

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**OTIMIZAÇÃO DE TORRES AUTOPORTANTES DE AÇO PARA LINHAS  
DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

**Pedro Henrique Rocha de Menezes Braga**

Belo Horizonte

2022

Pedro Henrique Rocha de Menezes Braga

**OTIMIZAÇÃO DE TORRES AUTOPORTANTES DE AÇO PARA LINHAS DE  
TRANSMISSÃO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Hermes Carvalho

Belo Horizonte  
2022

B813o

Braga, Pedro Henrique Rocha de Menezes.

Otimização de torres autoportantes de aço para linhas de transmissão utilizando algoritmos genéticos [recurso eletrônico] / Pedro Henrique Rocha de Menezes Braga. - 2022.

1 recurso online (102 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Hermes Carvalho.

Apêndices: f. 91-102.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 87-90.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Otimização estrutural - Teses. 3. Algoritmos genéticos - Teses. 4. Linhas elétricas aéreas - Teses. 5. Treliças de aço - Teses. I. Carvalho, Hermes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"OTIMIZAÇÃO DE TORRES AUTOPORTANTES DE AÇO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS"**

Pedro Henrique Rocha Menezes Braga

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Hermes Carvalho - DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas - DEES - UFMG

Prof. Dr. Leandro Fleck Fadel Miguel - UFSC

Belo Horizonte, 06 de julho de 2022



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Fleck Fadel Miguel, Usuário Externo**, em 25/07/2022, às 14:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hermes Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 04/08/2022, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 04/08/2022, às 11:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1628912** e o código CRC **65063120**.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa, Paula, pela paciência, suporte e companheirismo, fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Jean Mark, que exerceu o valioso papel de consultor técnico, auxiliando nas definições adotadas desde a concepção inicial do trabalho.

Aos colegas Ricardo Perucci, Tiago Corradi e Sírio Ferreira, que contribuíram substancialmente em diversas etapas da implementação computacional.

Ao restante do corpo técnico e direção da Engetower, em especial ao Pedro Liberato, Paulo Liberato e Filipe Soares, pelo respaldo e incentivo.

Aos professores do PROPEEs, em especial ao meu orientador, Prof. Hermes Carvalho, pela confiança, aconselhamentos e boa relação durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

## **RESUMO**

Torres treliçadas de aço são amplamente utilizadas nas linhas de transmissão (LT's) para sustentação dos cabos condutores de energia elétrica na trajetória da linha. Neste tipo de empreendimento, é usual a utilização de uma mesma solução estrutural em múltiplos pontos ao longo da linha, o que possibilita significativa redução de custos por meio da otimização dos projetos das torres. Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia de otimização baseada no conceito dos Algoritmos Genéticos para redução do peso dos elementos de aço que compõem as torres autoportantes através da variação das dimensões da base e do topo do tronco inclinado. Para a implementação do algoritmo, foi necessário o desenvolvimento de um sistema composto por módulos de parametrização geométrica, determinação de ações, análise estrutural e dimensionamento da estrutura baseado nos critérios da norma ASCE 10-15. Simulações com um problema clássico de referência de otimização estrutural de uma torre de 25 barras foram realizadas com o objetivo de validação da metodologia proposta. Em seguida, foi realizada a avaliação do desempenho da aplicação da metodologia para a otimização de uma torre autoportante de 525 kV do tipo cara-de-gato. A comparação dos resultados com o projeto de referência de uma torre equivalente, atualmente em operação no Brasil, demonstrou a eficácia da metodologia proposta para otimização de projetos de torres autoportantes.

Palavras-chave: Otimização Estrutural, Algoritmos Genéticos, Linhas Aéreas de Transmissão, Estruturas de suspensão de LTs, Treliças de Aço.

## ***ABSTRACT***

*Steel latticed towers are widely used as supports to conductors on transmission lines. On such projects, it is usual to use the same structural solution repeatedly along the line, what allows to achieve significant cost reduction due to structure's design optimization. This work proposes the development of an optimization methodology based on the Genetic Algorithms concept to reduce self-supporting tower's self-weight through the variation of its body base and top dimensions. To execute the algorithm, it was necessary to implement a system composed of modules for geometric parameterization, determination of loads, structural analysis, and sizing accordingly to ASCE 10-15. A 25-bar truss benchmark was optimized, and the results showed that the proposed methodology is effective. Besides, the performance of the methodology to optimize a self-supporting 525 kV cat-face tower was evaluated. The comparison of the results with the project of an equivalent tower which is in operation in Brazil proved the effectiveness of the proposed methodology for self-supporting towers optimization.*

*Keywords: Structural Optimization, Genetic Algorithms, Overhead Transmission Lines, Suspension Towers, Steel Structures.*

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1: Diagrama de uma linha de transmissão (Adaptado de IEC 60826, 2017).....                       | 21 |
| Figura 2.2: Estruturas autoportante e estaiada (LABEGALINI et al., 1992).....                             | 24 |
| Figura 2.3: Estrutura de circuito trifásico simples horizontal (LABEGALINI et al., 1992)....              | 25 |
| Figura 2.4: Estruturas de circuito simples e circuito duplo verticais (LABEGALINI et al., 1992).<br>..... | 25 |
| Figura 2.5: Estruturas de circuito simples e circuito duplo triangular (LABEGALINI et al.,<br>1992).....  | 26 |
| Figura 2.6: Componentes das torres autoportantes.....   | 27 |
| Figura 2.7: Componentes das torres estaiadas.....   | 28 |
| Figura 2.8: Exemplo de otimização dimensional (CARVALHO, 2014). ....                                      | 30 |
| Figura 2.9: Exemplo de otimização dimensional e geométrica (CARVALHO, 2014).....                          | 30 |
| Figura 2.10: Exemplo de otimização dimensional, geométrica e topológica (CARVALHO,<br>2014).....          | 30 |
| Figura 2.11: Solução inicial (A) e solução otimizada (B) (COUCEIRO et al., 2016). ....                    | 37 |
| Figura 2.12: Probabilidades de seleção por roleta. ....   | 42 |
| Figura 2.13: Cruzamento de ponto único. ....  | 44 |
| Figura 2.14: Cruzamento de dois pontos. ....  | 44 |
| Figura 2.15: Cruzamento uniforme. ....  | 44 |
| Figura 3.1: Esquema simplificado do sistema de otimização.....  | 49 |
| Figura 3.2: Torre de 25 barras (Adaptado de MIGUEL; LOPEZ; MIGUEL, 2013). ....                            | 50 |
| Figura 3.3: Cromossomo da torre de 25 barras. ....  | 52 |
| Figura 3.4: Cruzamento uniforme. ....   | 54 |
| Figura 3.5: Torre de referência na composição mais alta.....  | 55 |
| Figura 3.6: Silhueta 3D da torre de 525 kV.....   | 58 |
| Figura 3.7: Faces transversal e longitudinal da estrutura da torre avaliada.....                          | 60 |
| Figura 3.8: Determinação da razão $w/t$ .....   | 64 |
| Figura 3.9: Cromossomo do AG para a torre de 525 kV.....  | 70 |
| Figura 3.10: Ângulo de fechamento dos pés .....   | 71 |
| Figura 3.11: Fluxograma de avaliação das soluções geradas. ....   | 72 |
| Figura 3.12: Fluxograma de execução do Algoritmo Genético.....  | 74 |
| Figura 4.1: Evolução do AG para a torre de 25 barras.....   | 76 |
| Figura 4.2: Solução otimizada para a torre de 25 barras. ....   | 77 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.3: Evolução do AG para a torre de 525 kV.....                  | 80  |
| Figura 4.4: Silhueta da solução otimizada para a torre de 525 kV .....  | 81  |
| Figura A.1: Esquema de aplicação de forças para hipótese 1 .....        | 92  |
| Figura A.2: Esquema de aplicação de forças para hipótese 2 .....        | 93  |
| Figura A.3: Esquema de aplicação de forças para hipótese 3 .....        | 93  |
| Figura A.4: Esquema de aplicação de forças para hipótese 3-60 .....     | 94  |
| Figura A.5: Esquema de aplicação de forças para hipótese 3-75 .....     | 94  |
| Figura A.6: Esquema de aplicação de forças para hipótese 4m .....       | 95  |
| Figura A.7: Esquema de aplicação de forças para hipóteses 4e e 4d ..... | 95  |
| Figura A.8: Esquema de aplicação de forças para hipótese 5 .....        | 96  |
| Figura A.9: Esquema de aplicação de forças para hipótese 6 .....        | 96  |
| Figura A.10: Esquema de aplicação de forças para hipótese 7 .....       | 97  |
| Figura A.11: Esquema de aplicação de forças para hipótese 8 .....       | 97  |
| Figura A.12: Esquema de aplicação de forças para hipótese 9 .....       | 98  |
| Figura A.13: Esquema de aplicação de forças para hipótese 9-60 .....    | 98  |
| Figura A.14: Esquema de aplicação de forças para hipótese 9-75 .....    | 99  |
| Figura A.15: Esquema de aplicação de forças para hipótese 10 .....      | 99  |
| Figura A.16: Esquema de aplicação de forças para hipótese 11 .....      | 100 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1: População de exemplo .....                                       | 42 |
| Tabela 3.1: Carregamentos da torre de 25 barras .....                        | 50 |
| Tabela 3.2: Grupos de projeto da torre de 25 barras .....                    | 50 |
| Tabela 3.3: Áreas de seção para a torre de 25 barras (cm <sup>2</sup> )..... | 51 |
| Tabela 3.4: Variáveis geométricas da torre de 25 barras.....                 | 51 |
| Tabela 3.5: Parâmetros básicos do projeto .....                              | 54 |
| Tabela 3.6: Componentes da torre de referência. ....                         | 56 |
| Tabela 3.7: Hipóteses de ações atuantes sobre a torre de referência.....     | 56 |
| Tabela 3.8: Materiais empregados no projeto .....                            | 57 |
| Tabela 3.9: Perfis para dimensionamento da torre de 525 kV.....              | 62 |
| Tabela 3.10: Faixas de variação das variáveis.....                           | 70 |
| Tabela 3.11: Discretização do espaço de busca para varredura. ....           | 75 |
| Tabela 4.1: Resultados da otimização da torre de 25 barras .....             | 77 |
| Tabela 4.2: Execuções do AG para a torre de 525 kV. ....                     | 79 |
| Tabela 4.3: Resultados da varredura.....                                     | 83 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |   |
|---------------|---|
| $C\#$         | Linguagem de programação C-Sharp  |
| $N_{tb}$      | Pontuação dos indivíduos do Algoritmo Genético da torre de 25 barras  |
| $P_{tb}$      | Peso próprio da torre de 25 barras  |
| $\Omega$      | Fator de penalização por infringência de restrições   |
| $\rho$        | Densidade do material; Massa específica do ar   |
| $A_i$         | Área da $i$ ésima barra   |
| $L_i$         | Comprimento da $i$ ésima barra  |
| $Pb_i$        | Penalidade por infringência da restrição de tensão máxima da torre de 25 barras   |
| $Pn_i$        | Penalidade por infringência de deslocamento nodal máximo da torre de 25 barras  |
| $F_y$         | Tensão de escoamento  |
| $F_u$         | Tensão de ruptura   |
| $F_v$         | Tensão de cisalhamento  |
| $F_a$         | Tensão máxima admissível para esforço de compressão   |
| $E$           | Módulo de elasticidade longitudinal   |
| $L$           | Comprimento destravado da barra   |
| $r$           | Raio de giração   |
| $K$           | Coefficiente de comprimento efetivo   |
| $C_c$         | Esbeltez crítica que delimita a flambagem no regime elástico e inelástico   |
| $A_n$         | Área líquida da seção   |
| $A_g$         | Área bruta da seção   |
| $d_i$         | Diâmetro dos furos da $i$ ésima linha de furação  |
| $t$           | Espessura da peça   |
| $L_b$         | Comprimento da barra  |
| $W$           | Módulo de resistência à flexão  |
| $F$           | Força de tração ou compressão atuante na barra  |
| $n_p$         | Número de parafusos na ligação  |
| $A_p$         | Área da seção do corpo do parafuso  |
| $p$           | Número de planos de cisalhamento  |
| $f$           | Fator de esmagamento  |
| $\emptyset_p$ | Diâmetro do parafuso  |
| $P$           | Peso próprio da torre em kgf  |
| $p_i$         | Peso linear do perfil adotado na $i$ ésima barra em kgf/m   |
| $M$           | Coefficiente de majoração do peso das cantoneiras   |
| $W_i$         | Razão entre o peso total sobre o peso de cantoneiras do $i$ ésimo componente<br>Razão entre o peso total do $i$ ésimo componente sobre o peso de todos os |
| $N_i$         | componentes; Número de barras que não atenderam ao critério de taxa de trabalho limite  |
| $FW$          | Força de vento máximo do painel   |
| $q_0$         | Pressão dinâmica de referência associada ao vento máximo  |
| $G_t$         | Fator de rajada   |
| $C_a$         | Coefficiente de arrasto   |
| $A_e$         | Área exposta ao vento   |
| $K_r$         | Coefficiente de correção da velocidade de referência do vento   |
| $V_r$         | Vento de referência relativo à ação de vento máximo   |
| $g$           | Aceleração da gravidade   |
| $FW_i$        | Força de vento de alta intensidade do painel  |
| $q_i$         | Pressão dinâmica de referência associada ao vento de alta intensidade   |

|         |   |
|---------|---|
| $V_i$   | Vento de referência relativo à ação de vento de alta intensidade              |
| $N$     | Pontuação atribuída à solução do Algoritmo Genético                           |
| $P_b$   | Penalização por infringência da taxa de trabalho limite das barras e ligações |
| $P_a$   | Penalização por infringência do critério de ângulo mínimo dos pés             |
| $P_r$   | Penalização por infringência da razão admissível entre as dimensões da base   |
| $N_t$   | Número total de barras da torre   |
| $\beta$ | Ângulo de fechamento dos pés  |
| $r_b$   | Razão entre as dimensões longitudinal e transversal da base da torre          |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |   |
|-------|---|
| AG    | Algoritmo Genético  |
| ASCE  | American Society of Civil Engineering                       |
| CA    | Corrente alternada  |
| CC    | Corrente contínua   |
| CIGRÉ | <i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i> |
| GB    | Gigabyte  |
| IEC   | <i>International Electrotechnical Commission</i>            |
| LT    | Linha de Transmissão  |
| NBR   | Norma Brasileira  |
| PLS   | <i>Power Line Systems</i>                                   |
| POO   | Programação orientada a objetos                             |
| PSO   | <i>Particle Swarm Optimization</i>                          |

## SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introdução.....  | 16 |
| 1.1   | Objetivo .....   | 17 |
| 1.2   | Justificativa .....  | 18 |
| 1.3   | Organização do texto .....   | 18 |
| 2     | Revisão bibliográfica.....   | 20 |
| 2.1   | Linhas de transmissão .....  | 20 |
| 2.2   | Estruturas para LT's.....  | 21 |
| 2.2.1 | Função e aspectos gerais.....  | 21 |
| 2.2.2 | Elementos constituintes .....  | 22 |
| 2.2.3 | Forças atuantes .....  | 22 |
| 2.2.4 | Tipos de estruturas.....   | 23 |
| 2.2.5 | Disposição dos condutores .....  | 24 |
| 2.2.6 | Componentes das torres.....  | 26 |
| 2.2.7 | Projeto de torres de LT's .....  | 28 |
| 2.3   | Otimização estrutural.....   | 29 |
| 2.3.1 | Tipos de otimização.....   | 29 |
| 2.3.2 | Métodos de otimização .....  | 31 |
| 2.3.3 | Pesquisas desenvolvidas com métodos de otimização aplicados a estruturas.... | 34 |
| 2.4   | Algoritmos Genéticos .....   | 38 |
| 2.4.1 | Codificação.....   | 40 |
| 2.4.2 | População inicial .....  | 40 |
| 2.4.3 | Avaliação.....   | 41 |
| 2.4.4 | Seleção.....   | 41 |
| 2.4.5 | Cruzamento.....  | 43 |
| 2.4.6 | Mutação .....  | 45 |
| 2.4.7 | Parâmetros do algoritmo.....   | 45 |
| 2.4.8 | Critérios de convergência .....  | 46 |
| 2.4.9 | Considerações finais .....   | 46 |
| 3     | Metodologia.....   | 48 |
| 3.1   | Aspectos gerais .....  | 48 |
| 3.2   | Torre de 25 barras – <i>Benchmark</i> .....                                  | 49 |
| 3.3   | Torre autoportante de 525 kV .....   | 54 |
| 3.3.1 | Torre de referência.....   | 54 |
| 3.3.2 | Variação da geometria .....  | 58 |
| 3.3.3 | Análise estrutural.....  | 61 |

|         |   |           |
|---------|---|-----------|
| 3.3.4   | Dimensionamento conforme a norma americana ASCE 10-15.....              | 61        |
| 3.3.4.1 | Dimensionamento à compressão:.....                                      | 63        |
| 3.3.4.2 | Dimensionamento à tração:.....  | 66        |
| 3.3.4.3 | Dimensionamento à flexão .....  | 66        |
| 3.3.4.4 | Dimensionamento das ligações.....                                       | 67        |
| 3.3.5   | Ações .....   | 68        |
| 3.3.5.1 | Peso próprio .....  | 68        |
| 3.3.5.2 | Vento atuante sobre a estrutura.....                                    | 69        |
| 3.3.6   | Implementação do Algoritmo Genético .....                               | 70        |
| 3.3.6.1 | Cromossomo .....  | 70        |
| 3.3.6.2 | Avaliação das soluções geradas .....                                    | 71        |
| 3.3.6.3 | Operadores e parâmetros genéticos.....                                  | 74        |
| 3.3.7   | Varredura .....   | 75        |
| 4       | Resultados e discussão .....  | 76        |
| 4.1     | Torre de 25 barras – <i>Benchmark</i> .....                             | 76        |
| 4.2     | Torre autoportante de 525 kV .....                                      | 78        |
| 4.2.1   | Otimização da estrutura através do método dos Algoritmos Genéticos..... | 78        |
| 4.2.2   | Otimização da estrutura através do método de varredura.....             | 82        |
| 5       | Conclusões.....   | 85        |
| 5.1     | Sugestões para trabalhos futuros.....                                   | 86        |
| 6       | Referências bibliográficas .....  | 87        |
|         | <b>APÊNDICE A</b> .....   | <b>91</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais e de abundantes recursos hídricos, o que propiciou o estabelecimento das usinas hidrelétricas como principal fonte geradora da matriz elétrica nacional (BEN, 2021). Devido às questões políticas e geográficas, grande parte das usinas hidrelétricas situam-se distantes dos grandes centros consumidores, demandando que o transporte da energia gerada seja realizado por meio de linhas de transmissão (LT) de alta tensão. Nas LT's, a energia é transmitida por meio de cabos condutores que são suportados por estruturas ao longo da trajetória da linha.

O procedimento de elaboração de projetos de estruturas para linhas de transmissão é um processo essencialmente iterativo, especialmente na etapa de concepção do projeto, na qual os engenheiros exploram manualmente variações de soluções que atendam aos critérios do projeto, em busca da solução mais otimizada. No entanto, devido à alta demanda e constante pressão por redução de prazos, é inviável para o projetista avaliar um elevado número de possibilidades, sendo a qualidade do projeto dependente principalmente da sua experiência e sensibilidade (HAFTKA; GURDAL, 1992) .

Nesse sentido, o uso de recursos computacionais para otimização estrutural possibilita a exploração e avaliação automática de um elevado número de possibilidades em um tempo significativamente reduzido, assegurando o desenvolvimento de soluções mais eficientes e proporcionando ganhos de natureza técnica e econômica que beneficiam toda a cadeia do empreendimento.

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos de inteligência artificial baseados na Teoria da Evolução de Darwin, segundo a qual por um mecanismo de seleção natural ocorre um contínuo aprimoramento genético dos indivíduos de uma determinada espécie. No contexto da computação, o conceito evolucionista de Darwin inspirou o desenvolvimento de algoritmos de otimização que realizam a busca de soluções em um espaço determinado de possibilidades. Através de técnicas que simulam o mecanismo de seleção natural, possibilita-se a convergência

mais rápida da busca para soluções ótimas, uma vez que é evitada a exploração de possibilidades que não possuem as características que atendem aos critérios de otimização definidos (RUSSEL; NORVIG, 2016).

Processos de otimização em geral têm por objetivo a minimização ou maximização de grandezas específicas do projeto através da variação de determinados parâmetros. O presente trabalho propõe a utilização de um Algoritmo Genético para redução do peso dos elementos de aço que compõem torres autoportantes através da variação das dimensões da base e do topo do tronco inclinado. De forma a avaliar adequadamente as soluções geradas pelo Algoritmo Genético, é proposto que seja realizado, para avaliação de cada solução, a otimização dimensional de cada barra da estrutura através de uma rotina determinística para seleção do perfil mais leve dentre os disponíveis em uma tabela de perfis que atenda aos critérios de dimensionamento estabelecidos.

A metodologia proposta neste trabalho consiste, portanto, na otimização geométrica da estrutura, realizada por meio do Algoritmo Genético, possuindo como variáveis as dimensões da base e do topo do tronco inclinado. Adicionalmente, é realizada também a otimização dimensional da estrutura, por meio de um algoritmo determinístico que realiza a seleção otimizada dos perfis que atendam aos critérios de dimensionamento para os esforços obtidos para as barras pela análise estrutural para cada configuração geométrica gerada pelo Algoritmo Genético.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia baseada no conceito dos Algoritmos Genéticos para a otimização de projetos de torres autoportantes, que possibilite a determinação da configuração otimizada da geometria da estrutura em relação às dimensões da base e do topo do tronco inclinado, considerando simultaneamente o dimensionamento otimizado dos perfis adotados para as barras da estrutura.

A métrica de desempenho adotada será o peso próprio dos elementos de aço que compõem a estrutura, sendo que o objetivo da otimização é obter soluções de menor peso, que atendam às restrições e critérios normativos de projeto.

Em uma primeira etapa, a implementação do Algoritmo Genético e dos outros módulos do sistema de otimização será validada por meio de simulações com um problema de benchmark de uma torre de 25 barras e os resultados obtidos serão comparados com os resultados disponíveis na literatura. Em seguida, a metodologia será aplicada para otimização de uma estrutura autoportante de 525 kV e os resultados serão discutidos e avaliados.

## **1.2 Justificativa**

De maneira geral, projetos otimizados possibilitam a utilização mais eficiente de recursos como tempo, mão-de-obra e matéria-prima (HAFTKA; GURDAL, 1992). Em projetos de linhas de transmissão, usualmente são empregadas famílias de torres constituídas por diversos tipos de estruturas para sustentação dos cabos condutores e para-raios. As estruturas se distinguem de acordo com a sua função e cada tipo estrutural é utilizado repetidamente em diversos pontos ao longo da linha. Devido a essa característica de utilização de uma mesma solução estrutural em múltiplos pontos, a otimização dos projetos das estruturas para LT's tem o potencial para proporcionar significativa redução de custos (SOUZA et al., 2016), diminuindo os custos de fabricação, montagem e transporte de estruturas de LTs. Além disso, observa-se no mundo um apelo muito grande quanto às questões ambientais e, de forma direta, a redução do peso de aço nas estruturas implica em um desenvolvimento mais sustentável.

## **1.3 Organização do texto**

No Capítulo 1 são apresentados o objetivo geral e a justificativa deste trabalho.

No Capítulo 2, é realizada a revisão bibliográfica dos principais temas considerados no contexto deste estudo. Inicialmente há a conceituação geral do que são as linhas de transmissão e suas particularidades. Em seguida são apresentadas as principais funções e características das estruturas utilizadas em linhas de transmissão, bem como o procedimento geral adotado para elaboração dos projetos de torres. Na sequência, são apresentados os conceitos gerais relacionados à otimização estrutural, com menção aos principais tipos e métodos de otimização e dos resultados obtidos por outros pesquisadores em trabalhos semelhantes. O método de otimização por meio dos Algoritmos Genéticos, utilizado neste trabalho, é descrito de maneira mais detalhada.

O Capítulo 3 é dedicado à exposição detalhada de toda a metodologia proposta neste trabalho, considerando as particularidades das simulações realizadas para uma torre de referência da literatura de 25 barras e com uma torre autoportante de 525 kV. Nesta seção, são apresentados os aspectos relevantes das considerações técnicas do projeto estrutural e da implementação computacional do trabalho, além das estratégias utilizadas para validação dos resultados.

