). ..	89
Figura 8.12 – Rastreamento das solicitações máximas (E) e elementos escolhidos (D).....	91
Figura 8.13 – Primeiro (E) e segundo (D) modos de vibração da torre.	93
Figura 8.14 – Combinações críticas, para vento a 30 m/s.	94
Figura 8.15 – Combinação crítica, para vento a 45 m/s.	94
Figura 8.16 – Restrições críticas entre os elementos com vento a 30 m/s (E) e 45 m/s (D). ...	95
Figura 8.17 – Grau de violação de cada elemento (E) e acumulado (D) para vento a 45 m/s.	96
Figura 8.18 – Gráfico de Combinações Críticas para a simulação de 47 combinações.	98
Figura 8.19 – Restrições críticas entre os elementos com 61 combinações (E) e 47 (D).....	98
Figura 8.20 – Gráfico de Combinações Críticas, para 20 variáveis de projeto.	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 6.1 – Variações possíveis para o algoritmo DE.....	60
Quadro 7.1 – Listagem de ações considerada na análise estrutural.....	72
Quadro 7.2 – Listagem das combinações adotadas na simulação.	73
Quadro 7.3 – Divisão dos grupos para o estudo de caso.	76
Quadro 8.1 – Parâmetros heurísticos adotados.....	79
Quadro 8.2 – Violação e a respectiva combinação crítica de alguns elementos das pernas. ...	96
Quadro 8.3 – Listagem das combinações adotadas para a nova simulação.	97
Quadro 8.4 – Comparação entre as simulações com 30 (E) e 20 grupos (D).....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Coeficientes de força nas direções x e y.....	44
Tabela 7.1 – Propriedades dos cabos.....	70
Tabela 7.2 – Propriedades do isolador.....	70
Tabela 7.3 – Propriedades dos perfis cantoneira e numeração das variáveis de projeto.	71
Tabela 7.4 – Propriedades físicas do aço dos perfis cantoneira.	72
Tabela 8.1 – Estudo de convergência para o algoritmo DE.	81
Tabela 8.2 – Estudo de convergência do algoritmo PSO.	82
Tabela 8.3 – Estudo de convergência do algoritmo GNDO.....	84
Tabela 8.4 – Estudo de convergência do algoritmo QPSO.	85
Tabela 8.5 – Comparativo entre as melhores soluções de cada algoritmo.	87
Tabela 8.6 – Deslocamentos para a melhor solução.....	89
Tabela 8.7 – Perfis e verificação da segurança da solução ótima.....	90
Tabela 8.8 – Esforços máximos obtidos nos elementos rastreados, dentre todas as combinações.	92
Tabela 8.9 – Comparação entre as simulações.	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASCE – American Society of Civil Engineers

CIGRÉ – Conseli International des Grand Réseaux Électriques

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

IEC – International Eleetrotechnical Comission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

LT – Linha de Transmissão

NBR – Norma Brasileira

TLT – Torre de Linha de Transmissão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	MOTIVAÇÃO	19
1.2	OBJETIVOS	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	ANÁLISE DE TORRES DE LT.....	22
2.2	AÇÃO DO VENTO EM TORRES DE LT	23
2.3	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRES DE LT.....	25
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
3.1	ETAPAS DO PROJETO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	27
3.2	COMPONENTES DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	28
3.2.1	Cabos Condutores	29
3.2.2	Cadeia de Isoladores	29
3.2.3	Cabos Para-raios.....	29
3.3	CLASSIFICAÇÃO DAS TORRES	30
3.4	TÉCNICAS USUAIS DE ANÁLISE E PROJETO ESTRUTURAL DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	31
4	MODELAGEM MATEMÁTICA DA ESTRUTURA.....	33
4.1	ANÁLISE ESTRUTURAL DE CABOS	33
4.2	ANÁLISE ESTÁTICA	36
4.2.1	Elemento de Pórtico Espacial	36
4.2.2	Análise Elástica Linear	37
4.3	ANÁLISE MODAL	38
5	ANÁLISE E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DA TORRE	40
5.1	AÇÕES A CONSIDERAR	40
5.2	AÇÃO DO VENTO	41
5.3	COMBINAÇÕES DE AÇÕES	46
5.4	VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL.....	49
5.4.1	Capacidade Resistente à Compressão de Cantoneiras	49
5.4.2	Capacidade Resistente à Tração de Cantoneiras	52
6	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	54
6.1	CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	54
6.2	ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS	55
6.2.1	<i>Differential Evolution (DE)</i>	56

6.2.2 <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	60
6.2.3 <i>Generalized Normal Distribution Optimization (GNDO)</i>	62
6.2.4 <i>Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO)</i>	64
6.3 INTEGRAÇÃO DA ANÁLISE ESTRUTURAL COM O ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	66
7 ESTUDO DE CASO	68
7.1 ENTRADA DE DADOS DO PROBLEMA	68
7.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO.....	75
7.2.1 Definição da Função Objetivo e das Variáveis de Projeto.....	75
7.2.2 Definição das Restrições	77
8 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
8.1 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA	79
8.1.1 Algoritmo DE.....	80
8.1.2 Algoritmo PSO.....	82
8.1.3 Algoritmo GNDO	84
8.1.4 Algoritmo QPSO.....	85
8.1.5 Comparação dos Algoritmos.....	86
8.1.6 Resultados Obtidos para a Melhor Solução	87
8.1.7 Avaliação das Frequências Naturais	92
8.2 ESTUDO PARAMÉTRICO	93
8.2.1 Efeito do Aumento da Velocidade Básica do Vento.....	94
8.2.2 Efeito da Redução do Número de Combinações.....	96
8.2.3 Efeito da Redução do Número de Variáveis de Projeto.....	99
8.2.4 Comparação dos Resultados	101
9 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia e o crescimento econômico fazem com que haja um aumento expressivo pela demanda por energia elétrica. Conseqüentemente, se faz necessária a redução de custos com a expansão do setor elétrico. Devido à grande distância entre usinas geradoras de energia elétrica e centros de distribuição, são implantadas as linhas de transmissão (LT), composta por cabos condutores de energia, cabos para-raios, cadeia de isoladores e suportes, distribuídos ao longo da linha de transmissão para sustentar e manter os cabos a uma altura mínima de segurança do solo.

A implantação de linhas de transmissão abrange diversas disciplinas, desde estudos topográficos, pesquisas geológicas e geotécnicas, até projetos eletromecânicos e estruturais de seus componentes. Um dos elementos mais importantes de uma LT são os suportes que sustentam os cabos de transmissão de energia. GONTIJO (1994) explica que, de forma geral, estes suportes são concebidos como torres metálicas treliçadas cuja estrutura costuma ser composta por perfis cantoneiras de aço, com ligações aparafusadas e, em alguns casos, estais. Assim, realizar a otimização estrutural destas torres gera um impacto econômico significativo no empreendimento, uma vez que as linhas de transmissão geralmente se estendem por quilômetros de distância. Este processo de otimização permite reduzir custos, porém, ao mesmo tempo, garante a integridade, funcionalidade e segurança dos projetos estruturais das torres de LT.

Devido à grande extensão das linhas de transmissão, à baixa esbeltez das barras e leveza da estrutura, o vento se torna uma ação predominante no dimensionamento do sistema (SINGH, 2009). Em especial, no que se refere às torres, é importante definir, de forma adequada, todas as situações de carregamento possíveis ao longo da vida útil da estrutura. Isto inclui, além do vento, ações permanentes como o peso próprio dos cabos, isoladores e suportes. GONTIJO (1994) destaca também que hipóteses especiais devem ser consideradas como, por exemplo, ações devido à ruptura de cabos, e devido à construção da linha de transmissão, definindo uma ou mais sequências possíveis de montagem dos cabos. Todas estas hipóteses devem estar adequadamente combinadas, seguindo prescrições, por exemplo, da norma NBR 8681 (2003), que descreve diretrizes para definir as ações e combinações de segurança que devem ser

usadas para o dimensionamento das estruturas, incluindo seus coeficientes de ponderação, geralmente minorando as resistências e majorando as solicitações.

Por conta desta demanda de definir e modelar adequadamente as forças externas, grupos de pesquisa do CIGRÉ desenvolveram relatórios técnicos, a fim de fornecer orientações e apresentar estudos a respeito de torres de LT. Dentre estes estudos, ganham destaque no presente trabalho os relatórios de número 350 (CIGRÉ, 2008) e 324 (CIGRÉ, 2016) que abordam, respectivamente: a modelagem de ações de vento extremos (tormentas elétricas e tornados) e o estudo de cabos sob ação do seu peso próprio e ação do vento.

Em relação à normativa técnica presente no Brasil para torres de LT, está em vigor a norma NBR 5422 (1985) e a NBR 6123 (1988), as quais apresentam, respectivamente: diretrizes e premissas para o projeto de torres de LT e o cálculo da ação do vento em estruturas. A NBR 5422 (1985) também faz recomendações para os cálculos de forças externas às quais essas estruturas estão sujeitas. Porém, com a evolução das tecnologias e métodos de projeto ao longo dos anos, esta norma brasileira se tornou defasada e incompleta, e exigiu dos projetistas a necessidade de complementar seus projetos estruturais com normas estrangeiras, sendo a mais conhecida e aplicada a norma americana ASCE 10 (2015), para torres de LT. Esta norma fornece um procedimento específico para o dimensionamento das estruturas das torres, embasado no método dos Estados Limites. Estes estados limites são, em geral, os de esgotamento da capacidade resistente, deslocamentos máximos no topo da torre e de vibrações excessivas, limitando a frequência natural.

MENDES (2020) e SINGH (2009) realizam, em seus trabalhos, análises estáticas lineares destas torres, que em geral são modeladas de forma isolada, com as cargas externas aplicadas aos pontos de fixação dos componentes mecânicos. Esta técnica é adotada em boa parte dos escritórios de engenharia para conceber seus projetos. Porém, conforme destacado por CARLOS (2015), para torres estaiadas, mesmo que uma análise estática gere uma resposta precisa para o estado final da estrutura (após períodos de vibração), uma análise dinâmica permite observar uma amplificação significativa nos esforços de pico dinâmico, gerados durante o período de vibração da estrutura,

Nesse sentido, diversos autores como PARIS et al. (2012) e COUCEIRO et al. (2016) investigam a otimização estrutural aplicada a torres de LT, utilizando metaheurísticas. Geralmente, os trabalhos desenvolvidos nesta área visam a redução do peso de cada torre, sendo ela a função objetivo principal. Exigências normativas em geral são implementadas em

processos de otimização como restrições mecânicas, sendo as restrições geométricas oriundas de disponibilidade de perfis, esbeltezes de barras, entre outros. Incluir a otimização estrutural nos processos de projeto permite a economia de recursos valiosos na sua implantação.

1.1 MOTIVAÇÃO

Este trabalho tem por motivação a necessidade de se projetar estruturas cada vez mais leves, econômicas e seguras, de tal forma que garantam uma resposta estrutural adequada frente às solicitações que lhe são impostas. Linhas de transmissão mais seguras garantem que a energia elétrica seja conduzida de forma contínua até os seus pontos de consumo. Isto evita que a segurança e a prestação de socorro às pessoas sejam afetadas, mesmo após eventos naturais destrutivos, como tempestades e sismos, por exemplo. Além disto, estruturas econômicas viabilizam sua implementação, possibilitando o atendimento a regiões mais remotas.

Por estas razões, atualmente estão sendo desenvolvidos diversos trabalhos vinculando o projeto de estruturas, dos mais diversos tipos, com o ramo da otimização estrutural. Neste ponto, algoritmos metaheurísticos têm se mostrado com boa eficiência para resolver problemas de minimização do custo, uma vez que não se baseiam em métodos gradientes, mas sim em processos de busca, inspirados em diversos modelos. Desta forma, justifica-se como escolha de tema para o presente trabalho a otimização estrutural de uma torre de linha de transmissão utilizando algoritmos metaheurísticos. Este processo é feito levando em conta metodologias usuais de projeto de torres de LT adotados em escritórios de engenharia.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo da resposta, em termos de otimização estrutural paramétrica, das torres de linha de transmissão de energia elétrica, quando se consideram diversos aspectos do processo de cálculo estrutural destes suportes.

Para que o objetivo principal seja atingido definiram-se os seguintes itens específicos, a serem obrigatoriamente atendidos:

- a) Aprofundar os estudos sobre projetos de torres de linhas de transmissão;
- b) Estender as pesquisas referentes à otimização estrutural paramétrica, utilizando algoritmos metaheurísticos evolutivos;

- c) Analisar e discutir os pontos mais relevantes na consideração de diversas situações de cálculo de torres de linha de transmissão, dentro do processo de otimização estrutural.

O trabalho é elaborado de maneira a servir como base teórica e prática, tanto para pesquisadores futuros como projetistas que desejem ingressar na área de otimização estrutural. Se propôs fazer uma descrição detalhada de uma das metodologias possíveis de minimização da massa de uma torre de linha de transmissão. Para isto, foram explicados conceitos que incluem desde a análise estrutural de torres até considerações de projeto e a formulação do problema de otimização, incluindo aqui a definição da função objetivo (massa), das restrições geométricas e mecânicas, bem como das variáveis de projeto. No presente trabalho, foram definidos como variáveis de projeto os perfis que compõem a seção transversal de cada grupo de elementos da torre, divididos conforme critérios estabelecidos pelo projetista. Logo, o problema estudado trata-se de uma otimização estrutural paramétrica.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em 9 capítulos, incluindo este capítulo introdutório. Ele traz uma breve introdução sobre o tema estudado, mostrando sua motivação, seus objetivos principais e secundários. Ao final dele é apresentada a organização do trabalho.

O segundo capítulo deste trabalho apresenta uma **revisão bibliográfica** dos principais tópicos envolvidos no ramo de torres de linhas de transmissão. Aqui são apresentadas pesquisas relativas à análise estrutural de torres, incluindo a modelagem da ação do vento nestas estruturas e a sua otimização estrutural, usando metaheurísticas. Também são mostrados alguns trabalhos de pesquisa relacionados ao uso de algoritmos metaheurísticos, a fim de observar aspectos relevantes de sua modelagem.

No terceiro capítulo é feita a **fundamentação teórica** necessária para o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo são explanados os principais aspectos envolvidos no projeto de linhas de transmissão, elencando as principais fases envolvidas na definição de seus componentes. Na sequência são mostradas informações a respeito de cada um dos componentes da linha de transmissão, a saber: cabos condutores, cadeia de isoladores, cabos para-raios e classificação dos suportes, estes concebidos como torres metálicas compostas por cantoneiras. Por fim, o capítulo explana as práticas mais comuns adotadas em projetos estruturais de torres.

O quarto capítulo apresenta questões relacionadas à **modelagem estrutural**, incluindo a formulação matemática para o cabo em catenária, considerações sobre a matriz de rigidez e de massa para o elemento de pórtico espacial. Também é mostrado neste capítulo como se dá a resolução equações de equilíbrio por meio da análise elástica linear, para obtenção de deslocamentos e solicitações. Ao final do capítulo é mostrado brevemente a formulação para a análise modal, a fim de obter as frequências naturais e os modos de vibração da torre isolada.

No quinto capítulo é feito o levantamento das **ações** relevantes para o projeto de torres, divididas em permanentes e variáveis. As ações permanentes, são principalmente devido ao peso próprio dos elementos construtivos (ligações, barras, fundações, cabos, entre outros). As variáveis, por outro lado, serão governadas pela ação do vento. Com as ações definidas parte-se para a montagem às **combinações** de cálculo, incluindo seus coeficientes de ponderação. Estas hipóteses devem ser compatíveis com as utilizadas em práticas usuais de escritórios de Engenharia. Aqui também são explanados os conceitos envolvidos na verificação estrutural dos perfis, utilizando o método dos Estados Limites, a partir da norma ASCE 10 (2015).

O sexto capítulo descreve, de forma abrangente, o procedimento de **otimização estrutural** adotado. Desta forma, são apresentados os principais conceitos de otimização estrutural, com enfoque no uso de metaheurísticas. Nesta etapa também são explicados os conceitos e equações envolvidas em cada um dos quatro algoritmos utilizados no trabalho.

O sétimo capítulo realiza o estudo de caso, com uma torre modelo A55 de alta tensão, do tipo “cara de gato”. Aqui são mostrados os dados de entrada, definindo seus componentes e materiais, bem como a sua implementação, particularizando também o problema de otimização estrutural para a torre em estudo. Além disto, são apresentados de forma explícita as restrições e considerações adotadas no trabalho

O oitavo capítulo apresenta os resultados obtidos, realizando um estudo de convergência para verificar o desempenho de cada algoritmo para a torre estudada. Posteriormente é feito um estudo paramétrico, alterando isoladamente características do problema, a fim de avaliar seu impacto. Com isto, se fez três simulações: aumento da velocidade básica do vento, redução do número de combinações, redução do número de variáveis de projeto.

Por fim, o nono capítulo apresenta as conclusões obtidas a respeito dos estudos desenvolvidos neste trabalho. Além disto, são feitas sugestões de trabalhos futuros, a fim de aprofundar o tema de otimização estrutural.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANÁLISE DE TORRES DE LT

GONTIJO (1994) realiza um estudo extenso sobre aspectos de projetos de torres autoportantes de LT. Neste trabalho é feito um panorama geral sobre a implantação de linhas de transmissão, suas etapas, bem como um descritivo dos principais componentes do sistema, entre outros elementos importantes neste tipo de empreendimento. Na sequência são apresentados os elementos que compõem o projeto estrutural de uma torre de LT, incluindo a definição das hipóteses de cálculo, das ações de vento, das demais cargas atuantes nestas torres e métodos de dimensionamento.

KAMINSKI (2007) em sua tese discute sobre as incertezas dos modelos numéricos adotados em projetos de torres. O autor faz um comparativo entre as análises estática e dinâmica. No primeiro tipo é estudada a torre de forma isolada, com carregamentos estáticos, enquanto no segundo método um trecho de uma LT é modelado, incluindo seis torres e sua interação com o cabo. Conclui também que estas incertezas no modelo devem ser explicitamente consideradas, tanto na análise da confiabilidade quanto no projeto de estruturas de LT.

Dando sequência a esta pesquisa, KAMINSKI et al. (2009) desenvolvem uma rotina computacional em FORTRAN para análise dinâmica de estruturas de LT submetida a ruptura de cabos, a fim de dar suporte a projetistas, para que estes possam fazer comparações com as análises estáticas normativas. Nesta rotina é utilizado, para integração das equações de movimento dinâmico, o método explícito das diferenças finitas centrais. Como conclusão os autores destacam que, apesar da prática usual de projetos não modelar corretamente o fenômeno de ruptura de cabo, ocorrendo o colapso de uma ou mais torres, indiretamente o objetivo de conter o efeito cascata é atingido, pois este se restringiria a poucas torres, visto que, no evento de ruptura do cabo, a carga na torre adjacente é atenuada.

De forma complementar, CARLOS (2015) investiga a resposta estrutural estática e dinâmica de uma torre estaiada de uma LT quando submetida a ruptura de cabos. Para concretizar esta pesquisa, o autor desenvolveu um modelo numérico da torre isolada para a análise estática e de um trecho de LT para a análise dinâmica. Observou-se que a resposta ao final do evento dinâmico não apresentou diferenças significativas entre os dois tipos de análise. Porém,

conforme destacado pelo autor, a análise dinâmica permitiu verificar valores de pico e amplificação dinâmica, que resultaram em valores elevados ao longo do período de vibração.

SINGH (2009) faz a análise estática de um trecho de uma linha de transmissão, com 3 torres consecutivas com 33,80 m de altura. Foram propostos diversos modelos, considerando em alguns deles vãos iguais e em outros vãos desiguais. Devido ao comportamento altamente não linear do cabo, o autor considerou também uma análise não linear deste elemento, discretizando-o em vários elementos lineares de cabo ao longo da LT, e fazendo uma análise sem incluir a ação do vento para obter as forças de pré-tensionamento iniciais do cabo.

Dois anos depois, RESLER (2017), sob orientação do professor Ruy Carlos Ramos de Menezes, fez uma pesquisa da influência de modelos mecânicos na resposta estática de linhas de transmissão. Neste trabalho foram estudados três modelos básicos: de treliça espacial; de pórtico espacial; de treliça espacial combinada com pórtico espacial. Com isto, o autor conclui que, entre os modelos básicos de torres, utilizados na prática de projeto de torres metálicas de LT, a variabilidade é menor em elementos que absorvem esforços elevados, como montantes, por exemplo. Por outro lado, em elementos secundários e diagonais, a dispersão dos valores obtidos é maior, mas este fato não influencia nos resultados do projeto, uma vez que estes elementos absorvem poucos esforços.

2.2 AÇÃO DO VENTO EM TORRES DE LT

MIGUEL et al. (2012) realizam um estudo comparativo entre a resposta de linhas de transmissão sujeitas a ventos do tipo *extended pressure system* (EPS), conforme recomendações da norma IEC 60826, e a resposta do sistema sujeita a uma análise dinâmica, considerando um campo tridimensional de velocidades do vento. Estes estudos foram feitos com os espectros de potência mais utilizados da componente flutuante da velocidade do vento. Observou-se na comparação que os valores obtidos com a resposta dinâmica eram similares ao preconizados por norma, com erro estimado entre 5% e 10%. Erros menores foram observados em membros principais e nos cabos, enquanto erros maiores estavam presentes nas diagonais que compõem as torres.

TROIAN (2018) em sua dissertação discorre sobre a análise dinâmica de ventos EPS em torres estaiadas de LT. O autor gera, para um caso de carregamento transversal à linha, diversos campos aleatórios de velocidades. Para isto é utilizado o espectro de Davenport para

simular o sinal do vento, incluindo em sua análise a não linearidade geométrica dos componentes. Se observou que, para esta torre, os esforços oriundos da análise dinâmica não foram muito distintos dos obtidos por critérios normativos como a IEC 60826:2003, exceto para solicitações no mastro da torre.

RIERA (2016) explica a necessidade de se considerar ventos TS na análise de estruturas. O autor faz um compilado dos principais estudos desenvolvidos nesta área de ventos não sinóticos, sugerindo uma metodologia simplificada para projetistas estruturais incluírem em suas estruturas. Neste método, são incluídos os modelos do perfil radial de HOLMES e OLIVER (2000) com o vertical de SAVORY et al. (2001), obtendo resultados satisfatórios no exemplo numérico.

Complementando as considerações do estudo anterior, MIGUEL et al. (2018) publicam um artigo sobre a aplicação de ventos TS em estruturas altas. Neste trabalho é apresentado novamente o modelo simplificado proposto por RIERA (2016), com aplicações e comparativos em uma edificação prismática de 300 metros de altura.

CIGRÉ (2008), em seu relatório técnico, faz uma pesquisa de como torres de linhas de transmissão respondem a ventos de alta intensidade. Este documento apresenta um método simplificado para incluir efeitos de tormentas elétricas e tornados, denominado de “*wind on all*”, uma vez que atualmente não há uma metodologia consolidada para a consideração de ventos deste tipo na análise de estruturas.

Anteriormente a esta pesquisa, o método “*wind on all*” aparece como um dos elementos de estudo na dissertação de LANGLOIS (2007). Em seu trabalho são pesquisados os diversos aspectos de projeto de torres, quando submetidas a ventos de alta intensidade, chamados pelo autor de *High Intensity Wind* (HIW). São feitas experimentações numéricas aplicando diversos métodos simplificados, assumindo, por exemplo, uma distribuição uniforme da pressão do vento ao longo da torre para eventos de tornados e tormentas elétricas, porém com velocidades básicas e coeficientes de arrasto e rajada distintos. Assim, o autor recomenda que sejam consideradas, pelo menos, três direções de ventos HIW: 0° , 45° e 90° , para o projeto de torres de linhas de transmissão.

MENDES (2020) faz a avaliação da segurança estrutural de uma torre de LT utilizando os conceitos de confiabilidade apresentados na norma IEC 60826. O autor salienta a preocupação na modelagem da ação do vento em torres de LT, sendo que uma avaliação criteriosa desta

conduz a um dimensionamento mais confiável e realístico da torre. Neste trabalho são mostradas, de forma clara, a modelagem das hipóteses de carregamento, incluindo cabos rompidos, direções do vento relevantes para o estudo e tipos de vento. Além disto, o autor alerta as concessionárias sobre a necessidade de readequar as normas brasileiras para incluir estes conceitos de confiabilidade e aumentar a segurança das torres de LT.

2.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRES DE LT

GOMES (2011) realizou um estudo de otimização estrutural de forma e paramétrica de treliças planas e espaciais, utilizando o *Particle Swarm Optimization* (PSO) incluindo restrições dinâmicas de frequência natural. Este trabalho é desenvolvido com a intenção de investigar o uso do PSO como algoritmo de otimização nestes tipos de problema. Dito isto, se fez a investigação com quatro situações de *benchmark*, onde se chegou à conclusão que de fato o algoritmo PSO possui performance similar aos demais algoritmos utilizados no ramo, tendo inclusive em alguns casos melhor desempenho. Também nesta pesquisa é destacado o fato de que os autovalores do problema dinâmico, que são relacionados às restrições de frequência natural, são muito sensíveis às mudanças de forma.

Mais contribuições sobre otimização estrutural usando algoritmos metaheurísticos foram feitas por FURLANETTO et al. (2020). Neste trabalho se fez a otimização estrutural de uma torre metálica tubular para suporte de turbinas eólicas, usando o algoritmo *Quantum Particle Swarm Optimization* (QPSO). Devido a aspectos construtivos, estes tipos de torre são construídos com diversos segmentos tubulares, com espessuras de parede variáveis. Desta forma, estas espessuras foram adotadas como variáveis de projeto e o cálculo estrutural feito considerando aspectos da ação do vento conforme a NBR 6123 e do dimensionamento de estruturas metálicas conforme a NBR 8800. Utilizando o QPSO foi possível obter uma solução 12% mais leve em relação a outros algoritmos metaheurísticos. Porém, não se notou variações significativas no resultado em relação ao algoritmo PSO. Mesmo assim, o QPSO se mostra mais vantajoso, uma vez que utiliza menos parâmetros de entrada em sua formulação.

PARÍS et. al (2012) faz uma otimização de forma e paramétrica, utilizando variáveis contínuas e discretas, respectivamente. Para o estudo ele considerou como variáveis discretas seções de aço laminado comerciais, levando em conta restrições das normas europeia e espanhola. Os autores concluíram que, ao fazer adaptações em algoritmos heurísticos como o

Simulated Annealing, foi possível lidar simultaneamente tanto com variáveis contínuas quanto discretas em otimização de torres de LT.

Alguns anos depois, COUCEIRO et. al (2016) apresentam um interessante estudo de otimização de forma e paramétrica de torres de linha de transmissão utilizando o algoritmo *Simulated Annealing* (SA). Eles propõem algumas modificações no algoritmo, como uma análise de sensibilidade de primeira ordem, que tornou o algoritmo mais eficiente. Foram utilizados elementos de treliça espacial, assim como restrições normativas para um caso *benchmark* real. Como é usual, as barras foram organizadas em grupos, para reduzir o número de variáveis de projeto e manter a coerência com a prática construtiva. Os autores concluem que o algoritmo foi eficiente, se comparado com outros métodos como algoritmos genéticos (GA), *Harmony Search* (HS), critério de otimalidade e *fuzzy algorithm*, obtendo soluções 40% melhores, em termos de peso, em relação aos projetos usuais.

Aprofundando os estudos de otimização de torres, SAHIN (2016), em sua tese, faz a otimização estrutural, tanto paramétrica como de forma, de 4 modelos de torres de LT, utilizando também o algoritmo metaheurístico *Simulated Annealing*. Este processo de otimização é integrado a análises estruturais feitas no software comercial PLS-CADD e TOWER, da *Power Line Systems*, voltado especificamente ao projeto de linhas de transmissão. Com isto, o autor conseguiu uma redução de aproximadamente 8% para torres baixas e 26% para torres mais altas.

BARROS (2021) em sua dissertação utiliza uma torre estaiada para fazer sua otimização paramétrica e de forma, incluindo não linearidades geométricas. A torre é modelada com elementos de pórtico e treliça espacial. Neste trabalho é utilizado o algoritmo metaheurísticos *Backtracing Search Algorithm* (BSA), que segundo o autor possui maior flexibilidade ao se trabalhar com variáveis discretas. Com a otimização foi possível reduzir em até 4,8% os custos com a produção de uma torre ao se incluir a otimização de forma.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ETAPAS DO PROJETO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

GONTIJO (1994) elenca quais são as principais etapas envolvidas na implantação de sistemas de transmissão de energia elétrica. Dentre as diversas etapas, podem-se citar:

- a) **Viabilização do recurso energético:** verifica a capacidade de produção, localização e distância até os possíveis centros de consumo de energia. O principal foco desta etapa inicial é definir a voltagem da linha e a viabilidade econômica do empreendimento;
- b) **Levantamento topográfico:** definido o traçado da linha, parte-se para o estudo topográfico, ou seja, da obtenção do perfil do percurso a ser feito pela linha de transmissão. Ao longo do levantamento também são executados estudos de solo, principalmente em regiões onde possivelmente serão montados os suportes das torres;
- c) **Locação das estruturas de suporte:** as torres são dispostas ao longo do perfil, obtido da etapa anterior. Neste perfil longitudinal deve estar indicado: obstáculos e acidentes topográficos ao longo da faixa de servidão, tipo de vegetação, pontos obrigatórios de locação, marcos, referências de nível, estacas e declividade transversal (no caso de encostas). Primeiramente, se lançam os pontos obrigatórios como, por exemplo: início e fim de linha; derivações ou mudanças de direção; travessias de rodovias, ferrovias, rios ou vales. Neste estudo também são desenhadas as curvas dos cabos que interligam as estruturas de suporte.
- d) **Escolha do tipo de torre:** a escolha deve ser feita com base em critérios e condicionantes de projeto do ponto de vista elétrico (espaçamento entre fases, ângulo de proteção do cabo para-raios, isoladores, número de circuitos, entre outros) e estrutural (altura de segurança, flecha dos condutores).
- e) **Cálculo preliminar da estrutura:** parte-se para o estudo da geometria e arquitetura da torre. Uma vez definidos estes parâmetros, o engenheiro calculista realiza o dimensionamento dos perfis e ligações a serem utilizados nas barras, bem como o cálculo e projeto das fundações mais adequadas para cada tipo de solo encontrado ao longo do percurso feito pela linha de transmissão.

