

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METAHEURÍSTICA DA EVOLUÇÃO DIFERENCIAL PARA A OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL
NO PROJETO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Leonardo Silva Faria

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 10 de novembro de 2014.

METAHEURÍSTICA DA EVOLUÇÃO DIFERENCIAL PARA A OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL
NO PROJETO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Leonardo Silva Faria

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Jackson Manfredini Vassoler

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre, 10 de novembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família pelo apoio e compreensão que permitiram que concluísse essa etapa importante de minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Herbert Martins Gomes, que desempenhou um exemplar trabalho através de seus ensinamentos e instruções, os quais me guiaram durante o período em que desenvolvi este trabalho.

Aos professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que formam profissionais qualificados, e que, além de passar conhecimento, despertam a curiosidade pelo conhecimento científico em seus alunos.

FARIA, L. S. **Metaheurística da Evolução Diferencial para a Otimização Estrutural no Projeto de Torres de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. 2014. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e implementação de um algoritmo metaheurístico de Evolução Diferencial (Differential Evolution Algorithm) para a otimização estrutural no projeto de torres de linhas de transmissão de energia elétrica. A implementação do algoritmo é verificada e comparada em termos da acurácia da solução utilizando-se exemplos simples e de referências presente na literatura, como por exemplo, treliças espaciais. O algoritmo é brevemente revisado e os critérios para a escolha dos parâmetros heurísticos são apresentados. Por fim, um exemplo mais realista da otimização de um projeto de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica autoportante é apresentado com o objetivo de obter massa mínima. Perfis comerciais discretos são levados em conta assim como carregamentos oriundos do peso próprio, da ação do vento na estrutura e cabos assim como critérios de projeto para combinações de carregamentos, comportamento modal e flambagem presentes nas Normas NBR8800, NBR5422, NBR6123, NBR8449 e NBR 8681. Utilizando-se o algoritmo desenvolvido obtiveram-se reduções da massa estrutura em torno de 226% em relação ao projeto inicial onde todas as restrições de estado limite último e de serviço estabelecidas previamente foram atendidas.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo de Evolução Diferencial, Torres de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, Programação Inteira.

FARIA, L. S. **Differential evolution metaheuristics for structural optimization in the design of power transmission line towers**. 2014. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The present work aims at studying and implementing a metaheuristic Differential Evolution algorithm for the structural optimization in the design of Power Transmission Lines. The implementation of the algorithm is verified and compared in terms of the accuracy of the solution using simple examples available in the literature, like space trusses. The algorithm is briefly reviewed and the criteria for the choice of heuristic parameters are presented. Finally, a more realistic example that optimizes the design of a Power Transmission Line is presented focusing on the minimum mass. Commercial discrete profiles are taken into account as well as loadings originating from dead weight, the action of the wind on the structure, cables and design criteria for load combinations as well as modal (frequencies) and buckling behaviour defined at the NBR8800, NBR5422, NBR6123, NBR8449 and NBR8681 standards. The use of the developed algorithm yielded mass reduction of about 226% in relation to the initial design, where all the proposed constraints (ultimate and serviceability limit state functions) were met.

KEYWORDS: Differential Evolution Algorithm, Power Transmission Lines, Integer programming.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
2.1 Motivação.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1 Definições Básicas	2
4.2 Algoritmo de Evolução Diferencial (<i>Differential Evolution Algorithm</i> , DE)	3
4.2.1 Inicialização	3
4.2.2 Mutação.....	3
4.2.3 Crossover	4
4.2.4 Seleção.....	4
4.2.5 Síntese do algoritmo e escolha dos parâmetros heurísticos	4
4.3 Algoritmo de Análise Estrutural	5
4.3.1 Análise Estática.....	6
4.3.2 Análise Modal	6
5. PROJETO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (LT) DE ENERGIA.....	7
5.1 Ações.....	7
5.2 Combinações de carregamento	7
5.3 Forças devidas ao vento	8
5.3.1 Forças devidas ao vento nos cabos e isoladores	8
5.4 Verificação dos elementos de acordo com a NBR 8800	9
6. APLICAÇÕES NUMÉRICAS	9
6.1 Metodologia	9
6.1.1 Exemplos simples (<i>Bechmarks</i> da literatura)	10
6.1.2 Treliza de 72 Barras.....	10
6.1.3 Treliza espacial de 200 Barras	10
6.2 Otimização de um Projeto de Torre de Transmissão de Energia Elétrica – Treliza espacial de 244 Barras	11
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
ANEXOS.....	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1- Pseudocódigo para o algoritmo DE.	4
Figura 4.2 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de otimização estrutural.....	5
Figura 6.2 - Estrutura de Torre de Linha de Transmissão com 244 barras.....	12
Figura A1 - Isopletas de velocidade básica do vento a 10m, tempo integração 3s e tempo recorrência de 50 anos (NBR 6123).	16
Figura A2 - Coeficientes de arrasto para perfis L, ângulos de incidência do vento e definição das áreas projetadas (NBR 6123).	16
Figura A3 - Estrutura de treliça com 72 barras.....	17
Figura A4 - Estrutura de treliça com 200 barras.	17
Figura A5 - Comparação entre a convergência do PSO e do DE	18
.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Melhor solução encontrada para o problema de vaso de pressão e mola	10
Tabela 6.2 - Melhor solução encontrada para o problema da treliça de 72 barras (mm^2).....	10
Tabela 6.3 - Comparação da Treliça Espacial com 200 Barras – Variáveis Discretas.....	11
Tabela 6.4 - Seções transversais (Perfil da Tabela) calculadas pelo DE e pelo PSO.....	13
Tabela A1 - Critérios da Norma NBR 8800 para a otimização de barras prismáticas tubulares.	18
Tabela A2 - Perfis de cantoneiras de abas iguais para exemplo do projeto da Torre de Linha de Transmissão de Energia Elétrica.....	19

1. INTRODUÇÃO

O conceito de otimização pode ser interpretado como a busca pela melhor solução de um projeto em termos de custos, aproveitamento das capacidades dos materiais e racionalização do projeto. Em um universo de possíveis soluções, deseja-se maximizar características positivas, ou minimizar as negativas, características estas quantificadas por uma dada função objetivo. No caso da otimização estrutural, visa-se minimizar a função custo, ou seja, obter a configuração que possua menor custo de fabricação e que ainda respeite parâmetros que garantam sua segurança. Na maioria das vezes esta função é representada pela massa. Esta tarefa pode, sem dificuldades, ser desenvolvida por um engenheiro projetista experiente. Entretanto, com o aumento da complexidade do problema, torna-se desejável dispor de ferramentas que busquem a solução com eficiência e rapidez. O presente trabalho busca na recente técnica dos algoritmos evolutivos uma possível resposta para este desafio.

O algoritmo *Differential Evolution* vem sendo amplamente utilizado em problemas de otimização devido a sua simplicidade, robustez e precisão. O DE, assim como outros algoritmos evolutivos, baseia-se no processo de seleção natural observado por Darwin. Esta técnica utiliza mecanismos evolutivos como parâmetros. Assim como na natureza seres vivos são selecionados conforme sua aptidão, o algoritmo testa diferentes indivíduos como possível solução para a minimização da função. Na presente análise, a função a ser minimizada é representada pela massa da estrutura treliçada, a qual deve ser reduzida para que o custo da estrutura seja o menor possível. Entretanto, este processo depende de várias variáveis e deve obedecer restrições construtivas.

A metodologia empregada neste trabalho vem a exemplificar a aplicação do algoritmo *Differential Evolution* em problemas de engenharia. Por isso, a abordagem aqui adotada procura ser fidedigna a situações encontradas no cotidiano de projetistas. Com a alteração das áreas de seções transversais da estrutura treliçada, o algoritmo adapta a busca para encontrar modelos de perfis disponíveis em catálogos de fabricantes. Isto representa, em termos de otimização, uma busca discretizada no espaço da função objetivo.

2. OBJETIVOS

Neste trabalho tem-se como objetivo a otimização de estruturas treliçadas através do algoritmo meta-heurístico *Differential Evolution*. Serão apresentados comparativos dos resultados obtidos pelos algoritmos desenvolvidos em MATLAB com os resultados de funções simples citadas na literatura. Além disso, apresenta-se a implementação do algoritmo no dimensionamento de uma torre de transmissão de energia, de maneira a demonstrar toda potencialidade do algoritmo na solução de problemas de otimização estrutural.