Os resultados das simulações realizadas são apresentados e discutidos no Capítulo 4, por meio da apresentação de figuras e tabelas que fundamentam a análise do desempenho da metodologia proposta.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e conclusões elaboradas a partir da análise dos resultados.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Linhas de transmissão

A energia elétrica é gerada a partir de diversas fontes energéticas por meio de usinas como as hidrelétricas, termoelétricas, nucleares etc. O transporte da energia entre os polos gerador e consumidor é realizado por meio das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Devido a questões políticas e geográficas, as usinas geradoras de energia podem ser localizadas em regiões afastadas dos principais consumidores, geralmente localizados nos grandes centros urbanos e industriais. Para o transporte eficiente de grandes volumes de energia elétrica por longas distâncias, usualmente adota-se sistemas de transmissão de alta tensão. Os sistemas de distribuição, por sua vez, operam em classes de tensão mais baixas e são mais ramificados, conduzindo a energia diretamente para os consumidores finais após o tratamento adequado nas subestações.

A transmissão de energia pode ser realizada por meio de linhas subterrâneas, subaquáticas ou aéreas, que são mais convencionais. Além de transportar a energia da fonte geradora para os centros consumidores, as linhas de transmissão realizam a interligação entre os diversos componentes do sistema de transmissão, possibilitando o intercâmbio dinâmico de energia e assegurando maior estabilidade do sistema.

As linhas de transmissão podem transportar energia em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). A transmissão em CA é realizada por meio de circuitos trifásicos e é a forma mais amplamente utilizada devido à boa relação entre custo, segurança e eficiência na transmissão de energia. Os sistemas de transmissão em CC possuem circuitos compostos por dois condutores correspondendo aos polos positivo e negativo ou apenas um condutor para o caso de sistemas que utilizam a terra como retorno. A necessidade de menor quantidade de condutores os tornam mais econômicos neste aspecto em relação ao circuito trifásico em CA, no entanto exigem instalação de equipamentos de custo mais elevado nas subestações, fazendo

com que sejam uma solução mais vantajosa em especial para transmissão de grandes blocos de potência por distâncias elevadas (KIESSLING et al., 2003; LABEGALINI et al., 1992).

A norma internacional IEC 60826 (2017) define as linhas de transmissão como um sistema composto por estruturas, fundações, condutores e isoladores, conforme ilustrado pela Figura 2.1.

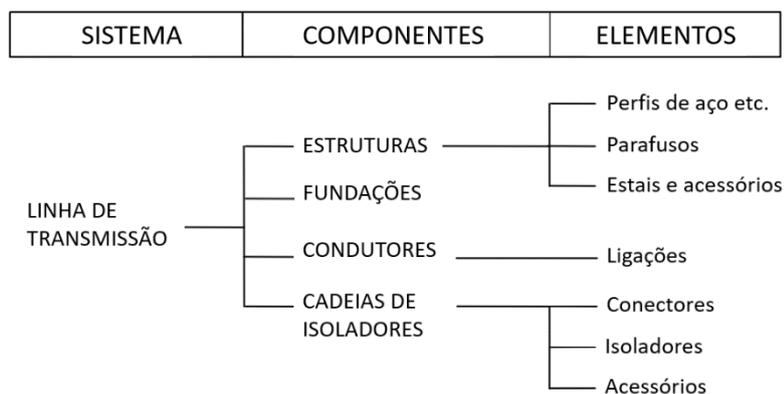


Figura 2.1: Diagrama de uma linha de transmissão (Adaptado de IEC 60826, 2017).

## 2.2 Estruturas para LT's

### 2.2.1 Função e aspectos gerais

As funções das estruturas nas linhas de transmissão são realizar o suporte mecânico dos cabos, transmitindo as solicitações para o solo, e manter as distâncias elétricas estabelecidas entre os condutores e o solo, entre os condutores e a estrutura e entre os próprios cabos.

As dimensões básicas das estruturas são definidas de forma a atender às distâncias mínimas exigidas por normas para as especificações do projeto elétrico da linha. No Brasil, usualmente adota-se os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5422 (1985) para linhas com tensões nominais entre 38 kV e 800 kV.

A altura das estruturas é determinada em função da distância mínima exigida entre os cabos condutores e o solo, do comprimento da cadeia de isoladores e da flecha máxima dos condutores. O projeto deve assegurar que a altura de segurança mínima entre os condutores e o solo será preservada em todas as condições de operação e ao longo de toda a vida útil da linha.

Os cabos para-raios são conectados às partes mais altas das estruturas e a sua altura em relação aos cabos condutores é determinada em função do seu ângulo de cobertura, que corresponde ao ângulo definido entre um plano vertical que contém os cabos para-raios e um ângulo inclinado que contém os cabos para-raios e os cabos condutores. O ângulo máximo admitido depende da tensão nominal da linha, das sobretensões consideradas no projeto e das características dos cabos e do circuito.

### **2.2.2 Elementos constituintes**

As estruturas utilizadas em linhas de transmissão de alta tensão normalmente possuem grandes dimensões de forma a atender aos requisitos de distâncias mínimas estabelecidos no projeto elétrico da linha. Para esse tipo de aplicação, as soluções estruturais mais eficientes tendem a ser as torres treliçadas de aço, embora, em especial para estruturas de menor porte, também se utilize estruturas alternativas como postes de aço, de concreto ou madeira.

As torres treliçadas de aço geralmente são constituídas de barras fabricadas em aço estrutural, em sua maioria cantoneiras com perfil L de abas iguais, ligadas por meio de parafusos e chapas e, eventualmente, soldadas. Adicionalmente utilizam-se nas ligações elementos como arruelas, porcas e contraporcas. Como medida de proteção contra a corrosão, é prática usual submeter as peças ao processo de galvanização à fogo (LABEGALINI et al., 1992).

### **2.2.3 Forças atuantes**

As estruturas devem ter os seus elementos dimensionados adequadamente para resistirem com segurança aos esforços mecânicos aos quais são submetidos. Os esforços internos são provenientes dos carregamentos atuantes diretamente sobre a estrutura e dos carregamentos transmitidos à estrutura através dos cabos. Em suma, a norma IEC 60826 (2017) estabelece que devem ser consideradas as seguintes forças atuantes sobre as estruturas:

#### **Forças verticais:**

- Peso dos cabos condutores e para-raios;
- Peso dos isoladores, ferragens e acessórios;
- Peso próprio da estrutura;

- Cargas de montagem e manutenção.

### **Forças horizontais:**

- Ação do vento sobre os cabos, estrutura e acessórios;
- Tração dos cabos.

#### **2.2.4 Tipos de estruturas**

Em geral, são projetadas séries de estruturas que contemplam soluções estruturais otimizadas para resistir aos carregamentos específicos em função das diversas aplicações das estruturas nas linhas. Os principais tipos de estrutura empregados classificam-se nos seguintes tipos:

- **Suspensão:** é o tipo predominante nas linhas, dimensionadas para resistir somente aos carregamentos verticais decorrentes do peso próprio da estrutura, peso dos cabos, isoladores e ferragens, ações de montagem e manutenção e aos carregamentos horizontais devidos à ação do vento sobre os cabos e sobre a estrutura e seus elementos acessórios, pequenos desvios longitudinais na linha (de até 3°) e ações excepcionais decorrente da ruptura de cabos. Não são dimensionadas para resistir a esforços unilaterais de elevada magnitude, o que resulta em estruturas mais leves e econômicas;
- **Ancoragem terminal:** são estruturas instaladas nos pontos extremos das linhas de transmissão, sendo dimensionadas para resistir às elevadas solicitações horizontais longitudinais unilaterais transmitidas pelos cabos devido à ação do vento máximo nos vãos entre ancoragens, além dos mesmos carregamentos presentes nas torres de suspensão. São tipicamente as torres mais solicitadas e conseqüentemente mais robustas e pesadas das linhas;
- **Ancoragem intermediária ou meio-de-linha:** semelhantes às torres de ancoragem terminal, no entanto são dimensionadas para resistirem às solicitações unilaterais longitudinais decorrentes apenas do tracionamento dos cabos ou de hipóteses excepcionais como ruptura de cabos e contenção de queda em cascata. É um tipo de estrutura comumente utilizado também em pontos de mudança de direção da linha, sendo dimensionados nestes casos para resistir também à componente horizontal transversal ao eixo da linha originária da tração longitudinal dos cabos nos alinhamentos da linha que se interceptam. São estruturas tipicamente mais leves que as torres de ancoragem terminal, porém mais pesadas que as torres de suspensão;

- **Transposição:** utilizadas em linhas de CA para realizar a transposição de fases nos circuitos, como técnica de controle da impedância ao longo da linha, proporcionando maior eficiência ao sistema;
- **Especial:** são estruturas projetadas com finalidades específicas para atender a aplicações pontuais nas linhas. Como exemplo, pode-se citar as estruturas de travessia, utilizadas para travessia de obstáculos como vales ou rios na trajetória da linha, e as estruturas de derivação, utilizadas para a realização de sangrias para alimentação de ramais.

As estruturas também podem ser classificadas de acordo com sua forma de sustentação em duas classes principais entre estruturas autoportantes ou estaiadas.

As estruturas estaiadas caracterizam-se pela utilização de cabos de aço com objetivo de transmitir os esforços da estrutura para as fundações, no solo. São estruturas geralmente mais leves e econômicas, que, no entanto, exigem maior área para instalação que as torres autoportantes. As estruturas autoportantes tipicamente possuem quatro apoios em sua base que transmitem os esforços para as fundações e são estruturas mais rígidas e robustas que as estaiadas.

A Figura 2.2 ilustra a diferença básica entre estas duas classes de estruturas.

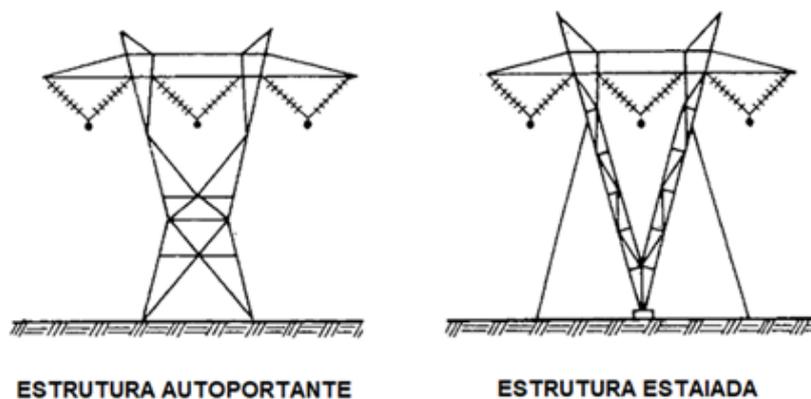


Figura 2.2: Estruturas autoportante e estaiada (LABEGALINI et al., 1992).

### 2.2.5 Disposição dos condutores

A disposição dos condutores nas estruturas pode ser horizontal, quando os condutores de fase de um mesmo circuito são posicionados em um mesmo plano horizontal. Esse tipo de

configuração, exemplificada na Figura 2.3, é usualmente adotada em estruturas de linhas de CC ou CA de circuito simples.

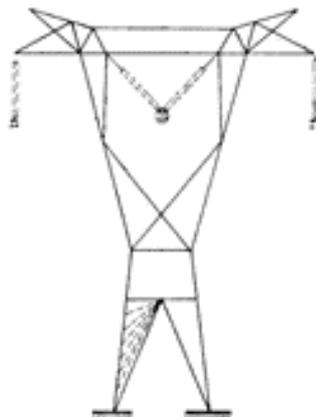


Figura 2.3: Estrutura de circuito trifásico simples horizontal (LABEGALINI et al., 1992).

Os condutores também podem ser posicionados em um mesmo plano vertical, sendo essa uma configuração comum para estruturas de linhas de CA de circuito simples e de circuito duplo, com as fases de cada circuito dispostas verticalmente em planos paralelos. A Figura 2.4 ilustra esse tipo de configuração.

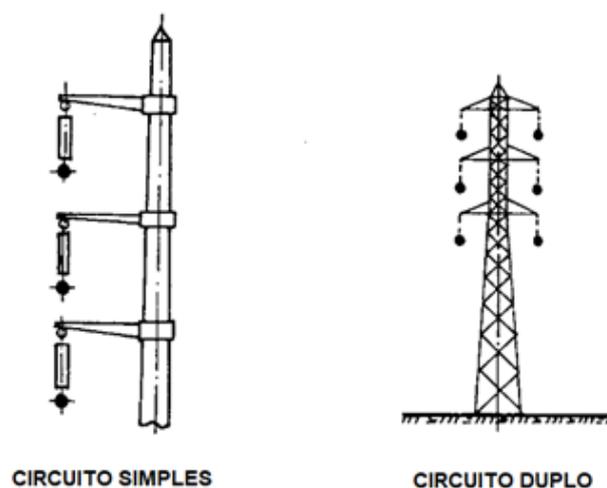


Figura 2.4: Estruturas de circuito simples e circuito duplo verticais (LABEGALINI et al., 1992).

Outra configuração comum para as linhas de transmissão é a disposição triangular dos condutores, adotadas para linhas de CA trifásicas de circuito simples e duplo, conforme ilustrado na Figura 2.5.

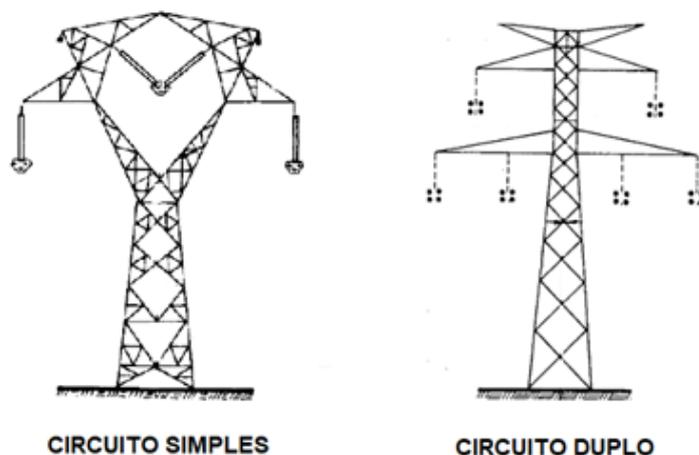


Figura 2.5: Estruturas de circuito simples e circuito duplo triangular (LABEGALINI et al., 1992).

### 2.2.6 Componentes das torres

As estruturas utilizadas em linhas de transmissão são compostas por partes comuns e partes intercambiáveis, que podem assumir diversas composições de acordo com possíveis combinações de componentes, de forma a atender às especificidades de cada ponto de instalação, como, por exemplo, variações de relevo e existência de obstáculos ao longo da trajetória da linha.

Os principais componentes intercambiáveis das estruturas são as extensões e, no caso de torres autoportantes, os pés. As combinações de pés e extensões de diversas alturas possibilitam que um mesmo projeto estrutural seja executado de forma a atender às exigências de diversas alturas de estrutura de acordo, por exemplo, com a existência de obstáculos naturais no local de instalação ou o comprimento do vão adotado, considerando a flecha formada pelos cabos no vão, de forma que sejam atendidos os requisitos de distância mínima entre os cabos e o solo. As combinações de pés com diferentes alturas viabilizam ainda a montagem da estrutura sobre bases com diversas condições de relevo, como irregularidades do solo ou regiões de aclive ou declive.

A Figura 2.6 ilustra os principais componentes das torres autoportantes e a Figura 2.7 ilustra os principais componentes das torres estaiadas.

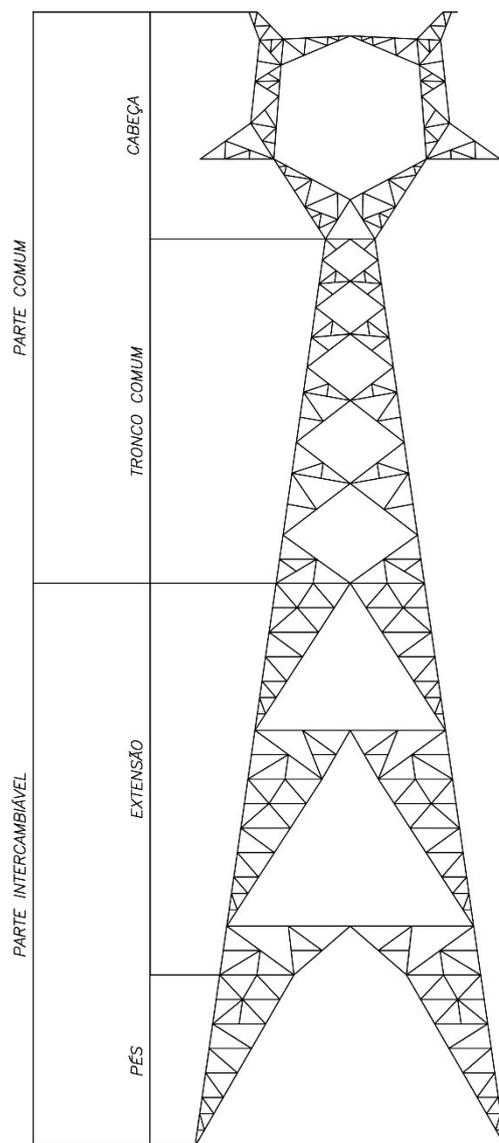


Figura 2.6: Componentes das torres autoportantes.

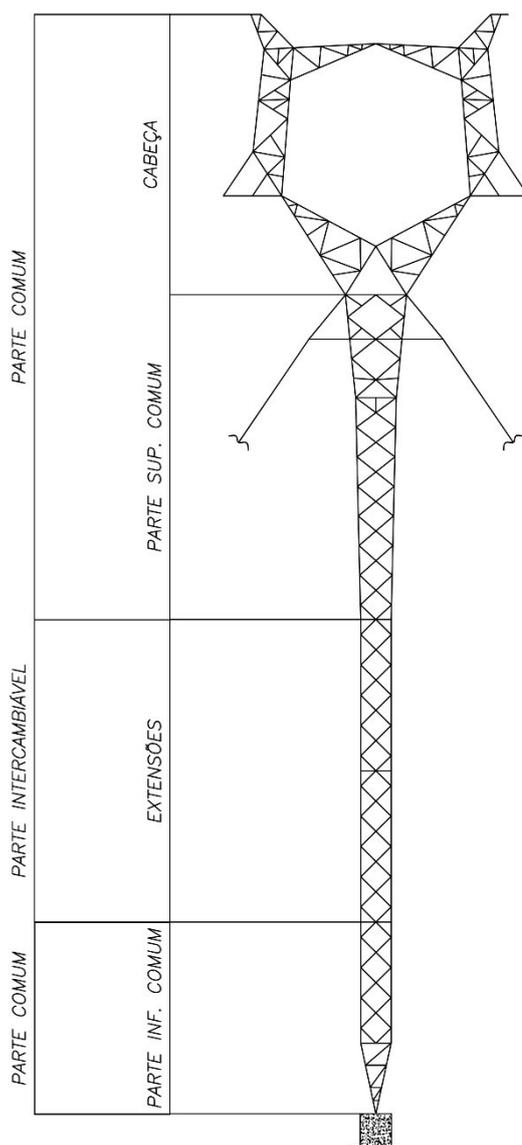


Figura 2.7: Componentes das torres estaiadas.

### 2.2.7 Projeto de torres de LT's

O projeto das estruturas para LT's tem início a partir das definições preliminares da linha, que estabelecem a sua trajetória, as características dos cabos que serão utilizados, as especificações das cadeias de isoladores, a classe de tensão e demais parâmetros elétricos e mecânicos.

Estabelecidos estes parâmetros, inicia-se a etapa de elaboração do projeto básico, quando é realizado o estudo das soluções estruturais que atendem aos requisitos elétricos e mecânicos estabelecidos. Nesta etapa são calculados os carregamentos básicos e determinadas as hipóteses de cálculo do projeto. As ações podem ser de natureza determinística, como o peso próprio das

estruturas, peso dos cabos e cargas de montagem e manutenção, ou probabilística, como a ação do vento e a oscilação da temperatura. O projeto básico estabelece as diretrizes para o projeto executivo, como as geometrias e os tipos das estruturas que serão adotadas.

O projeto executivo é a etapa na qual são realizadas a análise estrutural e os cálculos das estruturas para as hipóteses consideradas, usualmente por meio de ferramentas computacionais como programas baseados no Método dos Elementos Finitos. A partir dessa análise, o engenheiro projetista realiza o dimensionamento das barras e ligações, especificando os materiais, quantidades e dimensões de todos os elementos da estrutura, conforme os critérios normativos adotados.

Por fim, após o cálculo e dimensionamento das estruturas, inicia-se a etapa de detalhamento do projeto. Nesta etapa, os desenhistas e projetistas definem os detalhes construtivos necessários para a materialização do modelo teórico e elaboram os documentos que contenham todas as especificações para fabricação e montagem das estruturas, como desenhos e listas de materiais

## 2.3 Otimização estrutural

Otimização estrutural é o processo que visa a obtenção de uma solução estrutural que possua um desempenho ótimo em relação a um ou a múltiplos aspectos para um determinado problema e simultaneamente atenda ao conjunto de restrições definido. A busca pela solução ótima é realizada através da variação em faixas pré-definidas de parâmetros denominados variáveis de projeto, usualmente descritos por meio de um vetor  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  (HAFTKA; GURDAL, 1992).

### 2.3.1 Tipos de otimização

Segundo Carvalho (2014), a otimização de estruturas treliçadas pode ser classificada em três tipos principais:

- **Otimização dimensional:** as variáveis de projeto são parâmetros dimensionais dos elementos das estruturas. No caso de treliças, por exemplo, cada variável de projeto pode ser a área de seção das barras. A Figura 2.8 ilustra esse tipo de otimização.

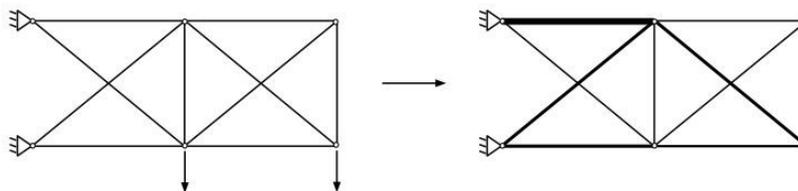


Figura 2.8: Exemplo de otimização dimensional (CARVALHO, 2014).

- **Otimização de geometria:** a forma da estrutura pode ser alterada através da variação das suas coordenadas nodais, sem alteração do número de barras ou da conectividade entre os elementos. A Figura 2.9 ilustra um exemplo de otimização dimensional e geométrica.

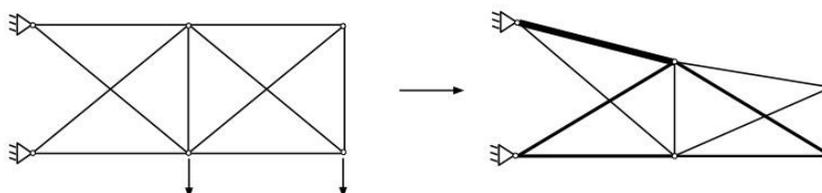


Figura 2.9: Exemplo de otimização dimensional e geométrica (CARVALHO, 2014).

- **Otimização topológica:** consiste no processo de otimização em que podem ser alteradas a quantidade de barras bem como a conectividade entre os elementos, como, por exemplo, o padrão de contraventamento adotado. A Figura 2.10 ilustra um exemplo de otimização dimensional, geométrica e topológica.

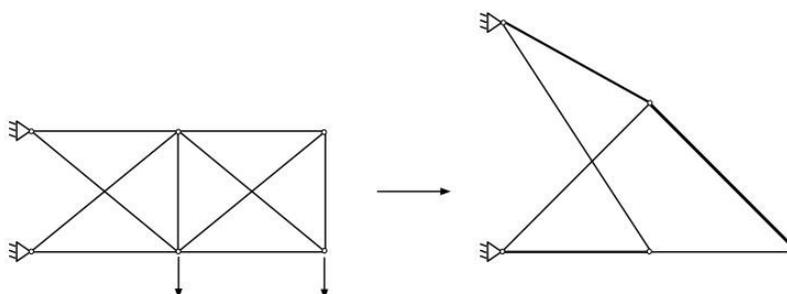


Figura 2.10: Exemplo de otimização dimensional, geométrica e topológica (CARVALHO, 2014).