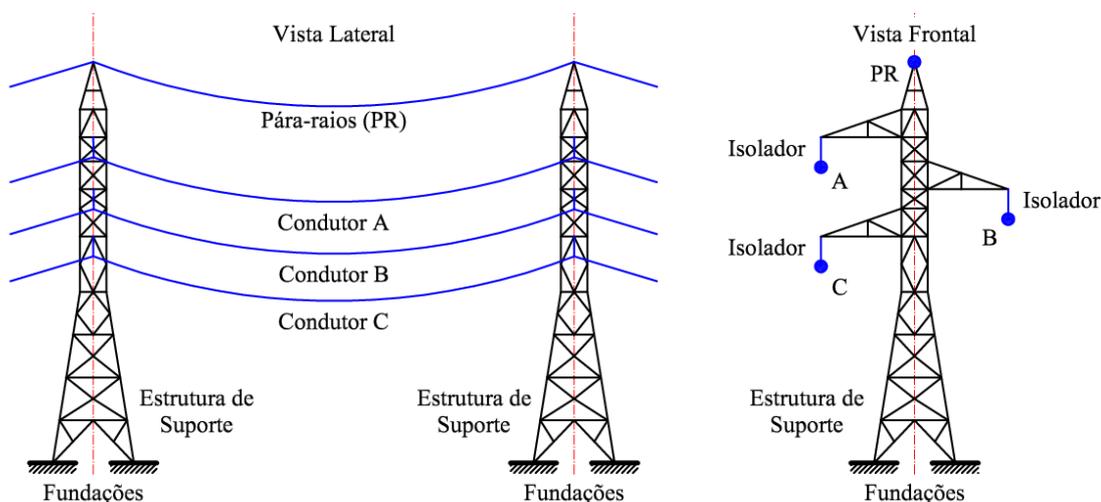
- f) **Custo total do empreendimento:** com o projeto básico elaborado, pode-se levantar o orçamento total a ser utilizado na implantação do projeto, contemplando: cabos condutores e para-raios, cadeia de isoladores, estruturas de suporte, fundações, montagem e mão de obra necessária. Geralmente, este custo é apresentado e avaliado por custo de linha por unidade de comprimento, podendo-se comparar também com outras soluções adotadas para outros projetos.
- g) **Projeto definitivo:** são gerados os cálculos completos, considerando as ações de vento e cargas permanentes, bem como o detalhamento de montagem da estrutura.
- h) **Fabricação e testes:** aprovado o projeto definitivo, a estrutura é fabricada e pré-montada. Esta estrutura é ensaiada, em escala real, em uma estação de testes.
- i) **Montagem da linha:** nesta etapa é feita a logística e gestão da execução do empreendimento. Como muitas vezes não há estradas ou trajetos que permitam o transporte adequado dos materiais e equipamentos, se faz necessário montar uma frente de trabalho que prepare o terreno previamente para a implantação da obra.

Na etapa de projeto das torres há muitas incertezas no modelo de cálculo utilizado. Além disto, há grande dificuldade em se considerar variados efeitos como, por exemplo: erros de fabricação, tolerâncias dimensionais na montagem, flexibilidade e deslizamento das ligações aparafusadas, tensões iniciais, variação das propriedades dos materiais, entre diversos outros fatores. Por conta disto, geralmente são feitos ensaios de carga em protótipos para fazer a calibração e verificação dos resultados. Estes protótipos são feitos em verdadeira grandeza e testados antes de se fazer a produção em série. As normas que orientam estes ensaios são a IEC 60652 (2017) e a NBR 8842 (2010).

3.2 COMPONENTES DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

O projeto de linhas de transmissão envolve diversos elementos, entre eles: cabos condutores, cabos para-raios (ou cabos de guarda), cadeia de isoladores, estrutura de suporte, entre outros. Estes elementos estão ilustrados na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Componentes de uma linha de transmissão.



(fonte: adaptado de LABEGALINI et al., 1992)

3.2.1 Cabos Condutores

Os cabos condutores mais utilizados são os constituídos por alumínio nu com alma de aço (CAA), mas também podem ser compostos por alumínio nu com alma de aço extraforte (ACSR – *Aluminium Conductor Steel Reinforced*), ou ainda apenas por alumínio, sendo denominados neste caso de CA (Cabos de Alumínio) ou AAC (*All Aluminum Conductor*).

3.2.2 Cadeia de Isoladores

Os cabos condutores devem ser isolados eletricamente, tanto em relação a torre que serve de suporte ao mesmo, como em relação ao solo. Isto é obtido através do ar que os envolve, auxiliado por elementos confeccionados com material dielétrico, denominado isoladores. Estes são dimensionados com base nas solicitações elétricas que recebe.

Além da resistência elétrica, o isolador deve possuir resistência mecânica para transmitir adequadamente o esforço devido ao cabo à estrutura de suporte.

3.2.3 Cabos Para-raios

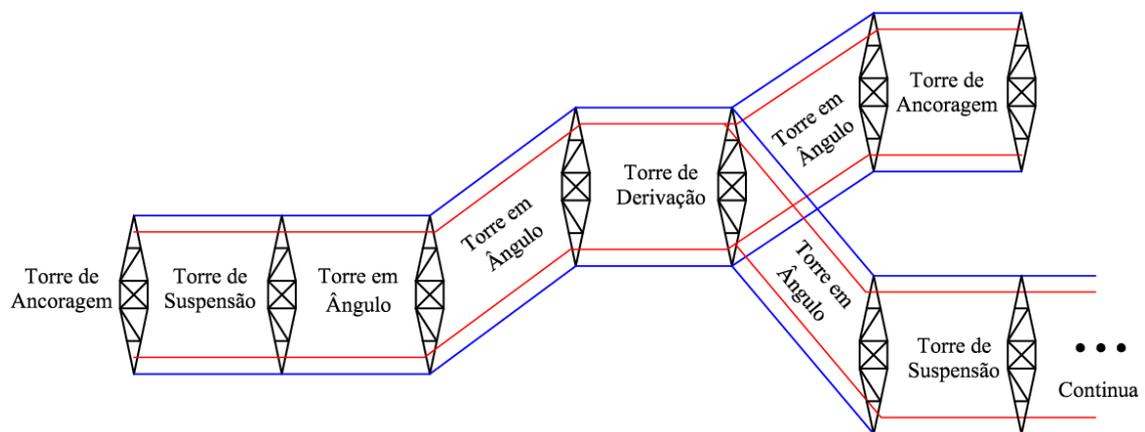
Estes elementos são inseridos na linha de transmissão com o objetivo de interceptar as descargas atmosféricas, transmitindo-as ao solo. Com isto, é possível impedir que estas descargas atinjam os cabos condutores, minimizando o risco de interrupção no fornecimento de energia elétrica. Os materiais mais empregados em cabos para-raios são: cordoalha de fios de aço zincada, cabos CAA extra-fortes e cabos de aço-alumínio.

3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS TORRES

Dentre as diversas classificações das torres pode-se ter (GONTIJO, 1994):

- a) **Quanto à disposição dos condutores:** triangular, vertical ou horizontal;
- b) **Quanto ao número de circuitos:** um ou dois;
- c) **Quanto à função na linha:** a Figura 3.2 mostra a vista superior de um trecho de linha de transmissão, onde os seguintes tipos de torres são apresentados:
 - **Estrutura de suspensão (*tangent supports*):** são as mais utilizadas ao longo da linha, sempre com o espaçamento mais uniforme possível e alinhadas (ou com pequeno ângulo). Funcionam como elemento de sustentação. Tais estruturas suspendem os cabos condutores através de cadeias de isoladores e os cabos para-raios através de aparelhos.
 - **Estruturas de ancoragem (*terminal supports*):** alocadas no início e fim da linha, sendo chamadas neste caso de estruturas de extremidade. Podem ser colocadas em posições intermediárias, caso seja necessário aplicar um tensionamento na rede, caso em que o intervalo entre estruturas de suspensão esteja entre 5 e 10 km. São importantes para conter o efeito cascata.
 - **Estrutura em ângulo (*angle supports*):** utilizadas quando há mudança de direção ao longo da linha de transmissão.
 - **Estruturas de derivação:** utilizadas quando há a necessidade de derivar um ponto da linha em mais ramificações.

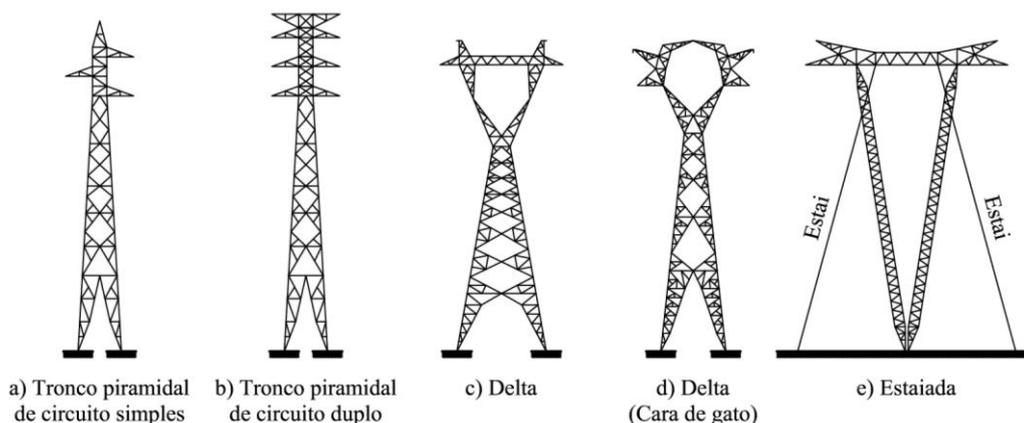
Figura 3.2 – Tipos de torres, de acordo com sua função na LT.



(fonte: autor)

- d) **Quanto à forma de resistência das estruturas:** autoportante ou estaiada
- e) **Quanto à tensão elétrica da linha:** a tensão da linha está diretamente relacionada com a capacidade de transporte de energia. No caso de ser necessário percorrer distâncias maiores até as regiões não energizadas, faz-se necessário ter cabos com diâmetros maiores para minimizar a queda de tensão entre os pontos de geração e distribuição de energia. No Brasil as tensões de operação mais comuns são: 69kV, 138kV, 230kV, 345kV, 500kV e 765kV.
- f) **Quanto ao formato:** as configurações geométricas usualmente adotadas para as torres são mostradas na Figura 3.3. Cabe ressaltar que, nesta figura, as torres a) a d) são autoportantes, enquanto que a torre e) é do tipo estaiada.

Figura 3.3 – Tipos de geometria para torres de linhas de transmissão.



(fonte: adaptado de GONTIJO, 1994)

3.4 TÉCNICAS USUAIS DE ANÁLISE E PROJETO ESTRUTURAL DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

As torres de LT são construídas geralmente com perfis laminados de seção cantoneira, com abas iguais. Ou seja, para fins de cálculo se trata de uma seção monossimétrica de parede fina. Tais perfis são conectados entre si através de ligações aparafusadas.

KAMINSKI (2007) explica que, em geral, para o projeto de torres, se faz uma análise linear elástica para calcular os deslocamentos e solicitações atuantes em cada elemento. Esta análise pode ser feita com barras de treliça espacial, pórtico espacial ou combinação dos dois elementos. O dimensionamento é feito com base no método semiprobabilístico dos estados limites. Neste método, se divide os estados em ELU (estado limite último) e ELS (estado

limite de serviço). O primeiro se baseia no esgotamento da capacidade resistente da estrutura, enquanto que o segundo verifica condições de serviço, como deslocamentos excessivos.

O ELU é verificado para a envoltória de solicitações, ou seja, os valores máximos e mínimos que podem ocorrer nos elementos ao longo da vida útil da estrutura. Os estados limites últimos usuais de torres de linhas de transmissão envolvem a ruptura à tração das barras ou à compressão, considerando efeitos de flambagem no modelo de cálculo. Em relação às ligações, por serem em geral aparafusadas, se verificam os ELU's de corte dos parafusos, rasgamento ou esmagamento das seções dos perfis.

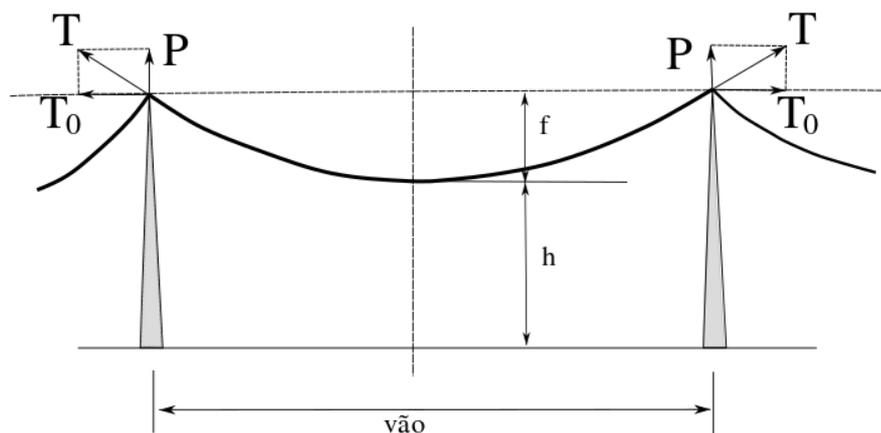
Há diversas normas voltadas especificamente para o projeto de torres de linhas de transmissão. Dentre elas, a mais utilizada é a norma ASCE 10 (2015). Esta norma inclui observações a respeito da análise estrutural, verificação de ligações, dimensionamento dos perfis para resistir a esforços de compressão, tração, flexo-compressão e flexo-tração. Esta norma também mostra formas de considerar a flambagem de perfis do tipo cantoneira e como ocorre a transmissão de esforços nas conexões aparafusadas.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA DA ESTRUTURA

4.1 ANÁLISE ESTRUTURAL DE CABOS

O cabo é um elemento estrutural que transmite apenas esforços axiais de tração. A força transmitida pelo cabo para a torre é função do vão gravante entre as estruturas de suporte. Define-se vão gravante como a distância entre os pontos mais baixos dos cabos, considerando dois vãos adjacentes a uma estrutura. Para dois vãos consecutivos iguais em uma linha de transmissão, o vão gravante corresponde a distância entre dois suportes consecutivos. Desta forma, pode-se obter as componentes de força conforme mostrado na Figura 4.1, por meio das equações de equilíbrio estático.

Figura 4.1 – Ações permanentes devidas ao peso próprio do cabo.



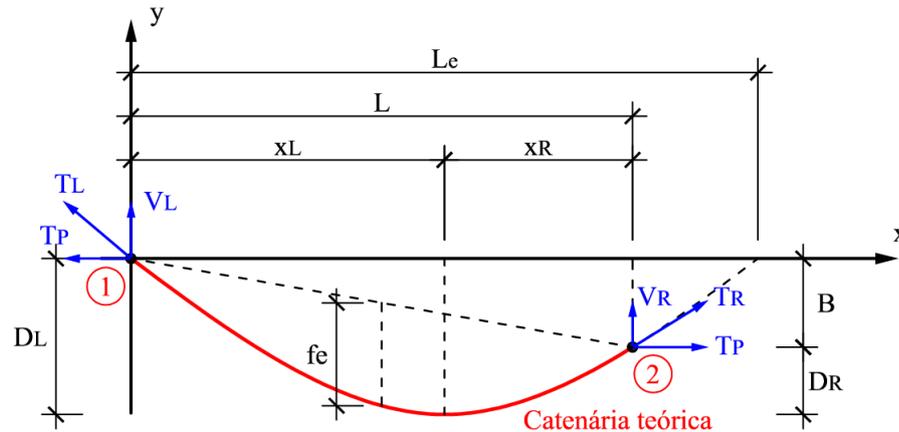
(fonte: adaptado de LABEGALINI et al., 1992)

O cabo, sob ação do seu próprio peso, assume a forma de uma catenária. No caso ilustrado na Figura 4.1, as componentes de força se distribuem igualmente entre as duas estruturas de suporte. As componentes horizontais T_0 são equilibradas pela metade do vão, enquanto que as componentes verticais P devem ser absorvidas pela estrutura.

A menor distância h entre o condutor e o nível do solo é chamado de “altura de segurança”, sendo determinada em função da tensão da linha e da natureza do terreno que a linha percorre. Por outro lado, o deslocamento vertical máximo f que o cabo sofre, ao longo do vão entre suportes de uma linha de transmissão, é chamado de flecha da catenária.

Para a definição da curva catenária, em caso de suportes desnivelados, se utilizam os parâmetros mostrados na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Cabo suspenso entre dois apoios desnivelados 1 e 2.



(fonte: CIGRÉ, 2016)

onde: x_R é a distância horizontal entre o ponto de deslocamento máximo e o suporte à direita, x_L é a distância horizontal entre este mesmo ponto e o suporte à esquerda, D_R é a distância vertical entre o ponto de deslocamento máximo e o suporte à direita, D_L é a distância vertical entre este mesmo ponto e o suporte à esquerda, B é o desnível entre suportes, L o vão efetivo da catenária, L_e o vão teórico da catenária, f_e a flecha máxima do cabo, V_R e T_R são, respectivamente, a componente vertical e a resultante do esforço de tração no cabo, no suporte à direita, V_L e T_L são os mesmos tipos de esforços, porém para o suporte à esquerda e T_p é a componente horizontal da força de tração no cabo, assumida como constante ao longo dele.

Todos estes parâmetros dependem de uma constante C , cuja obtenção se dá por:

$$C = \frac{T_p}{p_c} \quad (4.1)$$

onde p_c o peso linear do cabo, em N/m. A constante C também é chamada de constante de catenária, conforme salientado pelo relatório técnico BT 324 do CIGRÉ (2016). Quanto maior for esta constante, mais rasa a catenária se torna e, portanto, menor sua flecha teórica. Geralmente, este valor fica entre 500 e 2000 m, para linhas de transmissão convencionais.

A Tabela 3 da NBR 5422 (1985) indica as cargas máximas que podem atuar nos cabos, na condição de trabalho de maior duração. Este é dado como uma porcentagem da carga de ruptura. Para cabos condutores de alumínio, com núcleo de aço (CAA), na condição EDS (*Every Day Stress*), esta carga máxima não pode ser maior que 20% da capacidade UTS (*Ultimate Tension Stress*), chamado aqui por T_{\max} . Para cabos para-raios o valor da força axial

de tração deve ser calculado para a flecha da catenária teórica igual a 90% da flecha máxima dos cabos condutores, no vão considerado. Este valor deve ser limitado, segundo a NBR 5422 (1985), a uma tração de projeto correspondente a 14% da condição UTS. Assim sendo, se estabelecem as seguintes relações para cabos condutores e para-raios, respectivamente:

$$T_{P,CC} = 0,20 \cdot T_{\max,CC} \quad (4.2)$$

$$T_{P,PR} = 0,14 \cdot T_{\max,PR} \quad (4.3)$$

IRVINE e CAUGHEY (1974) apresentam a formulação para cabos em catenária. Nela se obtém o comprimento do vão teórico L_e , mostrado na Figura 4.2, através da Equação 4.4.

$$L_e = L + \frac{2BC}{L} \quad (4.4)$$

Na sequência, se calcula posição da flecha máxima à esquerda x_L :

$$x_L = \frac{L}{2} - C \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{B}{2C \cdot \sinh(L/2C)} \right) \quad (4.5)$$

A posição à direita, por consequência, será:

$$x_R = L - x_L \quad (4.6)$$

A flecha teórica f_e , por outro lado, pode ser aproximada pela expressão a seguir:

$$f_e \cong \frac{L_e^2}{8C} - B \quad (4.7)$$

No caso em que os pontos de fixação se encontram nivelados, ou seja, $B = 0$, o deslocamento máximo ocorre no meio do vão. Logo, pode-se obter a equação da catenária como sendo:

$$y(x, x_L) = C \cdot \left[\cosh \left(\frac{x - x_L}{C} \right) - \cosh \left(\frac{x_L}{C} \right) \right] \quad (4.8)$$

Por fim, a Eq. 4.9, extraída de KAMINSKI (2007), calcula o comprimento do cabo em catenária L_c , após a aplicação do peso próprio. Obtido este valor, pode-se obter as componentes de tração no cabo utilizando equações de equilíbrio estático.

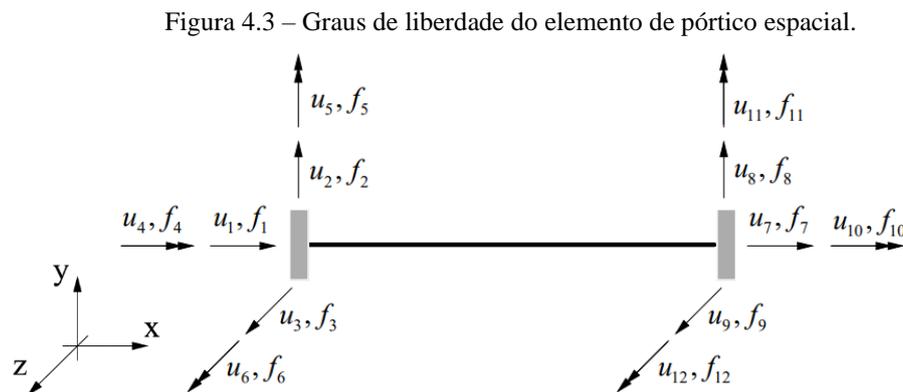
$$L_c = \sqrt{B^2 + 4C^2 \cdot \left(\sinh \left(\frac{L}{2C} \right) \right)^2} \quad (4.9)$$

4.2 ANÁLISE ESTÁTICA

Na análise estática as forças são aplicadas de forma lenta e gradual na estrutura, de tal maneira que os efeitos inerciais não são relevantes para a análise desta. Este tipo de cálculo pode ou não considerar a não linearidade física e/ou geométrica da estrutura.

4.2.1 Elemento de Pórtico Espacial

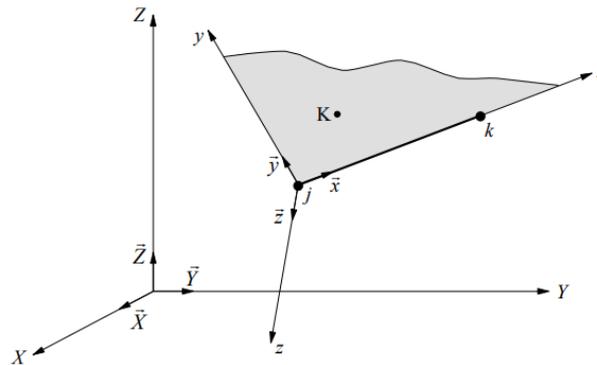
O elemento de pórtico espacial possui seis graus de liberdade por nó, sendo três de translação e três de rotação. Consequentemente, cada nó deste tipo de elemento possui seis esforços internos: um esforço normal, dois esforços cortantes, dois momentos fletores e um momento de torção. A Figura 4.3 mostra os graus de liberdade de translação $u_1, u_2, u_3, u_7, u_8, u_9$, bem como seus respectivos esforços internos $f_1, f_2, f_3, f_7, f_8, f_9$. Esta figura também apresenta os graus de liberdade de rotação $u_4, u_5, u_6, u_{10}, u_{11}, u_{12}$, com suas respectivas solicitações internas $f_4, f_5, f_6, f_{10}, f_{11}, f_{12}$.



(fonte: adaptado de RIBEIRO et al., 2014)

Para barras modeladas como pórtico espacial a orientação de sua seção transversal é relevante para a definição da matriz de rigidez da estrutura. Sendo assim, há duas formas de se implementar a entrada de dados no algoritmo de análise estrutural: ou se insere um nó auxiliar para que seja possível definir um vetor unitário que oriente a seção, ou utiliza-se como dado de entrada o ângulo que a seção faz com o eixo local z de referência. Dá-se preferência ao primeiro caso, por ser de fácil implementação. Estes comentários são ilustrados na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Sistema de coordenadas local e global, com os respectivos vetores unitários.



(fonte: RIBEIRO et al., 2014)

As matrizes de rigidez e de massa de cada elemento são construídas em relação ao sistema de eixos local. Desta forma, deve-se utilizar a matriz de rotação \mathbf{R} para transformar as matrizes do sistema local para o sistema global de referência da estrutura. Com isto, obtém-se as matrizes globais de rigidez e massa rotacionadas, conforme as multiplicações matriciais das equações mostradas a seguir:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^T \mathbf{K}^L \mathbf{R} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}^T \mathbf{M}^L \mathbf{R} \quad (4.11)$$

4.2.2 Análise Elástica Linear

MENDONÇA e FANCELLO (2019) explicam que, neste tipo de análise, é considerado que o material constituinte dos elementos estruturais da torre é elástico linear, obedecendo à lei de Hooke. Isto permite aplicar o método da rigidez de uma estrutura formada por barras, através da formulação do seguinte sistema de equações:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{U} \quad (4.12)$$

onde \mathbf{F} é o vetor de cargas nodais, \mathbf{K} a matriz de rigidez global da estrutura e \mathbf{U} o vetor de deslocamentos nodais. Todas estas variáveis devem estar em relação ao sistema de referência global, adotado para o modelo. Dito isto, o procedimento para implementação deste método consiste nas seguintes etapas:

- a) Montagem da matriz de rigidez, em coordenadas locais, de cada um dos elementos de barra que compõem a estrutura;
- b) Alocação de cada uma destas matrizes locais na matriz de rigidez global, nos respectivos graus de liberdade. Para isto, é necessário rotacionar a matriz local para que esta fique em relação ao sistema de referência global da estrutura;

- c) Montagem do vetor de cargas. No caso de modelo de pórtico espacial, é permitida a implementação de cargas distribuídas ao longo dos elementos. Nesta situação, é necessário convertê-las em cargas nodais equivalentes, que em essência correspondem à forças de engastamento perfeito com o sinal trocado.
- d) Resolução do sistema de equações, obtendo o vetor de deslocamentos nodais, para cada grau de liberdade da estrutura.

Uma vez obtido o vetor de deslocamentos, estes podem ser utilizados para obter as solicitações atuantes na barra m . Para isto, aplica-se a seguinte equação:

$$\mathbf{F}^m = \mathbf{K}^m \mathbf{U}^m + \mathbf{F}_{ep}^m \quad (4.13)$$

onde o superíndice m se refere à barra em estudo, \mathbf{U}^m é o vetor de deslocamentos nodais de cada barra e \mathbf{F}_{ep}^m as forças de engastamento perfeito nos nós das barras. Para obter as solicitações em relação aos eixos locais da barra, aplica-se a transformação a seguir:

$$\mathbf{F}^{m,L} = \mathbf{R}^T \mathbf{F}^m \quad (4.14)$$

A reação no vínculo perfeito, localizado no nó i , pode ser obtida por meio de:

$$\mathbf{R}_i = -\mathbf{P}_i + \sum_{m=1}^p \mathbf{F}_i^m \quad (4.15)$$

onde \mathbf{P}_i corresponde a cargas concentradas que estejam aplicadas nos vínculos, p o número de barras ou elementos que concorrem a este vínculo, e \mathbf{R}_i o vetor de reações no vínculo.

4.3 ANÁLISE MODAL

Os conceitos abordados neste item possuem como referência KELLY (2012) e MENDONÇA et al. (2019). Ambos explicam conceitos básicos de dinâmica estrutural e aplicações para o Método dos Elementos Finitos (MEF). No presente trabalho foi obtida apenas as frequências naturais da torre referentes aos dois primeiros modos de vibração. Ou seja, não foi incluída a contribuição dos cabos e das demais torres na forma modal do conjunto que compõe a LT, pois exigiria uma análise não linear geométrica e física. A NBR 8850 (1985) recomenda que se faça análise dinâmica para suportes não usuais, muito esbeltos, cuja frequência natural seja menor que 2,0 Hz. Não é indicado o projeto de suportes com frequência natural menor que

1,0 Hz, uma vez que este tipo de estrutura se torna passível de sofrer amplificação de esforços por conta de efeitos dinâmicos induzidos pelo vento.

A análise modal é utilizada para obter as características dinâmicas da estrutura, como as frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. Para obter estes resultados, considere a seguinte equação matricial de vibração livre não-amortecida para uma estrutura com n graus de liberdade:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}\mathbf{x}_n = \mathbf{0} \quad (4.16)$$

onde \mathbf{x}_n é o vetor de deslocamentos do n -ésimo modo de vibração, ou vetor de deslocamentos modais. Sabe-se, da teoria de vibrações que, em sistemas lineares, a solução desta equação pode ser escrita como uma superposição de movimentos harmônicos simples, ou senoides. Tal superposição assume a separação da componente estática da amplitude da componente variável no tempo. Este procedimento resultará no vetor $\boldsymbol{\phi}_n$, que representa o n -ésimo modo de vibração da estrutura. Logo, o vetor de deslocamentos é reescrito como:

$$\mathbf{x}_n = \boldsymbol{\phi}_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (4.17)$$

sendo ω_n a frequência natural do n -ésimo modo de vibração, em rad/s, e ϕ_n o ângulo de fase, em radianos. Substituindo esta expressão na Equação 4.16 chega-se a:

$$(-\omega_n^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}) \boldsymbol{\phi}_n = \mathbf{0} \quad (4.18)$$

O sistema de equações obtido possui soluções não triviais se, e somente se, o determinante do termo entre parênteses for diferente de zero. Percebe-se, portanto, que se trata de um problema de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração). Dito isto, para encontrar as frequências naturais basta resolver o determinante da Equação 4.19.

$$|-\omega_n^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}| = 0 \quad (4.19)$$

5 ANÁLISE E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DA TORRE

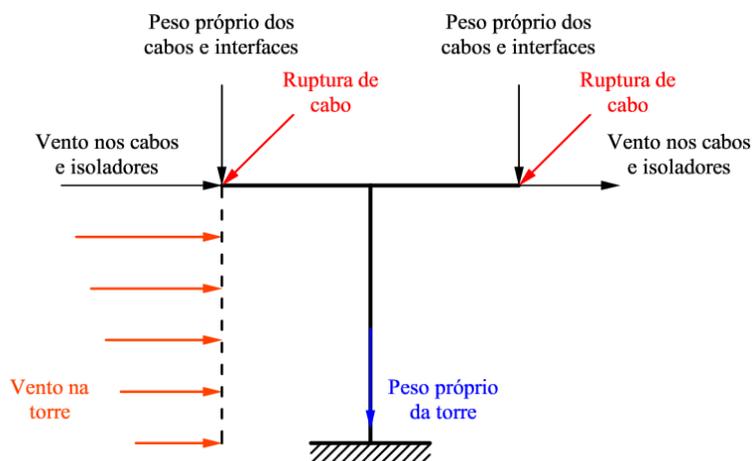
Neste capítulo aborda-se a modelagem das ações e combinações de carregamento, além das hipóteses de cálculo mais relevantes para o estudo de torres de LT, para aplicação da análise estática linear. Também são discutidos aspectos relativos à consideração de cargas devido a ventos extremos nestas torres. Por fim, são mostrados os métodos de dimensionamento e verificação da resistência dos perfis cantoneira, conforme as normas técnicas usuais em projetos de torres de LT.