2.1 Motivação

Principalmente no caso de torres de linhas de transmissão de energia elétrica, um projeto bem elaborado que faça o uso racional das capacidades dos materiais pode ao mesmo tempo render economia na construção e ao mesmo tempo manter a segurança e a integridade destes elementos estruturais. Com uma malha que ultrapassa mais de 107000 km de linhas (ABRADE, 2014) e que interliga uma quantidade de regiões do país cada vez maior, é estratégico que os projetos tenham custo reduzido e ao mesmo tempo elevada confiabilidade de operação. A falha de componentes estruturais de linhas de transmissão são apenas um dos componentes em jogo que compõe a matriz de eventos de falha que podem acarretar uma série de eventos em cadeia que geram custos diretos e indiretos decorrentes da interrupção de fornecimento de energia. O evento da queda de torres de linhas de transmissão por efeitos de tormentas elétricas tem sido assunto de notícias de jornais no mundo e no país, juntamente com os transtornos e prejuízos associados (Reuters, 2014).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Price *et al* (2006), DE é uma das técnicas de otimização global estocásticas, baseada em populações. Este algoritmo minimiza uma função objetivo, que pode modelar o problema a ser resolvido quando impostas restrições na área de busca. Estudos como o de Coello *et al.* (2007) tem um papel importante na validação do algoritmo DE. Após comparação com técnicas reconhecidas, análise de convergência e estabilidade do algoritmo foi possível desmistificar o sucesso da DE, permitindo que subsequentes estudos fossem realizados. O algoritmo proposto por Storn e Price (1995) visava a solução de problemas monobjetivos em espaço contínuo. Entretanto, devido a sua facilidade de implementação e eficiência, DE tem sido empregada não só em problemas multiobjetivos, mas também em problemas com espaço discretizado.

Aplicações em otimização de estruturas metálicas vem sendo tema de um grande número de trabalhos na literatura técnica desde sua concepção. Kitayama *et al.* (2011) aplica DE na otimização estrutural de uma treliça 2D, onde as variáveis de projeto são as áreas das sessões transversais de cada elemento. Neste trabalho, será empregada uma abordagem semelhante para o caso de uma treliça estruturas treliçadas, onde valida-se a técnica da DE em casos de otimização.

A partir de uma população criada aleatoriamente, que se encontra dentro de limites mínimos e máximos, a evolução desta se dá de acordo com a aptidão dos indivíduos para a variável de projeto desejada. Parâmetros de controle são utilizados para controlar o processo evolutivo: taxa de crossover (CR), fator de escala (F) e tamanho da população (NP). DE utiliza o vetor de valores gerados para selecionar aleatoriamente três indivíduos que passarão pelas operações de mutação e crossover, e assim gerando um novo indivíduo para a nova geração. Zahirie (2002) investiga valores para os parâmetros de controle com o intuito de garantir que o algoritmo apresente um bom comportamento. A autora ressalta a importância da diversidade das populações e estabelece relações entre os parâmetros. Como medida adicional, a autora sugere que valores estatísticos baseados na variância da população sejam computados para cada componente da população. Dessa forma, é possível analisar a influência da mutação e *crossover* no processo. Por fim, conclui-se que essas medidas são eficazes como forma de evitar a convergência prematura do algoritmo.

Em Singh (2009) é estudado o comportamento de torres metálicas autoportantes submetidas à ação do vento. São desenvolvidos programas para calcular a geometria e a carga estática nos elementos da treliça de acordo com os critérios da NBR 6123 e NBR 5422. Com base na norma, é feita a caracterização do carregamento exercido pelo vento. Ao modelar as torres, a autora utiliza um modelo matemático não linear que considera o alongamento nos elementos treliçados e nos cabos, além de considerar também o efeito da temperatura. Com isso, mostra-se que os programas utilizados são plenamente capazes de simular o comportamento do sistema para obtenção dos esforços presentes na mesma.

Mendoza *et al.* (2012) realiza uma análise estrutural numérica de uma torre de transmissão baseada em dados técnicos fornecidos pela empresa Eletrobras-Eletronorte. A plataforma ANSYS foi utilizada na construção dos modelos computacionais. Primeiramente, foi levado em conta o carregamento estático provindo do vento. Para isso, normas técnicas pertinentes foram observadas para determinar as diretrizes de cálculo. Nestas constam os parâmetros de ponderação do peso próprio da torre e dos cabos aos quais a mesma está conectada. Em um segundo momento, observou-se o comportamento dinâmico da estrutura através de uma análise modal. Por fim, os resultados obtidos indicam que os carregamentos estáticos estão de acordo com os limites admissíveis especificados na NBR 6123, e que as frequências naturais da estrutura estão acima das excitadas pelo vento.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Definições Básicas

Problemas de otimização são caracterizados pela busca dos pontos de mínimo ou de máximo da função objetivo. Alguns conceitos e definições fundamentais para o entendimento do processo serão apresentados a seguir.

Uma função de n variáveis a ser minimizada pode ser especificada conforme:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } f(x) && (4.1) \\ &\text{tal que } x \in [x_{\min}; x_{\max}] \end{aligned}$$

onde $f(x)$ é a função objetivo a ser otimizada, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ é um vetor que contém as variáveis de projeto a serem otimizadas. Por sua vez, $x_{\min} = \{x_{\min,1}, x_{\min,2}, \dots, x_{\min,n}\}^T$ e $x_{\max} = \{x_{\max,1}, x_{\max,2}, \dots, x_{\max,n}\}^T$ são vetores que definem os limites inferiores e superiores de cada variável. Estes podem ser contínuos, discretos ou uma mistura de ambos.

4.2 Algoritmo de Evolução Diferencial (*Differential Evolution Algorithm, DE*).

Storn e Price (1995) desenvolveram o procedimento de mutação diferencial, acompanhado da recombinação discreta e da seleção de pares, para criar o algoritmo *Differential Evolution*. Este, inicialmente, visava a otimização de funções não-lineares em espaços contínuos. Como praticamente qualquer algoritmo evolutivo, *Differential Evolution* ataca o problema a partir de uma amostra inicial da função objetivo composta de múltiplos pontos randomicamente gerados. Condições de contorno previamente escolhidas estabelecem o domínio a qual os vetores da população inicial farão parte. Os vetores são indexados do número 0 a $Np - 1$. Cada vetor indexado, então, é perturbado com a diferença ponderada de dois elementos randomicamente escolhidos dentro da população. Para produzir o vetor-teste, u_0 , DE adiciona a diferença ponderada a um terceiro vetor randomicamente selecionado. Na etapa de seleção o vetor-teste compete com os vetores da população de mesmo índice. Os vetores com menor valor na função objetivo são então armazenados. Este processo se repete até que todos Np vetores tenham sido comparados com vetores-teste aleatoriamente selecionados. Após o último vetor ser utilizado, os restantes dos Np vetores teste se tornam pais da próxima geração do ciclo evolutivo. Existe literatura diversa para o DE, podendo-se citar livros essenciais ao tema como o de Price e Storn (2006). Referente a códigos fonte abertos referentes ao algoritmo, existem também uma grande quantidade disponível baseada em C++, Java, Scilab, Maple, Labview, Frotran90, Python etc., destacando-se o toolbox do Matlab para algoritmos genéticos que possui uma versão modificada do DE.

Muitas variações do algoritmo DE foram propostas, o que será implementado ao longo deste trabalho é uma versão própria do DE/rand/1/bin, onde DE representa *Differential Evolution*, rand indica que as partículas selecionadas para mutação são randomicamente escolhidas, e bin representa a recombinação binomial.

4.2.1 Inicialização

Primeiramente, os limites superior e inferior dos vetores devem ser determinados para cada um dos parâmetros do vetor-busca. Após os valores terem sido especificados, um gerador randômico determina, conforme a Equação 4.2, para cada posição do vetor um valor inicial contido no domínio determinado.

$$x_{i,g} = x_{\min,g} + \text{rand}(0,1) \cdot (x_{\max,g} - x_{\min,g}) \quad (4.2)$$

onde $\text{rand}(0,1)$ é um operador que retorna um número aleatório dentro do intervalo $0 \leq \text{rand}(0,1) < 1$.

4.2.2 Mutação

Uma vez que inicializados, DE recombina os vetores da população para produzir uma população de Np vetores-teste. A forma como se dá essa combinação depende da diferença entre dois vetores somada a um terceiro vetor, todos aleatoriamente selecionados. O vetor mutante, v_i se dá pela Equação 4.3 demonstrada a seguir:

$$v_{i,g} = x_{3,g} + \alpha F(x_{1,g} - x_{2,g}) \quad (4.3)$$

O peso diferencial $F \in [0,1]$ é um número real positivo que controla a taxa com a qual a população evolui. Embora o valor de F não seja limitado, este raramente ultrapassa o valor 1.0. Um fator α pode ser utilizado para ajustar o algoritmo dando mais flexibilidade e robustez na procura. No exemplo da torre de Linhas de Transmissão (LT) que será apresentado, ele se mostrou importante. Este fator utiliza o operador randômico para regular a diferença entre os vetores de busca.

4.2.3 Crossover

Para complementar a estratégia de mutação, DE emprega o mecanismo uniforme de crossover. Muitas vezes reconhecido como recombinação discreta, o crossover binomial arranja parâmetros de dois vetores diferentes para formar um vetor-teste. No caso do DE, o vetor é arranjado com um vetor mutante:

$$u_{i,g} = \begin{cases} v_i & ; \text{rand}(0,1) \leq Cr \\ x_i & \end{cases} \quad (4.4)$$

A probabilidade de crossover, $Cr \in [0,1]$, é um parâmetro cujo valor é escolhido pelo usuário e controla a fração de parâmetros que será copiado do vetor mutante. Para determinar qual parâmetro contribuirá para o vetor-teste, o mecanismo de crossover compara Cr com o valor gerado pelo operador rand[0,1]. Se o valor gerado for menor ou igual a Cr , o vetor-teste herda do vetor mutante, v_i , seu parâmetro; caso contrário, o parâmetro é copiado do vetor x_i .