Problemas típicos de otimização estrutural têm por objetivo a redução do peso próprio da estrutura através da variação de parâmetros como as áreas de seção das barras e coordenadas nodais, sujeito à restrições como critérios de tensão admissível e deslocamentos máximos.

A Brochura Técnica 03 publicada pelo Cigré (2001) recomenda que em projetos de torres para linhas de transmissão o projetista procure otimizar o peso próprio da estrutura através da variação de parâmetros como a inclinação dos montantes, a abertura da base e o dimensionamento das barras, atendendo às restrições normativas do projeto.

### **2.3.2 Métodos de otimização**

De acordo com Rao (2009), os métodos de otimização podem ser classificados entre métodos clássicos e modernos.

Os métodos clássicos de otimização são essencialmente métodos de cálculo diferencial, usados para encontrar valores máximos e mínimos de funções de uma ou múltiplas variáveis sem consideração de restrições. Para aplicação destes métodos é necessário que a função objetivo seja convexa, contínua e derivável em relação às variáveis de projeto, o que limita o seu escopo de aplicações em problemas práticos de otimização. Para problemas de otimização com restrições, há diversos métodos consolidados como o método dos multiplicadores de Lagrange e condições de Kuhn-Tucker (1951). As técnicas se distinguem de acordo com a sua aplicação entre métodos lineares e não-lineares. Os métodos lineares são aplicáveis para otimização de problemas em que a função objetivo e as funções de restrição podem ser representadas por meio de funções lineares das variáveis do projeto. Um exemplo clássico de técnica de otimização linear é o método Simplex, formulado por George Dantzig (1948), como resultado dos esforços para otimização de operações militares das forças aliadas durante a Segunda Guerra Mundial. As técnicas não-lineares são mais genéricas e podem ser aplicadas para solução de qualquer problema de otimização, porém usualmente exigem a solução de sistemas de equações não-lineares complexas e de difícil resolução.

Os métodos modernos de otimização, também denominados de métodos heurísticos, são conceitualmente diferentes dos métodos clássicos, e vem sendo amplamente utilizados para a solução de problemas complexos de engenharia. As características da formulação destes

métodos possibilitam a tratativa simples e eficaz de problemas que devido a sua complexidade são difíceis de serem explicitamente descritos por meio de funções matemáticas adequadas para a abordagem pelos métodos tradicionais. A maioria dos métodos modernos de otimização são inspirados por mecanismos e comportamentos de sistemas biológicos e naturais. Seguem abaixo as descrições de alguns dos métodos modernos mais utilizados:

- **Algoritmos Genéticos:** trata-se de um método de otimização inspirado na Teoria da Evolução Natural de Darwin. Os conceitos básicos da teoria, como seleção, cruzamento e mutação dos indivíduos de uma determinada espécie, são utilizados no procedimento de otimização dos Algoritmos Genéticos. A estruturação básica do algoritmo é descrita pelas seguintes etapas, que se repetem ciclicamente ao longo da sua execução e tendem a conduzir à convergência do algoritmo para a solução otimizada para o problema:
  1. **Geração** de uma população inicial de indivíduos em que cada indivíduo representa uma possível solução para o problema;
  2. **Avaliação** dos indivíduos baseados em uma métrica de desempenho representada por uma função de avaliação. Nesta etapa, cada indivíduo recebe uma nota proporcional ao seu desempenho;
  3. **Seleção** dos melhores indivíduos da população baseado na nota atribuída pela função de avaliação;
  4. **Cruzamento** dos indivíduos selecionados e geração de uma nova população, em que cada indivíduo filho possui características mescladas dos pais;
  5. **Mutação** de genes aleatórios dos indivíduos, de forma a assegurar a diversidade genética da população e evitar a estagnação da solução em condições de mínimo ou máximo local.

O método dos Algoritmos Genéticos será adotado nesse trabalho e é descrito mais detalhadamente no item 2.4;

**Recozimento Simulado:** o método de Recozimento Simulado é baseado no tratamento térmico de recozimento, que consiste no aquecimento de um sólido metálico até uma faixa de temperatura crítica, seguido por uma etapa de resfriamento lento e controlado. Os átomos constituintes do metal aquecido tendem a se mover livremente entre si em uma razão diretamente proporcional à energia interna do material, medida por meio da temperatura. À medida que o metal é resfriado, o movimento dos átomos tende a diminuir progressivamente até que o material se estabiliza idealmente em uma condição de mínima energia interna. O algoritmo de otimização simula este comportamento, através da geração sucessiva de soluções aleatórias para o problema, que são avaliadas por uma métrica de desempenho pela função objetivo. A cada iteração do algoritmo, uma nova solução é gerada na vizinhança da solução anterior no espaço de busca e, caso tenha desempenho superior à solução anterior é imediatamente aceita para a próxima iteração. Do contrário, a sua probabilidade de aceitação é determinada por meio da função de distribuição de probabilidade de Boltzmann, que corresponde analogicamente à temperatura do processo de recozimento. O processo iterativo se repete continuamente até que seja atingida uma condição de parada, representada por analogia por um parâmetro de temperatura mínima do algoritmo;

- **Enxame de partículas:** a otimização do tipo enxame de partículas, usualmente referida pela forma abreviada do inglês PSO (*Particle Swarm Optimization*), é baseada no comportamento de aves ou insetos como abelhas e vespas. As partículas representam os indivíduos pertencentes ao grupo e se comportam de maneira autônoma, porém integrados em um sistema de inteligência coletiva. Na estrutura social desses animais, quando um indivíduo encontra uma fonte de alimentos todo o grupo é atraído de maneira diretamente proporcional ao valor do alimento encontrado. Por analogia, o algoritmo PSO é iniciado a partir de um grupo de indivíduos em que cada indivíduo corresponde a uma possível solução no espaço de busca do problema. Cada indivíduo possui como características a sua posição e uma velocidade que determina o seu alcance de exploração no espaço de busca. Quando uma solução é bem avaliada pela métrica de desempenho definida, outras partículas são atraídas para aquela região do espaço de busca, de maneira semelhante ao comportamento de enxames. Dessa forma, é assegurada a busca eficiente pela solução ótima para os problemas em um espaço determinado. O PSO é um método inspirado no padrão comportamental de agentes

biológicos, diferentemente dos algoritmos genéticos que são denominados métodos evolutivos;

- **Colônia de formigas:** o método é baseado no comportamento de uma colônia de formigas, na qual as formigas se movimentam pelo ambiente em busca de alimentos e, quando encontram, deixam feromônios no percurso de forma a indicar para as outras formigas o caminho. Quanto melhor for a fonte de alimento, mais formigas percorrerão aquele caminho e reforçarão a concentração de feromônios pelo percurso, atraindo ainda mais formigas. Na aplicação deste método, cada variável de projeto é representada como uma camada constituída por nós em que cada nó corresponde a um possível valor compreendido na faixa admissível de valores para aquela variável. Quando o algoritmo é iniciado, cada formiga percorre todas as camadas adotando um valor específico em cada camada, resultando em um vetor de valores para as variáveis de projetos correspondente ao caminho percorrido pela formiga. Cada caminho, ou vetor, representa uma solução para o problema e é avaliado pela função objetivo conforme a métrica estabelecida e o seu nível de desempenho corresponde à quantidade de feromônio depositada naquele caminho. Dessa forma, as formigas são atraídas para os caminhos do espaço de busca que tendem a apresentar melhor desempenho. Como forma de evitar a estagnação em mínimos ou máximos locais, é aplicado um procedimento que estimula a variação de caminhos correspondente, por analogia, à evaporação do feromônio depositado pelas formigas. Por meio desse mecanismo, ao longo das iterações o algoritmo tende a convergir para uma solução otimizada para o problema.

### 2.3.3 Pesquisas desenvolvidas com métodos de otimização aplicados a estruturas

Há um vasto acervo de publicações relacionadas à aplicação de métodos de otimização para a solução de problemas de estruturas. Pereira (2007) realizou um estudo comparativo entre diversos métodos heurísticos para otimização de treliças planas. Um problema de uma treliça plana de 10 barras foi utilizado para simulações com o objetivo de otimização dimensional da estrutura e os métodos que apresentaram melhor desempenho foram Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, Colônia de Formigas e Recozimento Simulado, nessa ordem. Foram realizadas ainda simulações para otimização dimensional e geométrica de uma treliça plana de 18 barras, e os melhores resultados foram obtidos pelos métodos de Busca Tabu e Colônia de Formigas, seguido por Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado. Por fim, foram realizadas

simulações com uma treliça plana de uma torre de 47 barras e os melhores resultados foram obtidos, na seguinte ordem, pelos métodos de Busca Tabu, Colônia de Formigas, Recozimento Simulado e Algoritmos Genéticos. Essa comparação de desempenho entre os métodos foi realizada adotando como métrica o menor peso próprio obtido para as estruturas dentre as simulações realizadas. Não obstante a análise apresentada, o autor destacou em suas conclusões que o método que apresentou maior eficiência, considerando simultaneamente a facilidade de implementação, o custo de processamento e a qualidade das soluções obtidas foi o método de Recozimento Simulado.

Hasançebi e Erbatur (2002) propuseram uma reformulação dos parâmetros de configuração do método de Recozimento Simulado para melhorar o seu desempenho em problemas de otimização estrutural de elevada complexidade. Foram realizadas simulações para otimização dimensional de uma treliça espacial de 942 barras e otimização dimensional e geométrica de uma treliça plana de 18 barras e de uma treliça plana de uma torre de 47 barras. Foram obtidos resultados com desempenho superior aos obtidos pelo método dos Algoritmos Genéticos nos trabalhos de referência.

Capriles *et al.* (2007) utilizaram uma variação do método de Colônia de Formigas para otimização dimensional com objetivo de redução do peso próprio de estruturas treliçadas. Foram realizados experimentos com problemas de referência de uma treliça plana de 10 barras, uma torre treliçada de 25 barras, uma treliça plana de 52 barras, uma treliça espacial de 120 barras e uma torre treliçada de 160 barras. Foi adotada uma técnica de penalização para tratamento de restrições relacionadas a critérios de falha por flambagem e tensão e deslocamentos nodais máximos admissíveis. Foi concluído que a metodologia adotada foi efetiva e competitiva em relação aos Algoritmos Genéticos e a outras variantes de Colônia de Formigas. Foi observado também que o desempenho do método é altamente sensível aos parâmetros de inicialização do algoritmo.

Perez e Behdinan (2007) realizaram experimentos com o método de Enxame de Partículas para otimização dimensional com objetivo de redução de peso próprio em problemas de referência de uma treliça plana de 10 barras, uma torre de 25 barras e uma treliça espacial de 72 barras. Foram realizados ajustes dos parâmetros de configuração do algoritmo de forma a se melhorar o seu desempenho para problemas de otimização de estruturas. Os resultados foram comparados com outros métodos de otimização, como Algoritmos Genéticos, e observou-se que o desempenho do método foi competitivo em relação aos outros métodos, embora não tenha sido

constatada nenhuma discrepância de desempenho significativa. Os autores ainda observaram que o método Enxame de Partículas possui a característica de exigir a configuração de poucos parâmetros para sua execução.

Hadidi *et al.* (2010) adotaram uma modificação do método de Colônia Artificial de Abelhas, que é um método inspirado no comportamento de busca de alimentos das abelhas, para otimização dimensional com objetivo de redução do peso próprio dos problemas de referência de uma treliça plana de 10 barras, uma treliça plana de 17 barras, uma treliça espacial de 120 barras e uma treliça plana de 45 barras. Os resultados comprovaram a eficácia do método e o melhor desempenho da modificação proposta em relação ao método tradicional.

Lameiras, Neto e Nunes (1987), desenvolveram uma metodologia para otimização de torres autoportantes considerando como variáveis as dimensões da base das estruturas. Para cada solução avaliada pelo algoritmo, foi realizada a análise estrutural e dimensionamento das barras da estrutura. O desempenho das soluções foi avaliado pela composição do custo de fabricação e montagem da estrutura e do custo de execução das fundações. Nos experimentos realizados, foram obtidas reduções de 2% a 18% do custo das soluções otimizadas em relação aos projetos de referência.

Couceiro *et al.* (2016) desenvolveram um algoritmo baseado no método de Recozimento Simulado para a otimização dimensional e geométrica com objetivo de redução de peso próprio de torres para linhas de transmissão. O algoritmo foi utilizado para otimização do projeto de uma torre autoportante CA de circuito duplo vertical, tensão de 220 kV e altura de 39,8 m, submetida à 7 hipóteses de carregamento. A torre é composta por 684 barras e foram definidas 76 variáveis discretas e 47 variáveis contínuas para o problema. Na avaliação de desempenho das soluções, foram consideradas restrições de deslocamento, tensão e esbeltez máximas admissíveis. A estrutura inicial possuía peso de 16380 kgf e o peso final da solução otimizada foi de 9050 kgf, representando uma redução de 44,73% do peso. A Figura 2.11 ilustra os resultados obtidos.

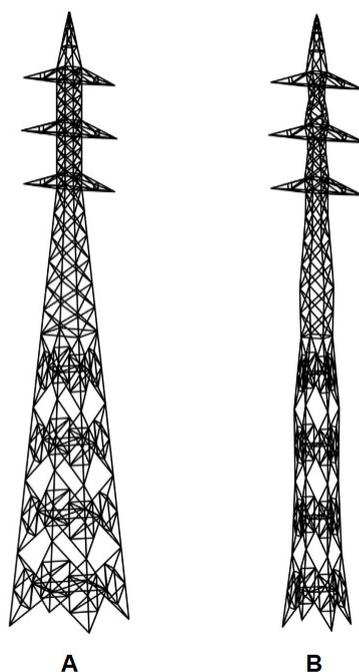


Figura 2.11: Solução inicial (A) e solução otimizada (B) (COUCEIRO et al., 2016).

De maneira semelhante, Tort *et al.* (2017) também desenvolveram, integrado ao programa de análise estrutural PLS-Tower, um algoritmo baseado no método de Recozimento Simulado para otimização geométrica e dimensional para redução de peso próprio de torres para linhas transmissão. Para otimização geométrica foram consideradas 3 variáveis contínuas e, como restrições, foram aplicados os critérios de dimensionamento da norma ASCE 10-97 (1997). O algoritmo foi aplicado à 3 torres autoportantes:

- Suspensão de circuito duplo vertical de 220 kV com 31,5 m de altura, submetida à 11 hipóteses de carregamento. A torre possui 397 barras e foram definidas 58 variáveis de projeto discretas. O peso da solução inicial é de 6346 kgf e foi obtida uma redução de 26,7% para a solução otimizada;
- Ancoragem de circuito simples triangular de 110 kV com 43,9 m, submetida à 49 hipóteses de carregamento. A torre possui 438 barras e foram definidas 64 variáveis de projeto discretas. O peso da solução inicial é de 13207 kgf e foi obtida uma redução de 10,6% para a solução otimizada;

- Suspensão de circuito simples vertical de 400 kV com 80,4 m, submetida à 44 hipóteses de carregamento. A torre possui 693 barras e foram definidas 96 variáveis de projeto discretas. O peso da solução inicial é de 33562 kgf e foi obtida uma redução de 10,5% para a solução otimizada.

Algoritmos Genéticos são utilizados para a solução de problemas de engenharia estrutural há décadas, como demonstrado pelos trabalhos disponíveis na literatura como o de Rajeev e Krishnamoorthy (1992), que implementaram um Algoritmo Genético para otimização dimensional de estruturas treliçadas. O algoritmo foi executado para otimização de uma torre autoportante de circuito simples triangular de 16,15 m de altura composta por 160 barras e 12 variáveis de projeto e foram obtidos resultados consistentes em todas as simulações realizadas.

Fonseca (2007) desenvolveu um procedimento utilizando Algoritmos Genéticos e Redes Neurais para otimização dimensional, topológica e geométrica de estruturas tubulares submetidas à carregamentos estáticos e dinâmicos. A rede neural foi treinada e adaptada para substituir a análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos na avaliação de desempenho dos indivíduos pelo algoritmo genético, com o intuito de reduzir o tempo e o custo computacional dispendidos para execução do algoritmo. Foram realizados experimentos com problemas de referência da literatura e com uma torre de 47 barras, 15,0 m de altura e 11 variáveis de projeto. Em todos os experimentos os resultados demonstraram a eficácia do método para a obtenção de uma solução com redução de peso das estruturas avaliadas.

Wu e Chow (1995) e Tang *et al.* (2005) desenvolveram um algoritmo genético e Miguel *et al.* (2013) uma variação do método de enxame de partículas, inspirada no comportamento dos vagalumes. Em todos estes trabalhos foram realizados experimentos para otimização geométrica e dimensional com objetivo de redução do peso próprio para o problema de referência (*benchmark*) de uma torre treliçada de 25 barras, submetida aos mesmos carregamentos e considerando as mesmas variáveis de projeto, restrições e geometria inicial. Os resultados obtidos foram consistentes e demonstram a eficácia dos respectivos métodos para obtenção de soluções otimizadas para o problema.

## 2.4 Algoritmos Genéticos

A Teoria da Evolução das Espécies de Charles Darwin (1859) estabelece que há uma constante competição por recursos pelos organismos vivos que coexistem em um mesmo ecossistema, no

qual os indivíduos mais fortes e que melhor se adaptam ao meio prevalecem sobre os mais fracos. Dessa forma, ao longo das sucessivas gerações, existe a tendência de os indivíduos mais fortes sobreviverem e se reproduzirem, perpetuando as suas características e traços genéticos, enquanto os indivíduos mais fracos tendem à extinção. Esse mecanismo de evolução das espécies é denominado seleção natural e é a base da teoria de Darwin (SIVANANDAM; DEEPA, 2008).

Desde a década de 70 há um interesse crescente no desenvolvimento de algoritmos computacionais inspirados nos processos evolutivos naturais para otimização de problemas complexos. Diversos pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento dessa linha de pesquisa, como Rechenberg (1975) e Schwefel e Beyer (2002), que publicaram estudos de suas técnicas de estratégia evolucionária. Ao conjunto de estudos associados à essa temática, atribuiu-se a denominação de Computação Evolutiva (GEN; CHENG, 1999).

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos de otimização e busca computacional inspirados no mecanismo evolutivo de seleção natural, propostos originalmente por John Holland em 1975, como resultado de suas pesquisas na Universidade de Michigan (HOLLAND, 1975).

Em problemas de otimização, o espaço de busca consiste no conjunto de possibilidades de solução para o problema, em que há soluções melhores que outras, segundo alguma métrica de desempenho. Frequentemente, dada a complexidade do problema, o espaço de busca é muito vasto, sendo inviável em termos de tempo ou de capacidade de processamento realizar a varredura e avaliação de todo o conjunto de possibilidades de forma a encontrar a solução ótima. Neste sentido, são desenvolvidas técnicas e metodologias que viabilizam a realização mais eficiente da busca da solução no espaço de busca dos problemas propostos. Há algoritmos que realizam a busca de soluções de maneira completamente aleatória, através da seleção aleatória de soluções no espaço de busca e avaliação do seu desempenho. Esta abordagem de busca aleatória é considerada um método extremamente básico, enquanto há técnicas de busca mais elaboradas, nas quais a busca é direcionada por algum indicador de tendência da qualidade de desempenho das soluções para determinadas regiões do espaço de busca (SIVANANDAM; DEEPA, 2008) (GOLDBERG, 1989).

Os Algoritmos Genéticos possuem características que combinam o método de busca aleatória, por meio da geração aleatória da população inicial de soluções e do mecanismo de mutação, que visam evitar a estagnação da busca em regiões de ótimo locais e assegurar a exploração de

todo o espaço de busca, e o método de busca direcionada, através dos mecanismos de seleção e cruzamento, que direcionam a busca para regiões em que há indícios de tendência à melhores soluções. Trata-se de uma abordagem que possibilita lidar com problemas que possuem simultaneamente variáveis discretas e contínuas e, embora sua formulação não garanta a obtenção do ótimo global, os estudos indicam que na maioria dos casos a solução ótima é encontrada.

À seguir será apresentada a formulação geral dos Algoritmos Genéticos, conforme descrito nos trabalhos de Holland (1975), Goldberg (1989), Soares (1997), Gen e Cheng (1999), Fonseca (2007) e Sivanandam e Deepa (2008).

### **2.4.1 Codificação**

Nos Algoritmos Genéticos, as possíveis soluções para o problema são representadas por meio de cromossomos constituídos por  $n$  genes, em que cada gene corresponde a um parâmetro variável do problema. Os genes constituintes do cromossomo podem ser valores binários, reais ou ainda estruturas de dados mais complexas, e a escolha da representação adequada depende da análise criteriosa do problema e pode influenciar na eficiência do algoritmo.

A forma de representação mais utilizada é a binária, em que há grande facilidade na busca de similaridades e na implementação. No entanto, a representação binária possui a característica de que soluções vizinhas no espaço genotípico (codificado) podem representar soluções totalmente distintas no espaço fenotípico (decodificado), bem como o contrário. Essa característica contribui para a exploração mais ampla do espaço de busca, porém dependendo da implementação pode induzir um comportamento de busca predominantemente aleatória no algoritmo.

O procedimento de evolução do algoritmo é executado no espaço genotípico, através de operações sobre as cadeias de caracteres dos cromossomos representativos das soluções. A partir da representação genotípica, realiza-se a decodificação dos cromossomos e a construção das soluções no espaço fenotípico, por meio da aplicação dos valores dos genes aos parâmetros do problema real que está sendo representado.

### **2.4.2 População inicial**

O algoritmo é inicializado com a geração da população inicial de indivíduos, etapa na qual são gerados os primeiros cromossomos correspondentes a possíveis soluções do espaço de busca

do problema. O tamanho da população inicial é um parâmetro que deve ser definido de acordo com o problema, e contribui para assegurar a exploração de todas as regiões do espaço de busca.

Os cromossomos gerados nesta etapa, no geral, possuem genes com valores definidos aleatoriamente dentro da faixa de variação permitida para cada variável do problema. Adicionalmente, podem ser adotadas estratégias para estimular a diversificação das soluções da população inicial, como, por exemplo, a geração de metade dos cromossomos de maneira aleatória e a outra metade através da inversão dos valores dos *bits* constituintes das cadeias de caracteres dos cromossomos gerados inicialmente.

### **2.4.3 Avaliação**

Os cromossomos gerados pelo Algoritmo Genético são avaliados por uma função adequada, específica para cada problema, que atribui para cada cromossomo uma pontuação proporcional ao seu desempenho. No caso de problemas de otimização multiobjetivo, uma possível abordagem simples é a atribuição de pontuações correspondentes ao desempenho da solução em relação a cada objetivo que são, então, multiplicadas por um fator de ponderação e somadas para determinação da pontuação final do indivíduo.

Nesta etapa pode ser introduzida também uma função de penalização, que reduz a pontuação do indivíduo caso sejam infringidas restrições pré-estabelecidas para o problema. Essa estratégia viabiliza a abordagem de problemas de otimização com restrições pelo método dos Algoritmos Genéticos, que não possui um mecanismo explícito para tratativa de restrições.

Os pesos adotados na soma ponderada das pontuações de múltiplos objetivos e da influência da penalização na pontuação final do indivíduo devem ser determinados de maneira adequada, de forma a contribuir para a eficiência na convergência do algoritmo para uma solução viável e otimizada.

### **2.4.4 Seleção**

A seleção nos Algoritmos Genéticos consiste no mecanismo pelo qual os indivíduos de uma população são selecionados para realização de cruzamento e geração de uma nova população. De maneira geral, os melhores indivíduos, ou seja, os indivíduos que receberam maior pontuação na etapa de avaliação, possuem maior probabilidade de serem selecionados. No entanto, a seleção exclusivamente dos melhores indivíduos de uma população tende a conduzir à convergência prematura do algoritmo para uma solução de ótimo local, em oposição à seleção

aleatória, que contribui para maior exploração do espaço de busca, porém em detrimento do direcionamento estratégico da evolução. Dessa forma, devem ser adotadas estratégias que assegurem um balanceamento adequado entre a exploração mais ampla do espaço de busca e o refinamento da solução em regiões de melhor desempenho. Algumas estratégias de seleção usualmente adotadas na formulação do método estão descritas nos itens seguintes.