5.1 AÇÕES A CONSIDERAR

Há uma série de ações a serem consideradas no projeto das torres de linhas de transmissão, conforme sintetizado na Figura 5.1. Estas ações podem ser diferentes, dependendo da função da torre na linha (suspensão, de ancoragem, entre outras) ou de seu tipo (autoportante, estaiada). Dentre as ações mais relevantes descritas por KAMINSKI (2007) estão:

- a) Peso próprio de elementos construtivos: estrutura da torre, cabos condutores, cabos para-raios e cadeia de isoladores;
- b) Ação estática do vento: normalmente, são considerados os casos de incidência do vento na direção transversal, longitudinal ou oblíqua em relação ao eixo da linha de transmissão;
- c) Ação dinâmica do vento sobre a torre e os cabos: importante sua consideração para torres altas;
- d) Ações transversais resultantes da mudança de direção da linha;
- e) Ações longitudinais devido às forças de tração nos cabos;
- f) Ações impostas durante o processo construtivo e de montagem, como peso de operários, cargas de içamento e manutenção;
- g) Ações devido ao rompimento de um cabo;

Figura 5.1 – Carregamento usual de torres de LT do tipo suspensão.



(fonte: KAMINSKI, 2007)

A norma IEC 60826 (2017) recomenda que três categorias de ações devem ser consideradas:

- a) Ações devidas a eventos meteorológicos ou qualquer carregamento que resulte destes fenômenos e que governe a confiabilidade da linha de transmissão ao longo de sua vida útil. Citam-se como exemplos:
 - Ações devidas ao vento;
 - Ações devido à presença de gelo, sem considerar o vento;
 - Ações devido à presença de gelo, considerando vento.
- b) Ações relacionadas a montagem, construção, manutenção e proteção de pessoas;
- c) Ações relacionadas à segurança;
 - Ações devido à ruptura de cabos e mecanismos de contenção de falha, objetivando prevenir ou reduzir a propagação de rupturas, tais como queda de torres e efeito cascata.

5.2 AÇÃO DO VENTO

O vento surge principalmente devido à diferença de pressão atmosférica, decorrente do aquecimento não uniforme da superfície terrestre gerado pela energia solar, fazendo com que massas de ar se desloquem das zonas de maior pressão para as de menor pressão (BLESSMANN, 1995). Os fenômenos meteorológicos que dão origem a ventos superficiais de alta intensidade são tratados como tormentas, independente do seu mecanismo de

formação, para fins de aplicação em engenharia estrutural. Os tipos mais correntes de tormentas são: ciclones extratropicais, ciclones tropicais, tormentas elétricas, linhas de tormenta (ou de instabilidade) e tornados.

Os ventos de ciclones extratropicais, quando plenamente desenvolvidos, são também chamados de ventos EPS (*Extended Pressure System*). Este tipo se caracteriza por uma atmosfera verticalmente estável, soprando numa velocidade média aproximadamente constante, por até algumas dezenas de horas. Além disto, o vento EPS atinge grandes regiões, variando de algumas centenas a milhares de quilômetros de extensão. Por estas características, é também classificado como vento **sinótico**, possibilitando modelar esta ação por meio de um perfil de velocidades característico, assumindo que o processo é estacionário, ou seja, as grandezas estatísticas são independentes do tempo.

Por outro lado, os ventos de tormentas elétricas são também conhecidos como ventos TS (*Thunderstorm*). Ao contrário do vento EPS, este tipo é caracterizado por uma atmosfera verticalmente instável, não sendo possível representá-lo por um único perfil de velocidades. Por este fato, o vento TS é classificado também como evento **não sinótico**.

A consideração de ventos EPS pode ser feita através de uma ação estática equivalente, bem estabelecida pelas normas técnicas. O perfil de velocidades médio ao longo da altura, para ventos EPS, pode ser obtido através de uma lei de potência. Assim sendo, a velocidade característica, de acordo com a NBR 6123 (1988), por:

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_o \quad (5.1)$$

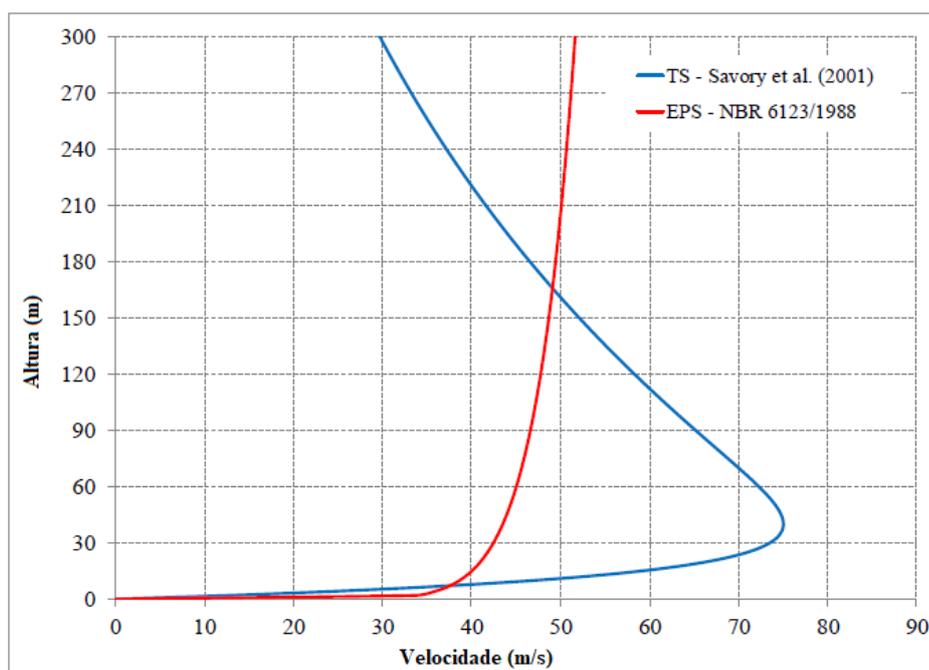
sendo V_o a velocidade básica do vento, que consiste na velocidade de uma rajada de 3 s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano. Para este trabalho a velocidade básica foi extraída do mapa de isopleias apresentado na NBR 6123 (1988). Os valores S_1 , S_2 e S_3 da Equação 5.1 correspondem, respectivamente, a fatores de correção topográficos, de rugosidade do terreno e estatístico de segurança (ou vida útil) da edificação. Com a velocidade característica pode-se obter a pressão dinâmica q , dada por:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (5.2)$$

RIERA (2016) reforça a importância de se considerar combinações com ventos causados por correntes descendentes no projeto estrutural de torres de linhas de transmissão. CIGRÉ (2002)

aponta que 80% das falhas que ocorrem nestas linhas, em climas temperados, são causados por ventos TS. Apesar desta relevância, os ventos não sinóticos ainda não possuem um modelo de cálculo consolidado e totalmente aceito por toda a comunidade científica. Uma das causas disto se deve à natureza complexa deste fenômeno. Outro fator relevante é de que há certa dificuldade em se obter dados sobre a ocorrência destes eventos, uma vez que os mesmos podem se manifestar de diversas formas. Por exemplo, a corrente descendente pode ocorrer de forma isolada, se deslocando com baixa velocidade, devido à circulação geral da atmosfera. Porém, outra forma de surgir, que hoje sabe-se ser mais destrutiva, é por meio de *linhas de instabilidade (squall lines)*, ou seja, quando a corrente descendente é transladada por meio de um evento EPS. Desta forma, nesta situação se combinam, de forma aditiva, o efeito dos dois tipos de vento, TS e EPS. A Figura 5.2 a seguir mostra um comparativo entre os dois tipos de perfis sugeridos para análise da ação do vento.

Figura 5.2 – Comparação entre os perfis de velocidade EPS e TS.



(fonte: adaptado de MIGUEL et al, 2018)

Conforme explicado por LOREDO-SOUZA (1996), no caso de torres treliçadas é possível fazer duas abordagens, para obter os esforços solicitantes devidos ao vento:

- a) **Cálculo individual em cada barra:** obtém a força de arrasto atuando em cada barra individualmente, distribuindo a mesma entre os nós que a compõem. Neste caso se utilizam os coeficientes de força para barras prismáticas e o coeficiente redutor para barras de comprimento finito da NBR 6123 (1988);

- b) **Divisão da estrutura em módulos:** Em cada módulo é calculada a velocidade característica no centro geométrico deste módulo. A seguir, calcula-se a força de arrasto conforme o item 7.7 da NBR 6123 (1998), que estabelece que a carga devida ao vento pode ser obtida por:

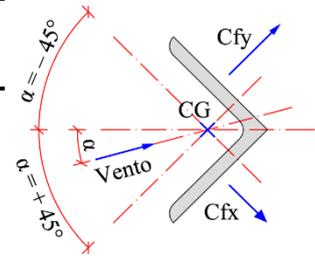
$$F = C_a \cdot q \cdot A_e(z) \quad (5.3)$$

A Figura 9 da norma permite obter o coeficiente de arrasto C_a em função do índice de área exposta ϕ . Este índice consiste na razão entre a área frontal efetiva do reticulado dividida pela área frontal da superfície limitada pelo contorno deste mesmo reticulado.

No caso do presente trabalho foi adotada a primeira metodologia, ou seja, a rotina do código computacional, desenvolvido pelo autor em *MATLAB*, calculou individualmente a ação do vento em cada barra. Atenção especial deve ser dada aos eixos locais de cada elemento, que devem ser coerentes com os eixos dados pela NBR 6123 (1988). Por conta disto, se fez uma extensão da Tabela 12 desta norma, resultando na Tabela 5.1 mostrada a seguir. Neste caso, o sentido positivo do ângulo α é o anti-horário. Para ângulos intermediários, é feita a interpolação entre dois valores.

Tabela 5.1 – Coeficientes de força nas direções x e y.

α	-180°	-135°	-90°	-45°	0	+45°	+90°	+135°	+180°
Cfx	-1,40	+0,30	-1,00	+1,80	+1,80	+2,10	-1,90	-2,00	-1,40
Cfy	-1,40	-2,00	-1,90	+2,10	+1,80	+1,80	-1,00	+0,30	-1,40



(fonte: NBR 6123, 1988)

Em contrapartida, a ação do vento sobre as cadeias de isoladores pode ser tratada de forma simplificada, através da avaliação das cargas considerando esses elementos como barras prismáticas de seção circular. Pode-se utilizar, por exemplo, as recomendações do item 7.3 e da Tabela 13 da NBR 6123 (1988). Neste item é apresentada a fórmula abaixo:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot K \cdot l_{barra} \cdot d_{barra} \quad (5.4)$$

sendo l_{barra} o comprimento da barra prismática, d_{barra} o diâmetro desta barra, e K o fator de redução para barras de comprimento finito, conforme Tabela 11 da NBR 6123 (1988).

Por fim, a força de arrasto em cabos, é dada pela Equação 5.5, extraída da NBR 6123 (1988):

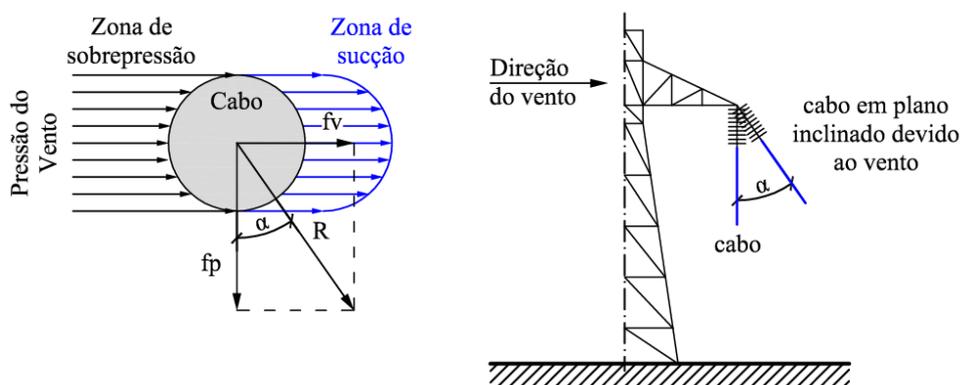
$$F_y = C_a \cdot q \cdot l_{cabo} \cdot d_{cabo} \cdot \sin^2 \alpha \quad (5.5)$$

onde α é o ângulo que o vento forma com o cabo, no plano horizontal, l_{cabo} o comprimento de cabo considerado e d_{cabo} o diâmetro deste mesmo cabo.

Admite-se, em um primeiro momento, que a flecha do cabo, em relação ao seu comprimento, é pequena o suficiente para considerar o vento como uma carga distribuída uniforme sobre o cabo, a uma altura equivalente a cota do centroide da catenária, no plano vertical, que forma o cabo. Cabe salientar que esta informação é importante, pois permite obter a pressão dinâmica do vento, que é função da altura. Além disto, é necessário também estabelecer um limite para a componente horizontal de tração no cabo. O item 5.4.3 da NBR 5422 (1988) recomenda, neste caso de velocidade máxima do vento, que o esforço de tração axial não pode ser superior a 50% da carga nominal de ruptura deles.

Considerando apenas a ação do vento, pode-se observar que o cabo forma também uma catenária no plano horizontal. Porém, como há a componente de peso próprio atuando sobre o elemento, acaba que o cabo forma uma catenária em um plano inclinado. A Figura 5.3 mostra a aplicação da resultante da força do vento f_v e da força peso f_p sobre o cabo. bem como o movimento que é gerado na cadeia de isoladores por conta da combinação destas duas componentes. Nota-se que a direção do plano inclinado da catenária coincide com a resultante de forças R entre f_v e f_p , formando um ângulo α com a vertical.

Figura 5.3 – Efeito da pressão do vento sobre os cabos condutores.



(fonte: adaptado de LABEGALINI et al., 1992)

Para a abordagem de ventos extremos, como tormentas elétricas e tornados, não há uma metodologia totalmente consolidada. Logo, CIGRÉ (2008) investigou métodos aproximados

para considerar estes efeitos, mesmo que de forma conservadora, a fim de que as torres não fiquem subdimensionadas para estes eventos críticos. Desta forma, o relatório técnico resultante propôs um método simplificado denominado de “*wind on all*”, para aplicações tanto em tormentas elétricas como em tornados.

Neste método, a velocidade do vento e sua pressão dinâmica não são corrigidas pela altura, sendo seu fator de resposta de rajada igual a 1,00. A área exposta da torre é obtida pela projeção da área frontal efetiva de todos os elementos em um plano perpendicular à incidência do vento. Além disto, assume-se, de maneira conservadora, que não haverá efeito de proteção de reticulados planos dispostos paralelamente entre si, adotando um coeficiente de arrasto médio igual a 1,60. MENDES (2020), em seu trabalho, também utiliza este método para fazer a análise de sua torre, considerando velocidade de 50 m/s e coeficientes para a hipótese de ventos de alta intensidade. Esta será a metodologia também do presente trabalho.

5.3 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

As combinações de ações podem ser utilizadas para verificações últimas, de esgotamento da capacidade resistente do elemento, ou para verificações de serviço, como vibrações e/ou deslocamentos excessivos, por exemplo. Quando usadas para a avaliação da segurança da estrutura, verificando-a para estados limites últimos, as combinações podem ser normais, especiais (ou de construção), ou excepcionais. No caso de combinações últimas normais se utiliza a Equação 5.6, conforme a NBR 8681 (2003):

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \gamma_{qj} \cdot \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} \quad (5.6)$$

sendo: F_d a ação de projeto, $F_{Gi,k}$ a ação permanente característica, γ_{gi} o coeficiente de ponderação das ações permanentes, $F_{Q1,k}$ a ação variável principal, $F_{Qj,k}$ a ação variável secundária, γ_{qi} o coeficiente de ponderação das ações variáveis e ψ_{0j} o coeficiente de ponderação das ações variáveis secundárias. Cabe ressaltar que o coeficiente ψ_{0j} considera a não simultaneidade das ações variáveis, sendo possível minorar ações variáveis secundárias.

Também são utilizadas, para verificação da resistência última dos elementos da estrutura, as combinações últimas de construção e excepcionais. A primeira pode ser adotada em situações de montagem da torre, por exemplo.

Neste caso o equacionamento se altera para:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_q \cdot \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \right] \quad (5.7)$$

onde $\psi_{0j,ef}$ é o fator de combinação efetivo de cada uma das variáveis que podem agir simultaneamente com a ação variável principal, durante a situação transitória. Ele é igual ao fator ψ_{0j} adotado nas combinações normais, exceto quando a ação variável principal possui um tempo de atuação muito curto, caso em que $\psi_{0j,ef}$ pode ser considerado igual a ψ_{2j} .

A combinação última excepcional, por outro lado, é utilizada em caso de eventos extremos, como tormentas elétricas e sismos. Nesta situação a formulação a ser empregada é:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_q \sum_{j=1}^n \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \quad (5.8)$$

onde $F_{Q,exc}$ é o valor da ação transitória excepcional.

Além destas combinações, são definidas também as combinações de ações de serviço, que podem ser quase permanentes, frequentes ou raras. Elas são utilizadas para a avaliação das condições de desempenho estrutural, sendo normalmente associadas a estados limites de deslocamentos e vibrações excessivas. Por exemplo, a combinação quase permanente pode ser utilizada para verificação do máximo deslocamento horizontal no topo da torre. Desta forma, a intensidade das ações para este tipo de combinação $F_{d,ser}$ é dado pela Equação 5.9, retirada também da NBR 8681 (2003):

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k} \quad (5.9)$$

onde ψ_{2j} é o fator de redução de combinação quase permanente. As combinações frequentes, por outro lado, são usualmente adotadas para verificar a ocorrência de vibrações excessivas. Para isto é definida a Equação 5.10.

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k} \quad (5.10)$$

onde ψ_1 é o fator de redução devido às combinações de serviço. Por fim, as combinações raras, que podem ser usadas para verificações de serviço em eventos extremos, como tormentas elétricas e terremotos por exemplo, são enunciadas por:

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} \cdot F_{Qj,k} \quad (5.11)$$

No contexto do projeto das torres de linhas de transmissão, as combinações de ações se aplicam às seguintes situações:

- a) **Combinações Normais:** verificação da capacidade resistente das peças;
- b) **Combinações Frequentes:** verificação de vibrações;
- c) **Combinações Quase-Permanentes:** verificação de deslocamentos;
- d) **Combinações Raras:** rompimento de cabos, ação de sismos, ventos extremos.

GONTIJO (1994, p. 25) recomenda as seguintes hipóteses básicas de cálculo para linhas de transmissão de energia elétrica:

- a) **Hipótese 1:** Todos os cabos intactos com ventos extremos EPS e/ou TS aplicados em todas as direções relevantes. Na prática, se consideram os ventos a 90° (longitudinal à linha), 45° e 0° (transversal à linha). Todas estas direções são em relação ao eixo da linha de transmissão.
- b) **Hipótese 2:** Ruptura de um cabo para-raios com vento reduzido. Cada combinação corresponde a um dos cabos rompidos.
- c) **Hipótese 3:** Ruptura de um cabo condutor com vento reduzido. Novamente, cada combinação corresponde a um dos cabos rompidos.
- d) **Hipótese 4:** Montagem dos cabos condutores e para-raios. É função da sequência de montagem destes cabos, podendo ser feita verticalmente de cima para baixo ou de forma alternada. Para cada etapa de montagem é criada uma combinação de ações.

Todas as hipóteses são avaliadas para carga vertical máxima e reduzida. Isto deve ser feito, pois se faz a verificação para uma família de torres, exigindo a verificação da carga vertical para vão gravante mínimo (reduzida) e máximo (não reduzida). Como consequência, as fundações podem ser solicitadas por forças de tração. GONTIJO (1994) também salienta que, em regiões onde há formação de gelo, deve-se considerar o aumento da área frontal efetiva do

cabo sob ação do vento, que ocorre devido ao aumento de diâmetro do cabo, ocasionado pela presença da camada de gelo. Por outro lado, para as combinações de ruptura de cabos, devem ser consideradas as ações de vento reduzida.

5.4 VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL

Para a verificação estrutural dos perfis da torre será utilizada a norma ASCE 10 (2015). Apesar do modelo implementado se tratar de um pórtico espacial, as solicitações de momento fletor e cortante são pequenas, se comparadas com as de compressão e tração. Assim sendo, os itens a seguir descrevem as metodologias de verificação da capacidade resistente de perfis adotadas no trabalho.

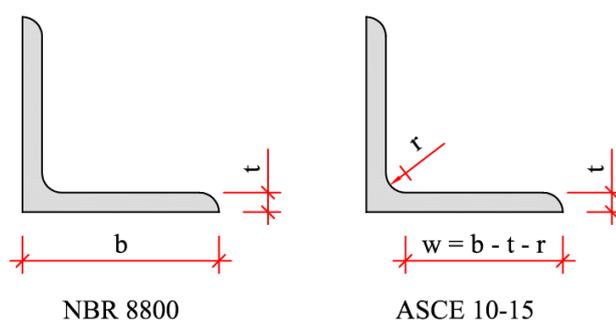
5.4.1 Capacidade Resistente à Compressão de Cantoneiras

O dimensionamento feito com base na ASCE 10 (2015) utiliza como premissas a consideração dos efeitos da flambagem da barra e das chapas que compõem o perfil. Desta forma, a capacidade resistente à compressão $N_{c,Rd}$ é obtida por meio da formulação abaixo:

$$N_{c,Rd} = \frac{f_a \cdot A_g}{\gamma_{a1}} \quad (5.12)$$

onde f_a é a tensão admissível no perfil para o cálculo da resistência à compressão, A_g a área bruta da seção transversal, e γ_{a1} o coeficiente de minoração da resistência do perfil, igual a 1,10. Para obter a tensão admissível, a norma ASCE 10 (2015) utiliza a esbeltez da aba (w/t), onde a largura da aba e a espessura são definidas conforme a Figura 5.4. Cabe salientar que esta definição é diferente daquela adotada pela NBR 8800 que, por conta disto, acaba sendo mais conservadora que a ASCE 10 (2015).

Figura 5.4 – Esbeltez da aba de cantoneiras, conforme a NBR 8800 e a ASCE 10 (2015).



(fonte: autor)

Com a esbeltez da aba é possível calcular a tensão de escoamento crítica f_{cr} , uma vez que esta é função da compacidade do perfil, que pode ser: compacto, semcompacto ou esbelto. Porém, em nenhuma situação a esbeltez pode exceder o valor 25. Dito isto, a tensão de escoamento crítica pode ser obtida por meio da equação a seguir:

$$f_{cr} = \begin{cases} f_y & \text{se } \frac{w}{t} \leq \frac{80\Psi}{\sqrt{f_y}} = \left(\frac{w}{t}\right)_{\text{lim}} \\ \left[1,677 - 0,677 \cdot \frac{w/t}{\left(\frac{w}{t}\right)_{\text{lim}}}\right] f_y & \text{se } \left(\frac{w}{t}\right)_{\text{lim}} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{144\Psi}{\sqrt{f_y}} \\ \frac{0,0332\pi^2 E}{(w/t)^2} & \text{se } \frac{144\Psi}{\sqrt{f_y}} < \frac{w}{t} \leq 25 \end{cases} \quad (5.13)$$

onde f_y é a tensão de escoamento do aço, E o módulo de elasticidade do aço e Ψ é um coeficiente de ajuste de 2,62 para valores de f_y em MPa e 1,00 em ksi. A tensão admissível f_a , por outro lado, é obtida pela seguinte equação:

$$f_a = \begin{cases} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL_r / r_{\min}}{C_c}\right)^2\right] f_{cr} & \text{se } \frac{KL_r}{r_{\min}} \leq C_c \\ \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL_r}{r_{\min}}\right)^2} & \text{se } \frac{KL_r}{r_{\min}} > C_c \end{cases} \quad (5.14)$$

onde L_r é o comprimento destravado, r_{\min} o raio de giração mínimo e C_c é o índice de esbeltez limite entre os regimes elástico e inelástico de flambagem, calculado por:

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{f_y}} \quad (5.15)$$

O coeficiente K , por outro lado, é o coeficiente de comprimento efetivo. Este parâmetro é função da esbeltez da peça e do tipo de vinculação nas extremidades da barra:

- a) **Condição de aplicação das cargas de compressão:** a aplicação pode se dar de forma concêntrica, quando a ligação aparafusada ocorre nas duas abas da cantoneira, e excêntrica, caso esta ligação ocorra em apenas uma aba;

- b) **Condição de contorno nas extremidades da barra:** podem ser restringidas ou livres à rotação (rotuladas). Geralmente, a primeira situação ocorre quando há mais de um parafuso na mesma ligação, enquanto a segunda é mais comum em ligações com apenas um parafuso.

Desta forma, a ASCE 10 (2015) elenca as seguintes possibilidades:

- a) Montantes comprimidos aparafusados em ambas as abas com $L_r / r_{\min} \leq 150$: neste caso consideram-se forças concêntricas em ambas as extremidades.



$$K = 1,0 \quad (5.16)$$

- b) Barras comprimidas com $L_r / r_{\min} \leq 120$: a tensão depende da excentricidade da força na ligação, ou seja, se a ação está centrada (concêntrica) ou não (excêntrica):

- Barras com forças concêntricas em ambas as extremidades:



$$K = 1,0 \quad (5.17)$$

- Barras com força concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra:



$$K = 0,75 + \frac{30}{L_r / r_{\min}} \geq 1,0 \quad (5.18)$$

- Barras com forças excêntricas em ambas as extremidades:



$$K = 0,50 + \frac{60}{L_r / r_{\min}} \geq 1,0 \quad (5.19)$$

c) Barras comprimidas com $L_r / r_{\min} > 120$: a tensão depende da restrição à rotação nas extremidades da barra, ou seja, se a barra se encontra restringida (mais de um parafuso na ligação) ou não (apenas um parafuso na ligação):

- Barras com um parafuso em ambas as extremidades:



$$K = 1,0 \quad (5.20)$$

- Barras com dois ou mais parafusos em uma das extremidades:



$$0,89 \leq K = 0,762 + \frac{28,6}{L_r / r_{\min}} \leq 1,0 \quad (5.21)$$

- Barras com dois ou mais parafusos em ambas as extremidades:



$$0,80 \leq K = 0,615 + \frac{46,2}{L_r / r_{\min}} \leq 1,0 \quad (5.22)$$

5.4.2 Capacidade Resistente à Tração de Cantoneiras

A obtenção da resistência de cantoneiras à tração $N_{t,Rd}$ é feita utilizando o estado limite de ruptura da seção líquida, representada pela Eq. 5.23.

$$N_{t,Rd} = \frac{f_t \cdot A_n}{\gamma_{a1}} \quad (5.23)$$

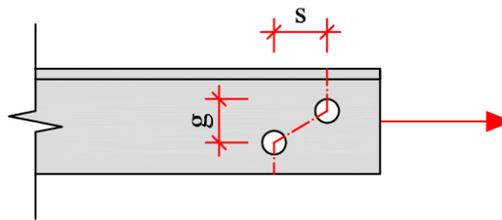
onde f_t é a tensão limite à tração, sendo igual a tensão de escoamento f_y em barras tracionadas com carregamento concêntrico e igual a $0,90f_y$ em barras com carregamento excêntrico e A_n a área líquida da seção transversal do perfil.

A área líquida A_n é calculada conforme a Equação 5.24.

$$A_n = A_g - n \cdot d_f \cdot t + t \cdot \sum \frac{s^2}{4g} \quad (5.24)$$

sendo A_g a área bruta da seção transversal do perfil cantoneira, n número de furos e d_f o diâmetro efetivo do furo, igual ao diâmetro do parafuso acrescido em 1,6 mm, conforme recomenda o item 3.10.1 da norma técnica ASCE 10 (2015). As grandezas s e g são, respectivamente, a distância entre furos nas direções paralela e perpendicular à força de tração, conforme a Figura 5.5.

Figura 5.5 – Distância entre furos em cantoneiras tracionadas.



(fonte: ASCE, 2015)

6 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Nos próximos itens deste capítulo são apresentados os principais conceitos de otimização estrutural e algoritmos metaheurísticos envolvidos no trabalho. São abordados desde a formulação do problema de otimização estrutural até a descrição e equacionamento dos algoritmos metaheurísticos. Também é mostrado, de maneira sintética, como realizar a integração de algoritmos de análise estrutural a um processo de otimização.

6.1 CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

RAO (2009) define otimização como o processo de encontrar as condições que fornecem o mínimo (ou o máximo) valor de uma função. Na Engenharia é muito comum a necessidade de se buscar a otimização de sistemas e componentes, visto que os recursos disponíveis para se resolver os problemas são limitados.

Assim sendo, a formulação básica de um problema de otimização envolve primeiramente a definição de uma função objetivo a ser minimizada $f(\mathbf{x})$, sujeita a nenhuma, uma, ou mais restrições que esta função objetivo precisa atender para que o seu resultado seja considerado viável. Tal função objetivo costuma representar o volume de materiais componentes da estrutura, um preço associado a eles ou dimensões de elementos estruturais. Além disto, para a modelagem adequada do problema se faz necessário definir também as variáveis de projeto, alocadas, por exemplo, em um vetor \mathbf{x} de n componentes.

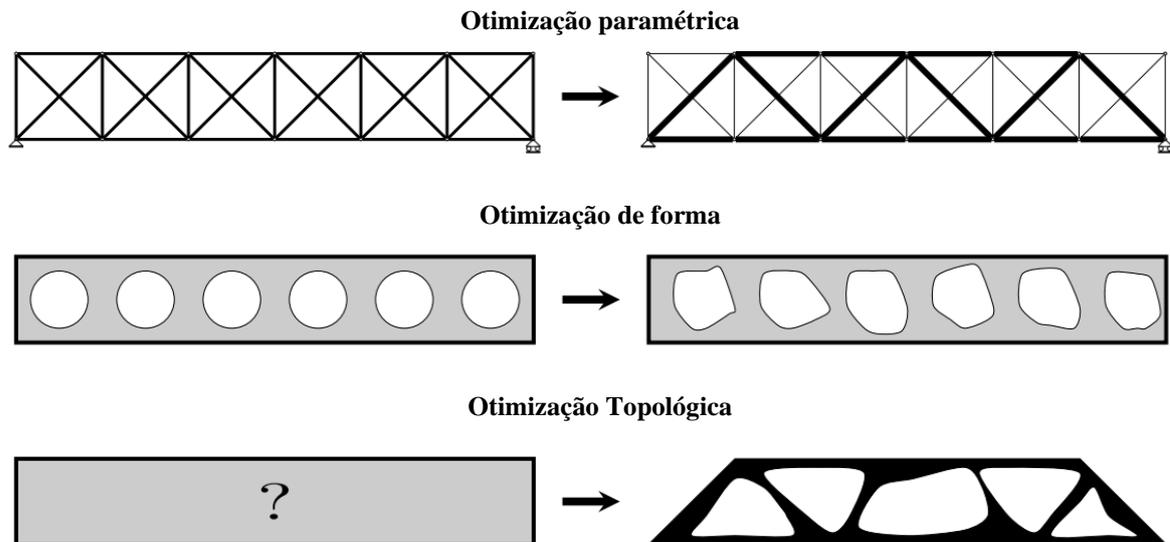
Para sistematizar os processos, os problemas de otimização são definidos em um formato padrão. RAO (2009) mostra que este padrão é enunciado por:

$$\begin{aligned} &\text{encontre } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ que minimiza } f(\mathbf{x}) \\ &\text{sujeita às restrições } \begin{cases} g_j(\mathbf{x}) \leq 0 & (j = 1, 2, \dots, J) \\ h_k(\mathbf{x}) = 0 & (k = 1, 2, \dots, K) \end{cases} \end{aligned} \quad (6.1)$$

onde \mathbf{x} é o vetor que contém as variáveis de projeto, $g_j(\mathbf{x})$ corresponde às restrições de desigualdade, enquanto $h_k(\mathbf{x})$ são restrições de igualdade. As restrições podem ser de vários tipos, dentre estes podem-se citar: restrições físicas, tecnológicas, econômicas ou geométricas.