4.2.4 Seleção

O funcionamento desta etapa é bastante simples, se o vetor-teste u_i tem valor igual ou menor que o vetor objetivo x_i , este substitui o vetor objetivo na próxima geração. Caso contrário, o vetor objetivo mantém sua posição por ao menos mais uma geração. A comparação dos vetores, que dá origem a evolução das populações se define por:

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & ; f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & \end{cases} \quad (4.5)$$

4.2.5 Síntese do algoritmo e escolha dos parâmetros heurísticos

Definindo $x = (x_1, \dots, x_n)$ como o candidato solução(agente), $f(x)$ a função objetivo que representa a solução do candidato x , F o peso diferencial, CR a probabilidade de cruzamento (crossover) pode-se representar em termos de pseudocódigo o algoritmo como segue na Figura 4.1.

Inicialize Np candidatos x dentro dos limites iniciais do espaço de procura pré-definido das variáveis de projeto.

Enquanto os critérios de parada não são atendidos (diversidade da população, número máximo de iterações e estabilização da solução ótima ao longo de iterações consecutivas), faça:

 Incremente o número de gerações. Para cada um dos Np agentes x da população, faça:

 Tome três agentes aleatórios e distintos da população x_1, x_2 e x_3 .

 Tome um número inteiro aleatório $\mathbb{I} \in \{1, \dots, n\}$ com n o número de variáveis de projeto

 Calcule as novas posições potenciais $v_{i,g} = (v_{1,g}, \dots, v_{n,g})$

 Para cada i tomado de uma distribuição uniforme nos limite de 0 e 1, $r_i = U(0,1)$

 Se $r_i < CR$ ou $i = R$ então faça $u_{i,g} = v_{i,g} = x_{3,g} + \alpha F(x_{1,g} - x_{2,g})$

 Caso contrário faça $u_{i,g} = x_i$

 Se $f(u_{i,g}) < f(x_{i,g})$ então troque o agente "a" da população pelo $u_{i,g}$

 Tome o elemento da população que possua o menor valor da função objetivo para comparação com iterações consecutivas, a média das funções objetivos da população e o número de gerações até então.

Figura 4.1- Pseudocódigo para o algoritmo DE.

Um dos principais problemas de algoritmos evolutivos é a escolha dos parâmetros de controle. Dependendo da escolha, quando escolhidos parâmetros errados, o algoritmo pode não convergir para o ótimo global. A escolha bastante comum caso não se tenha muita informação a respeito do problema que se vai otimizar é definir o número de pais da população como 10 vezes o número de variáveis de projeto da otimização, selecionar um fator de ponderação $F=0,8$, e de cruzamento constante $CR = 0,9$. Descobriu-se recentemente que a seleção de F a partir no intervalo $[0,5 \ 1,0]$ aleatoriamente para cada geração ou para cada vetor de diferença, uma técnica também chamada de ativação, melhora significativamente o comportamento de convergência, especialmente para funções objetivas ruidosas (Storn e Price, 1995). Também se verificou que a configuração CR a um valor baixo, por exemplo, $CR = 0,2$ ajuda a otimizar funções que sejam separáveis, uma vez que promove a busca ao longo dos eixos de coordenadas independentemente.

De acordo com Zaharie (2002), a convergência prematura pode ser prevenida se a probabilidade de cruzamento induz um aumento na variância da população. Para encontrar os valores ótimos, a relação $\sqrt{2F^2 - 2/n + CR/n + 1} > 1$, que foi obtida a partir da análise do valor esperado da variância das funções de custo da população, deve ser seguida. Os resultados mostram que um bom comportamento durante as gerações da otimização é conseguido utilizando-se esta relação para a escolha dos parâmetros heurísticos. F é o peso diferencial que pondera a evolução das populações, CR determina a taxa de probabilidade com que a operação de *crossover* será aplicada e n representa o número de populações presentes no espaço de busca.

4.3 Algoritmo de Análise Estrutural

O objetivo principal da análise estrutural no processo de otimização é, levando em conta determinadas condições de contorno, avaliar os deslocamentos e reações com os quais será possível obter esforços locais. Estes deverão ser analisados quanto à ocorrência de falha ou violação de critério de norma. No caso do algoritmo utilizado no presente trabalho, através de uma análise estrutural elástica linear, é possível minimizar a função objetivo, ou seja, diminuir a massa da estrutura treliçada. Na Figura 4.2 mostra-se o funcionamento do algoritmo DE em conjunto com o algoritmo de análise estrutural. As diretrizes do algoritmo se baseiam na teoria de elementos finitos, o qual foi modificado para compatibilizar com a parametrização (seções transversais) advinda da otimização pelo método DE.

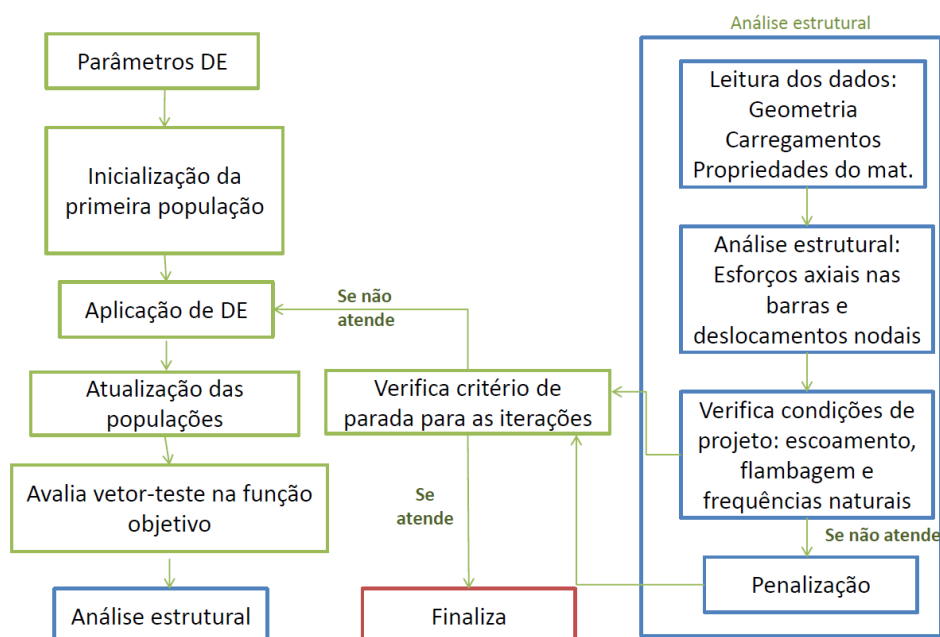


Figura 4.2 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de otimização estrutural

4.3.1 Análise Estática

Através do método da rigidez, é resolvido um sistema de equações que determina incógnitas do problema, como deslocamentos, reações e esforços solicitantes em cada nó. Este método assume os elementos da treliça espacial como barras, estas unidas através de seus nós, os quais possuem 3 graus de liberdade cada. A partir de equações constitutivas e de compatibilidade, é expresso o comportamento individual de cada barra. Uma vez obtida a matriz de rigidez, é feita a adequação do sistema local dos elementos com o sistema global de equações de equilíbrio. Diante destes dados, podem ser averiguadas as condições do sistema, e assim garantir a segurança da estrutura.

O sistema de equações de equilíbrio típico de uma estrutura treliçada 3D pode ser colocada como:

$$[K]\{d\} = \{F\} \quad (4.6)$$

onde $[K]$ é a matriz de rigidez global da estrutura, $\{d\}$ é o vetor de deslocamento nodal, e $\{F\}$, o vetor das forças externas aplicadas nos nós.

A matriz de rigidez no sistema global $[K_e]$ de um elemento é definida como:

$$[K_e] = [T]^T [k] [T] \quad (4.7)$$

onde $[K_e]$ é a matriz de rigidez no sistema global do elemento, $[T]$ é a matriz de rotação, e $[k]$, a matriz de rigidez em coordenadas locais. Para a obtenção da matriz global $[K]$ procede-se à montagem (superposição) das $[K_e]$ utilizando-se a numeração dos graus de liberdades efetivos. De forma simplificada, a matriz de rigidez $[K_e]$ pode ser expressa por:

$$[K_e] = \left(\frac{EA}{L} \right) \begin{bmatrix} C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z & -C_x^2 & -C_x C_y & -C_x C_z \\ & C_y^2 & C_y C_z & -C_x C_y & -C_y^2 & -C_y C_z \\ & & C_z^2 & -C_x C_z & -C_y C_z & -C_z^2 \\ & & & C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z \\ & & & & C_y^2 & C_y C_z \\ & & & & & C_z^2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

onde E é o módulo de elasticidade do elemento; A representa a área transversal; L , o comprimento do elemento; e C_x, C_y, C_z são os cossenos diretores, que podem ser obtidos por: $C_x = (x_2 - x_1)/L$; $C_y = (y_2 - y_1)/L$; $C_z = (z_2 - z_1)/L$