- **Roleta:** é um método simples de seleção, no qual cada cromossomo da população tem uma probabilidade de ser selecionado para cruzamento igual à razão entre a sua pontuação e a soma das pontuações de todos os cromossomos da população. Para exemplificação deste método, a Tabela 2.1 indica as pontuações dos indivíduos de uma população fictícia de 4 indivíduos e a Figura 2.1 ilustra a probabilidade de seleção de cada indivíduo. A seleção por roleta foi o método proposto por Holland (1975) na formulação original dos Algoritmos Genéticos;

Tabela 2.1: População de exemplo

| Indivíduo | Pontuação | % do total |
|-----------|-----------|------------|
| 1         | 436       | 12,7       |
| 2         | 914       | 26,7       |
| 3         | 1870      | 54,5       |
| 4         | 209       | 6,1        |
| Total     | 3429      | 100        |

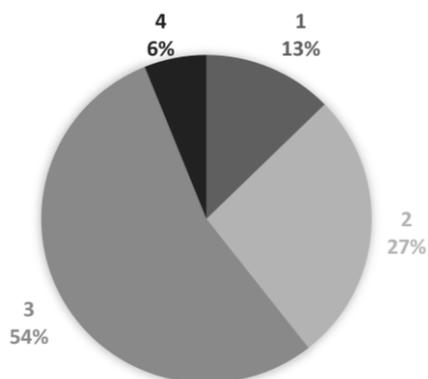


Figura 2.12: Probabilidades de seleção por roleta.

- **Torneio:** este método na seleção do indivíduo de pontuação mais alta entre  $n$  indivíduos selecionados aleatoriamente. É comum que a seleção por torneio seja realizada entre pares de indivíduos selecionados aleatoriamente ( $n = 2$ ), sendo esta variável do método

comumente referida por torneio binário. Esta estratégia de seleção possui as vantagens de ser de fácil implementação e ser eficiente para evitar a convergência prematura do algoritmo em uma região de ótimo local;

- **Elitista:** trata-se de uma variação que pode ser implementada em complemento aos outros métodos de seleção, que consiste na preservação de  $n$  melhores indivíduos de uma população para a população seguinte, sem que sofram qualquer alteração nas etapas de cruzamento e mutação. Esta técnica visa evitar que soluções de alto desempenho sejam perdidas ao longo da execução do algoritmo em decorrência da natureza probabilística dos métodos de seleção.

#### 2.4.5 Cruzamento

No fluxo de execução do Algoritmo Genético, o cruzamento consiste na etapa em que os cromossomos pais, selecionados pelo mecanismo de seleção, tem os seus genes recombinados de forma a gerar novos cromossomos filhos. Para cada geração, a seleção de cromossomos se repete sucessivamente para formar os pares ou conjuntos de cromossomos necessários para realização de cruzamentos até que sejam gerados cromossomos filhos suficientes para compor toda a nova população de indivíduos.

Há diversas técnicas de cruzamento que podem ser utilizadas na implementação dos Algoritmos Genéticos, que, essencialmente, são operações de combinação e permutação executadas sobre as cadeias de caracteres correspondentes aos cromossomos. Este mecanismo é crucial para, em analogia ao processo evolutivo natural, possibilitar a descoberta de melhores soluções e evolução do algoritmo. Alguns dos principais métodos de cruzamento utilizados nos Algoritmos Genéticos são descritos a seguir.

- **Cruzamento de ponto único:** esta é a forma de cruzamento proposta originalmente por Holland (1975) e consiste no seccionamento dos cromossomos pais em uma posição aleatória da cadeia de caracteres e a permutação entre as seções de genes dos pais para geração dos cromossomos filhos. A Figura 2.13 ilustra este cruzamento realizado entre cromossomos de 8 genes;

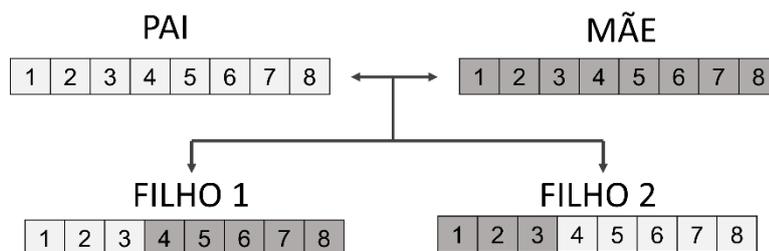


Figura 2.13: Cruzamento de ponto único.

- **Cruzamento de dois pontos:** método semelhante ao cruzamento de ponto único, porém neste método o seccionamento dos cromossomos pais é realizado em dois pontos da cadeia de caracteres escolhidos aleatoriamente. A Figura 2.14 ilustra o cruzamento de dois pontos;

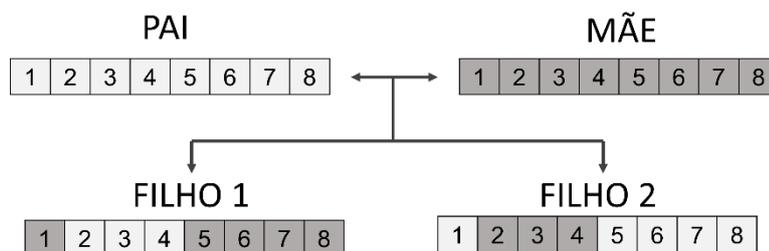


Figura 2.14: Cruzamento de dois pontos.

- **Cruzamento uniforme:** neste método a permuta de genes entre os cromossomos pais é determinada para cada caractere individual da cadeia por uma probabilidade fixa de 50% de ser realizada. A Figura 2.15 ilustra um exemplo de cruzamento uniforme.

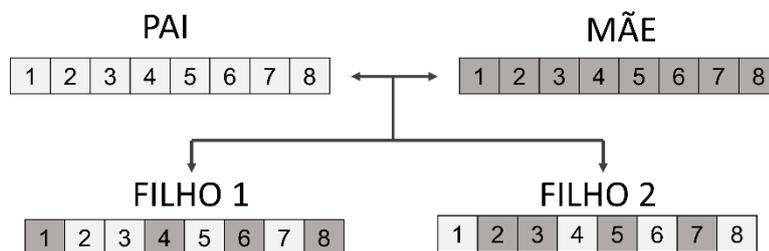


Figura 2.15: Cruzamento uniforme.

### 2.4.6 Mutação

A mutação é uma estratégia dos Algoritmos Genéticos que tem a função de assegurar a diversidade genética na população de indivíduos e evitar que o algoritmo fique estagnado em regiões de ótimo local. Para realizar a sua função, após a etapa de cruzamento, a mutação introduz nos cromossomos filhos características que podem não estar presentes nos cromossomos pais.

Há diversas formas de implementação do mecanismo de mutação, a principal forma, denominada mutação uniforme, consiste em percorrer os elementos do cromossomo e, de acordo com um valor determinado de probabilidade, realizar a alteração do valor do elemento. Essa alteração pode ser realizada por meio da inversão do valor do *bit* (0 ou 1), no caso de codificação binária do cromossomo, ou a geração aleatória de um novo valor dentro da faixa de variação correspondente àquele gene, no caso de codificação do cromossomo por valores reais.

Podem ser implementadas também formas alternativas de mutação, como a inversão de posição dos genes localizados em duas posições aleatórias na cadeia de elementos do cromossomo ou a reorganização aleatória da posição dos genes de intervalos arbitrários de elementos dos cromossomos.

### 2.4.7 Parâmetros do algoritmo

Alguns parâmetros devem ser pré-definidos para inicialização da execução do Algoritmo Genético. Os parâmetros devem ser devidamente ajustados de acordo com as características do problema de otimização e a sua adequada escolha influencia na eficiência do algoritmo. Os principais parâmetros estão descritos a seguir.

- **Tamanho da população:** é o número de indivíduos que serão gerados em cada ciclo de execução do Algoritmo Genético, inicialmente na formação da população inicial e, nas etapas seguintes, em cada geração de filhos. De maneira geral, o tamanho da população deve ser proporcional ao espaço de busca do problema, de forma a garantir uma quantidade de pontos amostrais suficiente para abranger mais regiões do espaço. Populações reduzidas tendem a conduzir à convergência prematura do algoritmo para condições de ótimo local. Populações muito grandes, porém, podem elevar consideravelmente o custo computacional de execução do algoritmo e/ou atrasar a sua convergência;

- **Probabilidade de cruzamento:** é a probabilidade de ocorrência de cruzamento entre os pares de cromossomos selecionados pelo mecanismo de seleção para geração de cromossomos filhos. Caso não ocorra o cruzamento, os cromossomos filhos são idênticos aos pais, porém estando ainda sujeitos a sofrerem mutação. Valores usuais de probabilidade de cruzamento se situam na faixa de 60% a 90%;
- **Probabilidade de mutação:** é o valor que determina a probabilidade de cada gene constituinte do cromossomo sofrer mutação. O valor de probabilidade de mutação de 0%, por exemplo, indica que nenhum gene do cromossomo sofrerá mutação após o cruzamento, enquanto probabilidade de 100% indica que todos os genes sofrerão mutação. A probabilidade de mutação deve ser escolhida de forma a assegurar a diversidade genética dos indivíduos, mas ao mesmo tempo evitar que a busca se torne predominantemente aleatória. Usualmente adota-se valores de probabilidade de mutação inferiores a 15%.

#### 2.4.8 Critérios de convergência

Podem ser estabelecidos diferentes critérios para determinar o instante de interrupção da execução do algoritmo. Os critérios mais usuais estão descritos a seguir.

- **Número limite de gerações:** consiste na interrupção do algoritmo quando é atingido um número pré-determinado de gerações;
- **Tempo limite:** por este critério de convergência, a execução do algoritmo é interrompida após transcorrido determinado tempo de execução;
- **Estagnação:** de acordo com este critério, a execução do algoritmo pode ser interrompida quando não ocorre melhorias na pontuação do melhor indivíduo da população durante um tempo determinado ou por um determinado número de gerações.

#### 2.4.9 Considerações finais

O bom desempenho dos Algoritmos Genéticos é fortemente dependente da adequada definição dos mecanismos de seleção, cruzamento e mutação, bem como dos valores de tamanho da população, probabilidade de cruzamento e probabilidade de mutação. Estes parâmetros devem ser escolhidos de acordo com o tipo do problema e baseados na análise empírica dos resultados por meio de uma etapa de calibração de parâmetros.

De maneira geral, os Algoritmos Genéticos são uma abordagem já bem consolidada e apresentam bons resultados para otimização de problemas complexos de engenharia, possuindo alguns aspectos de interesse como:

- Possibilidade de se otimizar problemas que possuem simultaneamente variáveis discretas e contínuas;
- Possibilidade de avaliação paralela de múltiplas soluções;
- Dispensar a necessidade de uma descrição matemática rigorosa do problema, o que pode ser crítico em problemas complexos e não-lineares;
- Relativa simplicidade de implementação;
- Versatilidade para otimização de diversos tipos de problema;
- Possibilidade de utilização híbrida com outras metodologias;
- Viabilidade de otimização de problemas restritos;
- Possibilidade de otimização com múltiplos objetivos.

Há também limitações do algoritmo, como a não-garantia de obtenção do ótimo global e a dependência da adequada escolha de mecanismos de seleção, cruzamento e mutação e da calibração dos parâmetros de forma a se obter resultados satisfatórios.

# 3 METODOLOGIA

## 3.1 Aspectos gerais

Para realização deste trabalho, foi desenvolvido um sistema de otimização estrutural baseado nos Algoritmos Genéticos, constituído pelos seguintes módulos:

- **Geometria:** conjunto de funções para manipulação paramétrica da geometria da estrutura. No procedimento de otimização geométrica são definidas coordenadas nodais como variáveis de projeto e o algoritmo deve ser capaz de alterar a geometria da estrutura atendendo simultaneamente aos critérios e restrições específicos do problema;
- **Análise estrutural:** trata-se de um módulo externo, correspondente ao programa de análise estrutural utilizado para obtenção dos esforços internos das barras para as soluções geradas pelo sistema de otimização. Por padrão, foi adotado o programa de cálculo de estruturas para linhas de transmissão CELT 2000®;
- **Dimensionamento:** algoritmo para realização do dimensionamento das barras e ligações da estrutura em conformidade com os critérios normativos e convenções adotadas;
- **Ações:** este módulo realiza o cálculo e determinação dos valores das ações atuantes sobre a estrutura, que variam em função das alterações dos perfis das barras e da geometria da estrutura;
- **Otimização:** consiste no algoritmo que realiza a execução do procedimento de otimização. Este módulo manipula os demais de maneira coordenada para a obtenção de uma solução otimizada para o problema e corresponde ao Algoritmo Genético em si.

A Figura 3.1 ilustra o esquema simplificado dos módulos do sistema de otimização.

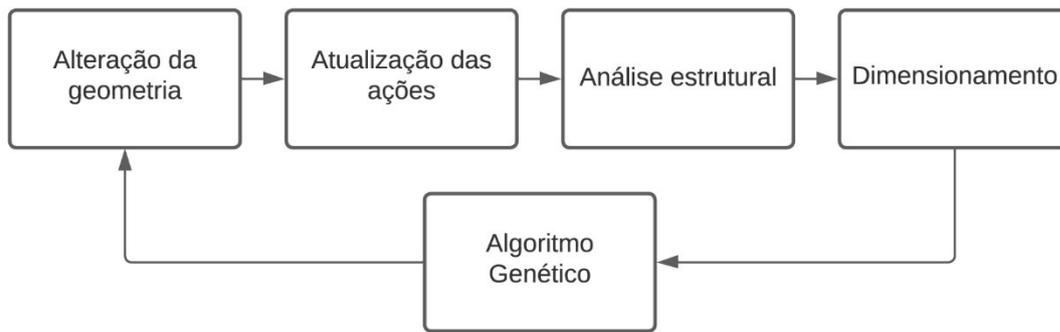


Figura 3.1: Esquema simplificado do sistema de otimização.

Os módulos internos do sistema foram desenvolvidos utilizando-se predominantemente a plataforma .NET em linguagem C# e em conformidade com os paradigmas de Programação Orientada a Objetos (POO). Para implementação do Algoritmo Genético, foi utilizada a biblioteca de código aberto GeneticSharp (GIACOMELLI, 2022). Os experimentos foram executados utilizando um computador com processador Intel Core i7-9750H 4.5GHz com 6 núcleos e 16 GB de memória RAM DDR4 2666MHz.

Foram realizados testes para validação da metodologia adotada através da utilização do sistema para otimização do problema clássico de referência da literatura da torre treliçada de 25 barras. Por fim, foram realizados experimentos para otimização do projeto de uma estrutura autoportante do tipo cara-de-gato de 525 kV, considerando os mesmos parâmetros do projeto de uma torre equivalente de referência que se encontra em operação em uma linha de transmissão no Brasil.

A metodologia empregada possui particularidades de acordo com cada problema específico e que são descritas nos itens seguintes.

### 3.2 Torre de 25 barras – *Benchmark*

A torre treliçada de 25 barras descrita a seguir é um problema de referência amplamente utilizado em diversos trabalhos de otimização estrutural. A Figura 3.2 ilustra a geometria inicial da estrutura, utilizada para inicialização do procedimento de otimização.

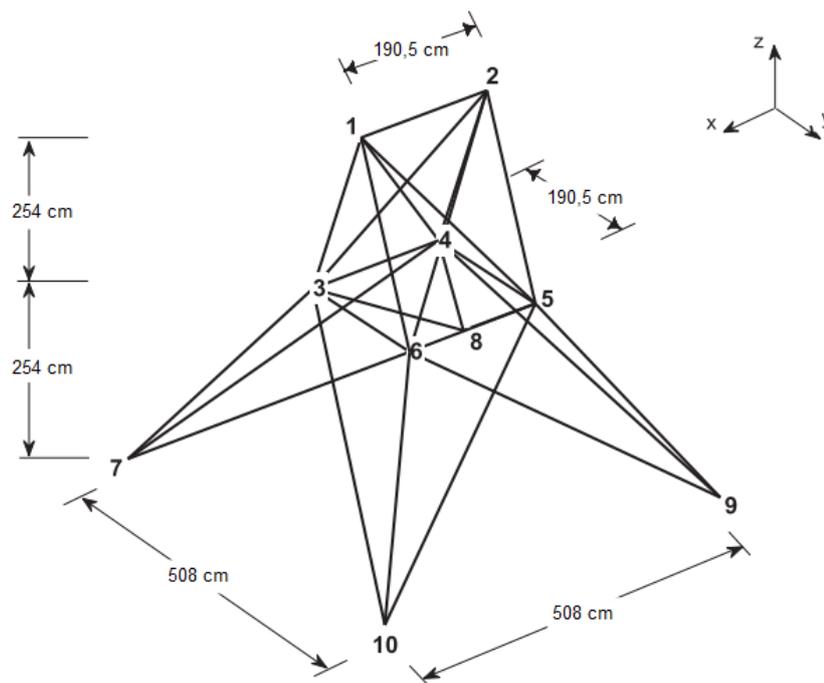


Figura 3.2: Torre de 25 barras (Adaptado de MIGUEL; LOPEZ; MIGUEL, 2013).

A Tabela 3.1 descreve as forças atuantes sobre a estrutura e a Tabela 3.2 descreve os grupos de barras de projeto.

Tabela 3.1: Carregamentos da torre de 25 barras

| Nó | $F_x$ [kgf] | $F_y$ [kgf] | $F_z$ [kgf] |
|----|-------------|-------------|-------------|
| 1  | 453,6       | -4535,9     | -4535,9     |
| 2  | 0           | -4535,9     | -4535,9     |
| 3  | 226,8       | 0           | 0           |
| 6  | 272,2       | 0           | 0           |

Tabela 3.2: Grupos de projeto da torre de 25 barras

| Grupo | Barras (nó inicial – nó final) |
|-------|--------------------------------|
| A1    | 1-2                            |
| A2    | 1-4, 2-3, 1-5, 2-6             |
| A3    | 2-5, 2-4, 1-3, 1-6             |
| A4    | 3-6, 4-5                       |
| A5    | 3-4, 5-6                       |
| A6    | 3-10, 6-7, 4-9, 5-8            |
| A7    | 3-8, 4-7, 6-9, 5-10            |
| A8    | 3-7, 4-8, 5-9, 6-10            |

A tensão máxima admissível nas barras para tração e compressão é de 276 MPa e o deslocamento nodal máximo admissível em qualquer direção para todos os nós é de 0,89 cm. O material das barras possui módulo de elasticidade de 68948 MPa e densidade de 2768 kg/m<sup>3</sup>. As áreas de seção disponíveis para o dimensionamento dos perfis são as contidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Áreas de seção para a torre de 25 barras (cm<sup>2</sup>)

|           |      |           |       |           |       |
|-----------|------|-----------|-------|-----------|-------|
| <b>1</b>  | 0,65 | <b>11</b> | 7,10  | <b>21</b> | 13,55 |
| <b>2</b>  | 1,29 | <b>12</b> | 7,74  | <b>22</b> | 14,19 |
| <b>3</b>  | 1,94 | <b>13</b> | 8,39  | <b>23</b> | 14,84 |
| <b>4</b>  | 2,58 | <b>14</b> | 9,03  | <b>24</b> | 15,48 |
| <b>5</b>  | 3,23 | <b>15</b> | 9,68  | <b>25</b> | 16,13 |
| <b>6</b>  | 3,87 | <b>16</b> | 10,32 | <b>26</b> | 16,77 |
| <b>7</b>  | 4,52 | <b>17</b> | 10,97 | <b>27</b> | 18,06 |
| <b>8</b>  | 5,16 | <b>18</b> | 11,61 | <b>28</b> | 19,35 |
| <b>9</b>  | 5,81 | <b>19</b> | 12,26 | <b>29</b> | 20,65 |
| <b>10</b> | 6,45 | <b>20</b> | 12,90 | <b>30</b> | 21,94 |

De forma a reproduzir a mesma configuração adotada por Wu e Chow (1995), Tang *et al.* (2005) e Miguel *et al.* (2013), foram estabelecidas como variáveis de projeto as coordenadas X, Y e Z dos nós 3, 4, 5 e 6 e as coordenadas X e Y dos nós 7, 8, 9 e 10. As coordenadas dos nós 1 e 2 permaneceram fixas. Adicionalmente definiu-se como requisito que seja preservada a simetria da estrutura em relação aos planos XZ e YZ. Dessa forma, foram definidas 5 variáveis de projeto relacionadas à geometria da estrutura, conforme descrito na Tabela 3.4 com as respectivas faixas de variação, e 8 variáveis de projeto relacionadas ao dimensionamento, correspondentes à área de seção adotada para cada grupo de projeto.

Tabela 3.4: Variáveis geométricas da torre de 25 barras

| Variável de projeto | Valor mínimo (cm) | Valor máximo (cm) |
|---------------------|-------------------|-------------------|
| $x_4$               | 50,8              | 152,4             |
| $x_8$               | 101,6             | 203,2             |
| $y_4$               | 101,6             | 203,2             |
| $y_8$               | 100,0             | 355,6             |
| $z_4$               | 228,6             | 330,2             |

Cada possível solução para o problema foi representada no algoritmo genético por meio de um cromossomo com 13 genes em que cada gene representa uma variável de projeto. Os 8 genes correspondentes às variáveis de projeto dimensionais foram codificados como valores inteiros variando na faixa de 1 a 30, sendo que cada valor corresponde ao índice de uma área de seção

dentre as disponíveis na Tabela 3.3. Os 5 genes correspondentes às variáveis de projeto geométricas foram codificados como valores decimais com precisão de 1 casa decimal variando de acordo com a respectiva faixa conforme a Tabela 3.4, sendo que o valor do gene corresponde ao valor em cm da respectiva coordenada.

A Figura 3.3 ilustra o cromossomo de um indivíduo que representa uma possível solução para o problema da torre de 25 barras.

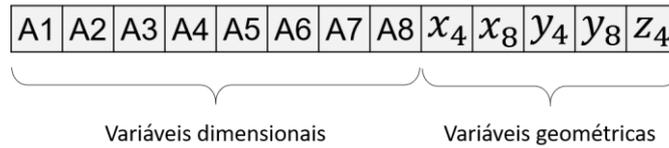


Figura 3.3: Cromossomo da torre de 25 barras.

O algoritmo foi configurado para execução com uma população inicial de 60 indivíduos, sendo que cada indivíduo corresponde à uma solução gerada com valores aleatórios para os cromossomos dentro das respectivas faixas de variação admissíveis. Foi estabelecido um critério de parada de 200 gerações, correspondentes às iterações cíclicas do algoritmo.

Baseado na metodologia adotada por Rajeev e Krishnamoorthy (1992), a avaliação dos indivíduos foi realizada por meio das Eqs. (3.1) a (3.5):

$$N_{tb} = 20000 - (P_{tb} + 10 \cdot \Omega \cdot P_{tb}) \quad (3.1)$$

$$P_{tb} = \sum_{i=1}^n \rho A_i L_i \quad (3.2)$$

$$\Omega = \sum_{i=1}^n P_{b_i} + \sum_{i=1}^n P_{n_i} \quad (3.3)$$

$$P_{b_i} = \begin{cases} 0, & \text{se } \sigma \leq \sigma_{max} \\ \frac{\sigma}{\sigma_{max}} - 1, & \text{se } \sigma > \sigma_{max} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$P_{ni} = \begin{cases} 0, & \text{se } \Delta_{x,y,z} \leq \Delta_{max} \\ \frac{\Delta_{x,y,z}}{\Delta_{max}} - 1, & \text{se } \Delta_{x,y,z} > \Delta_{max} \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde,

- $N_{tb}$  é a pontuação atribuída ao indivíduo, cujo valor deve ser maximizado pelo algoritmo;
- $P_{tb}$  é o peso próprio da estrutura em [kgf];
- $\Omega$  é o fator de penalização por infringência de restrições;
- $\rho$  é a densidade do material utilizado em [kg/m<sup>3</sup>];
- $A_i$  é a área da *i*ésima barra da estrutura em [m<sup>2</sup>];
- $L_i$  é o comprimento da *i*ésima barra da estrutura em [m];
- $P_{bi}$  é a penalização por infringência da restrição de tensão máxima da *i*ésima barra;
- $P_{ni}$  é a penalização por infringência da restrição de deslocamento nodal máximo no *i*ésimo nó;

Foram realizados experimentos variando os operadores de seleção, cruzamento e mutação do algoritmo para determinar a melhor combinação para o problema. A partir da análise dos resultados desses experimentos, foram adotados os seguintes operadores genéticos:

- Seleção por torneio;
- Cruzamento uniforme com probabilidade de cruzamento de 0,75;
- Mutação uniforme com probabilidade de mutação de 0,10.