Basicamente há 3 tipos de otimização estrutural (ARORA, 2017), como mostra a Figura 6.1.

Figura 6.1 – Tipos de otimização estrutural.



(fonte: adaptado de ISSA, 2019)

- a) **Otimização paramétrica:** visa otimizar dimensões específicas, como a área da seção transversal e/ou medidas internas de componentes estruturais. Por exemplo, pode-se encontrar as dimensões das seções transversais dos elementos que compõem a estrutura que minimizem seu custo de fabricação.
- b) **Otimização de forma ou geometria:** visa encontrar a geometria que permita a estrutura resistir aos esforços e ao mesmo tempo ser econômica, a partir de condições de contorno predeterminadas. No caso de pórticos planos ou espaciais, busca-se a posição ótima dos nós, permitindo que a estrutura mude de forma sem mudar a conectividade dos elementos.
- c) **Otimização topológica:** neste tipo pode-se modificar o padrão de conectividade e a quantidade de elementos ou membros da estrutura. Isto é feito com a retirada de material, o que altera sua topologia, minimizando peso e custos de produção com a estrutura.

6.2 ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS

Algoritmos metaheurísticos são métodos de busca direta que se baseiam em conceitos estocásticos para buscar a solução ótima. Estes algoritmos são aplicáveis aos mais variados tipos de problemas, desde o ramo de ciências sociais até problemas da Engenharia Estrutural.

Dentro da classe de métodos metaheurísticos se encontram os algoritmos evolutivos. Estes métodos aplicam técnicas que simulam processos de evolução biológica em uma população com indivíduos que representam as soluções testadas para o problema de otimização. Dentre estes processos citam-se, como exemplo: seleção natural, mutação e recombinação.

Os algoritmos metaheurísticos tem a vantagem de não exigir continuidade ou diferenciabilidade nas funções envolvidas no problema, como nos métodos de otimização baseados em gradientes de funções, por exemplo. A única exigência é que seja possível avaliar estas funções dentro das faixas de validade das variáveis de projeto (ARORA, 2017).

Para o presente trabalho foram utilizados quatro algoritmos metaheurísticos: *Differential Evolution* (DE) ou Evolução Diferencial; *Particle Swarm Optimization* (PSO), ou Enxame de Partículas; seu variante, o *Quantum Particle Swarm Optimization* (QPSO); e, por fim, o algoritmo *Generalized Normal Distribution Optimization* (GNDO).

6.2.1 *Differential Evolution* (DE)

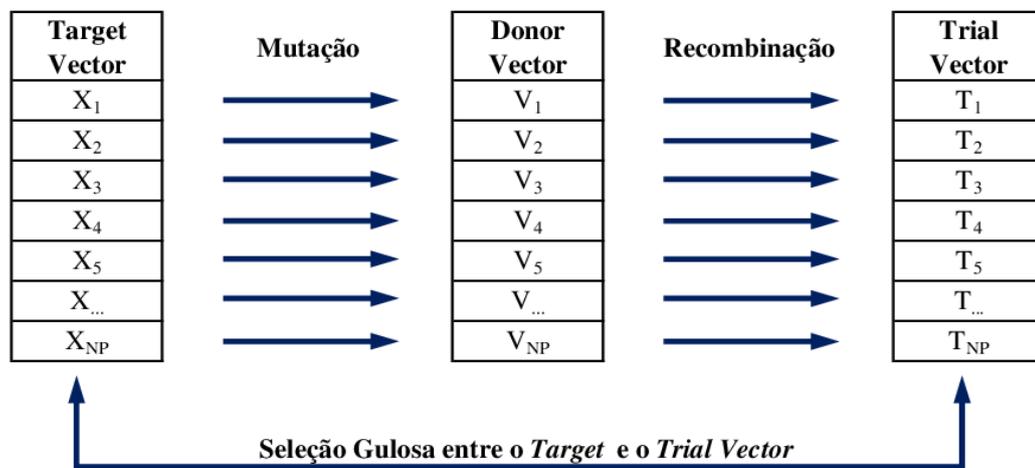
É um método de busca paralela direta que utiliza vetores de parâmetros $N_p \times D$ dimensionais numa população de soluções candidatas em uma dada geração G (PRICE e STORN, 1997). Nesta definição, N_p corresponde ao número de indivíduos (ou vetores) da população inicial. Cada um destes indivíduos possui D componentes, ou variáveis de projeto. Assim sendo, são descritas a seguir as principais etapas do algoritmo DE:

- a) **Geração da população inicial:** gerado aleatoriamente de forma a cobrir todo o espaço de busca. Na falta de definição acerca deste espaço, ou seja, regiões com grande probabilidade de abranger a solução ótima, utiliza-se uma distribuição uniforme para a população inicial;
- b) **Mutação:** por meio da soma de um vetor com a diferença ponderada de dois vetores distintos, escolhidos de forma aleatória, seguindo uma distribuição de probabilidades uniforme. O resultado deste processo são vetores chamados de *donor vectors*;
- c) **Crossover ou recombinação:** as componentes do *donor vector* são recombinadas com um quarto vetor, chamado de *target vector*, o qual não fez parte do processo de mutação. O resultado deste processo é um novo vetor, chamado de *trial vector*, que fará parte do processo de seleção.

- d) **Seleção gulosa:** é feita uma comparação direta entre o *trial vector* (gerado pelo processo de mutação e recombinação) e o *target vector*. O indivíduo que possuir o menor valor na função objetivo (ou *fitness function*) será mantido, enquanto o outro é descartado. Este tipo de seleção mantém o número de indivíduos da população N_p constante, em cada geração.

A Figura 6.2 ilustra o processo evolucionário do algoritmo DE. Neste diagrama são mostradas as componentes de cada um dos vetores envolvidos no processo.

Figura 6.2 – Processo evolucionário do algoritmo DE.



(fonte: autor)

Antes de gerar a população inicial devem ser estabelecidos os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto. Desta forma, define-se um vetor que contém os limites inferiores das variáveis de projeto \mathbf{x}_L e um que contém os limites superiores \mathbf{x}_U . Assim sendo, o i -ésimo indivíduo $\mathbf{x}^{(i,G)}$ da população inicial ($G=0$) é obtido por:

$$\mathbf{x}^{(i,0)} = \mathbf{x}_L + \mathbf{r}_i (\mathbf{x}_U - \mathbf{x}_L) \quad (6.2)$$

ou seja, a j -ésima componente do i -ésimo vetor \mathbf{x} da população inicial é obtida por:

$$x_j^{(i,0)} = x_{j,L} + r_{ij} (x_{j,U} - x_{j,L}) \quad (6.3)$$

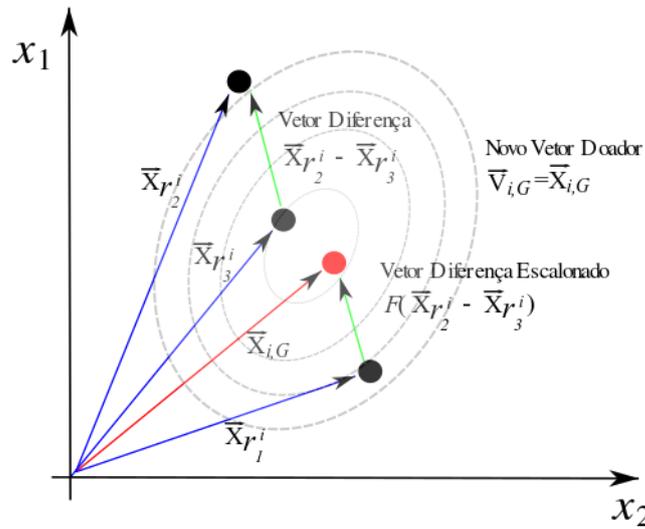
onde r_{ij} é um número aleatório entre 0 e 1, gerado para cada componente de cada vetor.

Na sequência, o processo de mutação é feito através da Equação 6.4.

$$\mathbf{V}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{r1,G} + F (\mathbf{x}_{r3,G} - \mathbf{x}_{r2,G}) \quad (6.4)$$

sendo F um fator de escala, sendo geralmente um número entre 0,50 e 1,00, utilizado para controlar o ritmo da evolução. Os vetores $\mathbf{x}_{r1,G}$, $\mathbf{x}_{r2,G}$ e $\mathbf{x}_{r3,G}$ são escolhidos de forma aleatória dentro do conjunto de indivíduos presentes no intervalo $[1, N_p]$, sendo mutuamente distintos entre si. Note que, como consequência disto, a população inicial deve ter um mínimo de 4 indivíduos, para que seja possível a mutação. Este processo está ilustrado, no plano bidimensional, na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Ilustração do processo de mutação em um espaço 2D paramétrico.



(fonte: DAS e SUGANTHAN, 2011)

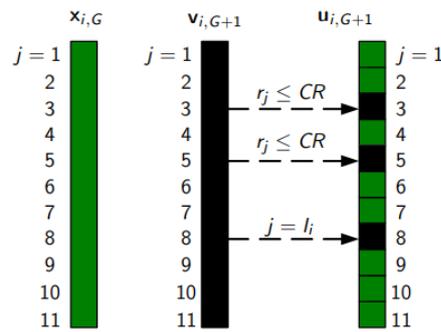
A etapa seguinte de recombinação é inserida de modo a gerar maior diversidade entre os indivíduos de uma população. Isto é feito através de uma troca de atributos entre os vetores que sofreram mutação e os demais membros da população, formando os *trial vectors*. As componentes destes novos vetores, denominados de $u_{ij,G+1}$, são obtidos da seguinte maneira:

$$u_{ij,G+1} = \begin{cases} v_{ij,G+1} & \text{se } r_j \leq CR \text{ ou } j = I_i \\ x_{ij,G} & \text{se } r_j > CR \text{ e } j \neq I_i \end{cases}, \quad j = 1, \dots, D \quad (6.5)$$

sendo: $v_{ij,G+1}$ as componentes do vetor mutante, $x_{ij,G}$ as componentes do vetor da geração atual (sem mutação), r_j um número aleatório gerado com distribuição uniforme (entre 0 e 1), I_i um índice aleatoriamente escolhido entre 1 e D e CR a constante de *crossover*, sendo um valor entre 0 e 1 definido pelo usuário. O índice I_i garante que o *trial vector* recebe pelo menos uma componente do vetor mutante.

Dito isto, este processo de *crossover* é ilustrado na Figura 6.4.

Figura 6.4 – Processo de recombinação de vetores.



(adaptado de PRICE et al., 2005)

Após as etapas de mutação e recombinação, onde todos os N_p vetores serviram como *target vectors*, é dada sequência a etapa de seleção. Nesta fase, utiliza-se um critério guloso para selecionar os vetores que serão preservados para a próxima geração. Este critério se baseia no fato de que é escolhida a alternativa que *parece* mais promissora naquele instante, nunca reconsiderando esta decisão. Assim, avalia-se tanto o *target vector* como o *trial vector*, ambos da geração atual, na função objetivo. O que resultar em maior valor é removido, de forma a manter o tamanho da população constante. Assim, pode-se sintetizar o raciocínio anterior através da relação abaixo:

$$\mathbf{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,G+1} & \text{se } f(\mathbf{u}_{i,G+1}) \leq f(\mathbf{x}_{i,G}) \\ \mathbf{x}_{i,G} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.6)$$

A condição de término do algoritmo pode ser definida pelo critério do número máximo de iterações ou quando o vetor de variáveis de projeto da solução ótima não se modifica após sucessivas gerações. Para utilizar a segunda alternativa se compara a melhor solução da geração atual com a melhor solução da geração anterior. A relação entre ambas deve atender a uma tolerância mínima para cessar o processamento do algoritmo.

Uma das desvantagens do método é a sua forte dependência dos parâmetros F , CR e N_p . Algoritmos mais recentes baseados em DE incluem algoritmos que fazem adaptações nestes parâmetros, como SHADE e suas variantes, por exemplo (RENKAVIESKI e PARPINELLI, 2020). PRICE et al. (2005) recomendam os seguintes valores: F pode estar entre 0,50 e 1,00; CR entre 0,80 e 1,00; e N_p entre 5D e 10D, sendo D a quantidade de variáveis de projeto.

Por fim, cabe salientar que o esquema do algoritmo DE explicado aqui não é o único, porém é o mais adotado na prática. PRICE et al. (2005) propõem variantes deste algoritmo, a fim de possibilitar a adequação a outros tipos de problemas. Para isto, na intenção de classificar estas

variantes, se propõe a nomenclatura $DE/x/y/z$, onde: x especifica o vetor a ser mutado, podendo ser *rand* (um vetor aleatório dentro da população) ou *best* (o vetor com o menor valor da função objetivo, dentro de uma mesma população); y se refere a quantidade de vetores diferença implementado; e z diz respeito ao esquema de recombinação adotado, que pode ser *bin* (binomial) ou *exp* (exponencial). Por exemplo, o Quadro 6.1 mostra possíveis variações do algoritmo e o tamanho mínimo da população para ser possível usá-lo.

Quadro 6.1 – Variações possíveis para o algoritmo DE.

Variante	Expressão para o Donor Vector	Tamanho mínimo da população
DE/rand/1/bin	$\mathbf{V}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{r1,G} + F(\mathbf{x}_{r3,G} - \mathbf{x}_{r2,G})$	4
DE/best/1/bin	$\mathbf{V}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{best,G} + F(\mathbf{x}_{r3,G} - \mathbf{x}_{r2,G})$	3
DE/rand/2/bin	$\mathbf{V}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{r1,G} + F(\mathbf{x}_{r3,G} - \mathbf{x}_{r2,G}) + F(\mathbf{x}_{r4,G} - \mathbf{x}_{r5,G})$	6
DE/best/2/bin	$\mathbf{V}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{best,G} + F(\mathbf{x}_{r3,G} - \mathbf{x}_{r2,G}) + F(\mathbf{x}_{r4,G} - \mathbf{x}_{r5,G})$	5

(fonte: PRICE et al., 2005)

O esquema adotado para este trabalho será o $DE/rand/1/bin$. Ou seja, o vetor a ser mutado é aleatoriamente escolhido na população, utilizando apenas um vetor diferença e o esquema de recombinação é binomial.

6.2.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

Também chamado de Otimização por Enxame de Partículas, este algoritmo se baseia em duas metodologias principais. A primeira consiste essencialmente na teoria de enxames, que estuda o comportamento de indivíduos em grandes grupos, como cardume de peixes, bando de pássaros, enxame de abelhas, entre outros agrupamentos. A segunda metodologia se refere a algoritmos genéticos e computação evolucionária. O PSO faz a relação entre estes dois métodos (KENNEDY e EBERHART, 1995).

Na abordagem clássica do algoritmo PSO cada partícula é descrita por sua velocidade e posição. A mudança de cada componente destas grandezas, em cada iteração $n+1$, pode ser feita por meio das equações mostradas em 6.7.

$$\begin{cases} v_{i,n+1}^j = v_{i,n}^j + c_1 r_{i,n}^j (P_{i,n}^j - x_{i,n}^j) + c_2 R_{i,n}^j (G_n^j - x_{i,n}^j) \\ x_{i,n+1}^j = x_{i,n}^j + v_{i,n+1}^j \end{cases} \quad (6.7)$$

onde: x_i^j é a componente j da posição da partícula i , v_i^j a componente j da velocidade da partícula i , $P_{i,n}^j$ a componente j da melhor posição que a partícula i obteve, ao longo de sua trajetória, G^j a componente j da melhor posição obtida entre todas as partículas (melhor global), c_1 a constante cognitiva relacionada ao comportamento de cada partícula, quando esta compara a sua posição anterior com a melhor posição que ela obteve ao longo do processo, c_2 a constante social, compara a posição da partícula no instante anterior com a melhor de todas as posições, de todas as partículas, ao longo de cada uma de suas respectivas trajetórias, $r_{i,n}^j$ e $R_{i,n}^j$ são duas sequências de números aleatórios distribuídos uniformemente entre 0 e 1. Aqui assume-se que há N_p partículas no processo ($1 \leq i \leq N_p$) e cada partícula possui D variáveis de projeto ($1 \leq j \leq D$).

Logo, o procedimento para este algoritmo segue as seguintes etapas:

- a) Geração da população inicial e das velocidades iniciais;
- b) Determinação de $P_{i,n}^j$ e G^j ;
- c) Cálculo da função objetivo (aptidão) de cada partícula;
- d) Cálculo das velocidades;
- e) Atualização das velocidades;
- f) Reinicialização da população.

EBERHART e SHI (1998) propuseram uma modificação no algoritmo, incluindo o coeficiente inercial ω , que determina o quanto a velocidade anterior da partícula é preservada. Desta forma, tal coeficiente assume o papel de realizar o balanço entre a busca global e local. Com isto, a Equação 6.7 é modificada para a Equação 6.8.

$$\begin{cases} v_{i,n+1}^j = \omega v_{i,n}^j + c_1 r_{i,n}^j (P_{i,n}^j - x_{i,n}^j) + c_2 R_{i,n}^j (G_n^j - x_{i,n}^j) \\ x_{i,n+1}^j = x_{i,n}^j + v_{i,n+1}^j \end{cases} \quad (6.8)$$

Conforme observado pelo mesmo autor, para valores do coeficiente inercial entre 0,90 e 1,20, a performance do algoritmo é melhorada. Logo, esta formulação foi a utilizada no trabalho.

6.2.3 Generalized Normal Distribution Optimization (GNDO)

ZHANG et al. (2020) explicam que este algoritmo é inspirado na distribuição normal gaussiana generalizada. Esta é usada para descrever diversos fenômenos da natureza. Assim, dada uma variável normal aleatória X com média μ e desvio padrão σ , pode-se expressar a distribuição de probabilidades como sendo:

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6.9)$$

O processo de busca em algoritmos de otimização baseado em populações de indivíduos segue basicamente três estágios:

- a) Inicialização da população e distribuição desta no espaço de busca;
- b) Todos os indivíduos desta população se movem em direção ao ótimo global, através de estratégias de exploração local e global;
- c) Todos os indivíduos são reunidos em torno da melhor solução obtida.

Todo este processo de busca pode ser descrito por múltiplas variáveis normais aleatórias. Ou seja, as posições que cada indivíduo ocupa, no espaço de busca, podem ser descritas como variáveis aleatórias sujeitas a uma distribuição normal.

Primeiramente se faz a inicialização da população através da maneira convencional. Ou seja, se gera, de maneira aleatória, uma população de indivíduos que atendam aos limites, tanto inferiores como superiores, através da Eq. 6.10, onde $t = 0$:

$$\mathbf{x}_i^t = \mathbf{l}_b + (\mathbf{u}_b - \mathbf{l}_b) \cdot \lambda_5 \text{ com } j = 1, 2, \dots, D \text{ e } i = 1, 2, \dots, N_p \quad (6.10)$$

onde \mathbf{x}_i^t é a solução atual, \mathbf{l}_b é o vetor com os limites inferiores das variáveis de projeto, \mathbf{u}_b o vetor com os limites superiores e λ_5 um número aleatório com valores de 0 a 1 e D .

A exploração local de ótimos é feita baseada na relação entre a distribuição dos indivíduos e um modelo generalizado de distribuição normal, construído através da Eq. 6.11.

$$\mathbf{v}_i^t = \boldsymbol{\mu}_i + \boldsymbol{\delta}_i \cdot \eta \text{ com } i = 1, 2, \dots, N_p \quad (6.11)$$

onde \mathbf{v}_i^t é o vetor teste do i -ésimo indivíduo no instante t , η um fator de penalidade, $\boldsymbol{\mu}_i$ e $\boldsymbol{\delta}_i$ são, respectivamente, a média generalizada e o desvio padrão generalizado da posição do i -ésimo indivíduo. Estas três últimas grandezas podem ser calculadas pelas equações a seguir:

$$\boldsymbol{\mu}_i = \frac{(\mathbf{x}_i^t + \mathbf{x}_{best}^t + \mathbf{M})}{3} \quad (6.12)$$

$$\boldsymbol{\delta}_i = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(\mathbf{x}_i^t - \boldsymbol{\mu})^2 + (\mathbf{x}_{best}^t - \boldsymbol{\mu})^2 + (\mathbf{M} - \boldsymbol{\mu})^2 \right]} \quad (6.13)$$

$$\eta = \begin{cases} \sqrt{-\log(\lambda_1)} \cdot \cos(2\pi\lambda_2), & \text{se } a \leq b \\ \sqrt{-\log(\lambda_1)} \cdot \cos(2\pi\lambda_2 + \pi), & \text{se } a > b \end{cases} \quad (6.14)$$

onde a , b , λ_1 e λ_2 são números aleatórios entre 0 e 1, \mathbf{x}_{best}^t é a melhor posição atual e \mathbf{M} é a posição média da população atual, calculada por meio da expressão a seguir:

$$\mathbf{M} = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i^t}{N} \quad (6.15)$$

Obtidas estas grandezas, se faz a seleção gulosa entre \mathbf{v}_i^t e \mathbf{x}_i^t por meio da Eq. 6.16.

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{v}_i^t, & \text{se } f(\mathbf{v}_i^t) < f(\mathbf{x}_i^t) \\ \mathbf{x}_i^t, & \text{se } f(\mathbf{v}_i^t) \geq f(\mathbf{x}_i^t) \end{cases} \quad (6.16)$$

A exploração global, por outro lado, possui o objetivo de encontrar regiões promissoras para a solução do problema. Isto é feito selecionando, de forma aleatória, três indivíduos da população. A partir desta escolha é aplicada a equação abaixo:

$$\mathbf{v}_i^t = \underbrace{\mathbf{x}_i^t + \beta \cdot |\lambda_3| \cdot \mathbf{v}_1}_{\text{compartilha dados locais}} + \underbrace{(1-\beta) \cdot |\lambda_4| \cdot \mathbf{v}_2}_{\text{compartilha dados globais}} \quad (6.17)$$

onde λ_3 e λ_4 são dois números aleatórios sujeitos à distribuição normal, β o parâmetro de ajuste, sendo um valor aleatório entre 0 e 1, \mathbf{v}_1 e \mathbf{v}_2 são dois vetores teste. O vetor \mathbf{v}_1 é obtido pela diferença abaixo:

$$\mathbf{v}_1 = \begin{cases} \mathbf{x}_i^t - \mathbf{x}_{p1}^t, & \text{se } f(\mathbf{x}_i^t) < f(\mathbf{x}_{p1}^t) \\ \mathbf{x}_{p1}^t - \mathbf{x}_i^t, & \text{se } f(\mathbf{x}_i^t) \geq f(\mathbf{x}_{p1}^t) \end{cases} \quad (6.18)$$

enquanto \mathbf{v}_2 é calculado pela diferença mostrada na Equação 6.19.

$$\mathbf{v}_2 = \begin{cases} \mathbf{x}_{p2}^t - \mathbf{x}_{p3}^t, & \text{se } f(\mathbf{x}_{p2}^t) < f(\mathbf{x}_{p3}^t) \\ \mathbf{x}_{p3}^t - \mathbf{x}_{p2}^t, & \text{se } f(\mathbf{x}_{p2}^t) \geq f(\mathbf{x}_{p3}^t) \end{cases} \quad (6.19)$$

Aqui, os índices $p1$, $p2$ e $p3$ são três números inteiros gerados de forma aleatória entre 1 e N_p , satisfazendo $p1 \neq p2 \neq p3 \neq i$. Feita esta etapa, seleciona-se o melhor indivíduo novamente por seleção gulosa conforme Eq. 6.16, iniciando uma nova iteração após este processo.

6.2.4 Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO)

O QPSO introduz conceitos da Mecânica Quântica no algoritmo de PSO (*Particle Swarm Optimization*). Ou seja, do ponto de vista mecânico, parte-se da ideia de que a partícula no espaço possui comportamento quântico. Se trata de uma variante do PSO, que busca reduzir as desvantagens deste, mantendo as suas vantagens e aumentando, portanto, sua performance.

Neste modelo quântico do PSO, ao invés da posição e velocidade, o estado da partícula é descrito pela função de onda $\Psi(x, t)$. No espaço 3D, esta função satisfaz a igualdade abaixo:

$$|\Psi(x, t)|^2 dx dy dz = Q dx dy dz \quad (6.20)$$

onde o termo à direita $Q dx dy dz$ corresponde à probabilidade de a partícula aparecer em um volume infinitesimal em torno do ponto (x, y, z) . Ou seja, a equação anterior representa uma função densidade de probabilidade, satisfazendo a condição de normalização:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x, t)|^2 dx dy dz = \int_{-\infty}^{+\infty} Q dx dy dz = 1 \quad (6.21)$$

Neste contexto quântico, o valor exato da posição e velocidade não podem ser determinados de maneira simultânea. Assim sendo, SUN et al. (2012) desenvolvem uma formulação para que a função de onda, no algoritmo QPSO, dependa apenas da posição, removendo a sua dependência com o tempo. Logo, utilizando simulação de Monte Carlo, é possível obter a equação evolucionária estocástica, que descreve a posição da partícula no QPSO:

$$x_{i,n+1}^j = p_{i,n}^j \pm \frac{L}{2} \cdot \ln\left(\frac{1}{u_{i,n+1}^j}\right) \quad (6.22)$$

onde $p_{i,n}^j$ é a posição do atrator local da j -ésima componente da i -ésima partícula, na n -ésima iteração e $u_{i,n+1}^j$ é uma sequência de números gerados de forma aleatória e uniformemente distribuídos em $(0,1)$. A posição deste atrator local $p_{i,n}^j$ é obtida com uma combinação linear entre a melhor posição atingida pela partícula $P_{i,n}^j$, ou ótimo local, e a melhor posição atingida pela experiência da população $G_{i,n}^j$, ou ótimo global:

$$p_{i,n}^j = \varphi_{i,n}^j P_{i,n}^j + (1 - \varphi_{i,n}^j) G_{i,n}^j \quad (6.23)$$

onde $\varphi_{i,n}^j$ é um valor aleatório uniformemente distribuídos entre 0 e 1. O valor de L da Equação 6.24 é obtido com base na posição atual da partícula e na melhor posição que esta obteve ao longo do processo de otimização (seu atrator local):

$$L = 2\alpha_n |x_{i,n}^j - p_{i,n}^j| \quad (6.24)$$

Substituindo esta equação na Equação 6.22 anterior chega-se a:

$$x_{i,n+1}^j = p_{i,n}^j \pm \alpha_n |x_{i,n}^j - p_{i,n}^j| \ln\left(\frac{1}{u_{i,n+1}^j}\right) \quad (6.25)$$

onde o coeficiente α_n é um número real positivo, denominado de coeficiente de expansão ou contração. Este é o único parâmetro do algoritmo QPSO e o mais importante, pois determina a dinâmica das partículas, bem como sua convergência. SUN et al. (2012) sugerem que as partículas convergem para $\alpha_n < 1,775$ e divergem quando $\alpha_n > 1,785$. Dito isto, há duas formas de seleção deste parâmetro: fixando um valor em α_n , válido para todas as iterações, e diminuindo seu valor linearmente ao longo da n -ésima iteração, conforme a Equação 6.26:

$$\alpha_n = \frac{(\alpha_{final} - \alpha_{inicial}) \cdot n}{T} + \alpha_{inicial} \quad (6.26)$$

sendo α_n o coeficiente na n -ésima iteração, decrescendo linearmente de um valor inicial $\alpha_{inicial}$, atingindo um valor final α_{final} ao completar as T iterações. Este é o método que foi adotado no presente trabalho. Além disto, SUN et al. (2012), a fim de evitar a convergência prematura do algoritmo, incorporaram ao método a média das melhores posições locais, obtidas individualmente por cada partícula. Esta é enunciada por:

$$C_n^j = \left(\frac{1}{M} \right) \sum_{i=1}^M P_{i,n}^j, \quad (1 \leq j \leq N) \quad (6.27)$$

Desta forma, a Equação 6.25 se altera para:

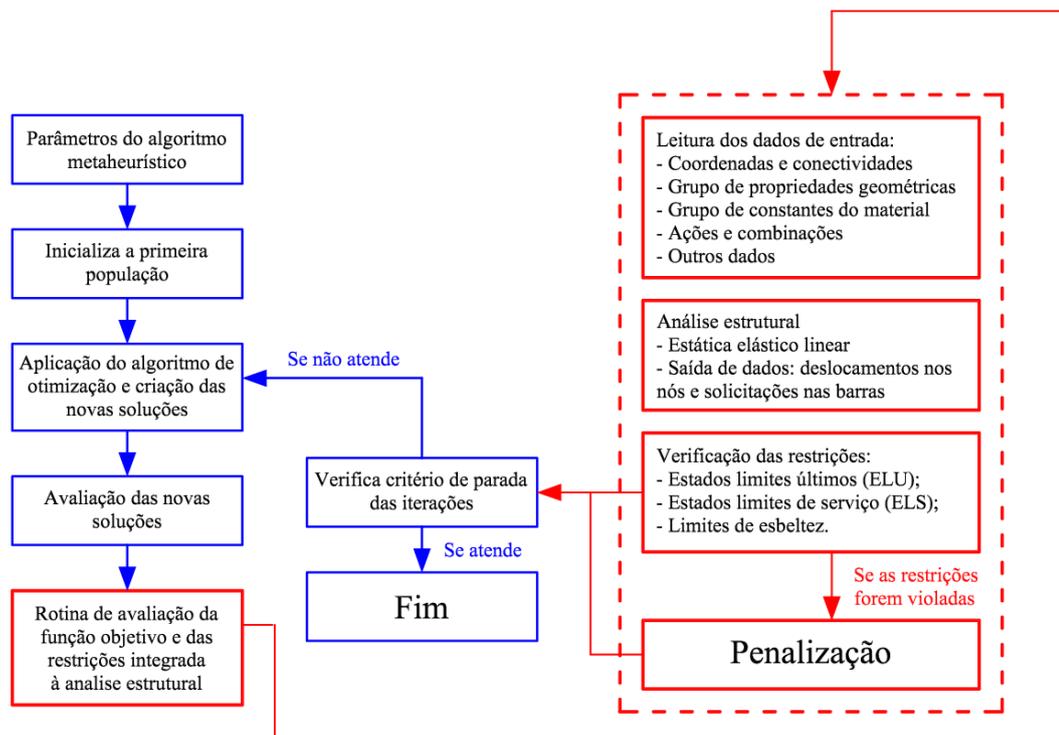
$$x_{i,n+1}^j = p_{i,n}^j \pm \alpha_n |x_{i,n}^j - C_n^j| \ln \left(\frac{1}{u_{i,n+1}^j} \right) \quad (6.28)$$

Percebe-se que o procedimento do QPSO é similar ao PSO, apenas utilizando equações evolucionárias distintas. No QPSO não há um vetor velocidade definido para a partícula, porém a sua posição é atualizada de acordo com a Equação 6.28.