4.3.2 Análise Modal

A matriz de massa para o elemento é avaliada de acordo com a formulação consistente, e pode ser calculada a partir da mesma transformação. Utilizando a expressão da energia cinética associada ao elemento, obtém-se a matriz de massa consistente para o sistema global:

$$[M_e] = [T]^T [m] [T] \quad (4.9)$$

onde $[M_e]$ é a matriz consistente do elemento em coordenadas globais, $[T]$ é matriz de transformação, e $[m]$, a matriz de massa consistente em coordenadas locais. De forma simplificada, a matriz de massa consistente pode ser expressa por:

$$[M_e] = \left(\frac{A\rho L}{6} \right) \begin{bmatrix} 2C_x^2 & 2C_x C_y & 2C_x C_z & C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z \\ & 2C_y^2 & 2C_y C_z & C_x C_y & C_y^2 & C_y C_z \\ & & 2C_z^2 & C_x C_z & C_y C_z & C_z^2 \\ & & & 2C_x^2 & 2C_x C_y & 2C_x C_z \\ & & & & 2C_y^2 & 2C_y C_z \\ & & & & & 2C_z^2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

onde $[M_e]$ é a matriz consistente do elemento em coordenadas globais, ρ é a densidade do elemento; A representa a área transversal; L , o comprimento do elemento; e C_x, C_y, C_z os cossenos diretores. A matriz global $[M]$ é obtida da mesma forma que $[K]$. Uma vez obtida a matriz de rigidez global e a matriz consistente de massa, pode-se computar as frequências naturais e modos de vibração do sistema a partir da solução do problema de autovalores e autovetores provindos da Equação 4.11, que se dá por:

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = 0 \quad (4.11)$$

onde ω representa a frequência de vibração (rad/s) e $\{\varphi\}$ é o vetor das formas naturais de vibração (modos).

5. PROJETO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (LT) DE ENERGIA

Todo projeto de linha de transmissão começa com parâmetros planialtimétricos dos locais de implantação e verificação da adequação do traçado geométrico à limitações de norma (NBR 5422). Também o tipo de torre e capacidade de transmissão de energia deve ser definido. Quanto ao suporte elas podem ser autoportantes ou estaiadas. Basicamente existem 3 classes de LT: A1 tensão acima de 230kV, A2, tensão entre 88 e 138 kV e A3, tensão de 69kV, as quais delimitam valores definidos na NBR 5422 para seu projeto. As LT são constituídas ao longo de sua altura de: pernas, extensão, troncos e cabeça. Nas pernas encontram-se os elementos de apoio no solo, na extensão encontram-se os chamados módulos geralmente de formato tronco piramidal, na cabeça encontram-se as mísulas utilizadas para apoio dos isoladores e cabos assim como os para-raios. Pequenas variações podem ocorrer em função do tipo estrutural empregado. Num projeto de torre de LT é comum empregarem-se montantes contínuos nos módulos e travamentos, barras diagonais e horizontais que seguem perfis descontínuos aparafusados, sendo o perfil L o mais empregado. Os cabos suportados por LT podem ser dos mais diversos tipos e diâmetros (basicamente CA- cabos de alumínio e CAA- cabos de alumínio com alma de aço). Esforços gerados pelo peso dos cabos seguem a teoria da catenária e podem ser avaliados facilmente ($flecha = \gamma L^2 / 8T$, γ peso por unidade de comprimento, L vão entre torres e T força no cabo).

5.1 Ações

Neste trabalho o peso dos cabos e acessórios (isoladores, para-raios, etc) assim como o peso próprio da treliça são tomados como ações permanentes. A ação do vento em três direções é tomada como ação variável assim como a presença de elementos humanos na manutenção da LT. O rompimento de todos os cabos e a manutenção de apenas 1 deles preso à estrutura com seu peso próprio por apenas um lado (condição de torção extrema na LT) concomitante à ação do vento de projeto representa a condição de evento raro no projeto. Cabe salientar que o peso próprio da estrutura, assim como a ação do vento sobre seus perfis, deverá, à cada mudança no projeto gerada pela otimização, ser atualizado correspondentemente de forma a representar adequadamente a estrutura em questão que está sendo analisada assim como as forças de arrasto geradas nos cabos e nas barras da estrutura.

5.2 Combinações de carregamento

A NBR 8800 assim como a NBR 8681 especifica as combinações de carregamentos (ações) a serem utilizados em projetos de estruturas metálicas. Basicamente montam-se combinações para estados limites últimos, de serviço (utilização) e excepcionais. Pela NBR 8681, para combinações permanentes, emprega-se:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{G1,i}) + \gamma_{qi} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (5.1)$$

onde γ_{gi} , γ_{qi} , são os coeficientes de ponderação das ações permanentes e variáveis, $F_{G1,i}$, $F_{Q1,k}$ e $F_{Qj,k}$ são os valores característicos das ações permanentes e da ação variável principal e das outras que podem ocorrer concomitante ao peso próprio, respectivamente e ψ_{0j} representa o fator de combinação para ações variáveis. Para as combinações de serviço (utilização) frequente recomenda:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m (F_{G1,i}) + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (5.2)$$

onde ψ_{2j} representa o fator de combinação para ações de serviço variáveis. Para combinações raras a especificação é:

$$F_{rar} = \sum_{i=1}^m F_{G1,i} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} F_{Qj,k}) \quad (5.3)$$

onde $\psi_{1j} F_{Qj,k}$ representa os valores frequentes das ações variáveis. Neste trabalho $\gamma_{gi} = 1,25$, $\gamma_{qi} = 1,4$, $\psi_{0j} = 0,6$, $\psi_{1j} = 0,3$, $\psi_{2j} = 0$. Um total de "7" combinações de carregamento foram empregadas para a verificação das flechas, tensões nas barras e frequências naturais da torre de LT, quais sejam: Combinação (1) peso próprio e ações permanentes na estrutura, (2) combinação do peso próprio com o vento na direção x, (3) combinação do peso próprio com o vento na direção y, (4) combinação do peso próprio e vento na direção x-y (45°), (5) combinação rara de peso próprio, ação do vento na direção x e ruptura dos cabos, (6) combinação rara de peso próprio, ação do vento na direção y e ruptura dos cabos, (7) combinação rara de peso próprio, ação do vento na direção x-y (45°) e ruptura dos cabos.

5.3 Forças devidas ao vento

A ação do vento deve seguir o que especifica a NBR 5422 apesar da NBR 6123 apresentar elementos básicos que podem suplementar informações da NBR 5422 como, por exemplo, isoplefas mais atualizadas referentes às velocidades básicas do vento no Brasil e a variação da velocidade do vento com a altura do solo. Em geral a força de arrasto devido ao vento atuando sob uma área efetiva (projeção ortogonal) A_e coeficiente de arrasto C_a (C_x, C_y , etc) e pressão dinâmica q vem dada por:

$$F_e = C_a q A_e \quad (5.4)$$

Os valores de C_a são obtidos em tabelas constantes na NBR 6123 para perfis metálicos para ângulos de incidência do vento definidos (Anexo 1). A velocidade de projeto do vento deve ser obtida em função da altura considerada de cada módulo da torre como:

$$V_p = K_r K_d (H/10)^{1/n} V_T \quad (5.5)$$

sendo n o coeficiente que depende da rugosidade e período de integração do vento, K_r o coeficiente de rugosidade e K_d o coeficiente que leva em conta o tempo de integração e a categoria do terreno, V_T é a velocidade do vento básica V_b (obtida nos mapas do Brasil constantes na referida norma em m/s) corrigida para um período de retorno de T anos (em geral 50 anos). A pressão dinâmica de referência fica então assim definida:

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho V_p^2 \quad (5.6)$$

onde ρ é a massa específica do ar em kg/m^3 e V_p é a velocidade de projeto do vento de projeto em m/s. Para a densidade do ar recomenda-se utilizar $\rho = [1,293 / (1 + 0,00367t)] \cdot [(16000 + 64t^2 - ALT) / (16000 + 64t^2 + ALT)]$, com t , temperatura em °C e ALT a altitude do local.

Para suportes metálicos treliçados de seção transversal retangular o esforço devido à ação do vento sobre os troncos de comprimento l , aplicado nos centros de gravidade é dado pela equação:

$$A_t = q_0 [1 + 0,2(\text{sen } 2\theta)^2] [S_{T1} C_{xT1} (\text{sen } \theta)^2 + S_{T2} C_{xT2} (\text{cos } \theta)^2] \quad (5.7)$$

onde θ é o ângulo de incidência do vento, S_{T1} e S_{T2} são as áreas líquidas projetadas ortogonalmente e C_{xT1} e C_{xT2} são os coeficientes de arrasto próprio das faces 1 e 2 para um vento perpendicular a cada face (sotavento e barlavento). O cálculo pode ser simplificado utilizando-se o índice de área exposta no caso de outros tipos de perfis.

5.3.1 Forças devidas ao vento nos cabos e isoladores

Para a ação do vento nos cabos estendidos em um vão z , recomenda-se utilizar a equação que fornece a força nos pontos de fixação do cabo decorrentes da ação perpendicular do vento sobre o cabo:

$$A_c = q_0 C_{xc} \alpha d \frac{z}{2} (\sin \theta)^2$$

onde q_0 é a pressão dinâmica, C_{xc} é o coeficiente de arrasto de 1,0, α é o fator de efetividade (Figura 2 da NBR 5422), z é o comprimento do vão considerado e θ o ângulo de incidência do vento. No caso de isoladores, a formulação é bastante semelhante para a força originada de arrasto:

$$A_i = q_0 C_{xi} S_i \quad (5.9)$$

onde C_{xi} é o coeficiente de arrasto da cadeia de isoladores e S_i é a área projetada ortogonalmente sobre um plano vertical.