A Figura 3.4 ilustra como é realizado o cruzamento uniforme entre os cromossomos deste problema.

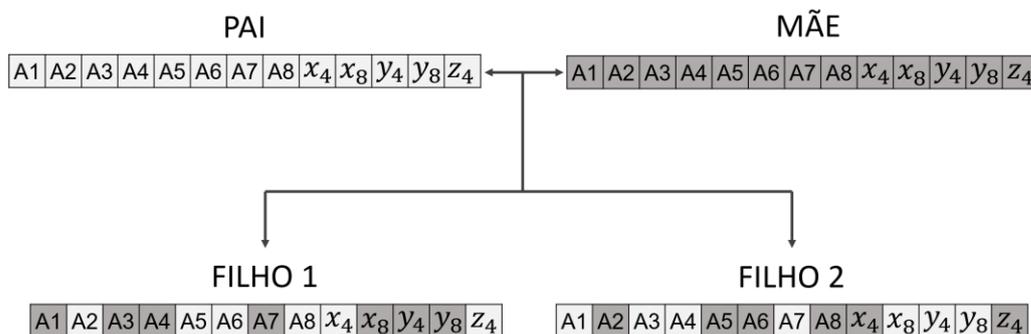


Figura 3.4: Cruzamento uniforme.

### 3.3 Torre autoportante de 525 kV

#### 3.3.1 Torre de referência

Os parâmetros de projeto de uma torre de suspensão autoportante de circuito simples do tipo cara-de-gato que está em operação em uma linha de 525 kV no Brasil foram selecionados para a aplicação da metodologia de otimização proposta neste trabalho, de forma que os resultados obtidos pelo algoritmo possam ser comparados com este projeto de referência.

A Tabela 3.5 demonstra alguns dos parâmetros básicos considerados no projeto da torre de referência.

Tabela 3.5: Parâmetros básicos do projeto

|                    |                           |
|--------------------|---------------------------|
| Tensão             | 525 kV                    |
| Circuito           | Simplex, com 2 para-raios |
| Aplicação          | Suspensão                 |
| Ângulo de deflexão | 0° / 6°                   |
| Vão médio (m)      | 700 / 525                 |

A torre de referência possui altura total variando entre 33,5 m e 69,5 m entre as suas composições. A Figura 3.5 ilustra a silhueta da torre em sua composição mais alta, composta pelos trechos definidos como Cabeça, Tronco comum, Extensão de 24,0 m e Pés de 10,5 m, totalizando 1614 barras. Na Figura 3.5, porém, as barras redundantes e algumas vistas e cortes

foram omitidos para simplificação. A Tabela 3.6 relaciona todos os componentes comuns e intercambiáveis da torre de referência.

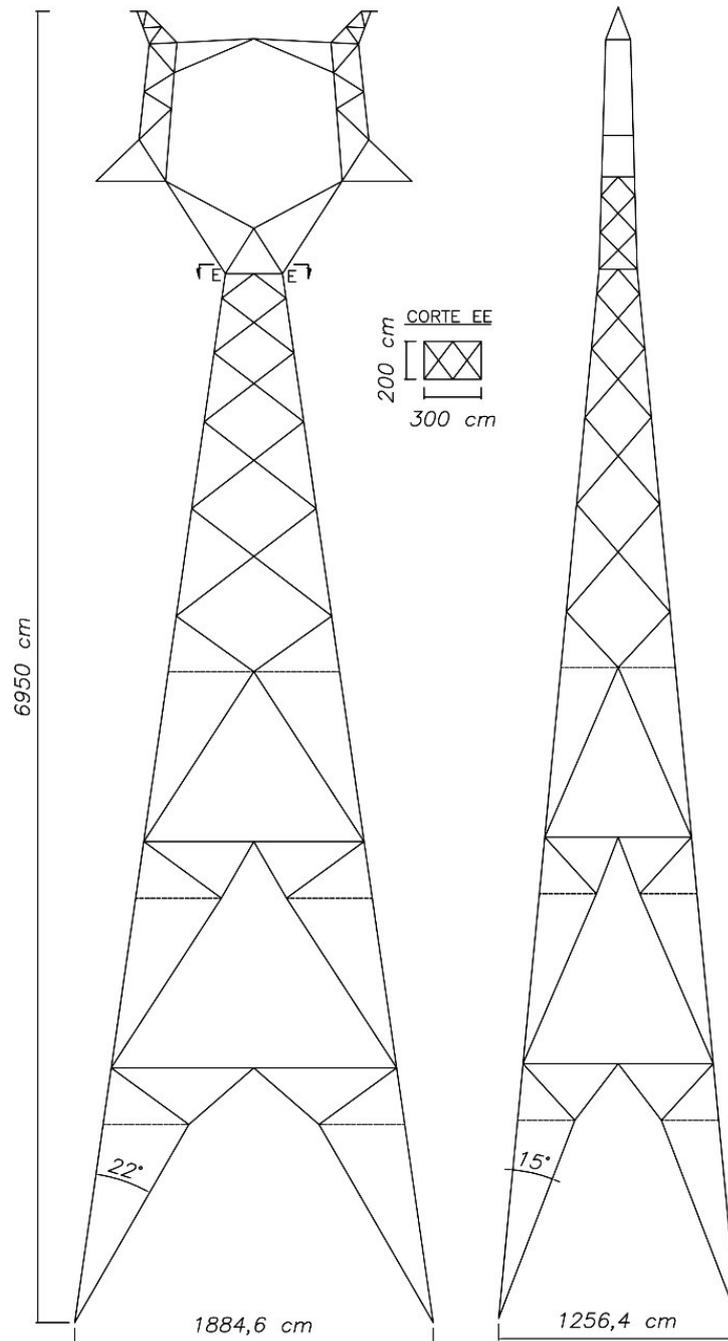


Figura 3.5: Torre de referência na composição mais alta.

Tabela 3.6: Componentes da torre de referência.

| Componentes comuns | Componentes intercambiáveis |                 |
|--------------------|-----------------------------|-----------------|
| Cabeça             | Pé 1,5 m                    | Extensão 6,0 m  |
| Tronco comum       | Pé 3,0 m                    | Extensão 12,0 m |
|                    | Pé 4,5 m                    | Extensão 18,0 m |
|                    | Pé 6,0 m                    | Extensão 24,0 m |
|                    | Pé 7,5 m                    |                 |
|                    | Pé 9,0 m                    |                 |
|                    | Pé 10,5 m                   |                 |

Foram consideradas 53 hipóteses de ações atuantes sobre a estrutura para realização da análise estrutural e dimensionamento das barras e ligações. A Tabela 3.7 relaciona as principais hipóteses consideradas, sendo que as hipóteses omitidas são variações destas principais.

Tabela 3.7: Hipóteses de ações atuantes sobre a torre de referência

| Hipótese | Descrição   |
|----------|---|
| 1        | Cabos intactos, com vento transversal máximo (90°)              |
| 2        | Cabos intactos, com vento longitudinal máximo                   |
| 3        | Cabos intactos, com vento máximo a 45°, 60° ou 75°              |
| 4        | Ruptura do cabo de 1 fase, sem vento                            |
| 5        | Ruptura do cabo de 1 para-raios, sem vento                      |
| 6        | Construção/Manutenção, sem vento                                |
| 7        | Cabos intactos, com vento transversal de alta intensidade       |
| 8        | Cabos intactos, com vento longitudinal de alta intensidade      |
| 9        | Cabos intactos, com vento de alta intensidade a 45°, 60° ou 75° |
| 10       | Contenção de queda em cascata, sem vento                        |
| 11       | Grampeamento, sem vento   |

A descrição detalhada das forças aplicadas na estrutura para cada hipótese de ações e os respectivos fatores de sobrecarga adotados estão disponíveis no Apêndice A.

Os valores das velocidades de vento de referência utilizadas para a determinação das hipóteses relacionadas à ação do vento foram obtidos dos dados do estudo climatológico realizado para a região de instalação da linha de transmissão, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para

determinação das ações de vento máximo, considerando os critérios da norma IEC 60826 (2017), foi adotado um vento com velocidade de 35,28 m/s para um período de retorno de 250 anos. Para as ações de vento de alta intensidade, em consonância com as recomendações da Brochura Técnica 350 do Cigré (2008) foi considerado um vento com velocidade de 56,94 m/s, constante com a altura, atuando integralmente sobre a estrutura e sobre 25% do vão médio. Em todos os cálculos foram consideradas a massa específica do ar igual a 1,226 kg/m<sup>3</sup> e a aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Para cada hipótese de ações, foi realizada a análise estrutural da torre em 20 composições, considerando 4 possíveis combinações de pés para cada altura de extensão dentre as 4 relacionadas na Tabela 3.6, além da configuração sem extensão. As barras da estrutura foram agrupadas por critérios de simetria e similaridade de função estrutural em um total de 85 grupos de projeto, cada grupo identificado por um código próprio.

Os materiais empregados no projeto estão relacionados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Materiais empregados no projeto

| <b>Aço estrutural</b> |  |
|-----------------------|--|
| ASTM A36              | $F_y = 2531 \text{ kgf/cm}^2$<br>$F_u = 4077 \text{ kgf/cm}^2$ |
| ASTM A572 GRAU 50     | $F_y = 3515 \text{ kgf/cm}^2$<br>$F_u = 4570 \text{ kgf/cm}^2$ |
| ASTM A572 GRAU 60     | $F_y = 4218 \text{ kgf/cm}^2$<br>$F_u = 5273 \text{ kgf/cm}^2$ |
| <b>Parafusos</b>      |  |
| ASTM A394 TIPO 0      | $F_v = 2620 \text{ kgf/cm}^2$                                  |

### 3.3.2 Variação da geometria

As dimensões da base e do topo do tronco inclinado da torre de 525 kV em sua composição mais alta foram definidas como as variáveis para o problema de otimização proposto. A Figura 3.6 ilustra a silhueta tridimensional da estrutura em sua composição mais alta com a indicação dos nós de referência B e C, correspondentes à base e ao topo do tronco inclinado, respectivamente.

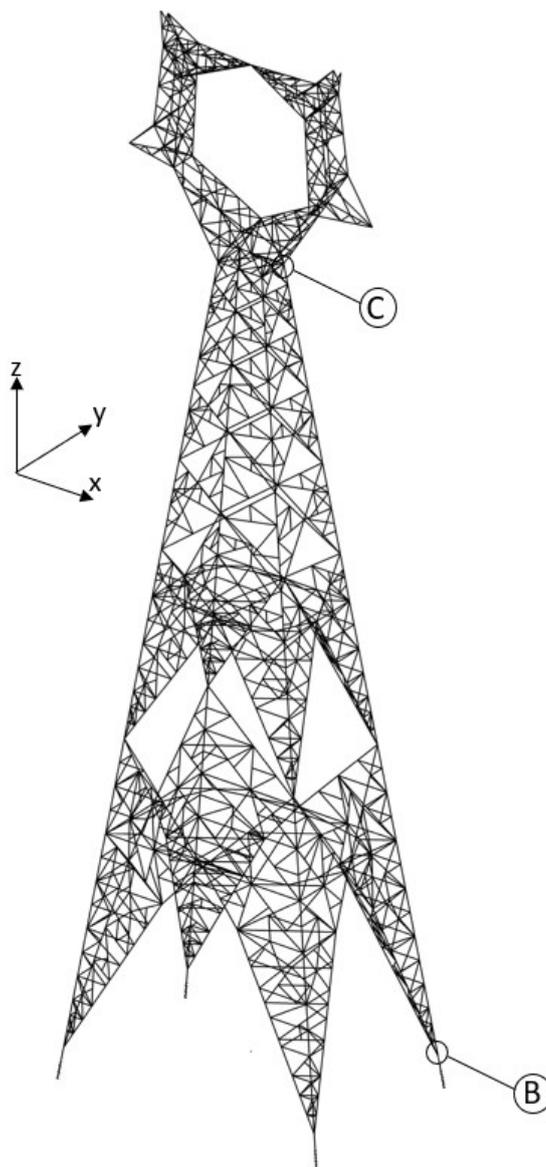


Figura 3.6: Silhueta 3D da torre de 525 kV.

Estabeleceu-se que a coordenada referente à altura dos nós de referência é mantida fixa, restando como variáveis apenas as coordenadas X e Y, conforme o sistema de coordenadas indicado na Figura 3.6.

Assumiu-se como requisito a preservação da simetria da estrutura em relação aos planos XZ e YZ, de forma que, considerando a origem do sistema de coordenadas no eixo de simetria vertical da torre, os valores das coordenadas dos nós simétricos aos nós de referência B e C são sempre iguais aos valores das coordenadas destes, modificando apenas o sinal correspondente ao quadrante em que cada nó está contido. Adicionalmente, estabeleceu-se que a razão entre as dimensões nas direções X e Y é constante entre a base da torre e o topo do tronco inclinado, ou seja, é mantida a regularidade do tronco. Dessa forma, bastam 3 valores de coordenadas para descrever todos as variáveis geométricas independentes do problema de otimização proposto:

- Coordenada X do nó C
- Coordenada Y do nó C
- Coordenada X do nó B

As faces externas do tronco inclinado da torre distinguem-se entre as faces transversais ou longitudinais, em relação à direção dos cabos condutores na linha de transmissão, conforme indicado na Figura 3.7. A alteração da geometria da torre foi realizada de maneira que as barras que originalmente estão contidas nos planos das faces transversais e longitudinais, permanecessem nos respectivos planos na configuração alterada.

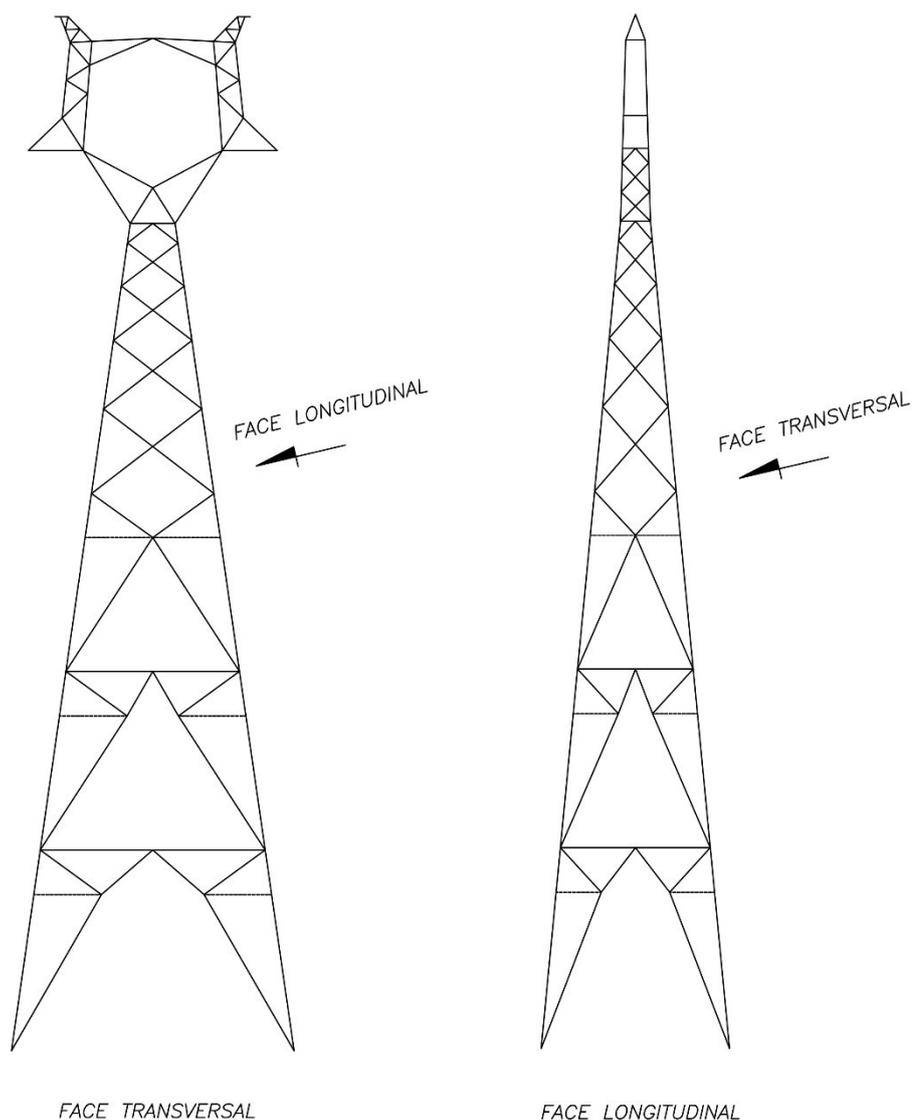


Figura 3.7: Faces transversal e longitudinal da estrutura da torre avaliada.

Adicionalmente, o tratamento para alteração paramétrica da geometria assegura a preservação da intercambialidade na montagem dos componentes da torre. Neste sentido, devem ser mantidas a compatibilidade de dimensões que viabilizem a montagem do topo de todas as extensões sob a base do tronco comum, e do topo de todos os pés sob as bases do tronco comum e das extensões.

Na implementação do módulo de alteração da geometria, além dos critérios descritos acima, foi considerado ainda o critério de preservação da proporcionalidade das divisões das barras no treliçamento da estrutura, em relação às proporções do modelo de base utilizado para inicialização do algoritmo.

### 3.3.3 Análise estrutural

Após a alteração da geometria do modelo estrutural descrita no item 3.3.2, realizada iterativamente pelo algoritmo de otimização ao longo de sua execução, é realizada a análise estrutural estática linear das 20 composições da torre para cada uma das 53 hipóteses de ações, conforme descrito no item 3.3.1.

As análises estruturais são realizadas por meio do *software* CELT 2000®, executado via IPC (*Inter-Process Communication*) após a alteração pelo sistema de otimização dos arquivos de entrada para execução das análises. O CELT 2000® realiza a análise estrutural dos modelos por meio da implementação computacional do Método dos Elementos Finitos para análise de treliças. Após a execução do processo, o sistema de otimização realiza a leitura dos arquivos de saída do CELT 2000® para obtenção dos esforços atuantes nas barras, considerando os esforços máximos para cada grupo de barras do projeto entre todas as condições analisadas.

### 3.3.4 Dimensionamento conforme a norma americana ASCE 10-15

A partir da obtenção dos esforços máximos atuantes nas barras, é realizado o dimensionamento das barras e ligações da estrutura, conforme os critérios da norma ASCE 10-15 – *Design of Latticed Steel Transmission Structures* (2015).

Esta etapa consiste na seleção do perfil de cantoneira de menor peso linear que atenda aos critérios normativos para cada grupo de barras de projeto, considerando os perfis disponíveis na Tabela 3.9, sendo permitida ainda a composição dupla de todos os perfis indicados.

Tabela 3.9: Perfis para dimensionamento da torre de 525 kV

| Perfil        | Peso linear (kgf/m) | Área (cm <sup>2</sup> ) |
|---------------|---------------------|-------------------------|
| L40x40x3      | 1,84                | 2,35                    |
| L45x45x3      | 2,09                | 2,66                    |
| L50x50x3      | 2,33                | 2,96                    |
| L40x40x4      | 2,42                | 3,08                    |
| L45x45x4      | 2,74                | 3,49                    |
| L40x40x5      | 2,97                | 3,79                    |
| L50x50x4      | 3,06                | 3,89                    |
| L45x45x5      | 3,38                | 4,30                    |
| L60x60x4      | 3,70                | 4,72                    |
| L50x50x5      | 3,77                | 4,80                    |
| L65x65x4      | 4,02                | 5,13                    |
| L60x60x5      | 4,57                | 5,82                    |
| L65x65x5      | 4,98                | 6,34                    |
| L75x75x5      | 5,71                | 7,27                    |
| L65x65x6      | 5,91                | 7,53                    |
| L75x75x6      | 6,87                | 8,72                    |
| L75x75x7      | 7,92                | 10,10                   |
| L90x90x6      | 8,30                | 10,60                   |
| L75x75x8      | 8,95                | 11,40                   |
| L100x100x6    | 9,26                | 11,80                   |
| L90x90x7      | 9,58                | 12,20                   |
| L100x100x7    | 10,70               | 13,70                   |
| L90x90x8      | 10,90               | 13,90                   |
| L100x100x8    | 12,20               | 15,50                   |
| L100x100x10   | 15,00               | 19,20                   |
| L100x100x12   | 17,80               | 22,70                   |
| L127x127x9,5  | 18,30               | 23,29                   |
| L152x152x9,5  | 22,17               | 28,13                   |
| L127x127x12,7 | 24,11               | 30,65                   |
| L152x152x12,7 | 29,17               | 37,10                   |
| L127x127x15,9 | 29,76               | 37,81                   |
| L152x152x15,9 | 36,01               | 45,87                   |
| L203x203x12,7 | 39,29               | 50,00                   |
| L152x152x19,1 | 42,71               | 54,45                   |
| L203x203x15,9 | 48,66               | 62,00                   |
| L203x203x19,1 | 57,89               | 73,55                   |

As barras do modelo estrutural adotado distinguem-se entre barras principais e barras redundantes. As barras redundantes têm como função principal aumentar a rigidez da estrutura e reduzir o comprimento destravado das barras principais, aumentando assim a sua resistência

quanto à falha pelo mecanismo de flambagem. Para o dimensionamento das barras redundantes, foi considerado o esforço atuante equivalente a 2,5% do esforço máximo atuante na barra principal na qual a barra redundante está ligada.

Estão resumidos abaixo os principais critérios adotados para o dimensionamento das barras. As resistências das barras calculadas conforme estes critérios foram minoradas por um coeficiente de 0,90, de forma a assegurar a confiabilidade da estrutura para um limite de exclusão de 10%, conforme proposto pelo estudo de Rieira et al. apresentado na bienal do Cigré em Paris (1990) e discutido por Soares et al. (2009).

#### 3.3.4.1 Dimensionamento à compressão:

A tensão máxima admissível em cantoneiras submetidas à compressão deve atender às seguintes equações:

$$F_a = \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y; \quad \frac{KL}{r} \leq C_c \quad (3.6)$$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{KL}{r} \right)^2}; \quad \frac{KL}{r} > C_c \quad (3.7)$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (3.8)$$

Onde,

- $F_a$  é a tensão máxima admissível;
- $F_y$  é a tensão de escoamento do material;
- $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal;
- $L$  é o comprimento destravado;
- $r$  é o raio de giração do perfil;
- $K$  é o coeficiente de comprimento efetivo;
- $C_c$  é a esbeltez crítica que delimita a flambagem elástica e inelástica;

Adicionalmente, a razão  $w/t$ , onde  $w =$  largura plana da aba e  $t =$  espessura da aba, conforme indicado na Figura 3.8, não deve exceder 25.

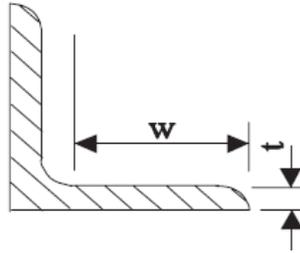


Figura 3.8: Determinação da razão  $w/t$

Caso  $w/t$  seja superior à  $(w/t)_{lim}$ , dado por:

$$(w/t)_{lim} = \frac{209,6}{\sqrt{F_y}} \quad (3.9)$$

a tensão máxima admissível deve ser calculada pelas Eqs. (3.6) a (3.8), com  $F_y$  substituído por  $F_{cr}$  dado por:

$$F_{cr} = \left[ 1,677 - 0,677 \frac{w/t}{(w/t)_{lim}} \right] F_y; \quad (w/t)_{lim} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{377,28}{\sqrt{F_y}} \quad (3.10)$$

$$F_{cr} = \frac{0,0332\pi^2 E}{(w/t)^2}; \quad \frac{w}{t} > \frac{377,28}{\sqrt{F_y}} \quad (3.11)$$

Para as Eqs. (3.9) a (3.11) foi considerado  $F_y$  em MPa.

Para montantes, a razão de esbelteza dada por  $L/r$  não deve exceder 150. Para outras barras, exceto barras redundantes, a razão de esbelteza dada por  $KL/r$  não deve exceder 200. Para barras redundantes, a razão de esbelteza dada por  $KL/r$  não deve exceder 250. O valor do comprimento destravado  $KL$  deve ser calculado conforme as equações abaixo.