6.3 INTEGRAÇÃO DA ANÁLISE ESTRUTURAL COM O ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

A análise estrutural foi incluída como uma sub-rotina do programa que calcula a função objetivo. Isto foi feito para que seja possível inserir este algoritmo no programa principal, sendo este utilizado para selecionar o algoritmo metaheurístico a ser processado. Desta forma, o fluxograma geral do código é o apresentado na Figura 6.5.

Figura 6.5 – Fluxograma do programa de otimização



(fonte: própria do autor)

O processo de avaliação da função objetivo é composto pelas seguintes etapas:

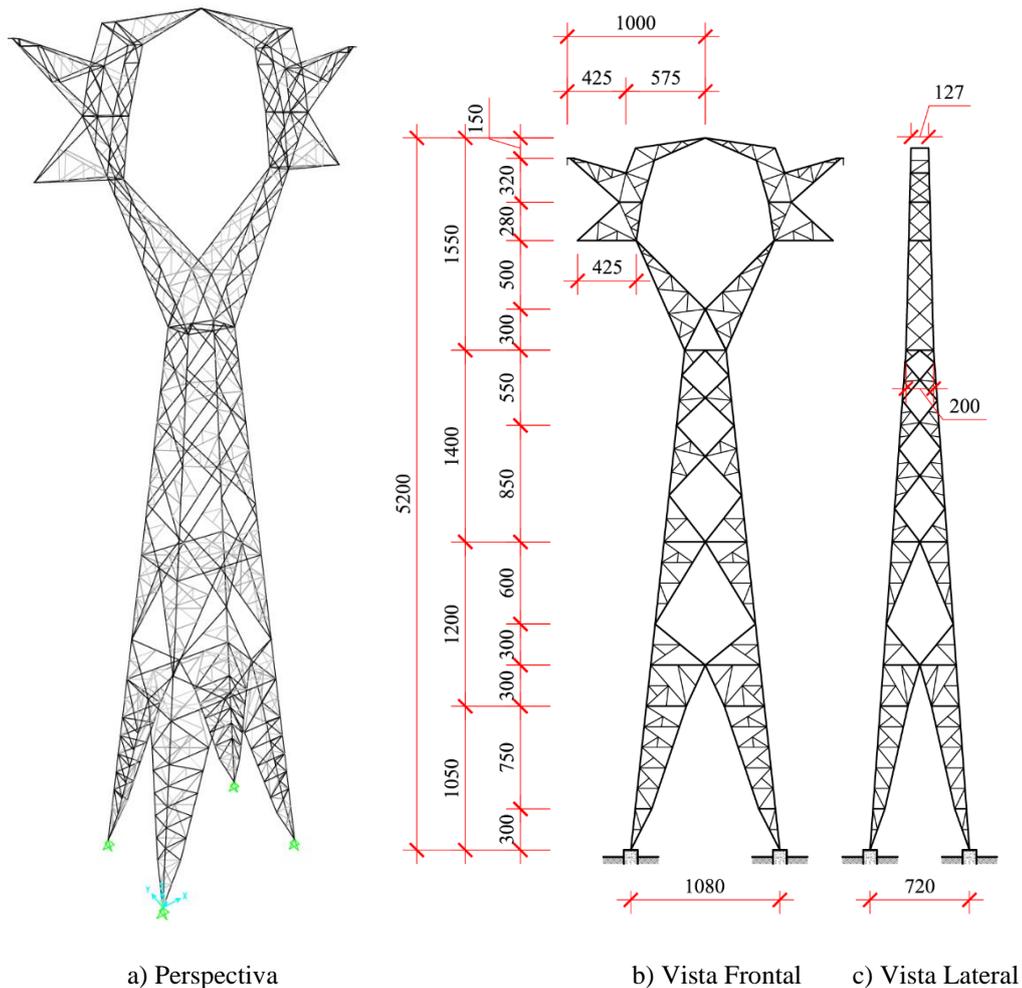
- a) **Entrada de dados:** inserção dos dados de entrada, incluindo: dados do vento (velocidade básica, coeficientes), dos cabos (posição dos nós, diâmetro, vão gravante, peso linear, cargas de ruptura), dos isoladores (posição dos nós, diâmetro, comprimento, peso específico), coordenadas dos nós, conectividades das barras, propriedades geométricas, constantes do material, lista de ações e combinações.
- b) **Análise estrutural elástica linear do modelo de pórtico espacial:** composto pelas seguintes etapas: obtenção do vetor de forças devido a cada uma das ações implementadas no algoritmo, montagem da matriz de rigidez, solução do sistema de equações resultante (gerando deslocamentos e esforços solicitantes para cada ação), e a combinação destes resultados, conforme lista de combinações de ações inserida na entrada de dados.
- c) **Verificação das restrições:** em caso de violação das restrições é aplicado um fator de penalidade na função objetivo, proporcional à violação sofrida, o que aumentará a massa final, diminuindo a chance deste indivíduo ser escolhido como solução ótima.
- d) **Saída de dados:** a função objetivo gera como saída a massa penalizada e o vetor de penalidades, que possuirá os graus de violação de cada restrição, caso existam.

7 ESTUDO DE CASO

7.1 ENTRADA DE DADOS DO PROBLEMA

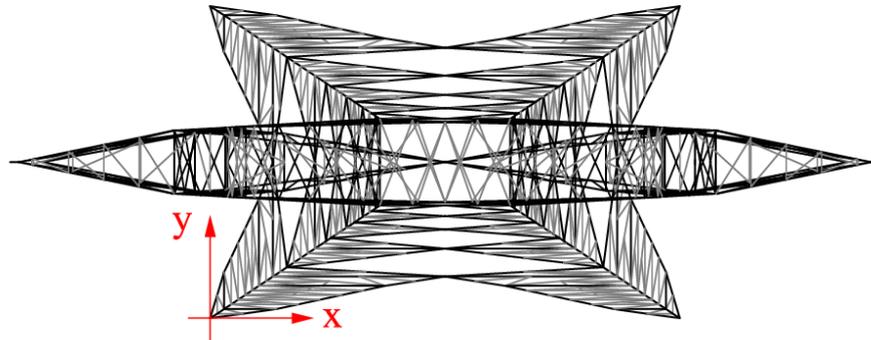
O problema abordado nessa seção consiste na otimização paramétrica das seções transversais dos elementos de uma torre de suspensão, que compõe uma linha de transmissão de energia elétrica. Esta torre é auto portante, do tipo "cara de gato", modelo A55 (PINTO et al., 2003). Sua geometria aparece nas Figuras 7.1 e 7.2, possuindo ao total 1721 elementos, 745 nós e 4 apoios que restringem as translações em x, y e z em sua base. Além disto, a análise estrutural foi formulada considerando que as conectividades das barras não se alteram. As restrições são tomadas como sendo os critérios estabelecidos pela ASCE 10 (2015). Os vãos gravantes consecutivos, por outro lado, são definidos como sendo iguais e nivelados. Desta forma, o vão gravante fica igual ao vão entre duas torres consecutivas, sendo aqui igual a 450 m.

Figura 7.1 – Geometria da estrutura (dimensões em centímetros).



(fonte: própria do autor)

Figura 7.2 – Vista superior, com orientação dos eixos coordenados.

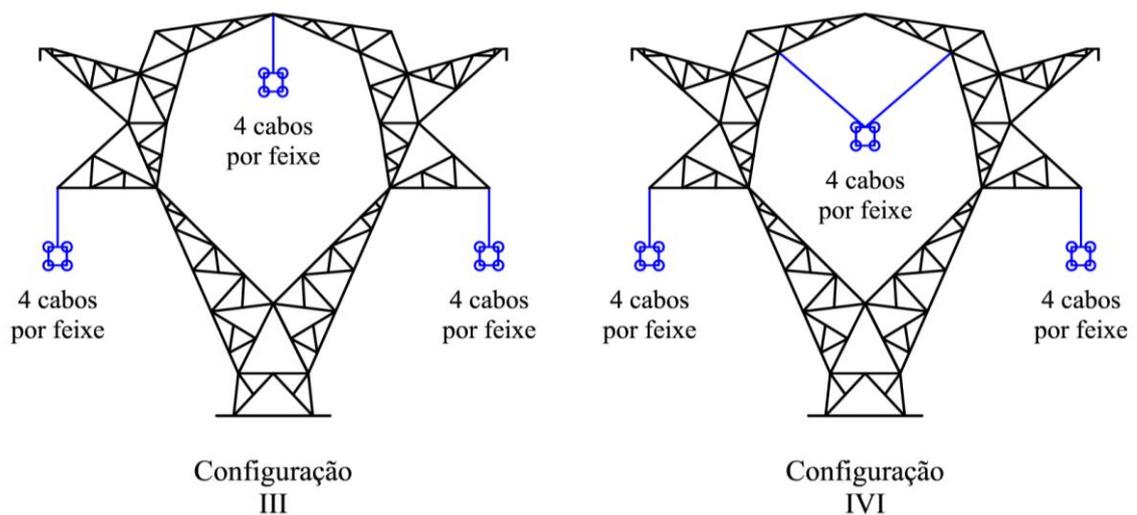


(fonte: autor)

Esta torre sustenta 3 feixes de cabos condutores de alumínio nu com alma de aço 45/7 fios (CAA), sendo do tipo Rail 954 kcmil Classe B. Cada feixe possuirá 4 condutores, totalizando 12 cabos condutores que atravessam a linha.

Estes feixes podem ser dispostos de duas formas, com configuração III ou IVI. Na primeira disposição, tanto as fases laterais como a central possuem apenas uma penca de isoladores. Para a configuração IVI utiliza-se, na fase central, duas pencas de isoladores, separadas por um ângulo de 92° . A Figura 7.3 ilustra a instalação do feixe de cabos condutores em configuração III, adotada para o presente trabalho. Esta informação é importante pois afeta os pontos de aplicação das cargas oriunda dos cabos centrais, na torre.

Figura 7.3 – Disposição do feixe de cabos condutores para cadeia III (E) e IVI (D).



(fonte: adaptado de PINTO et al., 2003)

Os cabos para-raios, por outro lado, serão constituídos de alumínio nu com alma de aço extra-forte, composto por 12/7 fios, tipo Dotterel, 176,9 kcmil. Neste cabo haverá apenas um cabo para-raio em cada extremidade, totalizando 2 cabos a serem considerados.

As propriedades destes materiais são mostradas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Propriedades dos cabos.

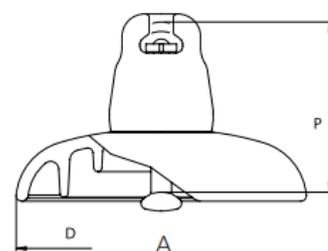
Propriedade	Cabo Condutor (CC)	Cabo Para-raios (PR)
Tipo	Rail	Dotterel
Quantidade de fios de alumínio / Quantidade de fios de aço	45/7	12/7
Bitola	954 kcmil	176,9 kcmil
Seção transversal	516,75 mm ²	141,93 mm ²
Diâmetro	29,59 mm	15,42 mm
Peso nominal	1600,2 kgf/km	656,8 kgf/km
Módulo de elasticidade final	6679 kgf/mm ²	10687 kgf/mm ²
Carga de ruptura	11539 kgf	7498 kgf

(fonte: NEXANS, 2013)

Os isoladores serão do tipo DL500-32. O comprimento dos isoladores será de 4,36 metros. A Tabela 7.2 apresenta as propriedades relevantes para o estudo,

Tabela 7.2 – Propriedades do isolador.

Propriedade	Valor
Diâmetro externo (D)	360 mm
Altura unitária ou Passo (P)	240 mm
Peso líquido aproximado	18 kgf
Área da seção transversal	500 mm ²
Módulo de Elasticidade	120000 MPa



(fonte: SEVES, 2009)

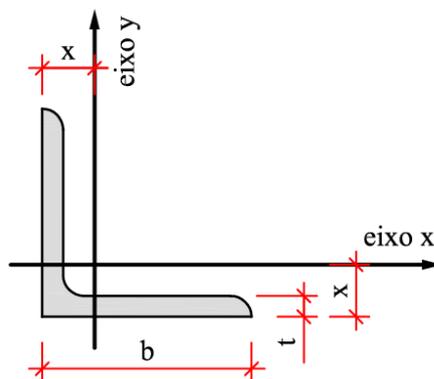
Para os perfis cantoneira que compõem a estrutura, utilizou-se como referência o catálogo de perfis cantoneira milimétrica de abas iguais, da GERDAU (2015). Utilizou-se também alguns perfis do catálogo de cantoneira em polegadas, por possuírem medidas maiores. Desta forma, chegou-se na Tabela 7.3, ordenando do perfil mais leve ao mais pesado. As propriedades geométricas presentes nesta tabela são obtidas com base nos eixos e distâncias mostrados na Figura 7.4. Cabe salientar que a primeira coluna da Tabela 7.3 se refere ao indicador de cada perfil do catálogo, sendo este utilizado como variável de projeto na montagem do problema de otimização estrutural.

Tabela 7.3 – Propriedades dos perfis cantoneira e numeração das variáveis de projeto.

Código	Perfil cantoneira	kg/m	b (mm)	t (mm)	Ag (cm ²)	Ix=Iy (cm ⁴)	Iz (cm ⁴)	Wx=Wy (cm ³)	rx=ry (cm)	rz min (cm)	x (cm)
1	L40x40x3,0	1,87	40	3,00	2,31	3,58	0,07	1,24	1,24	0,79	1,11
2	L45x45x3,0	2,12	45	3,00	2,61	5,16	0,08	1,58	1,41	0,89	1,23
3	L50x50x3,0	2,36	50	3,00	2,91	7,15	0,09	1,96	1,57	0,99	1,35
4	L40x40x4,0	2,42	40	4,00	3,08	4,47	0,16	1,55	1,20	0,79	1,15
5	L45x45x4,0	2,77	45	4,00	3,44	6,67	0,18	2,07	1,39	0,89	1,28
6	L40x40x5,0	3,00	40	5,00	3,75	5,56	0,31	1,97	1,22	0,79	1,18
7	L50x50x4,0	3,09	50	4,00	3,84	9,26	0,20	2,57	1,55	0,99	1,40
8	L45x45x5,0	3,38	45	5,00	4,3	7,84	0,35	2,43	1,35	0,87	1,40
9	L60x60x4,0	3,64	60	4,00	4,64	16,31	0,25	3,75	1,87	1,19	1,65
10	L50x50x5,0	3,77	50	5,00	4,80	11,00	0,40	3,05	1,51	0,97	1,42
11	L65x65x4,0	3,96	65	4,00	5,04	20,90	0,27	4,42	2,04	1,29	1,77
12	L50x50x6,0	4,47	50	6,00	5,69	12,80	0,68	3,72	1,50	0,97	1,56
13	L60x60x5,0	4,57	60	5,00	5,82	19,40	0,48	4,45	1,83	1,17	1,64
14	L65x65x5,0	4,98	65	5,00	6,34	24,70	0,52	5,20	1,97	1,28	1,77
15	L60x60x6,0	5,42	60	6,00	6,91	22,80	0,82	5,29	1,82	1,17	1,82
16	L75x75x5,0	5,71	75	5,00	7,27	38,70	0,60	7,06	2,31	1,48	2,02
17	L65x65x6,0	5,91	65	6,00	7,44	30,00	0,89	6,44	2,01	1,28	1,84
18	L80x80x5,0	6,08	80	5,00	7,75	48,60	0,65	8,35	2,50	1,59	2,18
19	L75x75x6,0	6,87	75	6,00	8,72	45,70	1,04	8,40	2,29	1,48	2,05
20	L80x80x6,0	7,25	80	6,00	9,24	57,30	1,11	9,91	2,49	1,58	2,22
21	L75x75x7,0	7,92	75	7,00	10,10	52,60	1,63	9,73	2,28	1,46	2,09
22	L90x90x6,0	8,30	90	6,00	10,60	80,30	1,25	12,20	2,75	1,78	2,41
23	L80x80x7,0	8,49	80	7,00	10,80	64,20	1,75	11,10	2,44	1,57	2,21
24	L100x100x6,0	9,14	100	6,00	11,64	114,40	1,40	15,70	3,13	1,99	2,72
25	L90x90x7,0	9,50	90	7,00	12,10	94,80	1,98	14,60	2,80	1,78	2,51
26	L100x100x7,0	10,70	100	7,00	13,70	128,00	2,21	17,50	3,06	1,97	2,69
27	L90x90x8,0	10,90	90	8,00	13,90	104,00	2,94	16,10	2,74	1,76	2,50
28	L100x100x8,0	12,20	100	8,00	15,50	145,00	3,28	19,90	3,06	1,96	2,74
29	L127x127x6,35	12,34	127	6,35	15,73	251,63	2,11	27,09	4,00	2,53	3,41
30	L100x100x9,0	13,50	100	9,00	17,20	164,30	4,64	22,90	3,09	1,97	2,83
31	L127x127x7,94	15,31	127	7,94	19,50	308,00	4,11	33,40	3,97	2,53	3,47
32	L127x127x9,52	18,30	127	9,52	23,29	362,00	7,03	39,50	3,94	2,51	3,53
33	L152,4x152,4x9,52	22,20	152,4	9,52	28,10	641,00	8,49	57,40	4,78	3,02	4,17
34	L127x127x11,11	23,52	127	11,11	26,96	416,68	11,10	45,71	3,93	2,50	3,58
35	L127x127x12,7	24,10	127	12,70	30,64	470,00	16,48	52,50	3,91	2,49	3,63
36	L152,4x152,4x12,7	29,20	152,4	12,70	37,09	828,00	19,94	75,40	4,72	3,00	4,27
37	L127x127x15,88	29,80	127	15,88	37,80	566,00	31,79	64,00	3,86	2,46	3,76
38	L152,4x152,4x15,88	36,00	152,4	15,88	45,86	1007,00	38,57	93,50	4,67	2,97	4,39
39	L152,4x152,4x19,05	42,70	152,4	19,05	54,44	1173,00	65,85	109,90	4,65	2,97	4,52
40	L203,2x203,2x15,88	48,70	203,2	15,88	62,90	2472,40	52,13	168,90	6,31	4,01	5,66
41	L203,2x203,2x19,05	57,90	203,2	19,05	73,81	2901,10	89,26	199,90	6,27	3,99	5,79

(fonte: GERDAU, 2015)

Figura 7.4 – Dimensões e eixos do perfil cantoneira.



(fonte: adaptado de GERDAU, 2015)

Os perfis dos montantes principais, por absorverem mais esforços, serão confeccionados com aço A572 grau 60, enquanto os demais elementos da torre serão fabricados com o aço A572 grau 50. Esta medida foi adotada para reduzir a seção transversal dos montantes, reduzindo o peso da estrutura. Todos os perfis estão disponíveis para ambos os tipos de aço. A Tabela 7.4 mostra as propriedades de cada um destes tipos de aço.

Tabela 7.4 – Propriedades físicas do aço dos perfis cantoneira.

Tipo de material	Aço A572 grau 50	Aço A572 grau 60
Módulo de Elasticidade E	20000 kN/cm ²	20000 kN/cm ²
Módulo de Elasticidade Transversal G	7700,00 kN/cm ²	7700 kN/cm ²
Massa específica ρ	7850,00 kgf/m ³	7850 kgf/m ³
Limite de Escoamento	34,50 kN/cm ²	41,50 kN/cm ²
Limite de Resistência	45,00 kN/cm ²	52,00 kN/cm ²

(fonte: GERDAU, 2015)

O Quadro 7.1 mostra as ações adotadas neste estudo, divididas conforme as hipóteses de cálculo recomendadas por GONTIJO (1994). Cabe salientar que as ações de ventos TS neste quadro se referem à metodologia simplificada *wind on all*, conforme descrito no item 5.2.

Quadro 7.1 – Listagem de ações considerada na análise estrutural.

Código	Descrição da ação	Tipo de ação
1	Peso próprio torre	Permanente
2	Peso próprio cabos	Permanente
3	Peso próprio para raios	Permanente
4	Peso próprio de demais elementos construtivos	Permanente
5	Montagem do cabo para-raios 1	Variável
6	Montagem do cabo para-raios 2	Variável
7	Montagem do cabo condutor 1	Variável
8	Montagem do cabo condutor 2	Variável
9	Montagem do cabo condutor 3	Variável
10	Cabo para-raios 1 rompido	Excepcional
11	Cabo para-raios 2 rompido	Excepcional
12	Cabo condutor 1 rompido	Excepcional
13	Cabo condutor 2 rompido	Excepcional

Código	Descrição da ação	Tipo de ação
14	Cabo condutor 3 (central) rompido	Excepcional
15	Vento 0° EPS	Variável
16	Vento 15° EPS	Variável
17	Vento 30° EPS	Variável
18	Vento 45° EPS	Variável
19	Vento 90° EPS	Variável
20	Vento 0° TS – <i>wind on all</i>	Excepcional
21	Vento 45° TS – <i>wind on all</i>	Excepcional
22	Vento 90° TS – <i>wind on all</i>	Excepcional

(fonte: autor)

A partir destas ações, se definiram 61 combinações, de acordo com a fase de construção, o estado de conservação do cabo, a direção e o tipo de vento adotado. Para o presente trabalho se considerou apenas um esquema de montagem dos cabos. Desta forma, o Quadro 7.2 mostra a listagem das combinações implementadas:

Quadro 7.2 – Listagem das combinações adotadas na simulação.

ID	Tipo por extenso	Descrição cabo	Descrição Vento
1	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 0° EPS
2	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 15° EPS
3	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 30° EPS
4	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 45° EPS
5	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 90° EPS
6	Combinações Últimas Excepcionais	Cabos intactos	Vento 0° TS
7	Combinações Últimas Excepcionais	Cabos intactos	Vento 45° TS
8	Combinações Últimas Excepcionais	Cabos intactos	Vento 90° TS
9	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 0° EPS reduzido
10	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 15° EPS reduzido
11	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 30° EPS reduzido
12	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 45° EPS reduzido
13	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 90° EPS reduzido
14	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 0° EPS reduzido
15	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 15° EPS reduzido
16	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 30° EPS reduzido
17	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 45° EPS reduzido
18	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 90° EPS reduzido
19	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 0° EPS reduzido
20	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 15° EPS reduzido
21	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 30° EPS reduzido
22	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 45° EPS reduzido
23	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 90° EPS reduzido
24	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 0° EPS reduzido
25	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 15° EPS reduzido
26	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 30° EPS reduzido
27	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 45° EPS reduzido
28	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 90° EPS reduzido

ID	Tipo por extenso	Descrição cabo	Descrição Vento
29	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 0° EPS reduzido
30	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 15° EPS reduzido
31	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 30° EPS reduzido
32	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 45° EPS reduzido
33	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 90° EPS reduzido
34	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 0° TS reduzido
35	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 45° TS reduzido
36	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 90° TS reduzido
37	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 0° TS reduzido
38	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 45° TS reduzido
39	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 90° TS reduzido
40	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 0° TS reduzido
41	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 45° TS reduzido
42	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 90° TS reduzido
43	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 0° TS reduzido
44	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 45° TS reduzido
45	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 90° TS reduzido
46	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 0° TS reduzido
47	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 45° TS reduzido
48	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 90° TS reduzido
49	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo para-raios 1	Sem vento
50	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo para-raios 2	Sem vento
51	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo condutor 1	Sem vento
52	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo condutor 2	Sem vento
53	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo condutor 3 (central)	Sem vento
54	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 0° EPS
55	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 15° EPS
56	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 30° EPS
57	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 45° EPS
58	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 90° EPS
59	Combinações Raras de Serviço	Cabos intactos	Vento 0° TS
60	Combinações Raras de Serviço	Cabos intactos	Vento 45° TS
61	Combinações Raras de Serviço	Cabos intactos	Vento 90° TS

(fonte: autor)

Para o projeto em estudo se considerou os pontos de fixação dos cabos na torre nivelados, ou seja, $B=0$ e, portanto, $L_e = L$. Logo, primeiramente é calculada a flecha teórica do cabo condutor, quando este se encontra submetido apenas a seu peso próprio. Para as condições definidas no problema, obtém-se a constante $C = 1442,19m$, da qual resulta a flecha teórica nos cabos condutores de 17,55 m. Para obter a força de projeto nos cabos para-raios deve-se limitar a sua flecha em 90% da flecha obtida para os cabos condutores. Desta forma, chega-se à tração máxima de projeto no cabo para-raios de 10324,81 N.

7.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Tanto o algoritmo de análise estrutural como o de otimização foram implementados em rotinas próprias do autor desenvolvidas em linguagem *MATLAB*. Os resultados da análise estrutural foram validados com o uso do software SAP2000 (2013) versão educacional, inserindo como dados de entrada os mesmos que foram utilizados nas rotinas autorais. A saída gráfica da estrutura e dos esforços também utilizou o mesmo software.

7.2.1 Definição da Função Objetivo e das Variáveis de Projeto

O objetivo do processo de otimização da estrutura em estudo é a redução de sua massa total. A estrutura é dividida em grupos de barras e os perfis que compõem as barras de cada grupo são tomadas como as variáveis de otimização, sendo estas variáveis discretas. Nesse contexto, a função objetivo é definida por:

$$f(\mathbf{x}) = \rho \sum_{i=1}^n A(x_i) \cdot L_i \quad (7.1)$$

sendo $f(\mathbf{x})$ a massa da estrutura da torre, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ o vetor das variáveis de projeto, x_i o indicador do perfil de cada grupo, $A(x_i)$ a área da seção transversal do perfil correspondente de cada grupo, L_i a soma dos comprimentos de todas as barras que pertencem ao respectivo grupo e ρ a massa específica do aço. Neste trabalho, assume-se que a massa específica será a mesma para todos os elementos da torre.

As variáveis de projeto são os perfis que compõem cada grupo de barras, divididos conforme a prática de projeto de torres. Estas variáveis são do tipo *linked-discrete*, que consiste em associar a cada perfil um inteiro “indicador” e utilizar este inteiro como variável de projeto.

Assim sendo, para definir os grupos, os seguintes critérios foram adotados:

- a) Se a barra é contraventada ou de contraventamento;
- b) Continuidade das barras: barras que na execução se mantêm contínuas, possuirão a mesma seção transversal;
- c) Divisão dos módulos: como a montagem da torre é feita por módulos, utilizou-se como critério de divisão dos grupos estes módulos.

Com isto, chega-se à relação de grupos apresentada no Quadro 7.3.

Quadro 7.3 – Divisão dos grupos para o estudo de caso.

Descrição	Grupo (variável)
Montantes Principais Pernas	1
Montantes Secundários Pernas Frontal	2
Montantes Secundários Pernas Lateral	3
Diagonais Internas Pernas 1	4
Diagonais Internas Pernas 2	5
Diagonais Internas Pernas 3	6
Travamento Pernas com Tronco	7
Diagonais em X Inferior Frontal	8
Diagonais em X Inferior Lateral	9
Diagonais em X Intermediário Frontal	10
Diagonais em X Intermediário Lateral	11
Diagonais em X Superior Frontal	12
Diagonais em X Superior Lateral	13
Diagonais Internas de União da Cabeça 01	14
Diagonais Internas de União da Cabeça 02	15
Terço Inferior Cabeça	16
Diagonais Internas Terço Inferior Cabeça	17
Travamento Terço Inferior Cabeça	18
Terço Intermediário Cabeça	19
Diagonais Internas Terço Intermediário Cabeça 1	20
Diagonais Internas Terço Intermediário Cabeça 2	21
Travamento Terço Intermediário Cabeça	22
Terço Superior Cabeça	23
Diagonais Internas Terço Superior Cabeça	24
Travamento Terço Superior Cabeça 1	25
Travamento Terço Superior Cabeça 2	26
Mísula Inferior	27
Mísula Superior	28
Sustentação Para raios	29
Diagonais Internas Sustentação Para-raios	30

Descrição	Grupo (fixo)
Redundantes L40x40x3	31
Redundantes L45x45x3	32
Redundantes L50x50x3	33
Redundantes L50x50x4	34
Redundantes L60x60x4	35

(fonte: autor)

Caso a barra seja de contraventamento, a mesma não será incluída na otimização, uma vez que ela servirá apenas para reduzir o comprimento de flambagem das barras principais, não possuindo função estrutural de absorver esforços. Porém, para fins construtivos, estas barras de contraventamento serão divididas em cinco grupos, que estão numerados de 31 a 35 no Quadro 7.3 mostrado anteriormente. Esta ação se torna necessária pois, mesmo que estes grupos não façam parte do processo de otimização, seus elementos são computados a fim de obter o peso total da torre.

7.2.2 Definição das Restrições

As restrições adotadas no projeto são essencialmente as normativas, relacionadas ao Estado Limite Último (ELU), ao Estado Limite de Serviço (ELS) e às esbeltezes limite de cada peça. Foram utilizadas as verificações mais relevantes da coletânea de normas técnicas voltadas para estruturas de aço e sistemas de linhas de transmissão. As frequências naturais não foram incluídas como restrição, porém foi feita a sua verificação nas soluções geradas pelo algoritmo no fim do processo de otimização, para confirmar que de fato o primeiro modo de vibração atende ao limite da NBR 8850 de possuir frequência natural acima de 1,0 Hz.

Um outro fato importante é a consideração da estabilidade global do suporte da LT a partir dos modos de flambagem global da torre. Porém, isto envolveria um problema de autovalores e autovetores com a matriz de rigidez geométrica da estrutura, além de exigir a consideração de aspectos da análise estrutural não linear, ficando fora do escopo do presente trabalho.