5.4 Verificação dos elementos de acordo com a NBR 8800

A norma NBR 8800 utiliza o método dos estados limites, logo, os esforços e deformações devem ser menores que determinados valores limites, que dependem do material usado e do tipo de estrutura adotada. Após a execução da análise estrutural pelo algoritmo, são testados de acordo com os critérios de segurança da norma os resultados obtidos; como esforços axiais, deslocamentos e frequências naturais. Para a verificação dos elementos, são consideradas as possíveis situações de falha do material. Usualmente, os perfis de aço utilizados em linhas de transmissão de energia fazem parte dos perfis laminados, por isso, devem seguir as diretrizes da norma correspondentes à sua categoria.

São várias as restrições da norma quanto a solicitações e geometrias impostas no elemento. Deve-se observar, primeiramente, que o limite de escoamento do aço para tração e compressão não é o mesmo. Consta na norma, portanto, que barras submetidas à força axial de tração devem obedecer a diferentes parâmetros das barras submetidas à força axial de compressão. Além das condições de resistência de cálculo, para compressão é crítica a possibilidade de flambagem. Logo, observações especiais são levadas em conta para levar em conta os diferentes modos de flambagem. Basicamente a NBR 8800 especifica para barras à compressão o método das larguras efetivas (MLE). No Anexo 2 podem ser observadas as restrições adotadas para o dimensionamento de estruturas com perfil tubular da NBR 8800:2008.

Referente à característica dinâmica, pode-se dizer que a estrutura não deve ter frequência natural de vibração que possa ser excitada pelo vento a fim de evitar o fenômeno da ressonância. A NBR8800 especifica valores limites apenas para pisos de edifícios com o intuito de limitar a percepção dos ocupantes. A NBR 6123 traz fórmulas simples para determinar a frequência fundamental de edificações típicas, mas sem restrições quanto aos valores. A NBR 5422 também não especifica limites. Excitações típicas de sismos e ventos atuam na faixa de 0-5Hz (em torno de 1 Hz para ventos) sendo portanto necessário evitar torres com frequência fundamental nesta faixa (Mendonça, 2012).

6. APLICAÇÕES NUMÉRICAS

6.1 Metodologia

Nesse trabalho serão otimizados três casos de estruturas treliçadas, dos quais dois já foram abordados por autores que utilizaram outros algoritmos de otimização. Com isso, pode-se validar os resultados do algoritmo *Differential Evolution* e comparar sua eficiência com os demais. No que diz respeito aos *benchmarks*, cada problema foi tratado similarmente aos trabalhos da literatura citados com exceção do algoritmo de otimização utilizado. Ou seja, a configuração estrutural e as condições de contorno correspondentes seguem os critérios presentes na literatura. O exemplo apresentado da estrutura treliçada, cuja configuração representa uma torre de transmissão, foi, no entanto, composto com base em um caso hipotético sugerido pelo autor deste trabalho.

O método DE foi testado em exemplos de variáveis contínuas em treliças com 72 barras, 200 barras e 244 barras. Pretende-se testar também, para o exemplo com 244 barras, em variáveis discretas utilizando parâmetros advindos da Norma NBR 8800 como restrições de projeto. Após cada exemplo, é mostrada a comparação dos resultados com outros trabalhos realizados com diferentes algoritmos no mesmo exemplo.

6.1.1 Exemplos simples (*Benchmarks* da literatura)

Neste item os exemplos referentes à otimização de uma mola e de um vaso de pressão (Mezura-Montes, 2005) são utilizados para comparar e validar o algoritmo do DE que foi desenvolvido. Estes são exemplos bastante empregados na literatura como *Benchmarks* e representam problemas de engenharia simples, mas que podem trazer desafios para algoritmos tradicionais. O primeiro problema trata-se de um vaso de pressão com corpo cilíndrico e tampas hemisféricas. O objetivo é minimizar o custo total, sendo estes: custo do material, custo de conformação e custo de soldagem. As variáveis de projeto correspondem à espessura da casca T_s , espessura da tampa T_h , raio interno R e comprimento da seção cilíndrica L . Por sua vez, o segundo exemplo corresponde à otimização do peso de mola de tração/compressão sujeita a restrições de deflexão mínima, tensão de cisalhamento, frequência, e variáveis de projeto como diâmetro máximo. As variáveis de projeto são o diâmetro externo da mola D , o diâmetro do fio d e o número de espiras N . A seguir, a Tabela 6.1 indica os resultados obtidos neste trabalho e aqueles obtidos pelos autores da literatura.

Tabela 6.1 - Melhor solução encontrada para o problema de vaso de pressão e mola

Vaso de pressão	Valores para $f(x)$ [unidades]				
	SB (Akhtar et al. 2002)	PSO (Cagnina et al. 2008)	EA (Mezura-Montes, 2005)	FMA (Yang, 2010)	DE
Massa(kg)	6171.0	6059.714	6059.714355	6059.714	6059.714
Mola tração/comp.	MP (Belegundu, 2002)	SQP (Arora, 1989)	EA (Mezura-Montes, 2005)	FMA (Yang, 2010)	DE
Massa(kg)	0.012669	0.012665	0.012689	0.012665	0.012665

6.1.2 Treliça de 72 Barras

No exemplo a seguir, foi analisada uma treliça espacial com 20 nós e 72 barras, como mostrado na Figura A3. Trata-se de um exemplo bastante empregado na literatura como Benchmark tendo sido resolvido por diversos autores. Este exemplo tem o intuito de validar a programação do DE num caso que já foi otimizado por outros algoritmos heurísticos e baseado em gradientes. Maiores detalhes referentes às variáveis de projeto, grupos de barras, limites de tensões e flechas podem ser obtidos no trabalho de Guerra (2008). A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos pela presente programação com DE e aquelas obtidas na literatura.

Tabela 6.2 - Melhor solução encontrada para o problema da treliça de 72 barras (mm^2).

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆	Massa (kg)
(a)	63,8	400,6	175,4	221,9	276,1	338,7	45,16	77,41	745,8	353,5	55,48	58,06	1097,4	399,9	50,32	58,70	170,62
(b)	100,97	352,00	264,77	367,55	337,87	333,61	64,516	64,516	818,32	330,13	64,52	64,52	1216,9	330,52	64,52	64,52	172,20
(c)	103,87	359,35	243,22	326,45	394,19	343,22	64,51	64,51	803,86	338,06	64,51	64,51	1172,9	338,06	64,51	64,51	172,90
(d)	100,20	361,50	237,40	368,10	297,50	359,50	64,60	76,60	806,80	330,00	64,60	64,50	1181,8	334,00	64,50	64,50	172,87

(a) AG (Guerra, 2008), (b) FM Sedaghati, 2005, (c) Venkayya, 1971, (d) DE.

6.1.3 Treliça espacial de 200 Barras

A treliça apresentada na Figura A4 foi otimizada seguindo os critérios da NBR 6123, NBR 8800 e NBR 8681 utilizando-se perfis tubulares de alumínio comerciais utilizando um algoritmo genético e utilizando-se um software comercial mCalc3D por Guerra (2008). Neste trabalho, compara-se o resultado obtido utilizando-se o programa aqui desenvolvido com o objetivo de avaliar a confiabilidade do programa na otimização com critérios de norma. Detalhes das combinações, critérios de flambagem global e local e flechas admissíveis utilizadas podem ser encontrados em Guerra(2008). Os critérios da NBR 8800 para este exemplo encontram-se na Tabela A1 nos Anexos.

A Tabela 6.3 indica os resultados obtidos por Guerra (2008), pelo software comercial e pela programação aqui desenvolvida, sendo o perfil 23 da tabela comercial ($D=33,4\text{mm}$, $t=3,4\text{mm}$, $A=3,19\text{mm}^2$) o ótimo encontrado para as barras dos banzos superiores, inferiores e diagonais,

os quais foram assumidos como grupos de barras a serem otimizadas. Percebe-se que os resultados finais de massa e perfis utilizados são idênticos àqueles fornecidos pelo Software mCalc3D.

Tabela 6.3 - Comparação da Treliça Espacial com 200 Barras – Variáveis Discretas.

Variáveis de Projeto	mCalc 3D	Algoritmo Genético (Guerra, 2008)	Presente Trabalho DEA
	No. Perfil tabela	No. Perfil tabela	No. Perfil tabela
X_1	23	23	23
X_2	23	25	23
X_3	23	23	23
Massa (kg)	938,79	942,09	938,79

6.2 Otimização de um Projeto de Torre de Transmissão de Energia Elétrica – Treliça espacial de 244 Barras

Um dos grandes desafios na operação do sistema elétrico, para que a energia chegue adequadamente a todos os pontos de consumo do país, é a transmissão de energia. As torres tem papel fundamental neste processo, pois suportam os cabos de transmissão a uma distância segura do solo e de outros obstáculos. Acidentes envolvendo torres causam perdas diretas e indiretas a todos que são servidos pelas linhas danificadas. Além disso, estes acidentes representam gastos de manutenção consideráveis para as empresas que fornecem a energia.