- Montantes presos pelas 2 abas:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 150 \quad (3.12)$$

- Outras barras com carregamento concêntrico nas duas extremidades:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (3.13)$$

- Outras barras com carregamento concêntrico em uma extremidade e excêntrico na outra:

$$\frac{KL}{r} = 30 + 0,75 \frac{L}{r}; \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (3.14)$$

- Outras barras com carregamento excêntrico nas duas extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0,5 \frac{L}{r}; \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (3.15)$$

- Outras barras não-restringidas em relação à rotação nas duas extremidades, exceto barras redundantes:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 200 \quad (3.16)$$

- Outras barras parcialmente restringidas em relação à rotação em uma extremidade, exceto barras redundantes:

$$\frac{KL}{r} = 28,6 + 0,762 \frac{L}{r}; \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 225 \quad (3.17)$$

- Outras barras parcialmente restringidas em relação à rotação nas duas extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 46,2 + 0,615 \frac{L}{r}; \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250 \quad (3.18)$$

- Barras redundantes não-restringidas em relação à rotação nas duas extremidades:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250 \quad (3.19)$$

- Barras redundantes parcialmente restringidas em relação à rotação em uma extremidade:

$$\frac{KL}{r} = 28,6 + 0,762 \frac{L}{r}; \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 290 \quad (3.20)$$

### 3.3.4.2 Dimensionamento à tração:

A tensão máxima admissível para cantoneiras presas pelas duas abas e submetidas ao esforço de tração deverá ser igual à tensão de escoamento do material, considerando a transmissão do esforço pela área líquida da cantoneira, calculada conforme a equação abaixo.

$$A_n = A_g - \sum_i^n d_i \cdot t \quad (3.21)$$

Onde,

$A_n$  é a área líquida;

$A_g$  é a área bruta;

$d_i$  é o maior diâmetro de furo da  $i$ ésima linha de furação;

$n$  é o número de linhas de furação;

$t$  é a espessura da cantoneira.

Para cantoneiras presas por somente uma aba, a tensão máxima admissível deve ser  $0,9 \cdot F_y$ , considerando o esforço transmitido pela área líquida da cantoneira, calculada conforme a Eq. (3.21).

### 3.3.4.3 Dimensionamento à flexão

Considerando a hipótese de ação do peso próprio de pessoas atuando sobre as barras durante as etapas de montagem e manutenção da estrutura, as barras com ângulo de inclinação em relação à horizontal inferior à  $45^\circ$  deverão ser verificadas quanto à resistência à flexão considerando uma ação de 100 kgf com direção perpendicular à direção da barra e localizada em seu ponto médio. Essa verificação deve assegurar o atendimento ao critério estabelecido pela equação abaixo.

$$\frac{100 \cdot L_b}{4} \leq W \cdot F_y \quad (3.22)$$

Onde,

$L_b$  é o comprimento da barra em cm;

$W$  é o módulo de resistência à flexão da cantoneira em  $\text{cm}^3$ ;

$F_y$  é a tensão de escoamento do material em  $\text{kgf/cm}^2$ .

#### 3.3.4.4 Dimensionamento das ligações

Na implementação do algoritmo proposto neste trabalho, o dimensionamento das ligações consiste na verificação da resistência das ligações em relação ao cisalhamento dos parafusos e ao esmagamento das peças conectadas, considerando que o atendimento a estes critérios pode determinar a seleção do perfil que será adotado nas barras.

A Equação (3.23), descreve o critério de verificação de resistência dos parafusos ao cisalhamento.

$$F \leq n_p \cdot A_p \cdot F_v \cdot p \quad (3.23)$$

Onde,

$F$  é a força de tração ou compressão atuante sobre a barra;

$n_p$  é o número de parafusos da ligação;

$A_p$  é a área da seção do corpo dos parafusos;

$F_v$  é a tensão de cisalhamento máxima admissível no parafuso;

$p$  é o número de planos de cisalhamento da ligação.

A Equação (3.24), descreve o critério de verificação de resistência da ligação ao esmagamento das peças conectadas, que podem ser chapas ou cantoneiras.

$$f \cdot F_u \geq \frac{(F/n_p)}{\phi_p \cdot t} \quad (3.24)$$

Onde,

$f$  é o fator de esmagamento, que, pelos critérios estabelecidos neste trabalho, pode ser 1,0833 ou 1,25;

$F_u$  é a tensão de ruptura da peça;

$F$  é a força de tração ou compressão atuante sobre a barra;

$n_p$  é o número de parafusos na ligação;

$\varnothing_p$  é o diâmetro dos parafusos;

$t$  é a espessura da peça.

### 3.3.5 Ações

Foi implementado um módulo para determinação das forças relativas às ações do peso próprio e do vento atuante sobre a estrutura. Após a determinação dos valores das forças atuantes, é realizada, para cada hipótese de ações, a aplicação das forças nodais equivalentes no modelo estrutural de treliça espacial para realização das análises estruturais.

#### 3.3.5.1 Peso próprio

A ação referente ao peso próprio da estrutura é calculada a partir da Eq. (3.25), que determina o peso das cantoneiras, cujo valor foi majorado em 12,9% para consideração do peso adicional referente às chapas, parafusos e galvanização.

$$P = \sum_i^n L_i \cdot p_i \quad (3.25)$$

Onde,

$P$  é o peso próprio da torre em kgf;

$L_i$  é o comprimento da  $i$ ésima barra em m;

$p_i$  é o peso linear do perfil adotado na  $i$ ésima barra em kgf/m;

$n$  é o número total de barras;

O coeficiente de majoração foi determinado, simplificadamente, pela soma da razão do peso total de cada componente da torre de referência sobre o respectivo peso somente das cantoneiras do componente, ponderada pela proporção do peso de cada componente em relação à soma do peso de todos os componentes, conforme a Eq. (3.26).

$$M = \sum_i^n W_i \cdot N_i \quad (3.26)$$

Onde,

- M é o coeficiente de majoração do peso das cantoneiras;
- $W_i$  é a razão entre o peso total do *i*ésimo componente sobre o respectivo peso de cantoneiras do componente;
- $N_i$  é a razão entre o peso total do *i*ésimo componente sobre a soma do peso de todos os componentes;
- n é o número total de componentes;

### 3.3.5.2 Vento atuante sobre a estrutura

A ação referente ao vento atuante sobre a estrutura foi determinada em conformidade com os critérios da norma IEC 60826 (2017).

Para realização das análises estruturais, a ação do vento sobre a estrutura foi considerada individualmente em 15 painéis distintos, cada painel com seus respectivos limites inferior e superior de altura e composto pelas barras contidas nestes limites. A força relativa à ação do vento em cada painel foi igualmente dividida e aplicada no modelo estrutural como forças nodais nos níveis de vento inferior e superior do painel.

As Equações (3.27) a (3.30) resumem a formulação dos principais critérios implementados para cálculo das ações das hipóteses relativas à ação de vento máximo e vento de alta intensidade.

$$FW = q_0 \cdot G_t \cdot C_a \cdot A_e \quad (3.27)$$

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{(K_r \cdot V_r)^2}{g} \quad (3.28)$$

$$FW_i = q_i \cdot C_a \cdot A_e \quad (3.29)$$

$$q_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{V_i^2}{g} \quad (3.30)$$

Onde,

- $F_W$  é a força de vento máximo do painel;
- $q_0$  é a pressão dinâmica de referência associada ao vento máximo;
- $G_t$  é o fator de rajada, obtido em função da altura de referência do painel;

- $C_a$  é o coeficiente de arrasto, calculado em função da razão entre  $A_e$  (área exposta ao vento) e  $A_b$  (área de contorno associada a  $A_e$ ) do painel;
- $A_e$  Área exposta ao vento;
- $\rho$  é a massa específica do ar;
- $K_r$  é o coeficiente da correção da velocidade de referência do vento, em função da rugosidade do solo. Neste trabalho, foi considerado igual a 1,0;
- $V_r$  é o vento de referência relativo à ação de vento máximo;
- $g$  é a aceleração da gravidade, considerada igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>;
- $FW_i$  é a força de vento de alta intensidade do painel;
- $q_i$  é a pressão dinâmica de referência associada ao vento de alta intensidade;
- $V_i$  é o vento de referência relativo à ação de vento de alta intensidade.

### 3.3.6 Implementação do Algoritmo Genético

#### 3.3.6.1 Cromossomo

Conforme descrito no item 3.3.2, há apenas de 3 variáveis independentes no problema proposto, correspondentes aos valores das coordenadas X e Y do nó de referência do topo e ao valor da coordenada X do nó de referência da base do tronco inclinado. Dessa forma, para codificação das possíveis soluções para execução do Algoritmo Genético, foi considerado um cromossomo constituído por uma cadeia de 3 valores inteiros, conforme ilustrado na Figura 3.9.

$$\boxed{x_c \mid y_c \mid y_b}$$

Figura 3.9: Cromossomo do AG para a torre de 525 kV

A Tabela 3.10 indica as respectivas faixas de variação definidas para cada variável do problema.

Tabela 3.10: Faixas de variação das variáveis

| Variável de projeto | Valor mínimo (cm) | Valor máximo (cm) |
|---------------------|-------------------|-------------------|
| $x_c$               | 120               | 180               |
| $y_c$               | 80                | 120               |
| $x_b$               | 750               | 1000              |

### 3.3.6.2 Avaliação das soluções geradas

A métrica de desempenho adotada para avaliação das soluções foi o peso próprio da estrutura, de forma que as soluções de menor peso próprio fossem mais bem avaliadas. Adicionalmente, foram implementadas penalizações sobre a pontuação atribuída a cada solução, de forma a atender às seguintes restrições:

- I. **Taxa de trabalho:** a razão entre o esforço atuante nas barras e ligações e o respectivo esforço resistente deve ser igual ou inferior à 1;
- II. **Ângulo de fechamento dos pés:** o ângulo de fechamento dos pés, indicado por  $\beta$  na Figura 3.10, deve ser igual ou superior à  $15^\circ$ , sendo que a determinação da largura superior dos pés deve atender aos requisitos de intercambialidade entre os componentes da torre;
- III. **Razão entre as dimensões da base:** a razão entre as dimensões longitudinal e transversal da base da torre deve ser igual ou maior a  $2/3$  e menor ou igual a 1.

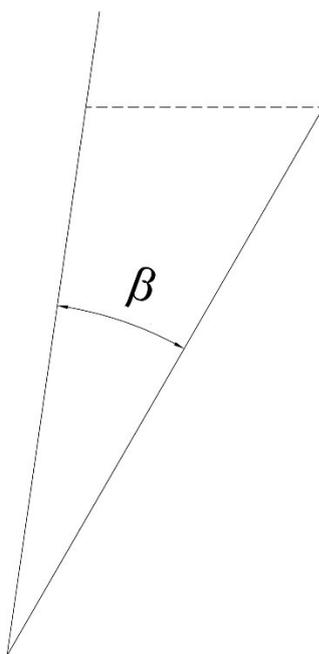


Figura 3.10: Ângulo de fechamento dos pés

Para determinação do peso próprio da estrutura, cada solução gerada pelo Algoritmo Genético, com sua respectiva geometria, foi primeiramente submetida ao procedimento de análise estrutural e dimensionamento das barras, conforme os itens 3.3.3 e 3.3.4.

A alteração dos perfis das barras, realizada na etapa de dimensionamento, implica na alteração das ações relativas ao peso próprio e da ação do vento atuante sobre a estrutura, conforme os critérios do item 3.3.5. Devido a esta interdependência entre as etapas de análise estrutural, dimensionamento e atualização das ações, foi necessário implementar a execução desta sequência de etapas de forma iterativa, por meio de execuções sucessivas até a estabilização do dimensionamento da estrutura na nova geometria, indicada pela não-alteração de perfis na etapa de dimensionamento, conforme ilustrado pela Figura 3.11.

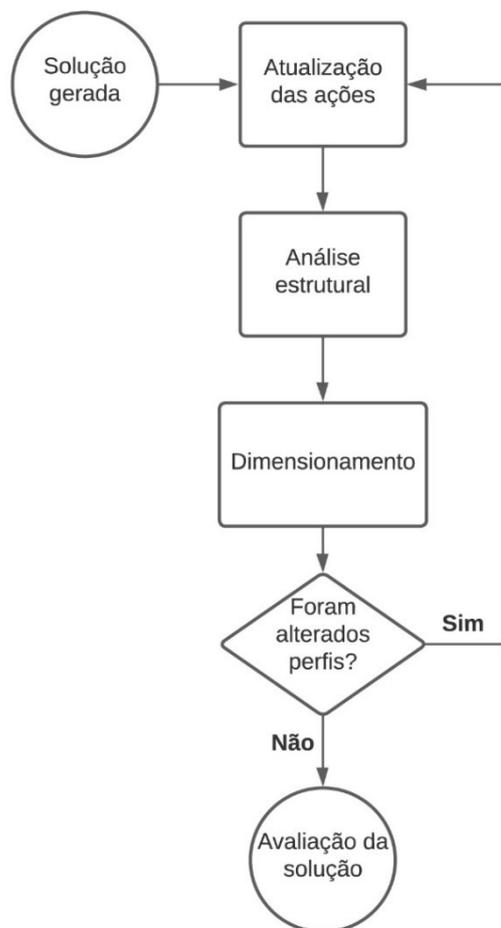


Figura 3.11: Fluxograma de avaliação das soluções geradas.

A pontuação atribuída para cada solução gerada pelo Algoritmo Genético, representada por meio do respectivo cromossomo, é determinada de acordo com as Eqs. (3.31) a (3.36).

$$N = 20^4 - (P + 10 \cdot \Omega \cdot P) \quad (3.31)$$

$$P = \sum_i^n L_i \cdot p_i \quad (3.32)$$

$$\Omega = 0,4 \cdot P_b + 0,3 \cdot P_a + 0,3 \cdot P_r \quad (3.33)$$

$$P_b = N_i/N_t \quad (3.34)$$

$$P_a = \begin{cases} 0, & \text{se } \beta \geq 15 \\ 1 - \frac{\beta}{15}, & \text{se } \beta < 15 \end{cases} \quad (3.35)$$

$$P_r = \begin{cases} 0, & \text{se } 2/3 \leq r_b \leq 1 \\ r_b - 1, & \text{se } r_b > 1 \\ 2/3 - r_b, & \text{se } r_b < 2/3 \end{cases} \quad (3.36)$$

Onde,

- N é a pontuação atribuída à solução, cujo valor deve ser maximizado pelo algoritmo;
- P é o peso próprio da estrutura em [kgf];
- $\Omega$  é o fator de penalização por infringência de restrições;
- $L_i$  é o comprimento da *i*ésima barra da estrutura em m;
- $p_i$  é o peso linear do perfil adotado para a *i*ésima barra da estrutura, em [kgf/m];
- n é o número de barras da estrutura;
- $P_b$  é a penalização por infringência do critério de taxa de trabalho limite das barras e ligações;
- $P_a$  é a penalização por infringência do critério de ângulo mínimo dos pés;
- $P_r$  é a penalização por infringência do critério de faixa de razão admissível entre as dimensões longitudinal e transversal;
- $N_i$  é o número de barras de não atenderam ao critério de taxa de trabalho limite com nenhum perfil da tabela;
- $N_t$  é o número total de barras da torre;
- $\beta$  é o ângulo de fechamento dos pés;
- $r_b$  é a razão entre as dimensões longitudinal e transversal da base da torre.

### 3.3.6.3 Operadores e parâmetros genéticos

Para execução do Algoritmo Genético foi implementado um mecanismo de seleção híbrido, baseado na seleção por torneio binário e na seleção elitista, com preservação de 10% dos melhores indivíduos da população entre as gerações, conforme descrito no item 2.4.4.

O método de cruzamento adotado foi o cruzamento uniforme, com probabilidade de cruzamento de 0,9. Para a mutação, foi implementado o método de mutação uniforme, com probabilidade de mutação de 0,15. As principais características destes métodos estão descritas nos itens 2.4.5 e 0, respectivamente.

O algoritmo foi configurado para gerar uma população inicial de 40 indivíduos e, como critério de convergência, adotou-se a interrupção de execução do algoritmo após 40 gerações.

A Figura 3.12 ilustra o fluxo geral de execução do Algoritmo Genético.

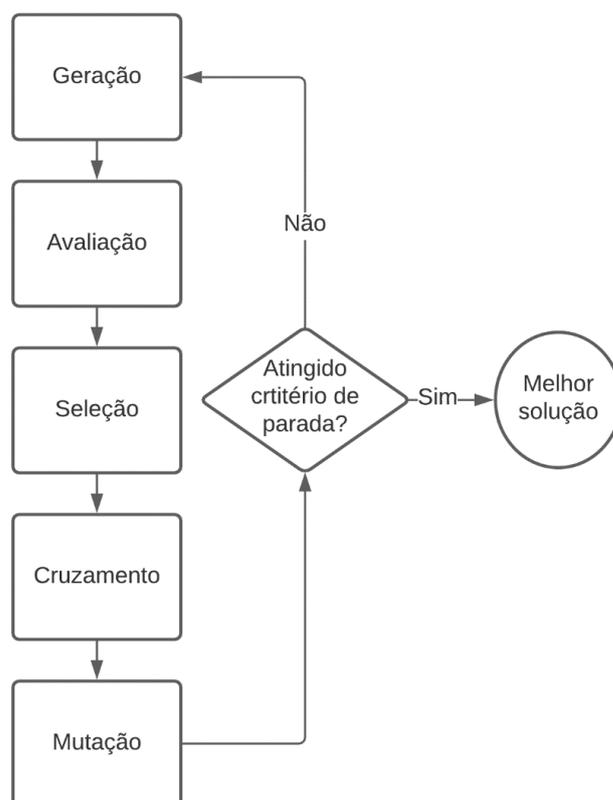


Figura 3.12: Fluxograma de execução do Algoritmo Genético.

### 3.3.7 Varredura

Com o objetivo de validação dos resultados do Algoritmo Genético quanto à eficácia para obtenção de soluções próximas do ótimo global, foi implementado um algoritmo para varredura do espaço de busca do problema.

A varredura foi realizada por um método iterativo simples, através da avaliação, conforme os mesmos critérios do item 3.3.6.2, de todas as soluções geradas de acordo com a discretização do espaço de busca indicada na última coluna da Tabela 3.11, para as mesmas faixas de variação das variáveis consideradas na execução do Algoritmo Genético. De acordo com estes critérios, foram avaliadas 3042 soluções no total.

Tabela 3.11: Discretização do espaço de busca para varredura.

| Variável de projeto | Valor mínimo [cm] | Valor máximo [cm] | Variação [cm] |
|---------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| $x_c$               | 120               | 180               | 5             |
| $y_c$               | 80                | 120               | 5             |
| $x_b$               | 750               | 1000              | 10            |

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 Torre de 25 barras – *Benchmark*

A Figura 4.1 ilustra a evolução do Algoritmo Genético configurado com uma população de 60 indivíduos e critério de parada de 200 gerações para otimização da torre de referência de 25 barras. O melhor resultado válido foi obtido na geração 74, com peso de 55 kgf, atendidas todas as restrições do problema.

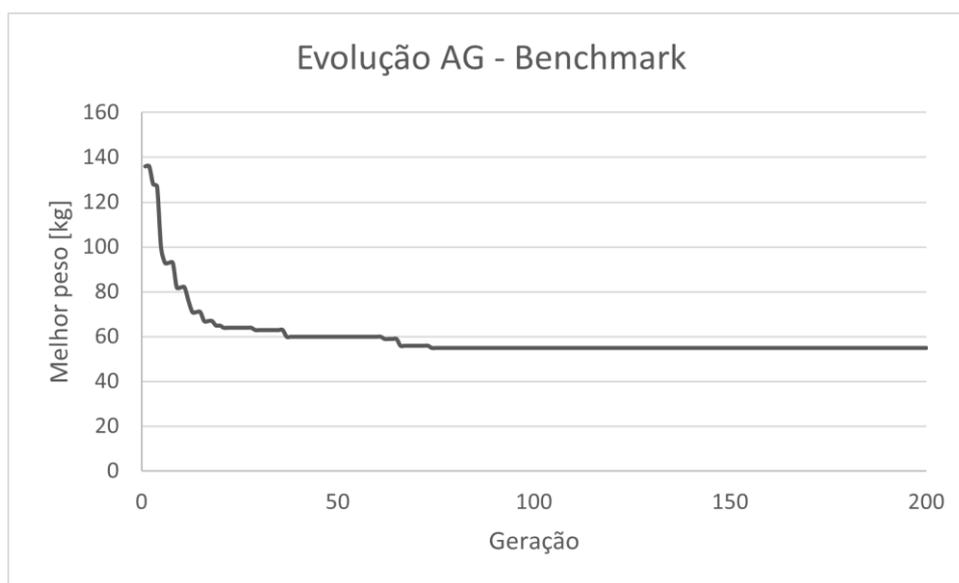


Figura 4.1: Evolução do AG para a torre de 25 barras

A Tabela 4.1 exibe o resultado obtido em comparação com os resultados das publicações referenciadas que reproduziram o mesmo experimento com outros algoritmos de otimização.

Tabela 4.1: Resultados da otimização da torre de 25 barras

| Variável<br>[cm <sup>2</sup> ] / [cm] | Este trabalho | Wu e Chow<br>(1995) | Tang et al.<br>(2005) | Miguel et al.<br>(2013) |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| A1                                    | 1,29          | 0,65                | 0,65                  | 0,65                    |
| A2                                    | 0,65          | 1,29                | 0,65                  | 0,65                    |
| A3                                    | 4,52          | 7,10                | 7,10                  | 5,81                    |
| A4                                    | 0,65          | 1,29                | 0,65                  | 0,65                    |
| A5                                    | 0,65          | 1,94                | 0,65                  | 0,65                    |
| A6                                    | 1,94          | 0,65                | 1,29                  | 0,65                    |
| A7                                    | 0,65          | 1,29                | 1,29                  | 0,65                    |
| A8                                    | 6,45          | 5,81                | 4,52                  | 6,45                    |
| x <sub>4</sub>                        | 91,0          | 104,3               | 90,1                  | 94,8                    |
| x <sub>8</sub>                        | 135,0         | 129,0               | 114,5                 | 127,4                   |
| y <sub>4</sub>                        | 187,0         | 135,8               | 153,3                 | 141,6                   |
| y <sub>8</sub>                        | 355,6         | 334,0               | 348,1                 | 346,5                   |
| z <sub>4</sub>                        | 330,2         | 316,5               | 327,8                 | 321,6                   |
| Peso [kgf]                            | 55            | 62                  | 57                    | 54                      |

A Figura 4.2 ilustra a configuração geométrica da solução encontrada pelo Algoritmo Genético.

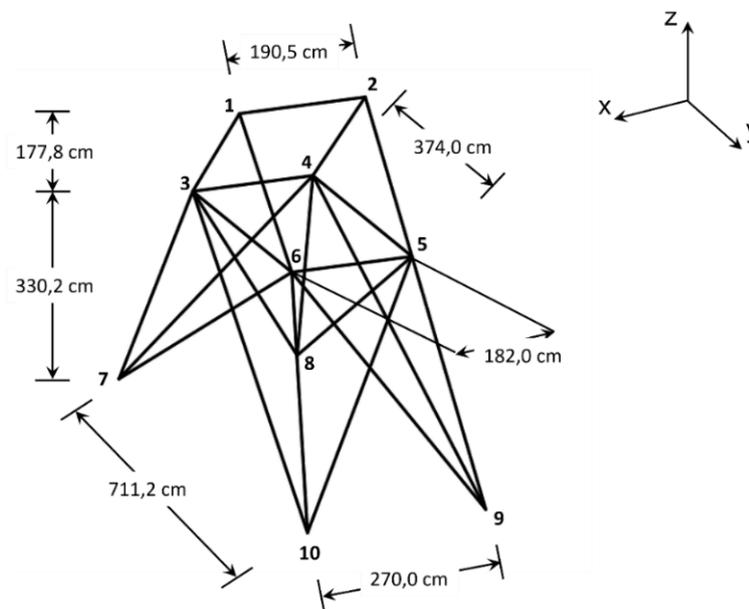


Figura 4.2: Solução otimizada para a torre de 25 barras.

Conforme indicado na Tabela 4.1, o resultado da solução otimizada obtida pelo Algoritmo Genético implementado neste trabalho para a torre de 25 barras, com peso próprio de 55 kgf, tem desempenho superior aos resultados obtidos por Wu e Chow (1995) e Tang et al. (2005), de 62 kgf e 57 kgf, respectivamente. Em relação ao resultado obtido por Miguel et al. (2013), de 54 kgf, o desempenho do resultado do presente trabalho foi ligeiramente inferior. Em relação ao desempenho médio dos 3 trabalhos de referência, cujo valor médio de peso próprio das soluções obtidas foi de 57,7 kgf, o desempenho da solução otimizada obtida pela metodologia proposta neste trabalho foi superior.