As restrições associadas à capacidade resistente das barras aos esforços de tração e compressão são definidas nas Equações 7.5 e 7.6, com base nos critérios de segurança definidos na ASCE 10 (2015). Desta forma, para a restrição de tração simples, chega-se a:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \Rightarrow g_1 = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} - 1 \quad (7.2)$$

enquanto a compressão simples é restringida por:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \Rightarrow g_2 = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} - 1 \quad (7.3)$$

A Equação 7.4 define a restrição associada ao deslocamento excessivo do topo da torre em condições de serviço. Para isto, é adotada a recomendação da Tabela 4 da norma IEEE Standard 1863 (2019), onde há a limitação do deslocamento δ no topo da torre, de acordo com a função que esta assume na linha (terminal, em ângulo ou de suspensão). Com isto, define-se a altura h da torre como sendo aquela que se inicia na face superior das fundações e termina no nó de maior cota. Assim sendo, chega-se à seguinte restrição de serviço:

$$\delta \leq \frac{5h}{1000} \Rightarrow g_3 = \frac{200 \cdot \delta}{h} - 1 \quad (7.4)$$

A quarta restrição diz respeito ao limite do índice de esbeltez de barras comprimidas, não podendo ser maior que 200. Esta é uma recomendação da ASCE 10 (2015), visto que um índice de esbeltez elevado reduz a carga crítica de flambagem. A Equação 7.5 introduz o coeficiente de comprimento efetivo K , função das condições de contorno e carregamento.

$$\frac{KL_r}{r_{\min}} \leq 200 \Rightarrow \boxed{g_4 = \frac{KL_r}{200r_{\min}} - 1} \quad (7.5)$$

A última restrição é apresentada pela Equação 7.6, sendo definida como o limite máximo do índice de esbeltez de barras tracionadas, que não pode ser superior a 300. Este limite foi extraído da NBR 8800 (2008) e adotado neste trabalho para evitar a ocorrência de vibrações excessivas. Assim sendo, tem-se o seguinte equacionamento:

$$\frac{L_r}{r_{\min}} \leq 300 \Rightarrow \boxed{g_5 = \frac{L_r}{300r_{\min}} - 1} \quad (7.6)$$

As violações destas restrições são tratadas utilizando a técnica de penalização. Ou seja, quando alguma restrição é violada, o algoritmo aplica um fator de penalidade FP na função objetivo do candidato à solução ótima. Isto é feito a fim de reduzir a possibilidade deste indivíduo permanecer na população e eventualmente ser escolhido como a solução do problema. Logo, definindo a função objetivo penalizada como $f^*(\mathbf{x})$, pode-se obter seu valor através da seguinte expressão:

$$f^*(\mathbf{x}) = (1 + FP) \cdot f(\mathbf{x}) = (1 + FP) \cdot \rho \sum_{i=1}^n A(x_i) \cdot L_i \quad (7.7)$$

Obviamente, se a solução atende todas as restrições, então $FP = 0$ e, portanto, $f^*(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})$. O fator de penalidade FP , por outro lado, é obtido pela soma de todas as violações ocorridas. Desta forma, considerando m restrições que foram violadas, a restrição genérica g_i e seu limite máximo g_i^* , pode-se obter o fator de penalização através da equação abaixo:

$$FP = \sum_{i=1}^m \left(\frac{g_i}{g_i^*} - 1 \right) \quad (7.8)$$

No caso de ocorrer violação, ou seja, $g_i > g_i^*$, o valor é computado na soma. Após todas as restrições terem sido verificadas, a soma final de FP é incluída na Equação 7.7.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente se fez um estudo de convergência, para comparar os resultados e verificar qual o algoritmo mais apropriado para o projeto em estudo. Cabe salientar que o resultado desse estudo será específico do projeto em questão. Pode ocorrer de, em um projeto distinto, outro algoritmo de otimização ser o mais adequado. Na sequência foi feito um estudo paramétrico, alterando de forma isolada algumas características do problema de otimização formulado. Esta estratégia foi adotada a fim de avaliar o impacto que alguns aspectos do projeto geram no resultado final do algoritmo.

8.1 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA

Esta seção apresenta um estudo de convergência, com base nos quatro algoritmos adotados para o presente trabalho. A comparação dos algoritmos se baseia em informações estatísticas, extraindo média, desvio padrão e valores extremos de uma sequência de 30 processos de otimização independentes, mantendo a quantidade de partículas e iterações constante em cada processamento. Desta forma, é possível avaliar os algoritmos em termos de demanda computacional e qualidade da solução.

O estudo comparativo se baseou nas seguintes condições, para cada um dos algoritmos testados neste trabalho:

- a) Foram realizadas otimizações considerando populações com 50, 75 e 150 partículas;
- b) Adotou-se como critério de parada o número máximo de 50, 100 e 200 iterações;
- c) Para cada combinação de tamanho de população e número máximo de iterações definidos, foram realizadas 30 otimizações independentes.

Além disto, o Quadro 8.1 mostra os parâmetros heurísticos utilizados para cada algoritmo.

Quadro 8.1 – Parâmetros heurísticos adotados.

Algoritmo metaheurístico	Parâmetro heurístico adotado
<i>Differential Evolution</i>	$CR = 0,90; F = 0,65$
<i>Particle Swarm Optimization</i>	$\omega = 0,90; c_1 = 2,01; c_2 = 2,01$
<i>Generalized Normal Distribution Optimization</i>	Sem parâmetros heurísticos
<i>Quantum Particle Swarm Optimization</i>	$\alpha_{inicial} = 1,60; \alpha_{final} = 0,80$

(fonte: autor)

Com isto, pode-se utilizar como exemplo a rodada de 30 processos de otimização independentes utilizando o algoritmo DE com 75 partículas e 100 iterações. Neste caso serão feitas, em cada otimização independente, 7500 avaliações na função objetivo, totalizando 225000 chamadas nesta subrotina. Pela maneira como o algoritmo foi programado, cada chamada da função objetivo durou cerca de 0,30s, totalizando, neste exemplo, 18,75h de duração do processamento. Estes tempos foram obtidos em uma máquina com 8 Gigabytes de memória RAM, processador Intel Core i7 em um sistema operacional de 64 bits.

Ao longo deste processo foram gerados diversos gráficos. Dentre eles:

- a) **Gráfico de convergência:** para avaliar a estabilidade do processo de otimização;
- b) **Gráfico de penalidades:** para inspecionar se as soluções permanecem penalizadas por muitas rodadas ou não, ao longo do processamento;
- c) **Gráfico das variáveis de projeto:** para verificar a estabilidade dos valores assumidos pelas variáveis de projeto. Aqui cabe salientar que o eixo das ordenadas corresponde ao indicador de cada perfil, conforme a Tabela 7.3 deste trabalho.

Os gráficos foram gerados com base em simulações utilizando a mesma população inicial, referente a uma das 30 análises independentes realizadas. Esta medida foi adotada para que seja possível a análise comparativa entre os gráficos. Porém, cabe ressaltar que as iterações iniciaram sua contagem a partir da ocorrência do primeiro processo evolucionário, de recombinação e mutação, por exemplo. Por esta razão, na primeira iteração, a solução ótima escolhida por cada algoritmo foi diferente. Os itens a seguir discutem estes resultados.

Por fim, para complementar as informações obtidas no processamento das otimizações, foi feita a análise modal da melhor solução obtida ao final das 30 rodadas independentes, para cada uma das simulações. Neste trabalho as frequências naturais não foram tomadas como restrições de projeto pois, como se verá nas tabelas de resultados mais adiante, se observou que as soluções finais naturalmente apresentavam frequências naturais dentro dos limites normativos (entre 1 e 2 Hz). Portanto, a sua inclusão apenas aumentaria o tempo computacional, uma vez que seria uma restrição não ativa.

8.1.1 Algoritmo DE

A Tabela 8.1 mostra os resultados obtidos com o algoritmo DE.

Tabela 8.1 – Estudo de convergência para o algoritmo DE.

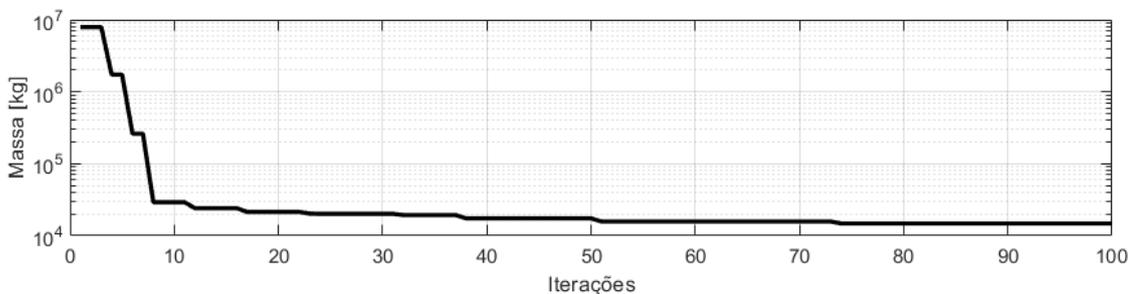
	Repetições	Partículas	Iterações	Melhor massa (kg)	Média (kg)	Desv. Pad. (kg)	Freq. Nat (Hz)
DE	30	50	50	16080,07	18059,34	1217,84	1,21
			100	13785,91	14861,85	650,99	1,39
			200	12167,04	12720,03	409,12	1,34
	30	75	50	15464,62	18217,45	1172,28	1,22
			100	13852,69	15310,97	677,43	1,28
			200	12500,00	13400,00	598,00	1,45
	30	150	50	15708,22	17928,47	942,71	1,33
			100	14700,00	15700,00	521,00	1,33
			200	12202,65	12774,36	401,36	1,43

(fonte: autor)

Analisando a Tabela 8.1 chega-se à conclusão de que, para uma mesma quantidade de iterações, o aumento de partículas não gera grandes variações nos resultados, para este algoritmo e este projeto. Observa-se também que, por exemplo, em 200 iterações, a melhor massa ficou em torno de 12,167 toneladas. Cabe salientar que todas as soluções apresentadas na Tabela 8.1 não se encontram penalizadas. Além disto, como é esperado, à medida que se aumenta o número de partículas e/ou iterações, o desvio padrão e a média tendem a diminuir também, sendo a média mais próxima do valor ótimo. Esta redução se tornou mais expressiva entre 50 e 100 iterações do que entre 100 e 200 iterações.

O gráfico da Figura 8.1 mostra que a convergência, para este algoritmo, ocorre em patamares e lentamente, apesar do início em queda abrupta. Nota-se também que, após várias iterações, ainda era possível obter uma melhor solução não penalizada, indicando que possivelmente seria necessário aumentar de forma significativa o número de iterações, a fim de obter uma solução otimizada satisfatória.

Figura 8.1 – Convergência do algoritmo DE, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.

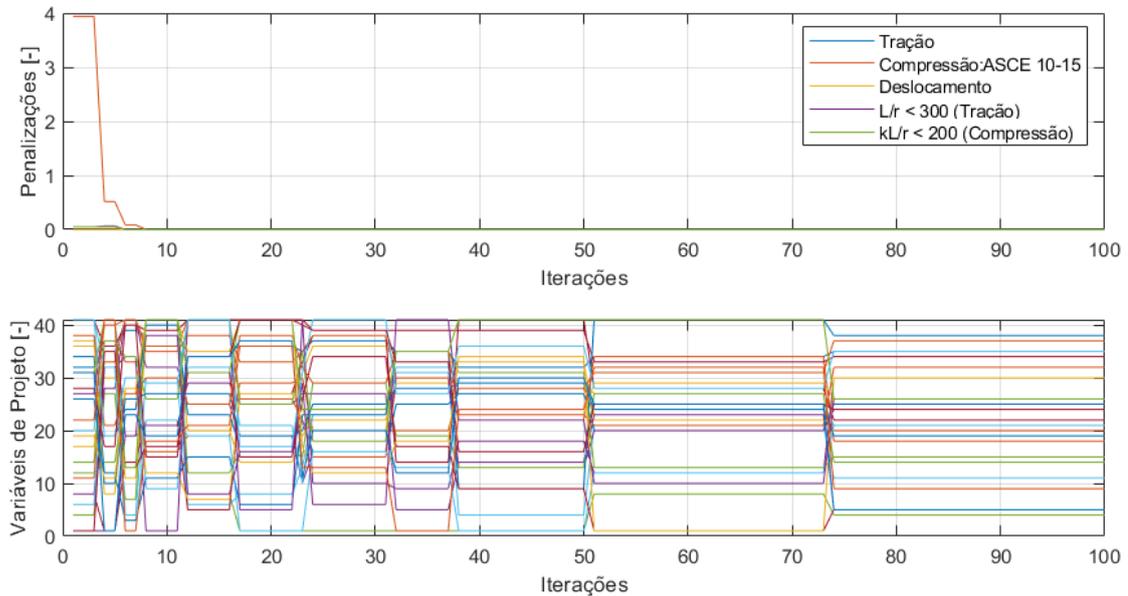


(fonte: autor)

O gráfico de penalidades mostrado na Figura 8.2 mostra que a penalização deixa de ocorrer com poucas iterações. Além disto, o gráfico de variáveis de projeto abaixo também evidencia que, mesmo após várias iterações, ainda era possível alterar as variáveis de projeto e obter

uma solução melhor que a anterior. Cabe salientar que, no gráfico de variáveis de projeto, cada uma das linhas corresponde a uma variável de projeto, totalizando 30 linhas no gráfico:

Figura 8.2 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo DE.



(fonte: autor)

8.1.2 Algoritmo PSO

Comportamento semelhante ao do algoritmo DE é notado no PSO, conforme mostra a Tabela 8.2. Nele, para 200 iterações, apenas se notou redução do peso significativa na simulação com 150 partículas. Isto indica que, para o algoritmo gerar resultados satisfatórios, é necessário um número elevado de partículas na simulação com o PSO.

Tabela 8.2 – Estudo de convergência do algoritmo PSO.

	Repetições	Partículas	Iterações	Melhor massa (kg)	Média (kg)	Desv. Pad. (kg)	Freq. Nat (Hz)
PSO	30	50	50	14142,68	33557,52	50798,15	1,20
			100	13420,85	27719,36	36425,93	1,31
			200	13851,11	92500,34	375939,40	1,36
	30	75	50	13738,81	19158,71	4142,74	1,22
			100	13909,39	20399,92	7690,58	1,18
			200	13756,92	19692,94	4108,80	1,34
	30	150	50	13108,05	16504,67	1855,51	1,30
			100	13025,78	16650,50	3605,13	1,21
			200	12520,66	16187,34	2642,86	1,26

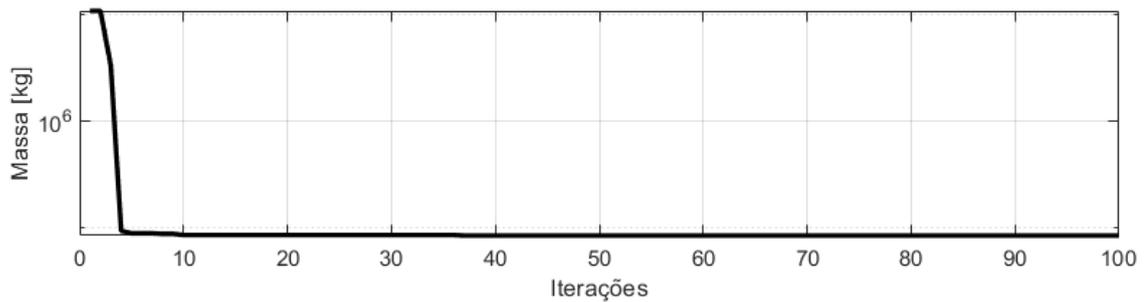
(fonte: autor)

Além disso, o desvio padrão obtido nas simulações deste algoritmo é significativamente maior que o obtido para o algoritmo DE. Não se percebe uma tendência de redução no desvio ao se aumentar o número de iterações, apenas ao aumentar o número de partículas se percebe

esta diminuição. Isto é reparado expressamente na simulação com 50 partículas, que geram valores bastante elevados se comparados com as demais rodadas.

A Figura 8.3 mostra o gráfico de convergência do PSO. Nele é possível observar que há uma queda abrupta de peso nas primeiras iterações. Porém, a partir deste ponto, a convergência se torna lenta. Além disso, as reduções de peso, quando ocorrem, são muito pequenas, o que indica que o algoritmo, para este problema, fica preso em ótimos locais.

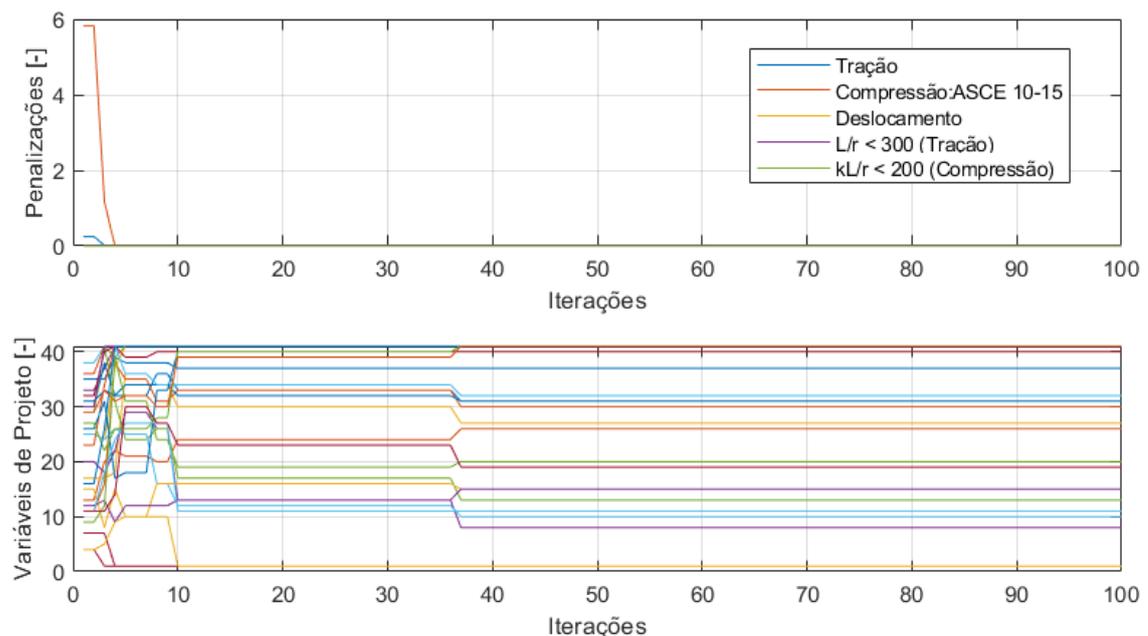
Figura 8.3 – Convergência do algoritmo PSO, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.



(fonte: autor)

Este fato também pode ser observado no gráfico das variáveis de projeto da Figura 8.4, onde se percebe que, após as primeiras iterações, elas dificilmente mudam de valor. Por outro lado, nesta mesma figura, o gráfico de penalidades mostra que as melhores soluções seguem não penalizadas, após as mesmas iterações iniciais, mesmo que longe do ótimo global

Figura 8.4 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo PSO.



(fonte: autor)

8.1.3 Algoritmo GNDO

A Tabela 8.3 mostra que, à medida que aumenta o número de partículas, o desvio padrão tende a reduzir, porém esta redução é pequena, isto quando ocorre. Por outro lado, as médias não sofreram reduções significativas, ficando entre 10 e 12 toneladas, aproximadamente. Aqui também é observado que foi obtida a melhor solução encontrada até então com a **menor massa não penalizada**, correspondente a uma massa da torre de 9778,24 kg. Cabe ressaltar aqui que, apesar de ser um resultado com uma otimização muito satisfatória, não é possível, a priori, definir se este é o ótimo global. Para garantir que se trata de uma solução ótima global seria necessário verificar todas as possíveis combinações entre as variáveis de projeto.

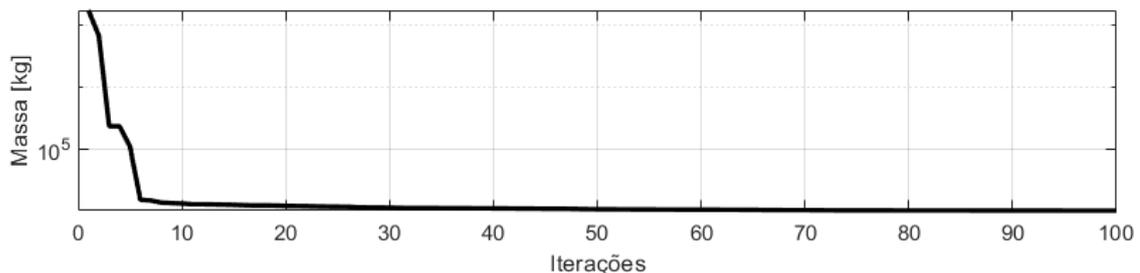
Tabela 8.3 – Estudo de convergência do algoritmo GNDO.

	Repetições	Partículas	Iterações	Melhor massa (kg)	Média (kg)	Desv. Pad. (kg)	Freq. Nat (Hz)
GNDO	30	50	50	11196,01	11879,37	513,44	1,34
			100	10141,23	10884,34	392,35	1,55
			200	10263,34	10936,29	486,23	1,54
	30	75	50	10793,17	11391,04	285,22	1,40
			100	10073,68	10578,81	357,68	1,56
			200	10049,73	10601,11	273,51	1,57
	30	150	50	10407,13	10806,52	242,13	1,53
			100	9913,06	10341,85	290,49	1,57
			200	9778,24	10230,80	279,79	1,62

(fonte: autor)

A Figura 8.5 mostra o gráfico de convergência para o GNDO. Aqui se observa que a convergência ocorre a partir da centésima iteração, sem transições abruptas:

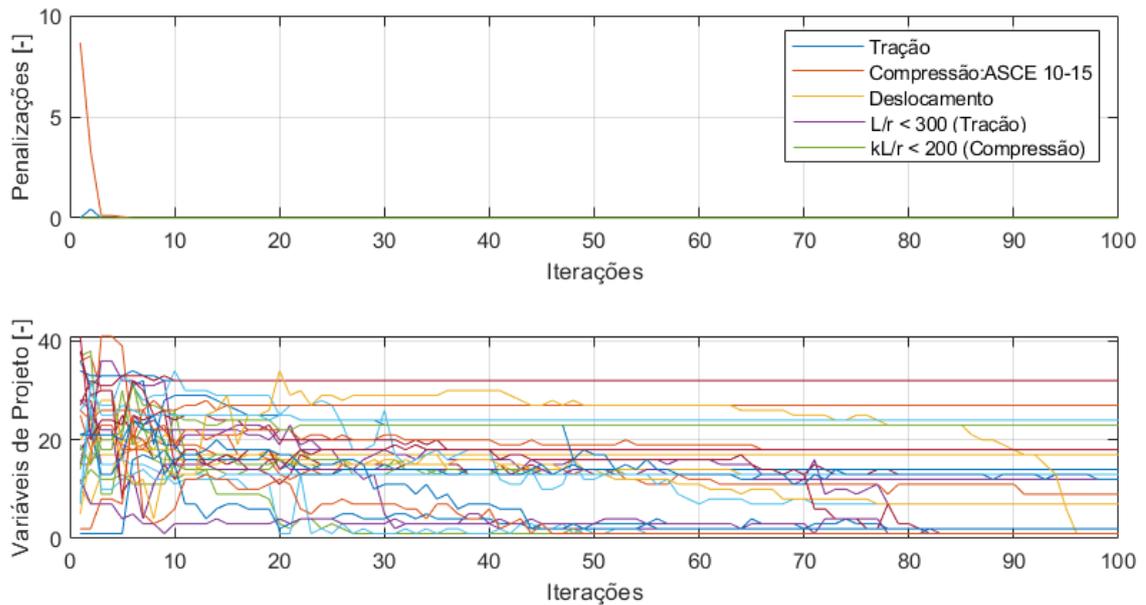
Figura 8.5 – Convergência do algoritmo GNDO, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.



(fonte: autor)

De maneira semelhante aos demais algoritmos, a penalização deixa de ocorrer nas primeiras iterações. Observa-se também, pelo gráfico de variáveis, que até a centésima iteração ocorre significativa exploração das variáveis e soluções, mostrando a robustez do algoritmo em explorar ótimos locais em busca do ótimo global. Dito isto, os gráficos da Figura 8.6 ilustram estes comentários.

Figura 8.6 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo GNDO.



(fonte: autor)

8.1.4 Algoritmo QPSO

A Tabela 8.4 mostra que, no caso do algoritmo QPSO, o desvio padrão se mostrou maior que o do algoritmo GNDO, porém menor que o DE e o PSO. Além disso, à medida que aumenta o número de partículas e/ou iterações, o desvio padrão também diminui, assim como a média.

Tabela 8.4 – Estudo de convergência do algoritmo QPSO.

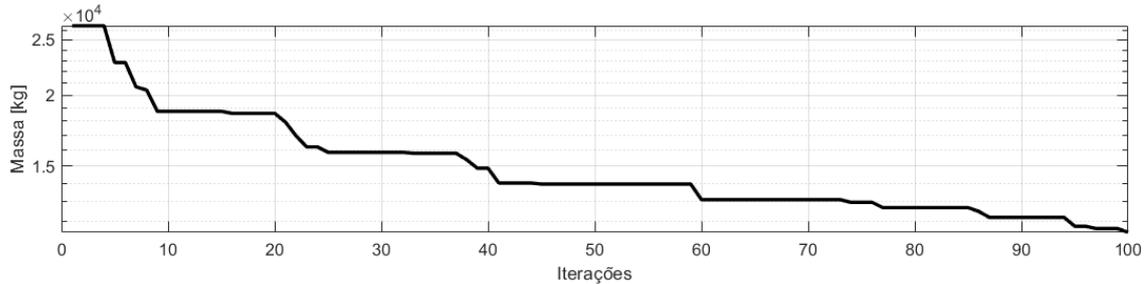
	Repetições	Partículas	Iterações	Melhor massa (kg)	Média (kg)	Desv. Pad. (kg)	Freq. Nat (Hz)
QPSO	30	50	50	11551,55	13495,57	989,23	1,39
			100	11130,61	12234,89	902,61	1,47
			200	10694,64	11367,73	445,81	1,54
	30	75	50	12029,28	13188,12	853,27	1,46
			100	10885,41	12045,87	516,54	1,47
			200	10419,16	10883,54	263,41	1,55
	30	150	50	11465,78	12482,09	685,41	1,44
			100	10582,28	11505,06	363,11	1,57
			200	10419,16	10883,54	263,41	1,55

(fonte: autor)

Nota-se também que as soluções possuem frequências naturais semelhantes à gerada pelo algoritmo GNDO. Seus resultados ótimos foram melhores que o obtido pelos algoritmos DE e PSO, porém piores que o do GNDO. O fato de o QPSO gerar resultados melhores e mais estáveis que o PSO se justifica pelo fato de aquele ser um refinamento do PSO, utilizando uma formulação que permite maior exploração de regiões promissoras de forma mais rápida.

Conforme mostra o gráfico da Figura 8.7, a convergência ocorre em patamares, sem transição suave nem quedas abruptas. Isto mostra que o algoritmo explora mais regiões promissoras, antes de se concentrar em uma determinada região, não ficando preso, portanto, em ótimos locais. Consequentemente, sua convergência ocorre de forma mais lenta.

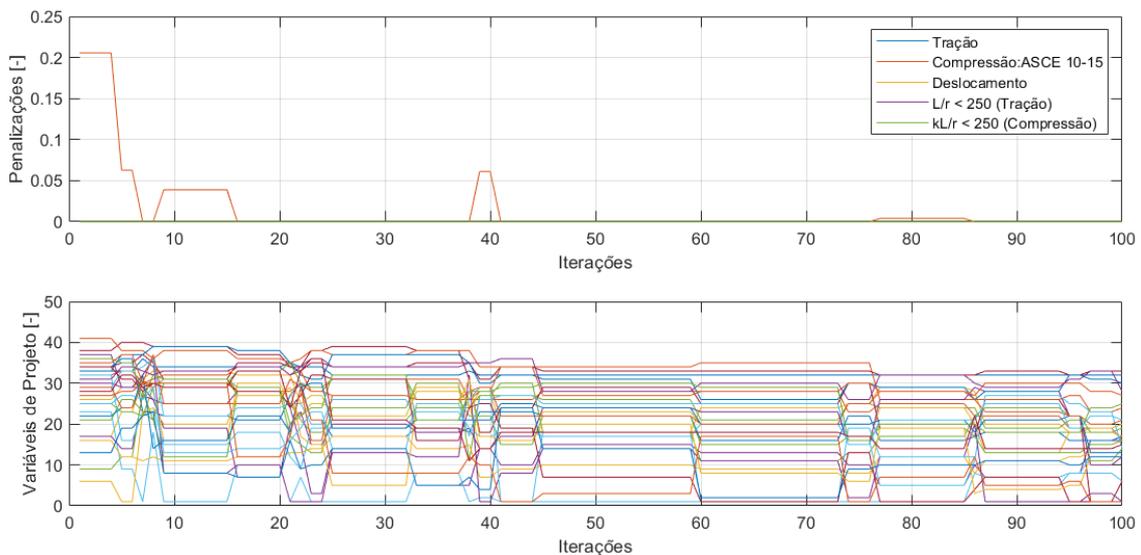
Figura 8.7 – Convergência do algoritmo QPSO, para 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações.



(fonte: autor)

O gráfico de penalidades da Figura 8.8 mostra que, novamente, logo nas primeiras iterações, a penalização é eliminada. Além disso, o gráfico de variáveis de projeto nesta mesma figura evidencia a maior exploração de soluções, comentada no parágrafo anterior.

Figura 8.8 – Gráfico de penalidades e de variáveis de projeto para o algoritmo QPSO.



(fonte: autor)

8.1.5 Comparação dos Algoritmos

A Tabela 8.5 mostra os principais resultados obtidos com o estudo de convergência. Nela é possível observar que o algoritmo GNDO gerou a solução mais leve, possuindo massa 28,04% menor que a solução mais pesada, que foi a do algoritmo PSO.

Tabela 8.5 – Comparativo entre as melhores soluções de cada algoritmo.

Algoritmo	Melhor solução (kg)	Média (kg)	Desvio Padrão (kg)	Frequência Natural (Hz)
DE	12167.04	12720.03	409.12	1.34
PSO	12520.66	16187.34	2642.86	1.26
GNDO	9778.24	10230.80	279.79	1.62
QPSO	10419.16	10883.54	263.41	1.55

(fonte: autor)

Por outro lado, o algoritmo PSO gerou a solução ótima com a maior massa e, portanto, menor frequência natural. Ou seja, a torre obtida com este algoritmo se torna mais suscetível a efeitos dinâmicos induzidos pela ação do vento. Isto é possível, visto que a frequência natural do primeiro modo de vibração se aproxima do limite dado pela NBR 8850, de 1,0 Hz.