Os principais carregamentos que podem desencadear falhas catastróficas de torres de transmissão são as cargas provindas do vento e cataclismos, como terremotos, tornados e ciclones. Como no Brasil a atividade sísmica é baixa, é razoável considerar que apenas o vento exerça cargas frequentes. De acordo com a NBR 6123, é possível calcular as forças exercidas pelo vento, em edificações, conforme a condição e incidência do mesmo em cada região do país. Os critérios de projeto propostos neste exemplo para torres de transmissão seguem também os parâmetros contidos na NBR 5422 (Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica), que se encontra ainda em vigência atualmente segundo a ABNT. No entanto, devido à possibilidade de falhas em cascata proporcionadas pelo rompimento de um cabo, torna-se necessário analisar esta condição. Constam na norma equações de combinação de cargas, que majoram os carregamentos de acordo com a frequência de incidência dos mesmos.

A estrutura da torre de linhas de transmissão de energia representa um desafio à robustez do algoritmo DE. A partir dos resultados obtidos, foi constatado que esta ferramenta é de boa aplicabilidade em problemas de otimização em engenharia. A estrutura espacial treliçada apresentada possui 244 barras e 77 nós. As variáveis de busca, referentes a estes elementos, correspondem às suas seções transversais, que neste exemplo foram discretizadas. Por sua vez, as propriedades do aço adotado, assim como a geometria da estrutura, visam representar uma torre real, e foram retiradas da literatura para manter o exemplo. A densidade do material é de 2770 kg/m³ e o módulo de elasticidade é de 200 GPa. Como restrições primárias têm-se os nós 74, 75, 76 e 77 simplesmente apoiados em rótulas. Na Figura 6.2 indica-se as principais características geométricas do projeto da torre de LT que foi otimizada.

Neste exemplo foram utilizadas 6 ações (peso próprio da torre, peso dos cabos e isoladores, vento x, vento y, vento 45°, ruptura dos cabos e manutenção de apenas 1 cabo). Foram utilizadas também 7 combinações de carregamentos como explicitado anteriormente no item 5.2. Neste trabalho adotou-se a tabela de perfis comerciais “L” ASTM-36 de cantoneiras (Tabela A2). Foram utilizados cabos condutores de alumínio com alma de aço CAA 636MCM-26/7 *Grosbeak* de diâmetro 21,9mm peso próprio de 13 N/m e tração Máxima de 31500 N. Para os para-raios, utilizou-se EHS3/8” uma cordoalha de 7 fios galvanizado de diâmetro 9,15mm, peso próprio de 4,07 N/m e carga máxima de 14 KN.

Os elementos da estrutura foram divididos em grupos para economizar tempo de processamento e para tornar o exemplo fidedigno, uma vez que não seria prático que o projeto

especificasse uma barra para cada seção transversal. Desse modo, elementos que ocupam posições equivalentes, considerando a simetria, são otimizados através da mesma população. Neste exemplo a estrutura foi dividida em 32 grupos, ou seja, 32 populações (vetores de busca). Conforme mencionado, os grupos são: barras 01 à 04, 05 à 12, 13 à 24, 25 à 28, 29 à 36, 37 à 52, 53 à 60, 61 à 64, 65 à 88, 89 à 108, 109 à 110, 11 à 114, 115 à 122, 123 à 126, 127 à 134, 135 à 138, 139 à 146, 147 à 152, 153 à 156, 157 à 170, 171 à 174, 175 à 188, 189 à 201, 202 à 209, 210 à 213, 214 à 218, 219 à 222, 223 à 226, 227 à 228, 229 à 234, 235 à 239, 240 à 244.

Quanto às restrições secundárias, elas são referentes à frequência natural fundamental da estrutural. Esta, e as demais, são calculadas a partir da análise modal como mostrado anteriormente. Conforme calculado, a primeira frequência natural da estrutura ficou acima do valor limite estipulado para a otimização que foi de 5 Hz. O resultado de 6,43 Hz para a frequência natural está de acordo com as recomendações presentes na literatura (Mendoza, 2012). Com base nos resultados obtidos pode-se encontrar os pontos mais solicitados da estrutura. A análise mais crítica corresponde à combinação número 7, onde há peso próprio (das barras e dos elementos da torre de LT), ruptura de um dos cabos e incidência de vento à 45° da estrutura. Pode-se observar que para tração o elemento 111 é o mais solicitado. Este recebe uma força aplicada de $1,4 \cdot 10^5 \text{ N}$, enquanto o esforço limite para este elemento é de $9,43 \cdot 10^5 \text{ N}$. Já para compressão, tem-se o elemento 63 como mais solicitado. A força solicitante é de $3,44 \cdot 10^5 \text{ N}$, enquanto o esforço limite é de $6,76 \cdot 10^5 \text{ N}$. Logo, conclui-se que nenhum dos elementos obtidos na solução final da função objetivo viola as restrições de dimensionamento da norma.

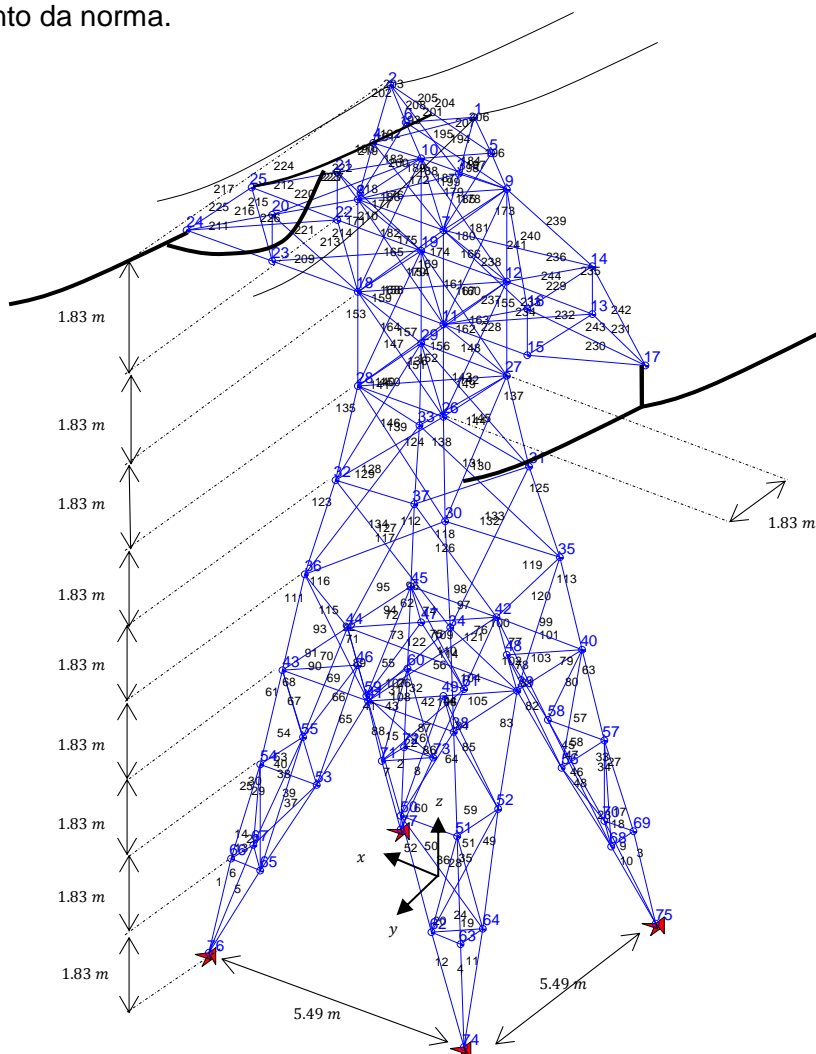


Figura 6.2 - Estrutura de Torre de Linha de Transmissão com 244 barras.

Os critérios da NBR 8800 para este exemplo são semelhantes aos encontrados na Tabela A1 nos Anexos trocando-se o tipo de perfil para L. Novamente, o algoritmo busca as seções transversais que diminuam a massa total da estrutura sem violar as condições de dimensionamento da norma. O valor da massa da estrutura minimizado pelo DE foi de 4012,43 kg, o que representa uma redução de 226% em relação primeira iteração na qual não houve penalização.

Como forma de validar o resultado final obtido e comparar DE com outros métodos, aplicou-se o método PSO (Particle Swarm Optimization) e o método SQP (Sequential Quadratic Programming) no problema de otimização da torre de LT. Para PSO usou-se $n = 20$; $\omega = 0,1$; $c_1 = 2$ e $c_2 = 2$. Os resultados de DE foram melhores que os dois outros métodos, ou seja, a redução da função de custo foi maior em DE. A massa da estrutura otimizada calculada com SQP foi de 5668 kg, a calculada pelo PSO foi de 4857 kg. A Figura A5 mostra a evolução da otimização do PSO e do DE. Pode-se observar que, embora PSO tenha convergido inicialmente mais rápido, DE reduziu mais a função objetivo em 200 iterações. Nota-se também que o algoritmo convergiu em poucas iterações para a proximidade do mínimo global, e então teve uma redução menos significativa da massa ao longo das próximas iterações. São mostradas na Tabela 6.4 as seções transversais escolhidas para cada grupo de elementos, ou seja, as variáveis de projeto da função objetivo.