Pela análise dos resultados obtidos neste trabalho e nos trabalhos de referência para a otimização da torre de 25 barras, observa-se que o desempenho da solução obtida no presente trabalho está acima da média de desempenho dos trabalhos de referência. Dessa forma, constata-se a eficácia da metodologia proposta para otimização geométrica e dimensional de estruturas treliçadas.

A análise da Figura 4.1 demonstra que ocorreu a estagnação da evolução do Algoritmo Genético a partir da geração de nº 74, uma vez que após essa geração não houve melhoria de desempenho da solução até a interrupção da execução do algoritmo, na geração de nº 200. Este resultado, associado à comparação com os resultados dos trabalhos de referência, indica que a solução obtida neste trabalho está próxima da condição de ótimo global para o problema proposto.

## **4.2 Torre autoportante de 525 kV**

### **4.2.1 Otimização da estrutura através do método dos Algoritmos Genéticos**

Para avaliação do desempenho do algoritmo para otimização da torre autoportante de 525 kV, considerando a natureza estocástica dos Algoritmos Genéticos, foram realizadas 8 execuções distintas, com população inicial de 40 indivíduos e critério de parada com 40 gerações.

A Tabela 4.2 indica, para cada execução, o tempo total gasto para executar as 40 gerações e as seguintes informações relativas à melhor solução da respectiva execução: número da geração de obtenção, o tempo gasto até a obtenção, os valores das variáveis, o peso próprio na composição mais alta e a variação percentual do peso próprio na composição mais alta em relação à torre de referência.

Tabela 4.2: Execuções do AG para a torre de 525 kV.

| Execução | Tempo total [h] | Tempo melhor solução [h] | Geração melhor solução | $x_c$ [cm] | $y_c$ [cm] | $x_b$ [cm] | Peso [kgf] | Variação [%] |
|----------|-----------------|--------------------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 1        | 11,5            | 1,6                      | 9                      | 143        | 98         | 897        | 21129      | -3,76        |
| 2        | 10,4            | 7,9                      | 30                     | 143        | 98         | 899        | 21142      | -3,70        |
| 3        | 10,0            | 9,0                      | 36                     | 143        | 98         | 901        | 21206      | -3,41        |
| 4        | 10,3            | 3,0                      | 10                     | 131        | 101        | 786        | 21228      | -3,31        |
| 5        | 10,3            | 6,5                      | 24                     | 127        | 98         | 795        | 21228      | -3,31        |
| 6        | 11              | 10,7                     | 39                     | 122        | 95         | 794        | 21228      | -3,31        |
| 7        | 10,0            | 2,3                      | 8                      | 135        | 105        | 783        | 21250      | -3,21        |
| 8        | 12,3            | 11,5                     | 37                     | 150        | 105        | 884        | 21266      | -3,13        |

Conforme observado na Tabela 4.2, os resultados das 8 execuções realizadas com o Algoritmo Genético para otimização da torre autoportante de 525 kV possuem o valor do peso próprio da torre na composição mais alta variando entre 21129 kgf e 21266 kgf, o que corresponde a uma variação percentual em relação a torre de referência de -3,76% a -3,13%. Os valores médios de peso próprio na composição mais alta e variação percentual em relação a torre de referência para as soluções obtidas são 21210 kgf e -3,39%, respectivamente.

Em relação às ações atuantes sobre as fundações da estrutura, a análise estrutural da solução de melhor desempenho, indicada na primeira linha da Tabela 4.2, indicou uma variação de +16,7% da ação máxima de tração e de +11,8% da ação máxima de compressão, em relação à torre de referência. A análise mais minuciosa dos aspectos relacionados às fundações da estrutura, embora esteja fora do escopo da proposta deste trabalho, pode ser avaliada em trabalhos posteriores que avaliem o conjunto da solução (estrutura e fundação).

A Figura 4.3 ilustra a evolução do Algoritmo Genético ao longo das 40 gerações para a execução de melhor desempenho.

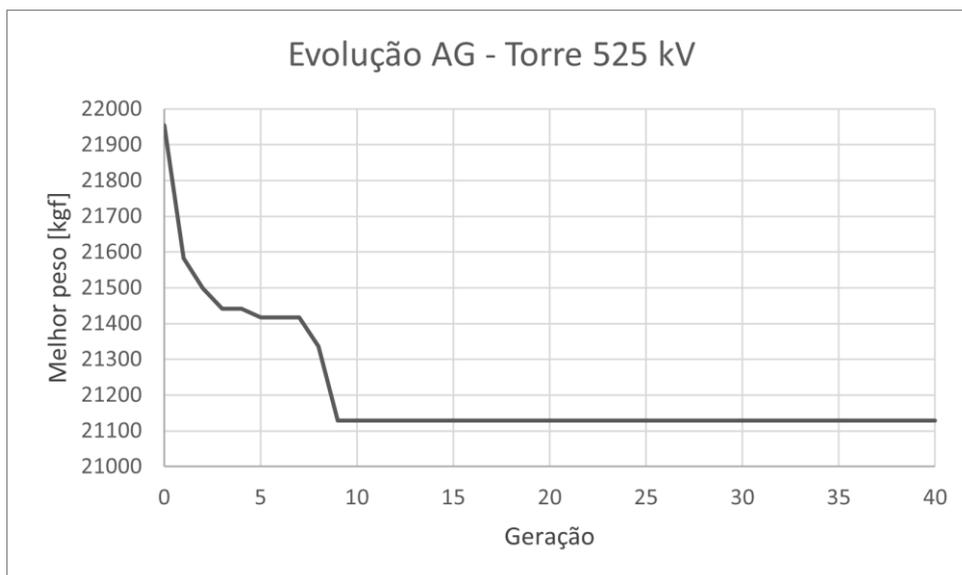


Figura 4.3: Evlução do AG para a torre de 525 kV.

A Figura 4.4 ilustra a silhueta com a geometria da solução obtida pela execução de melhor desempenho entre as 8 execuções do Algoritmo Genético.

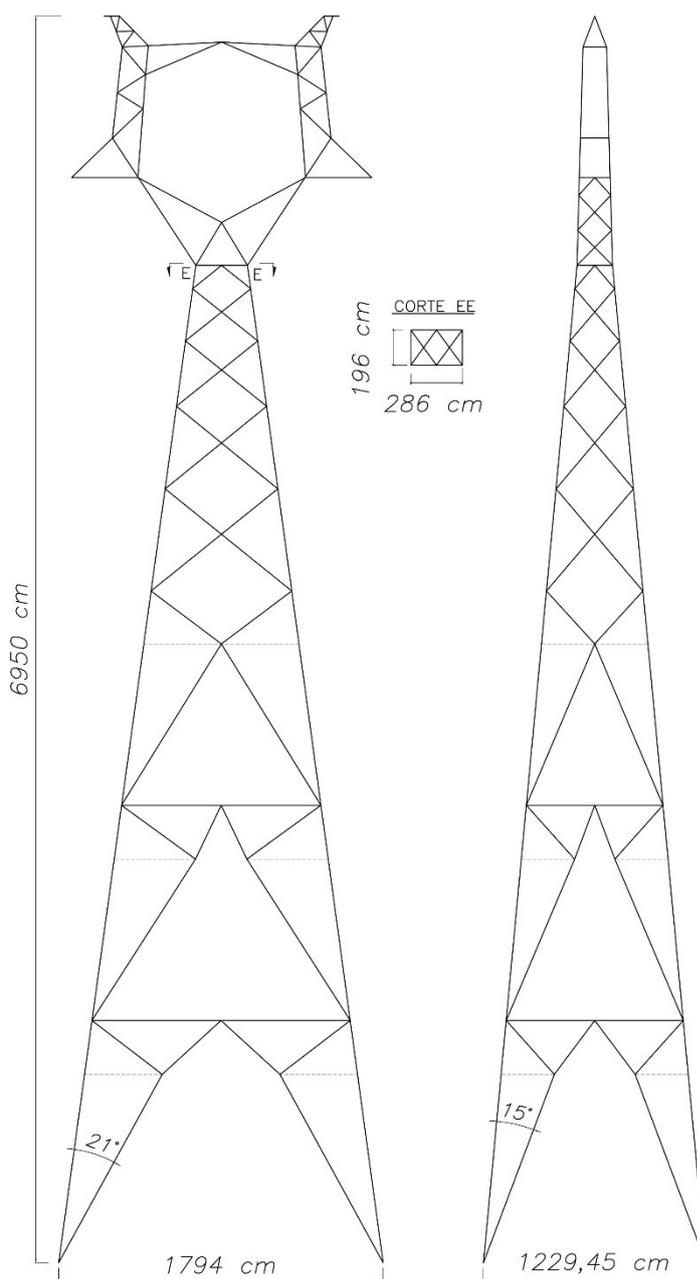


Figura 4.4: Silhueta da solução otimizada para a torre de 525 kV

Pela análise dos resultados das 8 execuções do Algoritmo Genético para otimização da torre autoportante de 525 kV, indicados na Tabela 4.2, observa-se que a amplitude de variação dos resultados é relativamente pequena, no valor de 137 kgf, o que corresponde a 0,63% do peso total da torre de referência na composição mais alta. Essa pequena variação entre os resultados do Algoritmo Genético indica que o algoritmo está convergindo com regularidade para resultados consistentes.

A semelhança entre os valores assumidos pelas variáveis do problema para as 3 melhores soluções obtidas pelo Algoritmo Genético, correspondentes às execuções de 1 a 3 da Tabela 4.2 indicam que possivelmente essas soluções estão próximas da condição de ótimo global para este problema.

Adicionalmente, todos os resultados obtidos para as 8 execuções do Algoritmo Genético analisadas, correspondem a soluções em que não há qualquer infringência das restrições consideradas para o problema, enumeradas de I a III no item 3.3.6.2. Dessa forma, constata-se a eficácia da metodologia adotada neste trabalho para tratamento de restrições por meio de penalizações na etapa de avaliação do algoritmo, de acordo com as Eqs. (3.34) a (3.36).

#### **4.2.2 Otimização da estrutura através do método de varredura**

Foi realizada a varredura do espaço de busca, considerando as mesmas faixas de variação das variáveis das execuções do Algoritmo Genético, discretizadas em intervalos de 5 cm para as variáveis correspondentes às coordenadas X e Y do topo do tronco inclinado e em intervalos de 10 cm para a variável correspondente à coordenada X da base do topo inclinado. No total, foram avaliadas 3042 soluções, executando os procedimentos descritos no item 3.3.6.2, em um tempo total de execução de 43 horas.

A Tabela 4.3 indica os resultados referentes às 10 melhores soluções avaliadas nesta etapa. Na tabela estão indicados, para cada solução, os valores das variáveis, o peso próprio da estrutura na composição mais alta e a variação percentual do peso próprio da estrutura na composição mais alta em relação à torre de referência.

Tabela 4.3: Resultados da varredura.

| Solução | $x_c$ [cm] | $y_c$ [cm] | $x_b$ [cm] | Peso [kgf] | Variação [%] |
|---------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 1       | 145        | 100        | 890        | 21174      | -3,55        |
| 2       | 120        | 90         | 820        | 21190      | -3,48        |
| 3       | 120        | 95         | 790        | 21220      | -3,34        |
| 4       | 125        | 95         | 800        | 21229      | -3,30        |
| 5       | 120        | 90         | 830        | 21230      | -3,30        |
| 6       | 130        | 100        | 790        | 21231      | -3,29        |
| 7       | 140        | 105        | 780        | 21237      | -3,27        |
| 8       | 120        | 95         | 800        | 21267      | -3,13        |
| 9       | 135        | 100        | 810        | 21288      | -3,03        |
| 10      | 120        | 90         | 840        | 21296      | -3,00        |

Conforme observado na Tabela 4.3, os resultados das 10 melhores soluções avaliadas na varredura do espaço de possuem o valor do peso próprio da torre na composição mais alta variando entre 21174 kgf e 21296 kgf, o que corresponde a uma variação percentual em relação a torre de referência de -3,55% a -3,00%. Os valores médios de peso próprio na composição mais alta e variação percentual em relação a torre de referência para as soluções obtidas são 21236 kgf e -3,27%, respectivamente.

A melhor solução avaliada pela varredura possui peso próprio da estrutura na composição mais alta de 21174 kgf, que corresponde à uma variação percentual em relação à torre de referência de -3,55%. A solução obtida pela execução de melhor resultado do Algoritmo Genético possui peso próprio da estrutura na composição mais alta de 21129 kgf, que corresponde à uma variação percentual em relação à torre de referência de -3,76%.

Em relação aos valores médios dos resultados obtidos pelas execuções do Algoritmo Genético, indicados no item 4.2.1, os valores médios dos resultados da varredura possuem uma variação percentual em relação ao peso próprio da estrutura na composição mais alta de +0,12% (21236 kgf e 21210 kgf).

A proximidade dos resultados obtidos pela varredura do espaço de busca em relação aos resultados obtidos pela execução do Algoritmo Genético, descritos no item 4.2.1, indicam que os resultados do Algoritmo Genético correspondem a soluções próximas à condição de ótimo global para o problema de otimização da torre autoportante de 525 kV.

Os resultados do Algoritmo Genético foram até mesmo ligeiramente superiores aos resultados da varredura, o que se deve à maior discretização do espaço de busca considerado para execução do Algoritmo Genético, com variação de 1 cm para todas as variáveis, em relação à discretização considerada na varredura para o mesmo espaço de busca, com variação de 5 cm em relação às variáveis  $x_c$  e  $y_c$  e de 10 cm em relação à variável  $x_b$ .

Adicionalmente, observa-se que o tempo total de execução da varredura para obtenção dos resultados indicados na Tabela 4.3 foi de 43 horas, enquanto as execuções do Algoritmo Genético convergiram para resultados com desempenho próximos ou superiores em um tempo médio de 10,7 horas por execução. Observa-se ainda que o tempo médio efetivamente gasto para obtenção da melhor solução para as execuções do Algoritmo Genético foi de 6,6 horas, indicando que o tempo de execução do Algoritmo Genético necessário para obtenção de uma solução de desempenho satisfatório poderia ser ainda mais reduzido do que o considerado nas execuções realizadas, nas quais foi adotado o critério de parada de 40 gerações.

Portanto, considerando as execuções realizadas, o tempo médio de execução do Algoritmo Genético corresponde a aproximadamente 25% do tempo de execução da varredura do mesmo espaço de busca. Dessa forma, o uso do método de otimização por Algoritmos Genéticos, conforme proposto neste trabalho, se justifica em comparação ao método de busca por varredura, por ser uma abordagem mais eficiente, que possibilita a obtenção de resultados igualmente satisfatórios ou mesmo superiores com um tempo de execução significativamente reduzido.

# 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo a proposta de uma metodologia de uso prático no contexto de elaboração de projetos de torres para LT's. Dois algoritmos de otimização aplicados a estruturas foram avaliados, um baseado em algoritmos genéticos e outro no método de varredura. Para a aplicação da metodologia em estruturas treliçadas de LT's foram estabelecidos diversos critérios restritivos para obtenção da solução final da estrutura otimizada, idênticos aos adotados na prática usual de projetos, de forma a se obter soluções efetivamente viáveis.

Para viabilizar a execução dos algoritmos, foram implementados módulos para alteração paramétrica da geometria da estrutura, atualização das forças atuantes relacionadas às ações do vento e do peso próprio, análise estrutural e dimensionamento das barras e ligações. A validação da metodologia foi realizada através da otimização do problema de referência de uma torre de 25 barras e os resultados foram comparados com os obtidos em outros trabalhos semelhantes. Por fim, a metodologia foi aplicada para otimização do projeto de uma torre autoportante de suspensão do tipo cara-de-gato, que está em operação em uma linha de transmissão de 525 kV no estado do Rio Grande do Sul.

Os resultados obtidos demonstram a eficácia da metodologia proposta, uma vez que foram obtidas soluções viáveis com reduções significativas no peso próprio em relação à estrutura utilizada como referência. Tais reduções se tornam ainda mais expressivas ao se considerar a prática de múltiplas utilizações de uma mesma solução estrutural, que é característica dos empreendimentos de linha de transmissão. Dessa forma, mesmo percentuais relativamente moderados de redução no peso próprio das estruturas resultariam em elevados ganhos em valores absolutos, em especial para as torres predominantes de linhas de maior extensão.

As configurações geométricas das soluções obtidas pelo algoritmo de otimização, conforme apresentado nos resultados, demonstram que a utilização de torres mais esbeltas tende a proporcionar redução no peso próprio das estruturas. No entanto, observa-se ainda que o aumento da esbeltez da estrutura também provoca o aumento das ações sobre as fundações.

Portanto, conclui-se que é pertinente a evolução da metodologia proposta neste trabalho, para que a estimativa de custo das fundações seja considerada como um parâmetro de otimização simultâneo, com o objetivo de se obter soluções de custo globalmente otimizados para a implantação de LT's. Esta constatação está em consonância com a sugestão de Gontijo (1994), sobre a necessidade de implementação de um programa computacional que possibilite a análise conjunta das torres e fundações para a execução de empreendimentos globalmente otimizados.

Os resultados deste trabalho possibilitam a análise do desempenho do método dos Algoritmos Genéticos para otimização do problema estrutural apresentado. Considera-se pertinente, em trabalhos futuros, que seja analisado o desempenho de outros métodos para tratativa do mesmo problema, de forma a contribuir para a investigação de qual é a abordagem mais eficiente.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Considerar a influência do custo das fundações na avaliação das soluções geradas através da metodologia proposta neste trabalho;
- Avaliar o desempenho de outros métodos em comparação aos Algoritmos Genéticos, como os métodos de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) e Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), para otimização da torre de 525 kV apresentada neste trabalho.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE 10-15. **Design of Latticed Steel Transmission Structures**. 10–15. ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015.

ASCE 10-97. **Design of Latticed Steel Transmission Structures**. 10–97. ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1997.

BEN. **Balanco Energético Nacional**. [s.l: s.n.].

BEYER, H.-G.; SCHWEFEL, H.-P. Evolution strategies – A comprehensive introduction. **Natural Computing** 2002 1:1, v. 1, n. 1, p. 3–52, 2002.

CAPRILES, P. V. S. Z. et al. Rank-based ant colony algorithms for truss weight minimization with discrete variables. **Communications in Numerical Methods in Engineering**, v. 23, p. 553–575, 2007.

CARVALHO, É. DA C. R. **Solução de Problemas de Otimização com restrições usando estratégias de penalização adaptativa e um algoritmo do tipo PSO**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

CIGRÉ. **Brochura Técnica 03 - Procedimento de Projeto de Torres Metálicas Treliçadas para Linhas de Transmissão**. [s.l: s.n.].

CIGRÉ. **Technical Brochure 350 - How OHL Respond to Localized High Intensity Winds**. [s.l: s.n.].

COUCEIRO, I. et al. Structural optimization of lattice steel transmission towers. **Engineering Structures**, v. 117, p. 274–286, 2016.

DANTZIG, G. B. **Programming in a linear structure**. Bulletin of the American Mathematical Society. **Anais...AMER MATHEMATICAL SOC** 201 CHARLES ST, PROVIDENCE, RI 02940-2213, 1948.

DARWIN, C. **On The Origin of Species: By Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life.** London: John Murray, 1859.

FILIFE GUERRA SOARES, PAULO RICARDO R. LIBERATO DA SILVA, REYNALDO CASTRIOTA DE MELLO, S. J. F. Testes de Carga em Estruturas para Linhas de Transmissão: A Experiência da Engetower Engenharia. **XX SNPTEE**, 2009.

FONSECA, M. DA. **Otimização de Estruturas Treliçadas Planas e Espaciais Sob Carregamentos Estáticos e Dinâmicos, Usando Algoritmos Genéticos e Redes Neurais.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

GEN, M.; CHENG, R. **Genetic Algorithms and Engineering Optimization.** Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999.

GIACOMELLI, D. **GeneticSharp.** Disponível em: <<https://github.com/giacomelli/GeneticSharp/>>. Acesso em: 4 maio. 2022.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**Addison-Wesley Pub. Co, 1989.

GONTIJO, C. R. **Contribuição a análise e projeto de torres autoportantes de linhas de transmissão.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.

HADIDI, A.; KAZEMZADEH AZAD, S.; KAZEMZADEH AZAD, S. Structural Optimization Using Artificial Bee Colony Algorithm. **2nd international conference on engineering optimization**, 2010.

HAFTKA, R. T.; GURDAL, Z. **Elements of Structural Optimization.** 3. ed. Waterloo: Kluwer Academic Publishers, 1992.

HASANÇEBI, O.; ERBATUR, F. On efficient use of simulated annealing in complex structural optimization problems. **Acta Mechanica**, v. 157, n. 1–4, p. 27–50, 2002.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence.** Cambridge: The MIT Press, 1975.

IEC 60826. **Overhead Transmission Lines - Design Criteria.** Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.

KIESSLING, F. et al. **Overhead Power Lines - Planning, Design, Construction**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.

KUHN, H. W.; TUCKER, A. Nonlinear Programming. **Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability**, 1951.

LABEGALINI, P. R. et al. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Bluecher, 1992.

LAMEIRAS, C. R. L.; NETO, F. F. C.; NUNES, R. R. Nova Concepção para Projetos de Linhas de Transmissão com Base na Otimização de Torres e Fundações. **IX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, 1987.

MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm. **Advances in Engineering Software**, v. 56, p. 23–37, 2013.

NBR 5422. **Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: [s.n.].

PEREIRA, J. P. G. **Heurísticas Computacionais Aplicadas à Otimização Estrutural de Treliças Bidimensionais**. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2007.

PEREZ, R. E.; BEHDINAN, K. Particle Swarm Optimization in Structural Design. **Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization**, p. 373–394, 2007.

RAJEEV, S.; KRISHNAMOORTHY, C. S. Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms. **October**, v. 118, n. 5, p. 1233–1250, 1992.

RAO, S. S. **Engineering Optimization - Theory and Practice**. 4. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2009. v. 1

RECHENBERG, I. Rechenberg, Ingo, Evolutionsstrategie — Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. 170 S. mit 36 Abb. Frommann-Holzboog-Verlag. Stuttgart 1973. Broschiert. **Feddes Repertorium**, v. 86, n. 5, p. 337–337, 1 jan. 1975.

RIEIRA, J. D., MENEZES, R.C.R., SILVA, V.R. AND SILVA, J. B. G. . Evaluation of the probability distribution of the strength of transmission line steel towers based on tower test

results. **Cigré Paris**, 1990.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A modern Approach**. Essex: Pearson, 2016. v. 48

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

SOARES, G. L. **Algoritmo Genético: Estudo, Novas Técnicas e Aplicações**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

SOUZA, R. R. DE et al. A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures. **Engineering Structures**, v. 111, p. 162–184, 2016.

TANG, W.; TONG, L.; GU, Y. Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 62, n. 13, p. 1737–1762, 2005.

TORT, C.; SAHIN, S.; HASANCEBI, O. Optimum design of steel lattice transmission line towers using simulated annealing and PLS-TOWER. **Computers and Structures**, v. 179, p. 75–94, 2017.

WU, S. J.; CHOW, P. T. Integrated discrete and configuration optimization of trusses using genetic algorithms. **Computers and Structures**, v. 55, n. 4, p. 695–702, 1995.