De forma geral, observou-se que os algoritmos DE e PSO foram os que obtiveram pior desempenho, resultando em torres mais pesadas que os algoritmos QPSO e GNDO sendo, ao mesmo tempo, mais suscetíveis a vibrações excessivas, uma vez que suas frequências naturais ficaram próximas de 1,0 Hz. A melhor solução foi para o algoritmo GNDO, com 30 repetições, 150 partículas e 200 iterações. Além disso, a solução ótima, ao final do processo de cada otimização, não ficou penalizada, em nenhum dos algoritmos.

O QPSO, apesar de ter tido melhor desempenho que o PSO e o DE, gerou resultados mais pesados que o GNDO, além de convergir mais lentamente. Desta forma, o algoritmo escolhido para o estudo paramétrico foi o GNDO, por possuir as propriedades desejadas de convergência suave, mas ao mesmo tempo explorando ótimos locais em busca do global.

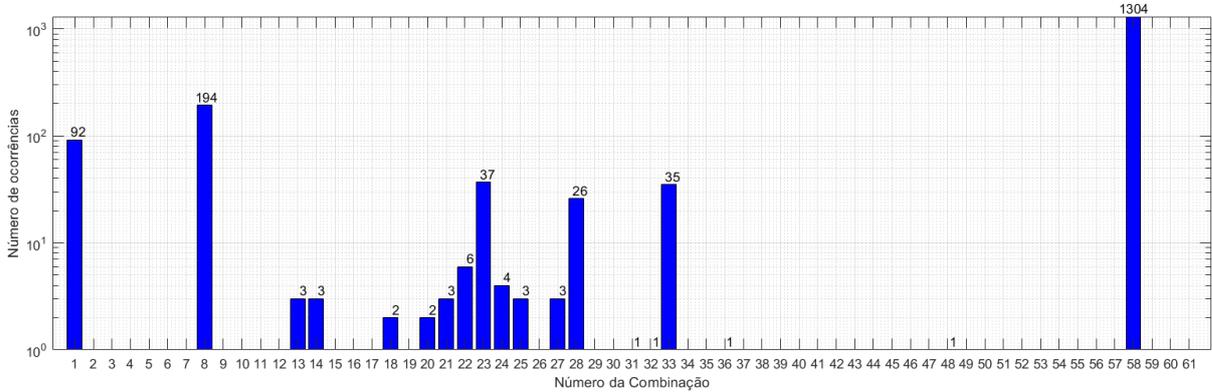
Conforme PINTO et al. (2003), baseando-se em resultados usuais de projetos, o peso médio esperado para a linha de transmissão de 500 kV, composta por torres do tipo “cara de gato”, é em torno de 22,0 tf/km. Considerando o vão médio de 450 metros do projeto em estudo, chega-se a um peso esperado para a torre de, aproximadamente, 10 tf. Cabe salientar que este parâmetro serve para fornecer uma ordem de grandeza dos resultados de uma torre que já sofreu processo de otimização. Assim sendo, como os resultados obtidos nas simulações oscilaram entre 9,8 e 10,3 tf, conclui-se que a torre otimizada se encontra dentro dos parâmetros de comparação.

8.1.6 Resultados Obtidos para a Melhor Solução

A melhor solução obtida foi a com massa de 9778,24 kg. Para realizar os estudos de convergência e paramétrico se construíram, além dos gráficos citados anteriormente, mais dois gráficos: o de **combinações críticas** e o de **restrições críticas**. Estes gráficos consistem,

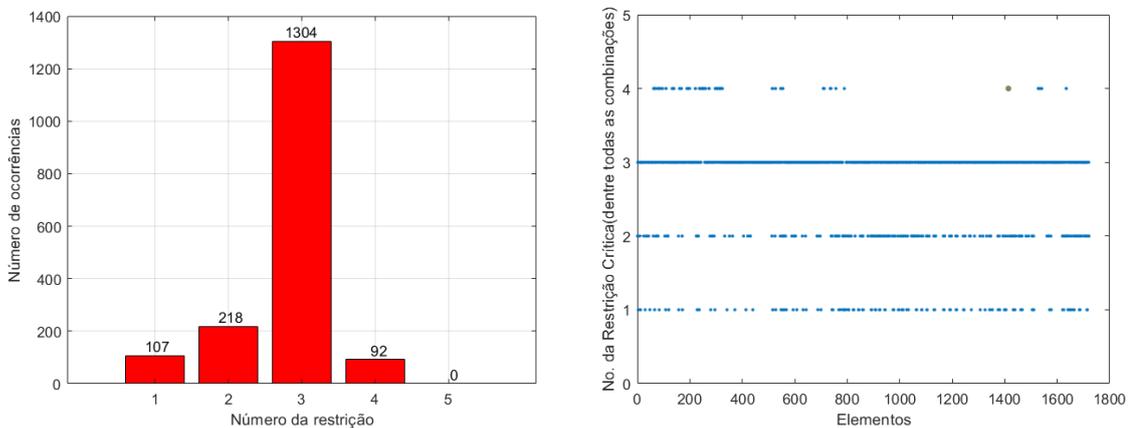
respectivamente, nas combinações e restrições que foram determinantes para escolher a seção transversal do elemento. Por exemplo, dadas as cinco restrições do problema, aquela que estiver mais próxima de ser violada, para um determinado elemento, será considerada como restrição crítica daquele elemento. Por outro lado, a combinação que gerou esta restrição crítica será a combinação crítica. Estes gráficos são ilustrados como gráficos de barras, onde o número em cada barra indica a quantidade de vezes que aquela combinação (ou restrição) foram críticas no dimensionamento de algum elemento da torre. Dito isto, os gráficos de combinações e restrições críticas da melhor solução são mostrados nas Figuras 8.9 e 8.10.

Figura 8.9 – Gráfico de combinações críticas.



(fonte: autor)

Figura 8.10 – Gráfico de restrições críticas acumulado (E) e de cada elemento (D).



(fonte: autor)

Pode-se notar que a restrição dominante é a de deslocamento máximo no topo da estrutura, ou seja, o Estado Limite de Serviço. Isto corresponde, no gráfico de combinações, a de número 58, que se refere à combinação frequente de serviço, considerando vento EPS a 90° e cabos intactos. Esta combinação é a que gera maior deslocamento no topo da estrutura, sendo estes valores os mostrados na Tabela 8.6.

Tabela 8.6 – Deslocamentos para a melhor solução.

	Valor (m)	Violação	Atende?
Deslocamento em x	0.0744	-0.71	Sim
Deslocamento em y	0.0853	-0.67	Sim
Deslocamento em z	-0.0114	-1.04	Sim

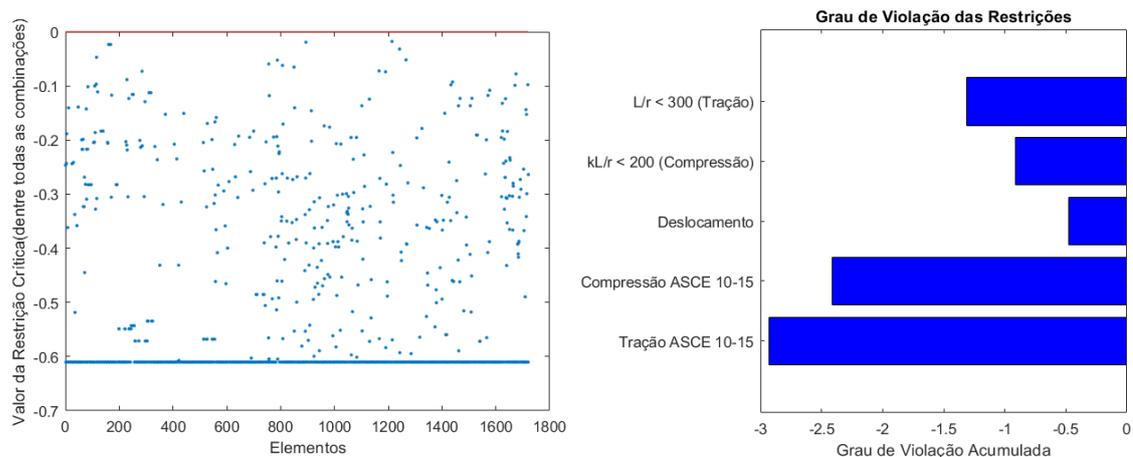
(fonte: autor)

Salienta-se que a violação é calculada pela equação da restrição correspondente e, caso resulte negativa, indica que a restrição é atendida. Dito isto, é possível gerar um gráfico de dispersão, onde é mostrado o grau de violação da restrição crítica de cada elemento.

De forma similar, é possível verificar a qualidade da solução ótima obtida gerando-se um gráfico de violação acumulada. Nele, se somam todas as violações negativas de todos os elementos e após as violações positivas, para no fim ambas as somas serem colocadas em um gráfico de barras, com o zero como eixo central.

Os gráficos da Figura 8.11 ilustram estas duas formas de apresentar a violação das restrições.

Figura 8.11 – Grau de violação da restrição crítica de cada elemento (E) e acumulada (D).



(fonte: autor)

Nota-se que, pelo gráfico de dispersão à esquerda desta figura, para a simulação realizada, os graus de violação de todos os elementos resultaram negativos, indicando que nenhum elemento está penalizado, pois faltaria um certo valor para a violação se tornar positiva. Os elementos que ficaram mais próximos de violarem uma restrição foram: o 894, correspondente a uma barra que compõe as diagonais intermediárias em X na face lateral da torre (grupo 11); o 1214, correspondente ao terço inferior da cabeça da torre (grupo 16); e os elementos 162 e 168, relacionados às diagonais internas das pernas (grupo 6). Estes elementos tiveram violações de, respectivamente, -0,019, -0,017, -0,0235 e -0,0235.

É possível ver, pelo gráfico de restrições acumuladas da Figura 8.12, que a restrição de compressão se tornou mais crítica que a de tração, ou seja, mais próxima de zero. Isto é esperado visto que, na compressão, há redução de rigidez e consideração de flambagem no seu cálculo da capacidade resistente. Em contrapartida, o Estado Limite de Serviço, junto com as restrições de esbeltezes, foram as que mais se aproximaram de ser violadas, o que novamente é esperado, uma vez que, geralmente em projetos estruturais, o que determina o dimensionamento das seções são critérios de serviço e geométricos.

A Tabela 8.7, por outro lado, mostra tanto os perfis escolhidos para cada grupo da solução ótima como as verificações de segurança de cada um destes grupos.

Tabela 8.7 – Perfis e verificação da segurança da solução ótima.

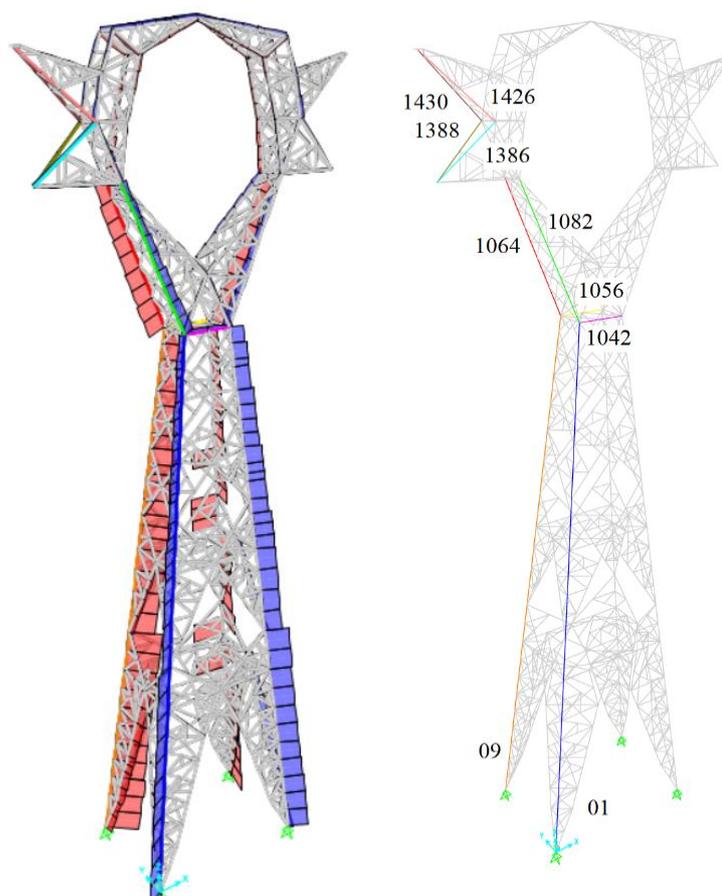
Grupo	Variável de proj.	Perfil correspondente	NtSd máx (kN)	NtRd (kN)	NtSd/NtRd	NcSd máx (kN)	NcRd (kN)	NcSd/NcRd
1	32	L127x127x9,52	728.31	802.32	0.908	578.85	809.07	0.72
2	16	L75x75x5,0	81.6	196.24	0.416	80.58	115.33	0.70
3	17	L65x65x6,0	85.96	195.62	0.439	85.33	91.56	0.93
4	2	L45x45x3,0	10.99	60.36	0.182	11.48	13.12	0.88
5	1	L40x40x3,0	5.56	51.98	0.107	5.27	22.18	0.24
6	1	L40x40x3,0	7.07	51.98	0.136	7.67	8.03	0.96
7	16	L75x75x5,0	6.66	196.24	0.034	6.61	79.1	0.08
8	17	L65x65x6,0	76.95	176.05	0.437	73.31	84.92	0.86
9	9	L60x60x4,0	44.94	108.43	0.414	43.59	53.25	0.82
10	11	L65x65x4,0	43.13	119.6	0.361	41.51	44.09	0.94
11	7	L50x50x4,0	45.51	86.07	0.529	44.52	45.39	0.98
12	11	L65x65x4,0	107.69	722.09	0.149	86.67	500.28	0.17
13	7	L50x50x4,0	49.89	86.07	0.580	48.98	57.5	0.85
14	32	L127x127x9,52	345.83	722.09	0.479	384.9	472.49	0.81
15	1	L40x40x3,0	14.46	51.98	0.278	14.34	18.63	0.77
16	27	L90x90x8,0	340.28	416.15	0.818	307.54	313.04	0.98
17	7	L50x50x4,0	31.34	90.54	0.346	31.29	44.03	0.71
18	1	L40x40x3,0	20.35	48.62	0.419	21.19	33.79	0.63
19	13	L60x60x5,0	124.55	136.09	0.915	98.28	117.55	0.84
20	1	L40x40x3,0	17.98	51.98	0.346	18.49	25.27	0.73
21	1	L40x40x3,0	10.87	51.98	0.209	10.23	22.22	0.46
22	7	L50x50x4,0	26.75	86.07	0.311	27.12	31.21	0.87
23	18	L80x80x5,0	160.58	190.03	0.845	127.94	157.7	0.81
24	1	L40x40x3,0	9.18	51.98	0.177	9.51	10.68	0.89
25	1	L40x40x3,0	17.37	51.98	0.334	23.01	39.77	0.58
26	16	L75x75x5,0	107.03	176.61	0.606	75.57	98.74	0.77
27	18	L80x80x5,0	78.67	211.14	0.373	81.11	145.11	0.56
28	25	L90x90x7,0	40.39	300.97	0.134	48.68	153.85	0.32
29	5	L45x45x4,0	31.63	83.21	0.380	32.59	40.44	0.81
30	1	L40x40x3,0	6.53	48.62	0.134	8.07	29.86	0.27

(fonte: autor)

A verificação de segurança apresentada na tabela é feita com o elemento mais solicitado de cada grupo e sua respectiva resistência a esta mesma solicitação. Desta forma, é mostrado também qual o grau de aproveitamento deste perfil, representado por uma escala de cores. Cabe salientar que o número apresentado na segunda coluna corresponde ao valor da variável de projeto obtido, que corresponderá a um determinado perfil na listagem de perfis implementada no algoritmo. Elementos de grupos cujo aproveitamento se aproximam de 100% da capacidade resistente tem como restrições críticas as de Estado Limite Último (tração ou compressão). Os demais grupos tiveram como restrição crítica a esbeltez da peça, função da geometria da estrutura.

Para rastrear onde ocorreram esforços solicitantes expressivos, foram selecionados alguns elementos da torre. Desta forma, chegam-se aos elementos destacados na Figura 8.12, onde é mostrado também, na Tabela 8.8, os esforços internos máximos, dentre todas as combinações.

Figura 8.12 – Rastreamento das solicitações máximas (E) e elementos escolhidos (D).



(fonte: autor)

Tabela 8.8 – Esforços máximos obtidos nos elementos rastreados, dentre todas as combinações.

Elem.	Grupo	Ocorrência	Perfil	NtSd (kN)	NtRd (kN)	NcSd (kN)	NcRd (kN)
1	1	Montantes Principais Pernas	L127x127x9,52	61.63	802.32	554.4	691.07
9	1	Montantes Principais Pernas	L127x127x9,52	153.48	802.32	507.44	691.07
1042	12	Diagonais em X Superior Frontal	L127x127x9,52	68.02	722.09	72.56	500.28
1056	12	Diagonais em X Superior Frontal	L127x127x9,52	107.69	722.09	31.81	500.28
1064	16	Terço Inferior Cabeça	L90x90x8,0	173.24	416.15	160.73	313.04
1082	16	Terço Inferior Cabeça	L90x90x8,0	58.87	416.15	261.89	313.04
1386	28	Mísula Superior	L90x90x7,0	13.46	300.97	48.68	153.85
1388	28	Mísula Superior	L90x90x7,0	39.62	300.97	35.35	153.85
1426	29	Sustentação Para raios	L45x45x4,0	21.98	83.21	32.59	40.44
1430	29	Sustentação Para raios	L45x45x4,0	28.48	83.21	13.68	40.44

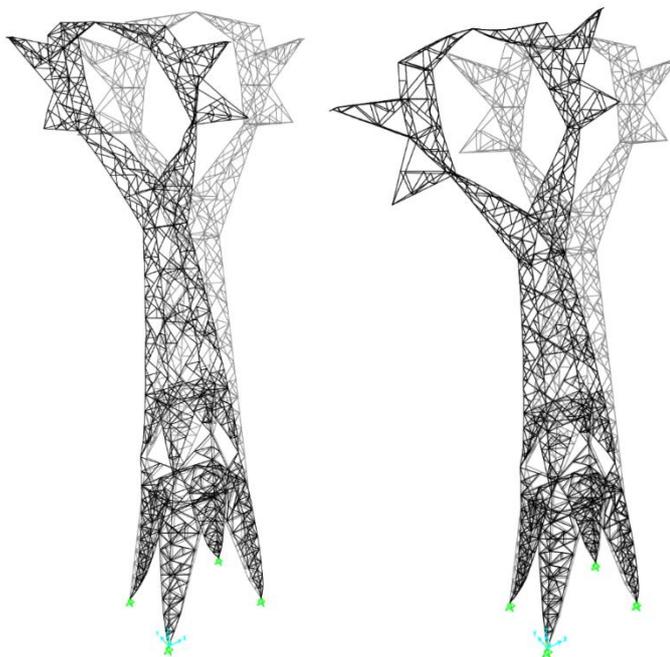
(fonte: autor)

Como esperado, os maiores esforços solicitantes ocorreram nos grupos referentes aos montantes principais, que compõem as pernas da torre. Elementos que fazem a transição do corpo para a cabeça da torre, como as diagonais na região superior dela, também absorvem esforços expressivos, exigindo seções mais robustas a fim de evitar o descolamento da cabeça da torre. Por fim, nota-se que elementos que sustentam os cabos condutores possuem seções maiores que as que sustentam cabos para-raios. Isto é esperado, visto que o peso e a seção dos cabos para-raios são menores que os condutores. Além disto, os três feixes de condutores possuem 4 cabos cada, enquanto cada feixe de para-raios possui apenas um cabo de guarda.

8.1.7 Avaliação das Frequências Naturais

De maneira geral, para todos os algoritmos, à medida que se obtinham soluções mais leves, suas respectivas frequências naturais aumentaram. Nota-se que a menor frequência natural obtida foi de 1,18 Hz, enquanto a maior foi de 1,62 Hz. Logo, as frequências naturais, em todas as simulações, atendem ao valor mínimo de 1,00 Hz, recomendado pela norma NBR 8850. A Figura 8.13 mostra o primeiro e o segundo modos de vibração do suporte da melhor solução obtida, cujas frequências naturais foram de 1,62 e 2,41 Hz, respectivamente. Nota-se que o primeiro modo flexiona a torre na direção longitudinal da linha de transmissão, enquanto o segundo modo a tensiona na direção transversal. Cabe reforçar o fato de que não foi incluída a contribuição dos cabos na forma modal da estrutura.

Figura 8.13 – Primeiro (E) e segundo (D) modos de vibração da torre.



(fonte: autor)

8.2 ESTUDO PARAMÉTRICO

Para realizar o estudo paramétrico se escolheu o algoritmo GNDO, por ser o com melhor desempenho para este problema em específico. Assim sendo, variando de forma isolada algumas características do problema, se fez um estudo paramétrico do impacto de cada uma destas alterações, tanto nos resultados do problema como no comportamento do processo de otimização. Para isto, foram feitos 30 processos de otimização independentes, com 150 partículas e 100 iterações cada uma. Cabe salientar que, ao contrário dos algoritmos DE, PSO e QPSO, que necessitam da inserção de um ou mais parâmetros heurísticos calibrados para funcionarem adequadamente, o GNDO não necessita desta calibragem, uma vez que não possui parâmetros heurísticos em sua formulação.

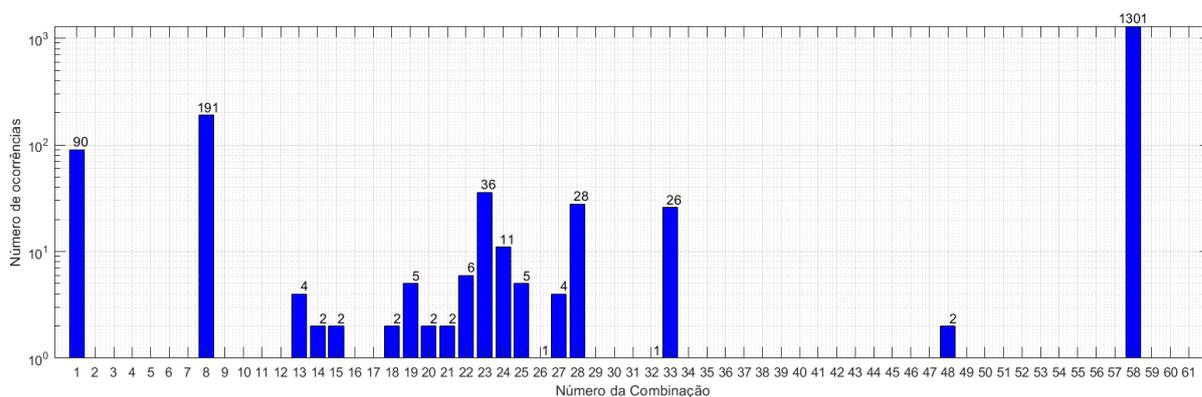
As propriedades modificadas em cada problema para o estudo paramétrico foram:

- Velocidade básica do vento: aumentou de 30 m/s para 45 m/s;
- Quantidade de hipóteses de cálculo: remoção das combinações que consideram vento a 15 e 30 graus, ou seja, de 61 para 47 combinações;
- Variáveis de projeto: redução de 30 para 20 variáveis de projeto, ou seja, grupos de barras que compõem a estrutura.

8.2.1 Efeito do Aumento da Velocidade Básica do Vento

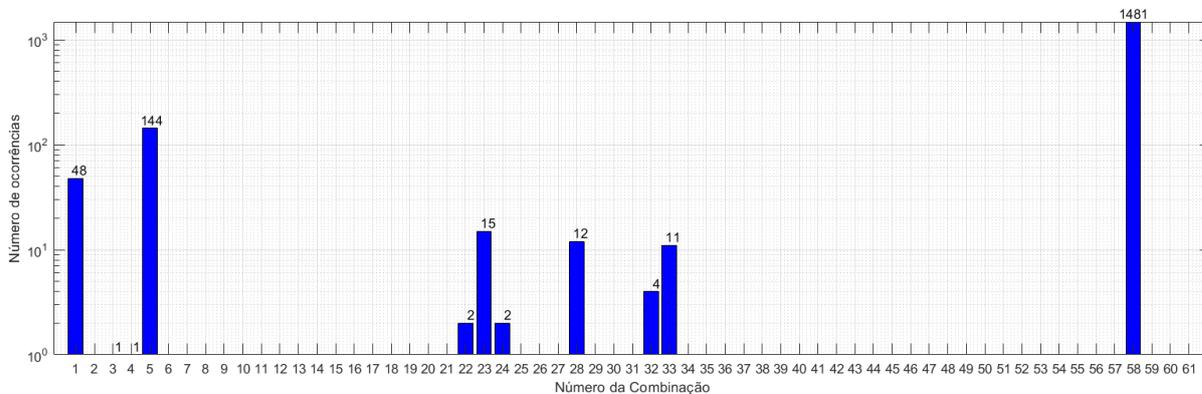
Como é de se esperar, a simulação com vento a 45 m/s gerou soluções mais pesadas. A melhor solução ficou em torno de 14 toneladas, ou seja, um aumento de, aproximadamente 40% em relação à simulação com vento a 30 m/s. De maneira complementar, os gráficos das Figuras 8.14 e 8.15 mostram, respectivamente, as combinações críticas obtidas para a simulação original e para a com velocidade básica maior.

Figura 8.14 – Combinações críticas, para vento a 30 m/s.



(fonte: autor)

Figura 8.15 – Combinação crítica, para vento a 45 m/s.



(fonte: autor)

Observa-se que, ao aumentar a velocidade, a direção do vento de 90° se torna determinante da seção transversal de mais elementos do que em relação à simulação com velocidade básica menor. Este fato é corroborado pela distribuição das combinações críticas, no caso de vento a 45 m/s, que se concentrou nas combinações 5, 23, 28 e 33, referentes a hipóteses com ventos a 90°, seja com cabos rompidos ou não.

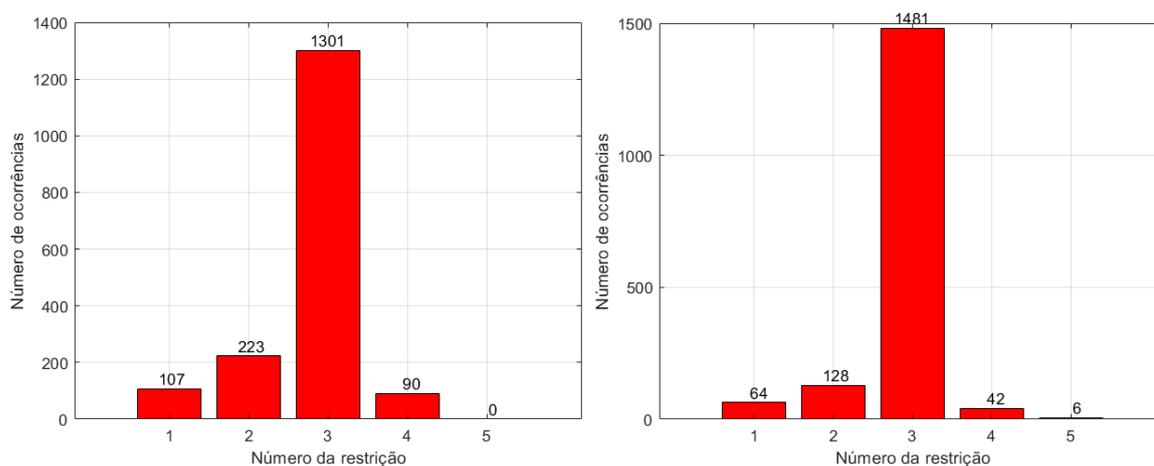
No caso do vento a 30 m/s, por outro lado, nota-se uma maior dispersão das combinações críticas, variando entre as hipóteses 13 e 33, correspondente às hipóteses de cabos rompidos

com vento reduzido. Os elementos que tinham como combinação crítica a 58, de vento a 90° EPS, considerando Estado Limite de Serviço, se mantiveram na mesma posição, apenas com pequenas variações nos valores.

Barras que absorvem poucos esforços e, portanto, resultam em seções menores, são governadas pelo Estado Limite de Serviço de deslocamento no topo da torre. Isto pode ser justificado pelo fato de, indiretamente, a seção transversal de cada barra interferir na rigidez global e, conseqüentemente, nos deslocamentos que a estrutura sofre ao se submeter aos carregamentos de projeto.

Apesar disto, conforme mostrado no gráfico da Figura 8.16, não houve variações significativas na restrição crítica. Ou seja, as restrições dominantes na verificação estrutural, de forma geral, foram as de compressão e tração, além da do Estado Limite de Serviço (ELS), nas duas simulações. Cabe salientar que a restrição crítica número 3 é a que corresponde ao ELS de deslocamento máximo no topo da estrutura.

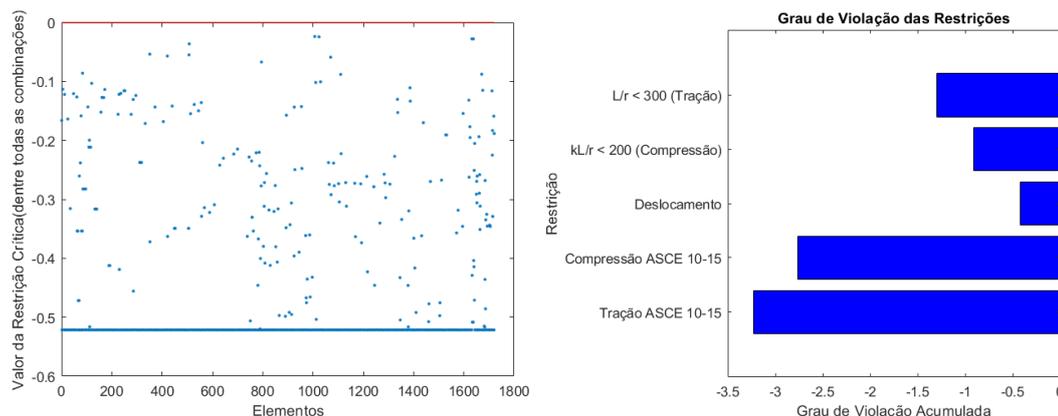
Figura 8.16 – Restrições críticas entre os elementos com vento a 30 m/s (E) e 45 m/s (D).



(fonte: autor)

Nenhum dos elementos da solução ótima foi penalizado. De maneira semelhante à da simulação com vento a 30 m/s, o grau de violação de todos os elementos desta nova simulação ficou negativo, porém próximos de violar as restrições do problema. Os gráficos da Figura 8.17 ilustram estes comentários.

Figura 8.17 – Grau de violação de cada elemento (E) e acumulado (D) para vento a 45 m/s.



(fonte: autor)

Os elementos mais próximos de não atender à restrição foram os das pernas da torre. Para estes elementos, a restrição crítica foi a de compressão conforme a ASCE 10 (2015). O Quadro 8.2 mostra o grau de violação, e a respectiva combinação crítica.