Tabela 6.4 - Seções transversais (Perfil da Tabela) calculadas pelo DE e pelo PSO.

	Variável de Proj.\		Variável de Proj.\	
	Algoritmo	PSO	Algoritmo	PSO
Perfil da Lista de Perfis "L"	A ₁	30	DE	34
	A ₂	29	DE	21
	A ₃	18	DE	9
	A ₄	26	DE	26
	A ₅	24	DE	18
	A ₆	19	DE	23
	A ₇	26	DE	6
	A ₈	31	DE	49
	A ₉	20	DE	19
	A ₁₀	19	DE	14
	A ₁₁	49	DE	58
	A ₁₂	27	DE	28
	A ₁₃	27	DE	25
	A ₁₄	34	DE	29
	A ₁₅	23	DE	23
	A ₁₆	24	DE	18
Perfil da Lista de Perfis "L"	A ₁₇	PSO	25	25
	A ₁₈	PSO	18	14
	A ₁₉	PSO	37	31
	A ₂₀	PSO	25	23
	A ₂₁	PSO	17	16
	A ₂₂	PSO	19	23
	A ₂₃	PSO	17	23
	A ₂₄	PSO	21	24
	A ₂₅	PSO	28	32
	A ₂₆	PSO	29	25
	A ₂₇	PSO	27	39
	A ₂₈	PSO	25	28
	A ₂₉	PSO	23	16
	A ₃₀	PSO	48	17
	A ₃₁	PSO	40	22
	A ₃₂	PSO	39	25

7. CONCLUSÕES

Foi programado em MATLAB um software para a resolução de problemas de otimização utilizando o algoritmo *Differential Evolution* (DE). O algoritmo desenvolvido, a fim de comparar e verificar a acurácia de soluções foi aplicado com êxito em exemplos simples presentes na literatura (Benchmarks). Além disso, como forma de testar o algoritmo em conjunto com a análise estrutural, implementou-se o algoritmo em problemas de otimização de estruturas treliçadas. Nessas aplicações, o processo de otimização apresentou bom comportamento e resultados compatíveis com os algoritmos empregados pelos autores citados e com softwares comerciais (mcalc 3D), o que validou a eficácia e robustez do DE como ferramenta de projeto.

Por fim, ao aplicar-se o algoritmo no projeto de uma torre de LT, foi demonstrada a versatilidade do mesmo. O exemplo proposto por este trabalho exemplificou, atentando para desafios encontrados no dimensionamento de estruturas, como o algoritmo reduziu a massa total da estrutura. A implementação em problemas de otimização em engenharia se torna simples devido à utilização de poucos parâmetros heurísticos de controle no algoritmo. Além disso, sua robustez tornou possível a busca da solução no espaço discretizado, representado neste exemplo pela tabela de perfis metálicos. Buscou-se da literatura indicações para os parâmetros heurísticos, tendo sido encontrados limites para os quais se assegura a estabilidade e bom comportamento do algoritmo.

O processo de otimização da função custo foi bastante satisfatório, pois foi possível encontrar um valor ótimo com um número pequeno de iterações em um tempo razoável de processamento. A redução da massa da torre de LT representou 226% em relação à primeira configuração dos elementos que não violou nenhuma restrição. Com base nos resultados avaliados, foi mostrado que nenhum elemento violou as restrições referentes aos critérios de dimensionamento da norma NBR 8800:2008. Além disso, a frequência natural da estrutura também se encontrou acima dos valores sugeridos pelos autores da literatura, o que previne que a estrutura entre em ressonância ao ser excitada pelo vento.

Também se conclui que a redução da estrutura da torre de LT obtida por DE superou significativamente o resultado obtido pelos outros métodos (para os parâmetros heurísticos utilizados na comparação). Enquanto encontrado pelo método DE o resultado ótimo é de 4012,43 kg, o encontrado pelos métodos PSO e SQP foram de 4857,0 kg e 5668,0 kg, respectivamente.

Para futuros trabalhos, seria de grande valia estudar a convergência do algoritmo DE de acordo com variações nos seus parâmetros. Além disso, um estudo com melhorias nos mecanismos de crossover e mutação podem melhorar resultados já obtidos. Por último, outra sugestão relevante para um próximo trabalho é o de aplicar o mesmo método em uma torre de LT cuja geometria possa ser otimizada e parametrizada com configurações correspondentes às mais utilizadas no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRADEE, Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica, **Redes de Energia Elétrica**. <http://www.abradee.com.br/>. Acessado em 01/08/2014.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123. **Forças devidas ao vento em edificações**. 1988.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2008.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5422. **Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. 1985.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8681. **Ações e segurança nas estruturas**. 2003.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8449. **Dimensionamento de cabos pára-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. 2003.
- Akhtar, S.; Tai, K. and Ray, T. “**A Socio-Behavioural Simulation Model for Engineering Design Optimization**”. *Engineering Optimization*, 34(4):341–354, 2002.
- Arora, J. S. **Introduction to Optimum Design**. McGraw-Hill, New York, 1989.
- Belegundu, A. “**A Study of Mathematical Programming Methods for Structural Optimization**”, PhD thesis, University of Iowa, Iowa, 1982.
- Cagnina, L. C.; Esquivel, S. C.; Coello, C. A. “**Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer**”, *Informatica*, 32, 319-326, 2008.
- Coello, C. A. C.; Lamont, G. B.; Veldhuizen, D. A. “**Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**”, Springer, 2007.
- Guerra, C. “**Otimização paramétrica de estruturas treliçadas por algoritmos genéticos**”. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS. 2008.
- Kitayama, S.; Arakawa, M.; Yamazaki, K. “**Differential Evolution as the Global Optimization Technique and its Application to Structural Optimization**”, *Applied Soft Computing* 11, 3792-3803p, 2011.
- Mendoza, A. C.; Braga, D. S.; Soeiro, N. S.; Melo, G. V. “**Análise Estrutural de uma Torre de Transmissão de Energia Elétrica Submetida a Carregamento Eólico**”; Universidade Federal de Pará, Belém, 2012.
- Mezura-Montes, E.; Coello, C. A. C.; Landa-Becerra, R. “**Engineering Optimization Using a Simple Evolutionary Algorithm**”, Mexico, EVOCINV, 2003.
- Mezura-Montes, E.; Coello, C. A. C. “**Useful Infeasible Solutions in Engineering Optimization with Evolutionary Algorithms**”, *Lecture Notes in Computer Science* Volume 3789, pp 652-662, 2005.
- Price, K.; Storn, R.; Lampinen, J. A. “**Differential Evolution – A Practical Approach to Global Optimization**”, Springer, 2006.
- Reuters, T. TRI. **Vendaval foi causa da queda de torres do sistema de Itaipu** <http://br.reuters.com/article/domesticNews/idBRKBN0EK1WE20140609>. Acessado em (09/06/2014).
- Singh, K. S. “**Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão**”, Dissertação de Mestrado. E-DM – 004 A/09, Universidade de Brasília, 2009.
- Storn, R.; Price, K. “**Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces**”, Technical Report TR-95-012, 1995.
- Yang, X.-S. “**Engineering Optimization – An Introduction with Metaheuristic Applications**”, Wiley, EUA, 2010.
- Zahirie, D. “**Critical Values for the Control Parameters of Differential Evolution Algorithms**”, *Proceedings of MENDEL*, 2002.

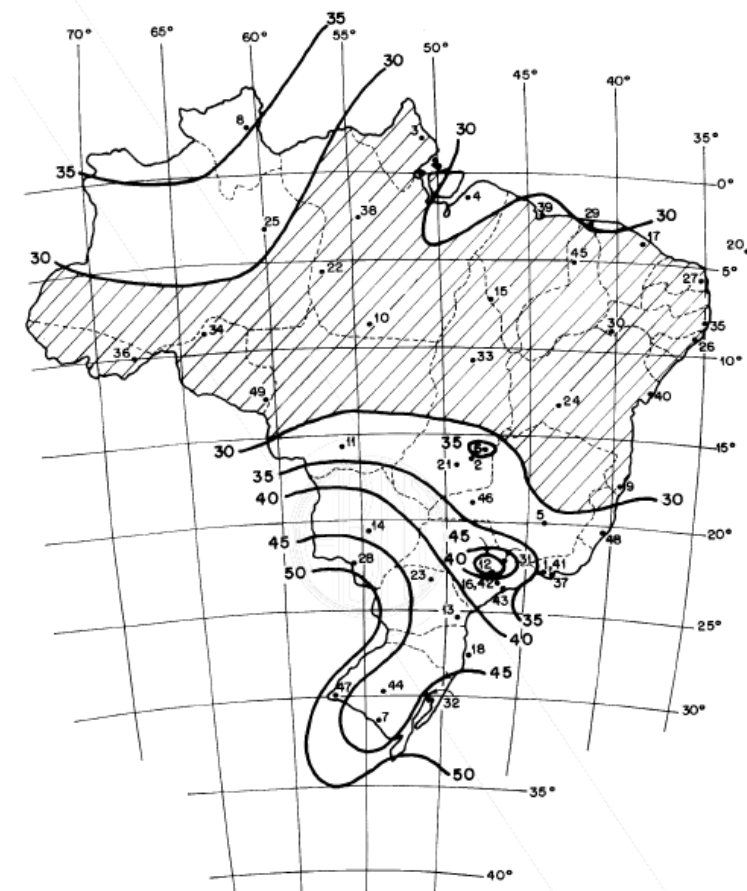


Figura A1 - Isopletas de velocidade básica do vento a 10m, tempo integração 3s e tempo recorrência de 50 anos (NBR 6123, 1988).