**APÊNDICE A**  
**HIPÓTESES DE AÇÕES**

## Fatores de sobrecarga

Ações transversais:

- Hipóteses 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 – Fator: 1,00
- Hipóteses 6 e 11 – Fator: 1,50

Ações verticais:

- Hipóteses 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 – Fator: 1,15 (normais) ou 0,87 (reduzidas)
- Hipóteses 6 e 11 – Fator: 1,50

Ações longitudinais:

- Hipóteses 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 – Fator: 1,00
- Hipóteses 6 e 11 – Fator: 1,50

### Ações por hipótese

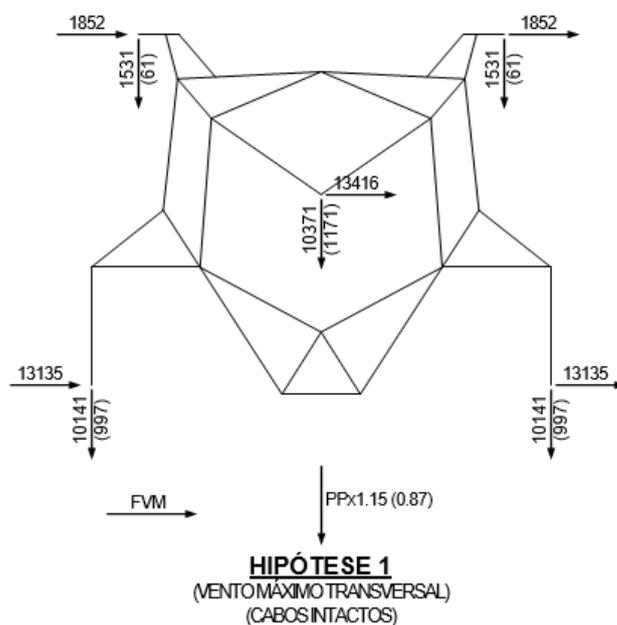


Figura A.1: Esquema de aplicação de forças para hipótese 1

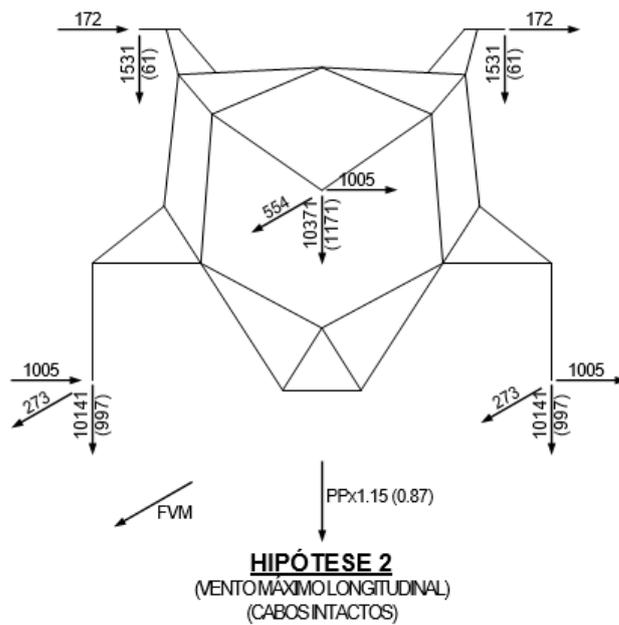


Figura A.2: Esquema de aplicação de forças para hipótese 2

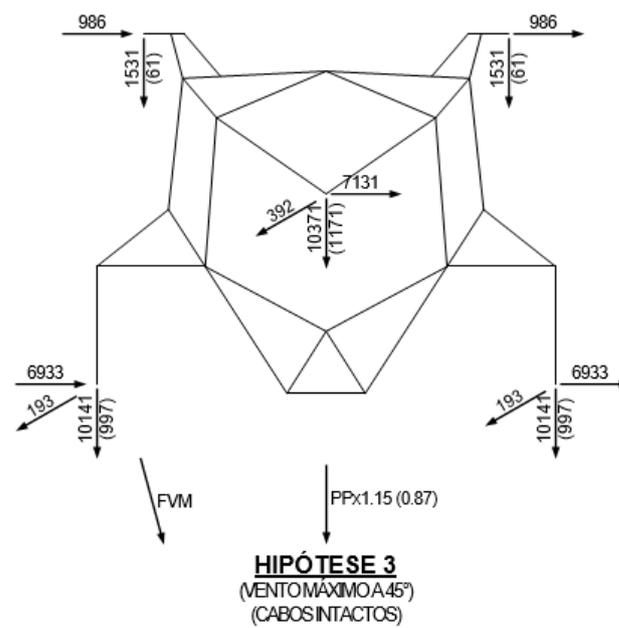


Figura A.3: Esquema de aplicação de forças para hipótese 3

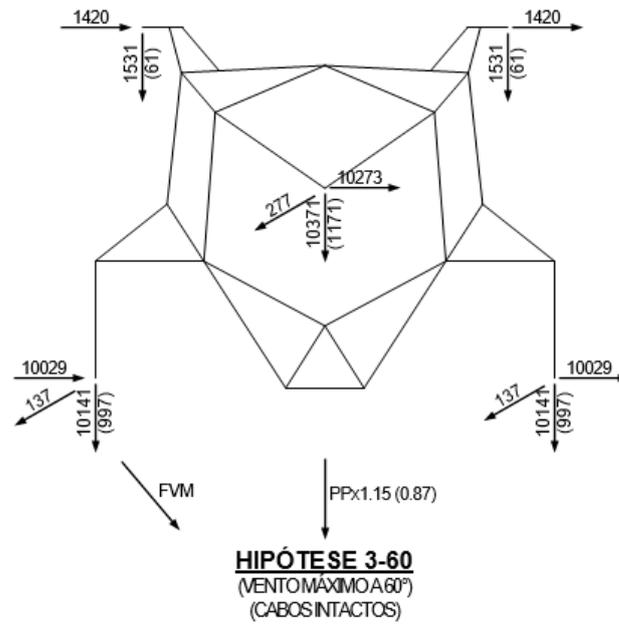


Figura A.4: Esquema de aplicação de forças para hipótese 3-60

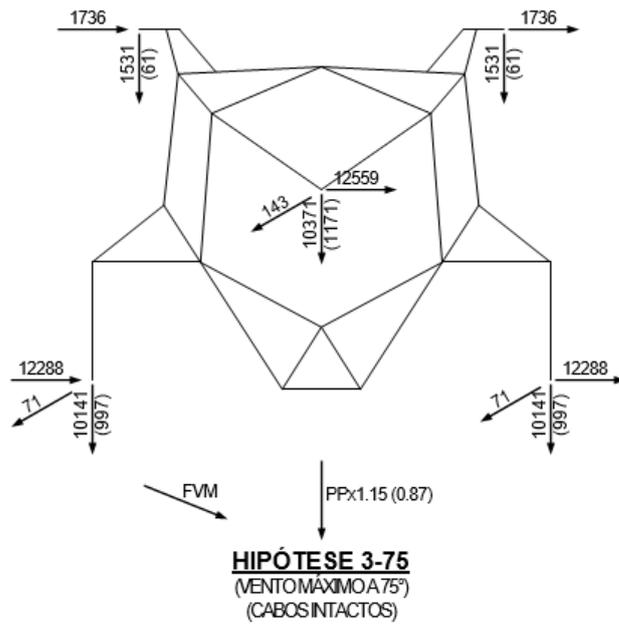


Figura A.5: Esquema de aplicação de forças para hipótese 3-75

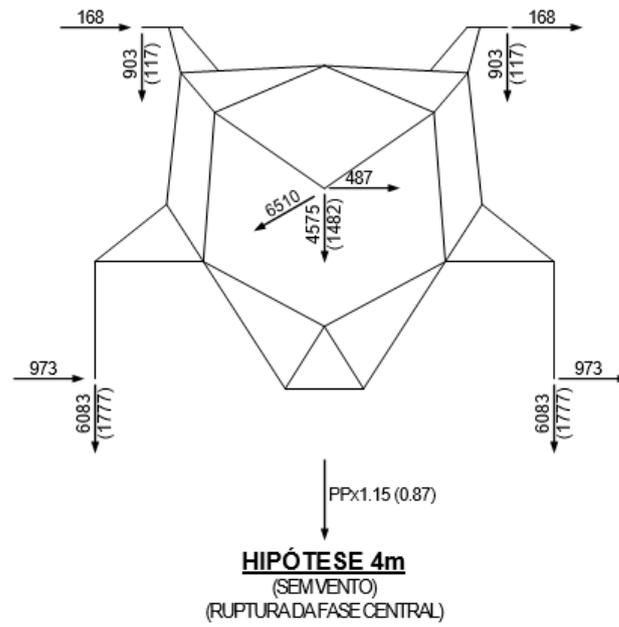


Figura A.6: Esquema de aplicação de forças para hipótese 4m

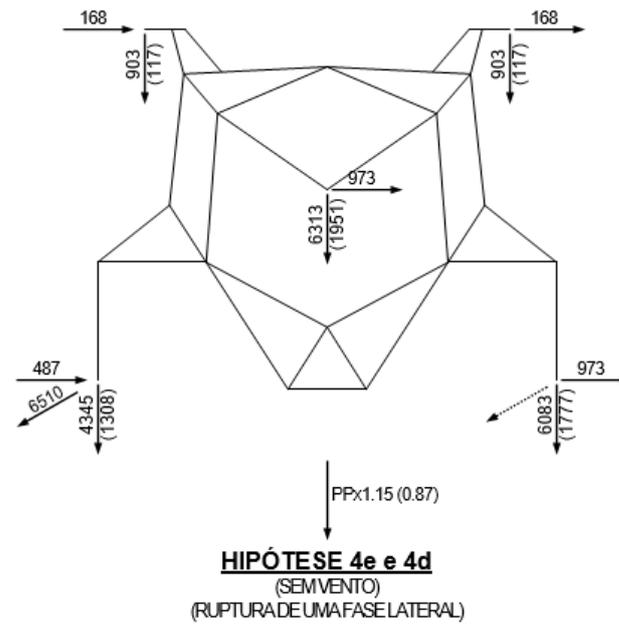


Figura A.7: Esquema de aplicação de forças para hipóteses 4e e 4d

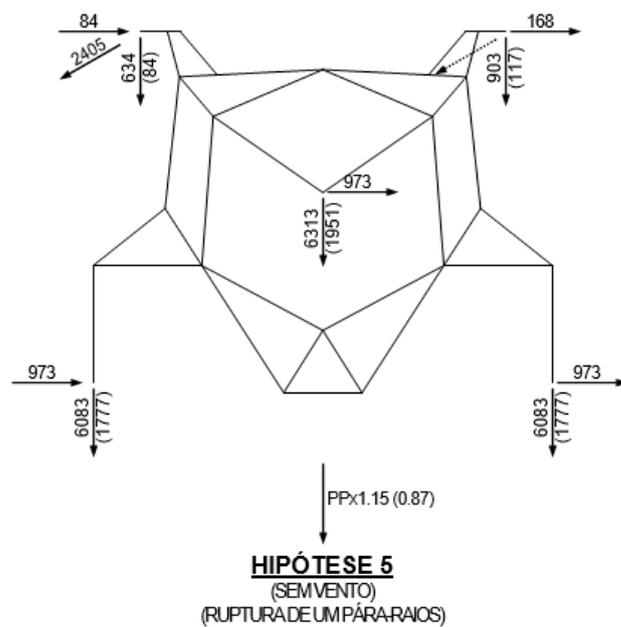


Figura A.8: Esquema de aplicação de forças para hipótese 5

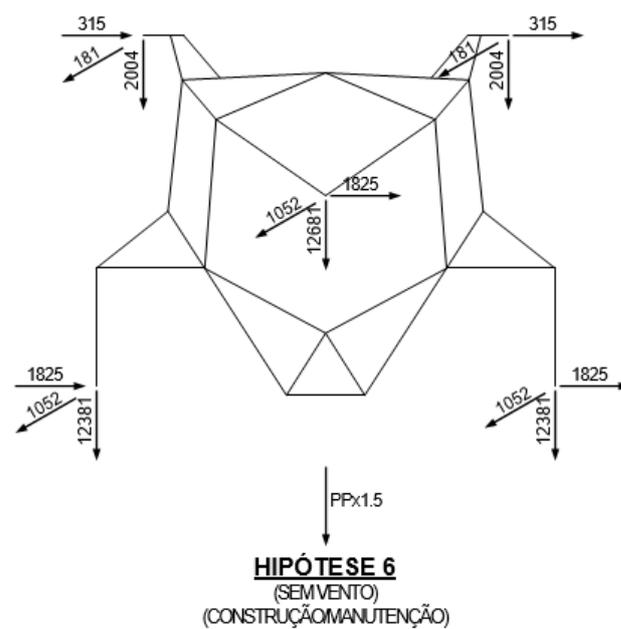


Figura A.9: Esquema de aplicação de forças para hipótese 6

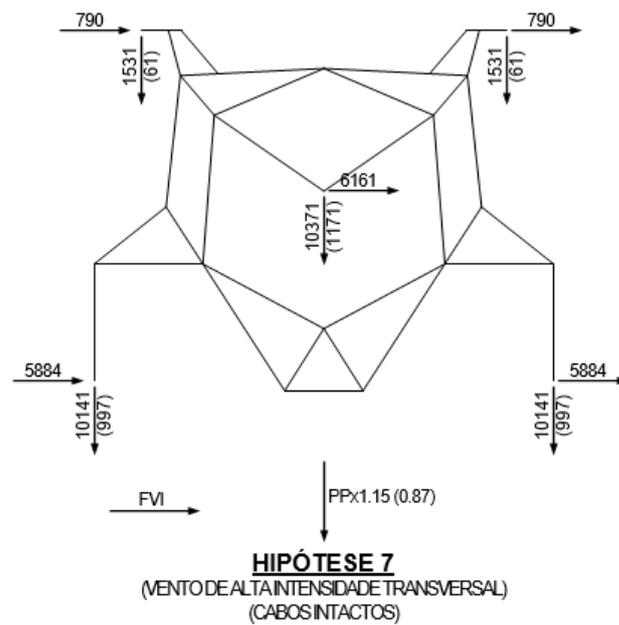


Figura A.10: Esquema de aplicação de forças para hipótese 7

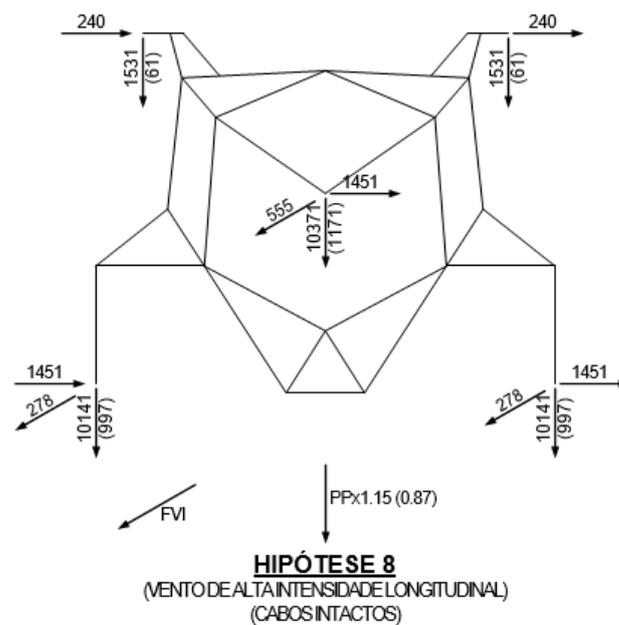


Figura A.11: Esquema de aplicação de forças para hipótese 8

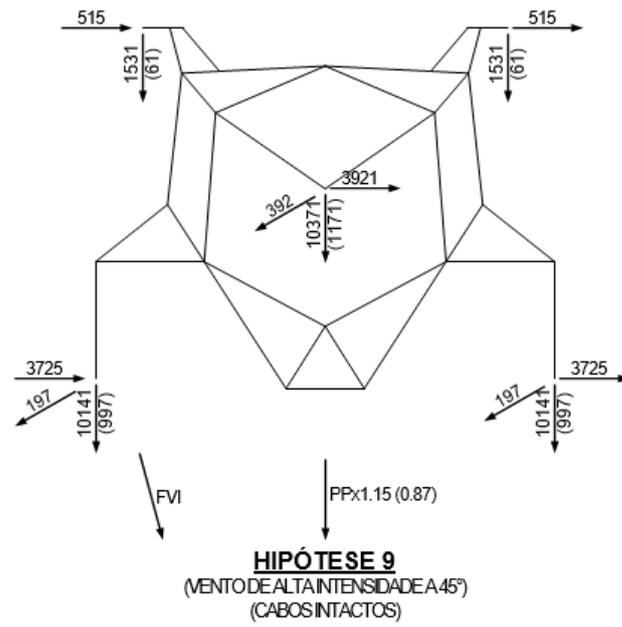


Figura A.12: Esquema de aplicação de forças para hipótese 9

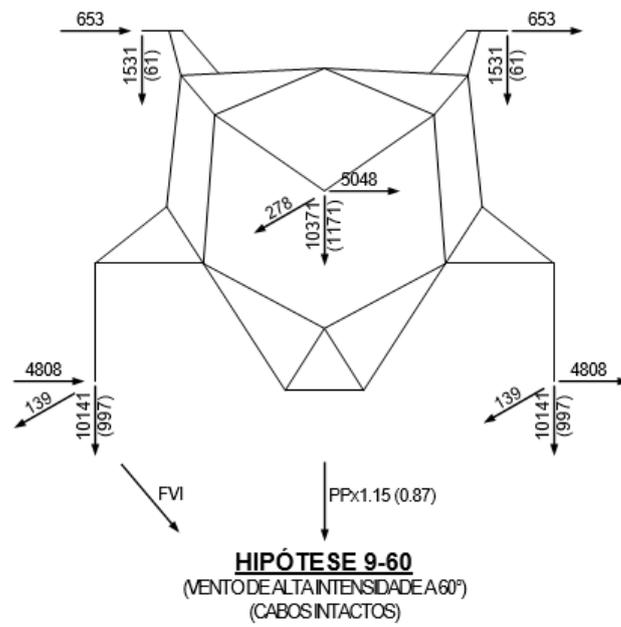


Figura A.13: Esquema de aplicação de forças para hipótese 9-60

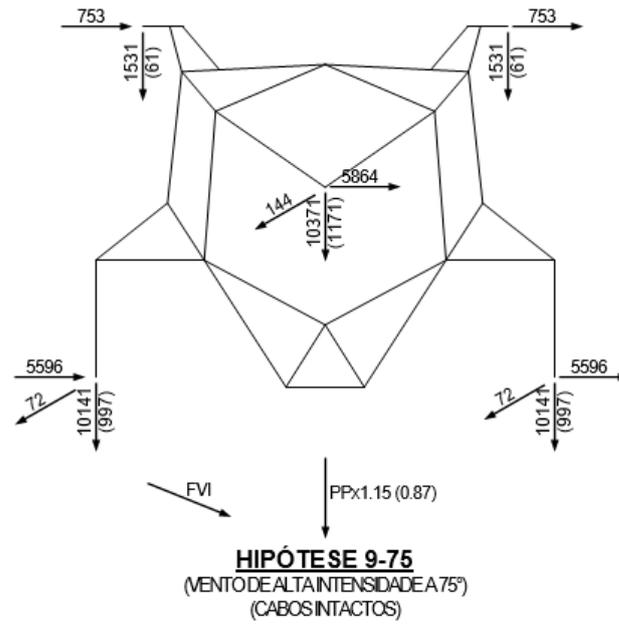


Figura A.14: Esquema de aplicação de forças para hipótese 9-75

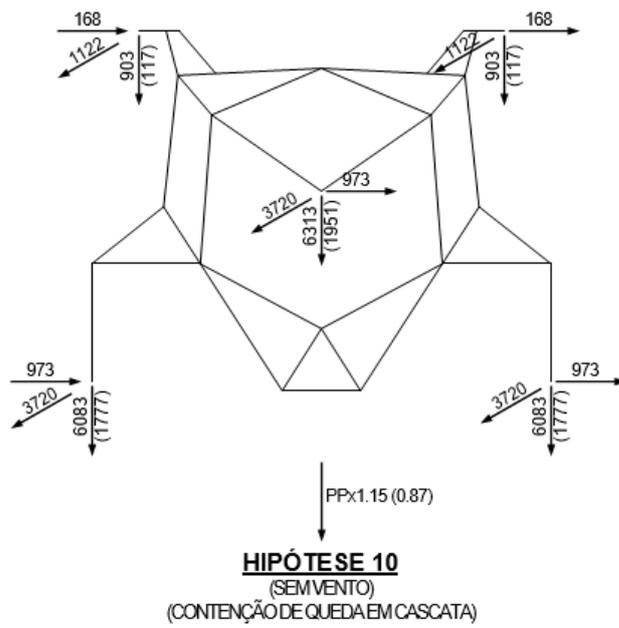


Figura A.15: Esquema de aplicação de forças para hipótese 10

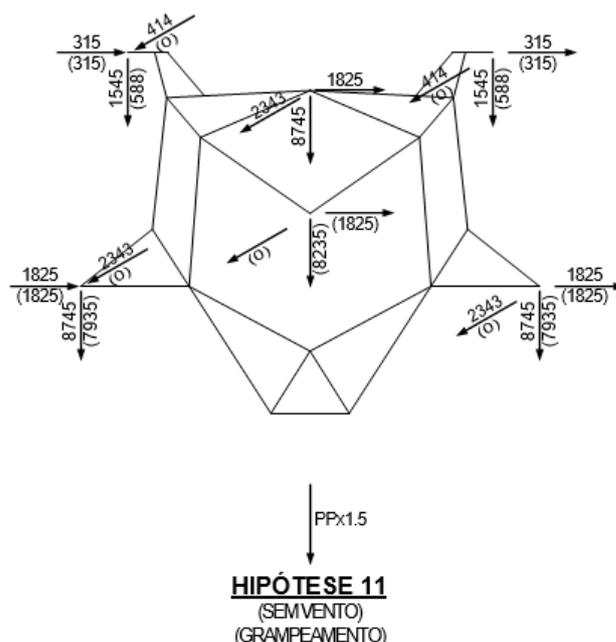


Figura A.16: Esquema de aplicação de forças para hipótese 11

#### Notas:

- a) Os valores indicados nos esquemas de aplicação de forças incluem os respectivos fatores de sobrecarga e estão em kgf;
- b) FVM indica a força devida à ação do vento máximo e FVI indica a força devida à ação do vento de alta intensidade atuantes sobre a estrutura e calculadas conforme descrito no item 3.3.5.2;
- c) PP indica o peso próprio da torre, calculado conforme descrito no item 3.3.5.1;
- d) Os esquemas de aplicação de forças apresentados representam as hipóteses de ações básicas consideradas no cálculo. Algumas destas hipóteses foram desdobradas para a análise estrutural, conforme se esclarece nas notas subsequentes;
- e) Hipóteses 4 (ruptura de uma fase): “e” na denominação da hipótese de ações indica ruptura dos cabos correspondentes à fase esquerda do circuito, “d” indica ruptura dos cabos correspondentes à fase direita do circuito e “m” indica ruptura dos cabos correspondentes à fase central do circuito;
- f) Hipóteses 5 (ruptura de um para-raios): “e” na denominação da hipótese de ações

indica ruptura do cabo para-raios esquerdo e “d” indica ruptura do cabo para-raios direito;

**g)** Hipóteses 6 (construção e manutenção):

- i. Ae: força atuante somente no para-raios esquerdo;
- ii. Ad: força atuante somente no para-raios direito;
- iii. B: forças somente nos dois para-raios;
- iv. Ce: forças somente nos dois para-raios e na fase esquerda;
- v. Cd: forças somente nos dois para-raios e na fase direita;
- vi. Cm: forças somente nos dois para-raios e na fase central;
- vii. De: sem as forças da fase esquerda;
- viii. Dd: sem as forças da fase direita;
- ix. Dm: sem as forças da fase central;
- x. E: todas as forças aplicadas.

**h)** Hipóteses 11 (grampeamento):

Obs.: 1) Para cabos em grampeamento, considerar forças fora de parênteses nos esquemas de aplicação de forças;

2) Para cabos só lançados ou já grampeados, considerar forças entre parênteses nos esquemas de aplicação de forças;

3) Nos desdobramentos abaixo especificados, considerar forças de cabos só lançados/já grampeados nos pontos onde não houver cabos em grampeamento:

- i. Ae: força atuante somente no para-raios esquerdo;
- ii. Ad: força atuante somente no para-raios direito;
- iii. B: forças somente nos dois para-raios;
- iv. Ce: forças somente nos dois para-raios e na fase esquerda;

- v. Cd: forças somente nos dois para-raios e na fase direita;
  - vi. Cm: forças somente nos dois para-raios e na fase central;
  - vii. De: sem as forças da fase esquerda;
  - viii. Dd: sem as forças da fase direita;
  - ix. Dm: sem as forças da fase central;
  - x. E: todas as forças aplicadas.
- i) Para todas as hipóteses, exceto para a hipótese 11, foram consideradas também as hipóteses equivalentes, porém com valores de forças verticais substituídos pelos valores de forças verticais mínimas, indicadas pelos valores entre parênteses nos esquemas de aplicação de forças.