Quadro 8.2 – Violação e a respectiva combinação crítica de alguns elementos das pernas.

Elem.	Descrição	Violação	Comb. Crít.	Estado do Cabo	Direção e Tipo de Vento
1007	Montantes Principais Pernas	-0.0237	28	Cabo condutor 2 rompido	Vento 90° EPS reduzido
1024	Montantes Secundários Pernas Frontal	-0.0243	28	Cabo condutor 2 rompido	Vento 90° EPS reduzido
1632	Montantes Secundários Pernas Frontal	-0.0277	5	Cabos intactos	Vento 90° EPS
1638	Montantes Principais Pernas	-0.0279	5	Cabos intactos	Vento 90° EPS
508	Montantes Secundários Pernas Lateral	-0.0362	4	Cabos intactos	Vento 45° EPS
351	Montantes Secundários Pernas Lateral	-0.0537	5	Cabos intactos	Vento 90° EPS
507	Montantes Secundários Pernas Lateral	-0.0550	3	Cabos intactos	Vento 30° EPS
421	Montantes Secundários Pernas Lateral	-0.0569	5	Cabos intactos	Vento 90° EPS
1070	Montantes Principais Pernas	-0.0589	5	Cabos intactos	Vento 90° EPS
795	Montantes Secundários Pernas Frontal	-0.0671	23	Cabo condutor 1 rompido	Vento 90° EPS reduzido

(fonte: autor)

8.2.2 Efeito da Redução do Número de Combinações

Neste estudo se retirou as combinações que incluíam ventos nas direções 15° e 30°. Isto foi feito a fim de verificar se a inclusão ou não destas combinações gera impacto significativo no resultado ótimo. Logo, nesta simulação, ao invés das 61 combinações, foram utilizadas apenas 47. Desta forma, chegou-se na listagem de combinações mostrada no Quadro 8.3.

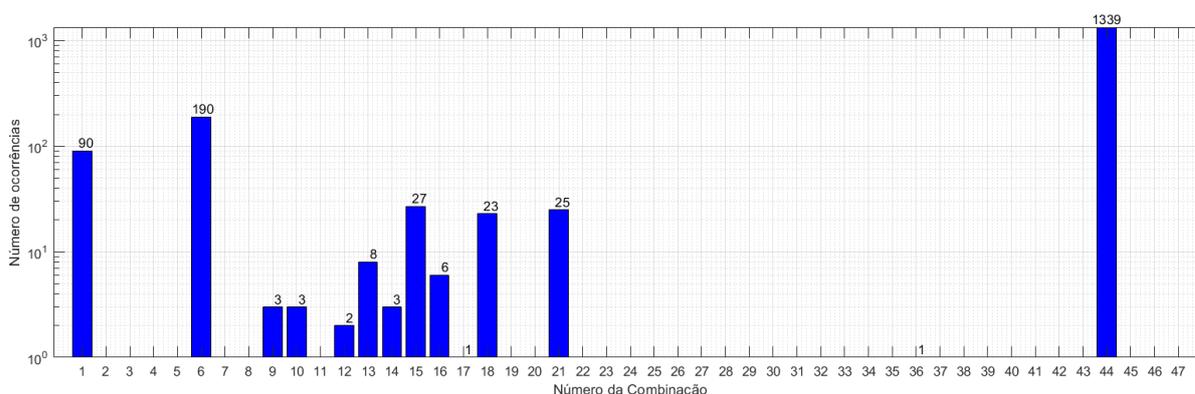
Quadro 8.3 – Listagem das combinações adotadas para a nova simulação.

ID	Tipo por extenso	Descrição cabo	Descrição Vento
1	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 0° EPS
2	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 45° EPS
3	Combinações Últimas Normais	Cabos intactos	Vento 90° EPS
4	Combinações Últimas Excepcionais	Cabos intactos	Vento 0° TS
5	Combinações Últimas Excepcionais	Cabos intactos	Vento 45° TS
6	Combinações Últimas Excepcionais	Cabos intactos	Vento 90° TS
7	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 0° EPS reduzido
8	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 45° EPS reduzido
9	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 90° EPS reduzido
10	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 0° EPS reduzido
11	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 45° EPS reduzido
12	Combinações Últimas Normais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 90° EPS reduzido
13	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 0° EPS reduzido
14	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 45° EPS reduzido
15	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 90° EPS reduzido
16	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 0° EPS reduzido
17	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 45° EPS reduzido
18	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 90° EPS reduzido
19	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 0° EPS reduzido
20	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 45° EPS reduzido
21	Combinações Últimas Normais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 90° EPS reduzido
22	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 0° TS reduzido
23	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 45° TS reduzido
24	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 1 rompido	Vento 90° TS reduzido
25	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 0° TS reduzido
26	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 45° TS reduzido
27	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo para-raios 2 rompido	Vento 90° TS reduzido
28	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 0° TS reduzido
29	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 45° TS reduzido
30	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 1 rompido	Vento 90° TS reduzido
31	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 0° TS reduzido
32	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 45° TS reduzido
33	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 2 rompido	Vento 90° TS reduzido
34	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 0° TS reduzido
35	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 45° TS reduzido
36	Combinações Últimas Excepcionais	Cabo condutor 3 (central) rompido	Vento 90° TS reduzido
37	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo para-raios 1	Sem vento
38	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo para-raios 2	Sem vento
39	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo condutor 1	Sem vento
40	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo condutor 2	Sem vento
41	Combinações Últimas de Construção	Montagem do cabo condutor 3 (central)	Sem vento
42	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 0° EPS
43	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 45° EPS
44	Combinações Frequentes de Serviço	Cabos intactos	Vento 90° EPS
45	Combinações Raras de Serviço	Cabos intactos	Vento 0° TS
46	Combinações Raras de Serviço	Cabos intactos	Vento 45° TS
47	Combinações Raras de Serviço	Cabos intactos	Vento 90° TS

(fonte: autor)

Utilizando metodologia semelhante à do item anterior, chegou-se no gráfico de combinações críticas mostrado na Figura 8.18. Nele é possível observar que houveram 101 ocorrências entre as combinações 9 e 21, referentes às hipóteses de cabos rompidos. Por outro lado, na simulação original, 137 elementos estiveram nesta mesma faixa. Outro fato importante é que, em ambas as simulações, as combinações com ventos a 0° e 90° foram determinantes no dimensionamento de algumas barras. Desta forma, infere-se que a inclusão de direções intermediárias não afeta os resultados do projeto em estudo.

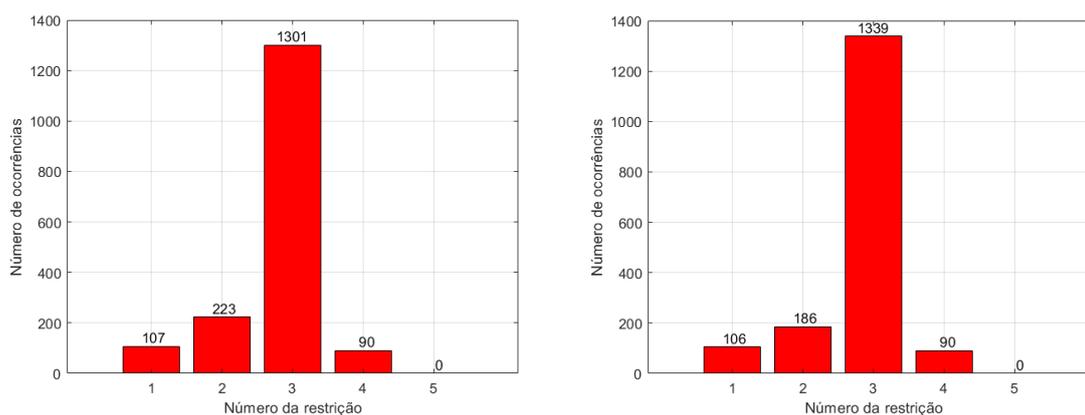
Figura 8.18 – Gráfico de Combinações Críticas para a simulação de 47 combinações.



(fonte: autor)

A Figura 8.19, por outro lado, faz um comparativo entre os gráficos de restrições críticas para as duas simulações, ou seja, com 61 e 47 combinações, respectivamente. Nota-se que novamente há uma distribuição maior entre as restrições 1 (de tração) e 2 (de compressão).

Figura 8.19 – Restrições críticas entre os elementos com 61 combinações (E) e 47 (D).



(fonte: autor)

Além disso, todos os elementos que têm a restrição 3 (de deslocamento máximo no topo) como crítica tiveram a combinação 44 (frequente de serviço com vento EPS a 90°) como crítica também. Mesmo assim, o número de ocorrências em cada restrição crítica não sofreu mudanças significativas entre as duas simulações.

8.2.3 Efeito da Redução do Número de Variáveis de Projeto

A quantidade de grupos, ou variáveis de projeto, foi reduzida a fim de verificar a real necessidade, para o caso em estudo, de subdividir a estrutura em vários grupos ou não. No Quadro 8.4 é mostrada a divisão original e a nova. Grupos com marcação em cinza compõem os grupos fixos, ou seja, não fazem parte do processo de otimização. Desta forma, chegou-se na lista de variáveis de projeto mostrada no Quadro 8.4.

Quadro 8.4 – Comparação entre as simulações com 30 (E) e 20 grupos (D).

Grupo (30 Variáveis de Projeto)	ID	Grupo (20 Variáveis de Projeto)	ID
Montantes Principais Pernas	1	Montantes Principais Pernas	1
Montantes Secundários Pernas Frontal	2	Montantes Secundários	2
Montantes Secundários Pernas Lateral	3	Diagonais Internas Pernas	3
Diagonais Internas Pernas 1	4	Travamento Pernas com Tronco	4
Diagonais Internas Pernas 2	5	Diagonais em X Inferior	5
Diagonais Internas Pernas 3	6	Diagonais em X Intermediário	6
Travamento Pernas com Tronco	7	Diagonais em X Superior Frontal	7
Diagonais em X Inferior Frontal	8	Diagonais Internas de União da Cabeça	8
Diagonais em X Inferior Lateral	9	Terço Inferior Cabeça	9
Diagonais em X Intermediário Frontal	10	Diagonais Internas Terço Inferior Cabeça	10
Diagonais em X Intermediário Lateral	11	Travamento Terço Inferior Cabeça	11
Diagonais em X Superior Frontal	12	Terço Intermediário Cabeça	12
Diagonais em X Superior Lateral	13	Diagonais Internas Terço Intermediário Cabeça	13
Diagonais Internas de União da Cabeça 01	14	Travamento Terço Intermediário Cabeça	14
Diagonais Internas de União da Cabeça 02	15	Terço Superior Cabeça	15
Terço Inferior Cabeça	16	Diagonais Internas Terço Superior Cabeça	16
Diagonais Internas Terço Inferior Cabeça	17	Travamento Terço Superior Cabeça	17
Travamento Terço Inferior Cabeça	18	Mísula Inferior	18
Terço Intermediário Cabeça	19	Mísula Superior	19
Diagonais Internas Terço Intermediário Cabeça 1	20	Sustentação Para raios	20
Diagonais Internas Terço Intermediário Cabeça 2	21	Redundantes L40x40x3	21
Travamento Terço Intermediário Cabeça	22	Redundantes L45x45x3	22
Terço Superior Cabeça	23	Redundantes L50x50x3	23
Diagonais Internas Terço Superior Cabeça	24	Redundantes L50x50x4	24
Travamento Terço Superior Cabeça 1	25	Redundantes L60x60x4	25
Travamento Terço Superior Cabeça 2	26		
Mísula Inferior	27		
Mísula Superior	28		
Sustentação Para raios	29		
Diagonais Internas Sustentação Para-raios	30		
Redundantes L40x40x3	31		
Redundantes L45x45x3	32		
Redundantes L50x50x3	33		
Redundantes L50x50x4	34		
Redundantes L60x60x4	35		

(fonte: autor)

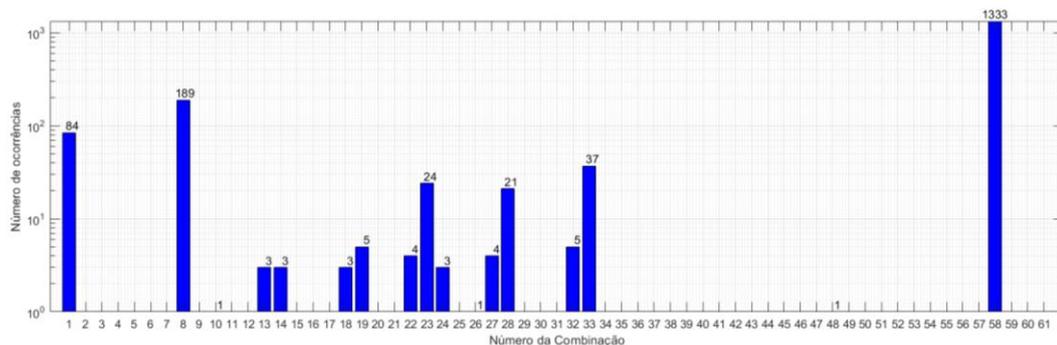
Nota-se, pelo Quadro 8.4, que na primeira simulação parte dos grupos foram separados em frontal e lateral. Enquanto que, na simulação nova, tanto a região frontal como a lateral da torre foram inseridas no mesmo grupo. Além disso, as diagonais e as pernas, que antes estavam divididas em três partes, foram colocados em um grupo apenas.

Logo, ao realizar a otimização, chegou-se no resultado ótimo de 9,952 toneladas. Este valor é 0,398 % maior que o obtido na otimização original do estudo de convergência. Isto mostra que, para este projeto, seria possível reduzir a quantidade de variáveis de projeto, sem afetar significativamente os resultados, mantendo os parâmetros de entrada no algoritmo de otimização (30 repetições, 150 partículas, 100 iterações).

Porém, devido ao fato de se manter os dados de entrada, o tempo de processamento foi de 32,61 horas para as 30 repetições, semelhante ao da otimização original, que foi de 32,40 horas. Isto é esperado, visto que a análise estrutural implementada no *MATLAB*, que é o mais impactante no tempo de processamento, não sofre interferência da quantidade de grupos, e sim da quantidade de elementos, nós, entre outros.

Complementando a análise anterior, é mostrado na Figura 8.20 o gráfico de combinações críticas para a simulação nova com 20 variáveis de projeto. Nota-se que, mesmo reduzindo a quantidade de grupos, as combinações críticas não alteraram significativamente os resultados.

Figura 8.20 – Gráfico de Combinações Críticas, para 20 variáveis de projeto.



(fonte: autor)

Isto se deve, novamente, pelo fato de que a análise estrutural não é afetada pela divisão dos grupos, na modelagem do problema de otimização. A única interferência se dá na alocação dos perfis nos elementos da estrutura, que é função do perfil alocado em cada grupo que foi definido na modelagem do problema.

Cabe salientar que esta redução de variáveis de projeto deve ser feita com visão crítica. Se ocorrer de, por exemplo, a colocação de uma barra de contraventamento e o montante

principal no mesmo grupo, a primeira resultará com um perfil significativamente mais robusto, mesmo que esta barra de contraventamento não absorva esforços elevados. Isto se deve ao fato de que o perfil do montante principal será o determinante para o grupo, uma vez que este elemento absorverá mais esforços, exigindo um perfil maior para que não seja penalizado. Por consequência, a solução ótima resultaria em uma estrutura mais pesada.

8.2.4 Comparação dos Resultados

Para fins de comparação, a Tabela 8.9 mostra os principais valores obtidos com a simulação original, feita no estudo de convergência, e as três variações propostas neste estudo. Reitera-se que todas as simulações foram feitas considerando 30 repetições, 150 partículas e 100 iterações, com o objetivo de minimizar as incertezas aleatórias devido ao caráter estocástico dos operadores do algoritmo de otimização.

Tabela 8.9 – Comparação entre as simulações.

Simulação	Descrição	Melhor massa (kg)	Média (kg)	Desv. Pad. (kg)	Freq. Nat (Hz)
	Estudo de convergência				
I	– Vento a 30 m/s – 61 Combinações – 30 Variáveis de projeto	9913.06	10341.85	290.49	1.57
II	Aumento da velocidade básica do vento	13991.09	14411.47	223.38	1.93
III	Redução do número de Combinações	9861.266	10296.17	324.16	1.57
IV	Redução do número de variáveis de projeto	9952.49	10211.60	209.06	1.61

(fonte: autor)

Observa-se que tanto a simulação III como a IV sofreram poucas variações no resultado ótimo, sendo este igual a, aproximadamente, 9,9 toneladas. Isto indica que seria possível, para este projeto, remover algumas combinações e reduzir o número de variáveis sem afetar significativamente os resultados finais. Porém, isto não significa que em outra estrutura de torre estas combinações não sejam relevantes. Por exemplo, torres que não possuem vãos consecutivos alinhados poderiam sofrer esforços adicionais que resultaria em outra direção crítica da ação do vento.

Mesma conclusão poderia ser obtida para a frequência natural, como mostrado na Tabela 8.9. Por outro lado, neste projeto, ao reduzir o número de variáveis, o desvio padrão consequentemente reduziu 38,95 % em relação à simulação I. Isto torna evidente que, quanto menos grupos são incluídos no processo de otimização, menor se torna a dispersão dos resultados em torno da média, uma vez que menos elementos são passíveis de sofrer variação nos seus valores.

9 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou explorar diversos aspectos a respeito da otimização estrutural de torres de linhas de transmissão. Isto foi feito a fim de incorporar técnicas de otimização estrutural a metodologias usuais de projeto, adotadas em escritórios de Engenharia. Por esta razão, se investigou sobre as hipóteses de cálculo e combinações mais relevantes no projeto de uma torre de suspensão, além da modelagem da ação do vento para fins de aplicação em engenharia estrutural. Por outro lado, incorporou-se ao trabalho os métodos de dimensionamento e verificação da capacidade resistente dos perfis recomendados pelas principais normas a respeito de projetos de LT. Assim sendo, foi feito um estudo de convergência utilizando quatro algoritmos metaheurísticos: DE, PSO, GNDO e QPSO. Na sequência, com o algoritmo GNDO, que teve melhor desempenho para este projeto, foi feito um estudo paramétrico, através de três simulações: aumentando a velocidade básica do vento, reduzindo o número de combinações e reduzindo o número de variáveis de projeto.

O estudo de convergência evidenciou que os algoritmos de otimização podem possuir desempenhos distintos, a depender da formulação do problema de otimização, no que se refere à definição da função objetivo, das variáveis de projeto e das restrições. Ou seja, algoritmos que são adequados a um determinado tipo de problema podem não ser adequados a outros tipos. A solução ótima obtida com o GNDO foi de 9,8 toneladas, coerente com a prática de projeto, que estima que torres deste modelo devem ter entre 9,7 e 10,5 toneladas. Cabe salientar que este valor não inclui o peso dos cabos da LT.

O estudo paramétrico mostrou que o refinamento do problema deve ser feito com visão crítica. Isto é evidenciado pelo fato de a subdivisão criteriosa dos grupos interferir pouco nos resultados gerados. Porém, se a divisão não for feita de maneira adequada, há o risco de os resultados se tornarem menos adequados ao projeto. Em contrapartida, a divisão excessiva dos grupos pode tornar o tempo de processamento proibitivo para o processo de otimização, por aumentar a quantidade de variáveis de projeto sobrecarregando, conseqüentemente, o algoritmo de otimização.

Outro fato importante é a consideração adequada das hipóteses de cálculo e combinações. No estudo paramétrico se mostrou que, para este projeto em específico, a consideração de ventos nos ângulos de 15° e 30° não foi importante para este problema de otimização estrutural, visto que outras combinações foram mais relevantes, algo não possível de se identificar, a priori, no

projeto. Logo, poderiam ser descartados da listagem de combinações e mesmo assim não interferir nos resultados. Porém, combinações como as de vento incidindo frontalmente à torre se tornam essenciais de serem incluídas. Além disto, a classificação das combinações é importante a fim de aplicar os coeficientes de ponderação adequados. Considerar uma combinação excepcional como normal, por exemplo, além de utilizar coeficientes maiores, não gerarão resultados econômicos e nem fidedignos aos esforços que de fato a estrutura estará submetida.

Soma-se a isto o fato de que a inclusão de parâmetros mais conservadores faz com que a estrutura se torne menos econômica. Isto é mostrado pelo estudo com vento a 45 m/s, que gerou uma torre 40% mais pesada que a torre original.

Por fim, os conceitos de otimização abordados neste trabalho podem se estender aos mais diversos tipos de estruturas, obtendo projetos mais eficazes e econômicos. Pode-se citar como exemplo: coberturas metálicas, estruturas aperticadas, edificações dos mais diversos portes, entre outros tipos de projeto. Porém, cabe salientar que isso não exclui o papel do engenheiro no trabalho de projetar a estrutura. A visão crítica do engenheiro é fundamental no estudo de concepções que propiciem um comportamento adequado e a correta distribuição dos esforços, de tal forma que a estrutura garanta segurança, funcionalidade e desempenho.

Como sugestões de trabalhos futuros pode-se citar:

- a) Inclusão de efeitos dinâmicos devido a rupturas de cabos, ventos sinóticos, ventos não sinóticos, sismos, dentre outros, no algoritmo de otimização;
- b) Consideração da análise não linear geométrica e física na otimização estrutural de torres de linhas de transmissão;
- c) Modelagem da rigidez das fundações e/ou da rigidez não linear das ligações aparafusadas, no modelo estrutural da torre, e sua inclusão em processos de otimização estrutural;
- d) Estudos de otimização estrutural de outros tipos estruturais de torres de linhas de transmissão;
- e) Estudos de otimização estrutural de torres incluindo a consideração de grupamentos otimizados com restrições de cardinalidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422**: projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 8842**: suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Resistência ao carregamento. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 8850**: execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Procedimentos. Rio de Janeiro, 1985.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **ASCE 10: Design of latticed steel transmission structures**. Reston, Virginia, 2015.

ARORA, J. S. **Introduction to Optimum Design**. 4ª ed. Elsevier. Iowa City, Iowa. 2017. 933p.

BARROS, V. V. B. **Optimization of guyed transmission line towers with geometric nonlinearity**. 2021. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

BLESSMANN, J. **O Vento na Engenharia Estrutural**. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 165p.

CARLOS, T. B. **Análise dinâmica de torres estaiadas de linhas de transmissão submetidas à ruptura de cabos**. 2015. 218p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RESEAUX ÉLECTRIQUES. **CIGRÉ Technical Brochure 324: Sag-tension calculation methods for overhead lines**. Task Force B2.12.3, 2ª ed, 2016.

_____. **CIGRÉ Technical Brochure 350: How Overhead Lines Respond to Localized High Intensity Winds – Basic Understanding**. Task Force B2.06.09, 1ª ed, 2008.

_____. **SC22 WG16 - Meteorology for overhead lines- Draft Report on Current Practices regarding Frequencies and Magnitude of High Intensity Winds**. Agosto, 2002.

COMPUTERS AND STRUCTURES INC. **SAP2000**: software para análise estrutural e dinâmica, linear e não-linear por elementos finitos – Versão 16.0.0. Berkeley, USA, 2013.

COUCEIRO, I.; PARÍS, J.; MARTINEZ, S.; COLOMINAS, I.; NAVARRINA, F.; CASTELEIRO, M. **Structural optimization of lattice steel transmission towers**. *Engineering Structures* v. 117, p. 274–286, Elsevier, 2016.

DAS, S.; SUGANTHAN, N. **Differential Evolution: A Survey of the State-of-Art**. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 15, n. 1. February, 2011.

EBERHART, R. C.; SHI, Y. **A modified particle swarm optimizer**. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Anchorage, Alaska, p. 69-73, 1998.

FURLANETTO, A.; GOMES, H. M.; ALMEIDA, F. S. **Design optimization of tapered steel wind turbine towers by QPSO algorithm**. *International Journal of Steel Structures*, v. 1, p. 1-12, 2020.

GERDAU, Açominas. **Catálogo de Barras e Perfis**. 2015.

GOMES, H. M. **Truss optimization with dynamic constraints using a particle swarm algorithm**. *Expert Systems with Applications*, v. 38, p. 957-968, 2011

GONTIJO, C. R. **Contribuição à Análise e Projeto de Torres Autoportantes de Linhas de Transmissão**. 1994. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1994.

HOLMES, J.D.; OLIVER, S.E. **An empirical model of a downburst**. *Engineering Structures*, v. 22, p. 1167-1172, 2000.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS (IEEE). **IEEE Guide for Overhead AC Transmission Line Design**. Estados Unidos, 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60826**: Design criteria of overhead transmission lines. 4^a ed. Geneva, Switzerland, 2017. 243p.

IRVINE, H. M., CAUGHEY, T. L. **The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable**. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A341, p. 299-315. Londres, Inglaterra, 1974.

ISSA, M. V. S. **On the Accuracy and Efficiency of Cross-Entropy Method for Structural Optimization**, 2019. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Centro de Tecnologia e Ciências, Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

KAMINSKI, J. **Incertezas de Modelo na Análise de Torres Metálicas Treliçadas de Linhas de Transmissão**, 2007. 362p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

_____; MIGUEL, L. F. F.; MENEZES, R. C. R.; MIGUEL, L. F. F. **Rotina computacional para análise dinâmica de estruturas de linhas de transmissão**. XIII ERIAC, 2009.

KELLY, S. G. **Mechanical Vibrations: Theory and Applications, SI Edition**. Cengage Learning, Stamford, Connecticut, USA, 2012

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Particle Swarm Optimization**. Proceedings of the IEEE international conference on neural networks, v. 4, p. 1942-1948, 1995.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. São Paulo. Editora Edgard Blücher, 1992.

LANGLOIS, S. **Design of Overhead Transmission Lines Subject to Localized High Intensity Wind**, 2007. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – *Department of Civil Engineering and Applied Mechanics*, McGill University, Montréal.

LOREDO-SOUZA, A. M. **The Behaviour of Transmission Lines Under High Winds**, 1996. 218p. Tese (Doutorado em Engenharia) – University of Western Ontario, Canada.

MIGUEL, L. F. F.; MIGUEL, L. F. F.; RIERA, J. D.; KAMINSKI, J.; MENEZES, R. C. R. **Assessment of code recommendations through simulation of EPS wind loads along a segment of a transmission line**. *Engineering Structures*, v. 43, p. 1-11, 2012.

_____; MIGUEL, L. F. F.; RIERA, J. D. **Assessment of downburst wind load on tall structures**. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Ed. Elsevier, 2018.

MENDES, V. R. V. **Verificação Estrutural de uma Torre de Suspensão Treliçada conforme os Critérios da Norma IEC 60826**, 2020. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais.

MENDONÇA R., P. de T.; A. FANCELLO, A. E. **O Método de Elementos Finitos aplicado à Mecânica dos Sólidos**. Florianópolis: Orsa Maggiore, 2019.

NEXANS. **Catálogo de produtos - Cabos Condutores de Alumínio Nu**. Nexans, mai. 2013. Disponível em: http://mesindustrial.com.br/fornecedores/nexans/mes-industrial-nexans-catalogo-nus_maio-013.pdf. Acesso em 10 de julho.

PARÍS, J.; MARTÍNEZ, S.; NAVARRINA, F.; COLOMINA, I.; CASTELEIRO, M. **Structural optimization of high voltage transmission line towers considering continuum and discrete design variables**. *Computer Aided Optimum Design in Engineering XII* 59, v. 125, WIT Transactions on The Built Environment, 2012. doi:10.2495/OP120061

PINTO, A.; SILVA, J. B. G. F. S.; AMARO, R. C. P. A.; PERONA, R. M; OLIVEIRA, C. M. F.; VIANA, J. M. V.; EMERALDO, P. C. V.; RICCO, V. H. **LT 500kV Cachoeira Paulista-Adrianópolis: uma elevada capacidade de transmissão em um corredor congestionado – aspectos mecânicos**. SNPTTE: XVII – Grupo III – Grupo de Estudos de Linhas de Transmissão – GLT, Uberlândia, MG, 2003.

PRICE, K. V.; STORN, R. M. **Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces**. Journal of Global Optimization, vol. 11, p. 341-359. Springer, Berlin, 1997.

PRICE, K. V.; STORN, R. M.; LAMPINEN, J. A. **Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization**. Springer, Berlin, 2005. 543p.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. John Wiley & Sons, Inc, 4^a ed. New Jersey, 2009. 829p.

RENKAVIESKI, C.; PARPINELLI, R. **L-SHADE with Alternative Population Size Reduction for Unconstrained Continuous Optimization**. XI Computer on the Beach, 2 a 4 de setembro de 2020, Balneário Camboriú, SC, Brasil.

RESLER, D. **Influência do Modelo Mecânico na Previsão da Resposta Estática de Torres Metálicas Treliçadas de Transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia, UFRGS, 2017.

RIBEIRO, I. S.; INOUE, H.; SILVA, K. I.; ROCHA, P. A. S. **Análise Linear Elástica de Pórticos Espaciais**. XI Simpósio de Mecânica Computacional, Juiz de Fora, 2014.

RIERA, J. D. **Sobre a definição do vento para projeto estrutural na ABNT NBR 6123 (1989) e outras normas sul-americanas**. Associação Sul-Americana de Engenharia Estrutural (ASAE), Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 12, n. 3, p. 21-39, set./dez. 2016.

SAHIN, S. **CAD – Integrated size and shape optimization of steel lattice energy transmission line towers using simulated annealing**, 2016. 197p. Tese (Doutorado em Engenharia), Middle East Technical University.

SAVORY, E.; PARKE, G. A. R.; ZAINODDINI, M.; TOY, N.; DISNEY, P. **Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower**. Engineering Structures, v. 23, p. 365-375, Ed. Elsevier, 2001.

SEVES. **Catálogo de produtos - Isoladores de suspensão de vidro temperado Sediver**. Seves, 2009. Disponível em: <http://www.eletromecan.com.br/eletromecan.com.br/catalogos/isoladores/vidro-temperado/ELETROMECHAN ELECTROVIDRO Vidro Temperado Brasil.pdf>. Acesso em 10 de julho.

SINGH, K. de S. **Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão**. Publicação E.DM– 004 A/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xviii, 110 p, 2009.

SUN, J.; LAI, C.; WU, X. **Particle Swarm Optimization: Classical and Quantum Perspectives**. Chapman & Hall/CRC, 2012.

TROIAN, S. P. **Sobre a Resposta Estrutural Dinâmica de uma Torre Estaiada de Linha de Transmissão submetida a ventos do tipo EPS**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), UFRGS, 2018.

ZHANG, Y.; JIN, Z.; MIRJALILI, S. **Generalized normal distribution optimization and its applications in parameter extraction of photovoltaic models**. In: Energy Conversion and Management, Ed. Elsevier, 2020.