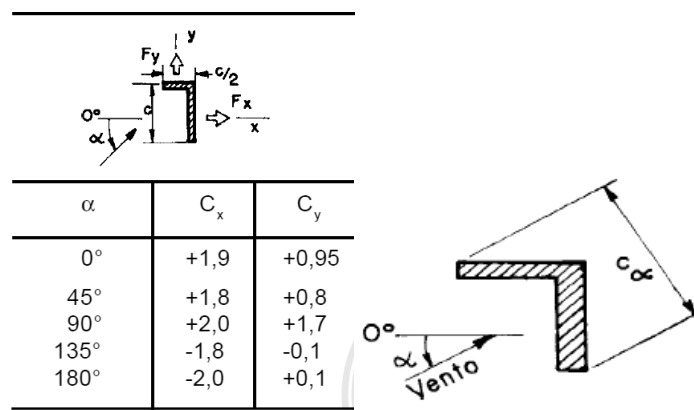


Figura A2 - Coeficientes de arrasto para perfis L, ângulos de incidência do vento e definição das áreas projetadas (NBR 6123,1988).

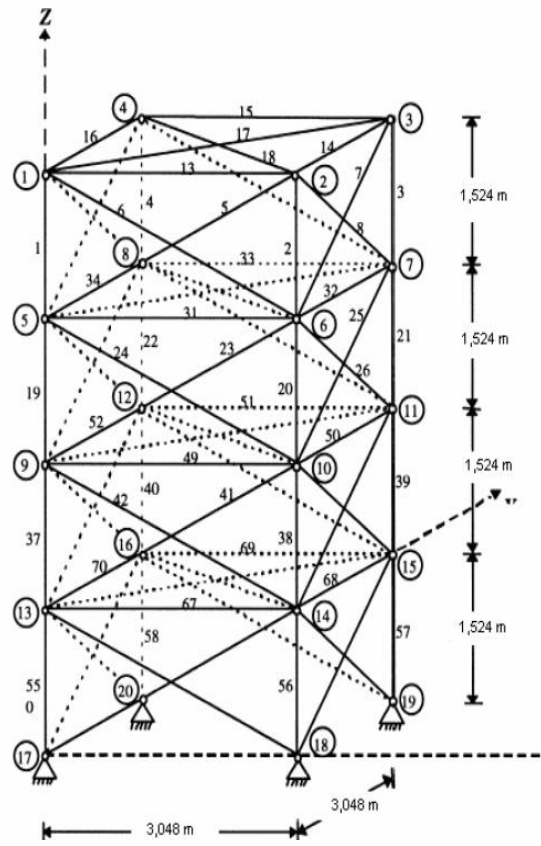


Figura A3 - Estrutura de treliça com 72 barras.

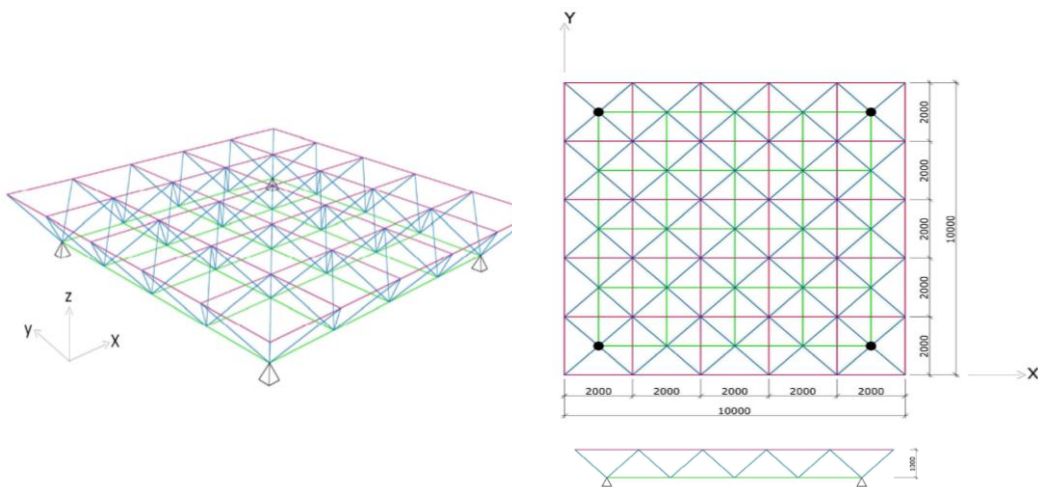


Figura A4 - Estrutura de treliça com 200 barras.

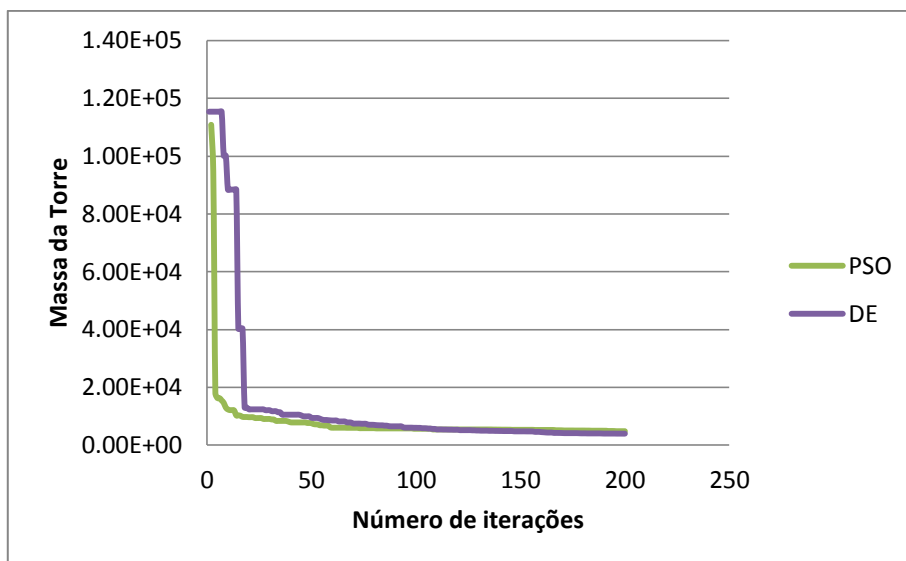
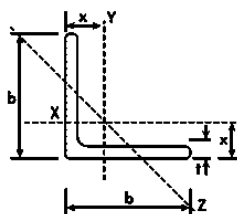


Figura A5 - Comparação entre a convergência do PSO e do DE

Tabela A1 - Critérios da Norma NBR 8800 (2008) para a otimização de barras prismáticas tubulares.

Deslocamento máximo admissível	dependente do problema	
Barras submetidas à força axial de tração	Condição	$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$
	Resistência de cálculo	$N_{t,Rd} = A_g \cdot F_y / \gamma_{a1}$ ($\gamma_{a1} = 1,10$)
	Limitação do índice de esbeltez	$L / r \leq 300$
Barras submetidas à força axial de compressão	Condição	$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$
	Resistência de cálculo	$N_{c,Rd} = \chi \cdot Q \cdot A_g \cdot F_y / \gamma_{a1}$ ($\gamma_{a1} = 1,10$)
	Fator de redução χ	Se: $\lambda_0 \leq 1,5$: $\chi = 0,658^{\lambda_0^2}$ Se: $\lambda_0 > 1,5$: $\chi = 0,877 / \lambda_0^2$
	Índice de esbeltez reduzido (λ_0)	$\lambda_0 = \sqrt{Q \cdot A_g \cdot F_y / N_e}$
	Força axial de flambagem elástica	$N_e = \pi^2 \cdot E \cdot I / (K \cdot l)^2$ ($K=1$ - rotulada nas duas extremidades)
	Fator de redução associado à flambagem das paredes do perfil de seção tubular	Se: $D / t \leq 0,11 \cdot E / F_y$, então: $Q = 1$ Se: $0,11 \cdot E / F_y \leq D / t \leq 0,45 \cdot E / F_y$, então: $Q = 0,038 / D / t \cdot E / F_y + 2/3$ Se: $D / t \geq 0,45 \cdot E / F_y$, então: não é permitido a utilização de seções tubulares circular.
	Limitação do índice de esbeltez	$L / r \leq 200$

Tabela A2 - Perfis de cantoneiras de abas iguais para exemplo do projeto da Torre de Linha de Transmissão de Energia Elétrica.



Perfil - Dimensões	Altura	Espessura	Área	Peso	$I_x = I_y$	$W_x = W_y$	$I_x = I_y$	$I_{máx}$	$I_{mín}$	$X_g = Y_g$
h (pol)	h (mm)	to (pol)	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm	cm
5/8 x 5/8	16	0.13	0.96	0.71	0.2	0.18	0.45	0.56	0.3	0.51
3/4 x 3/4	19	0.13	1.16	0.88	0.37	0.28	0.58	0.73	0.38	0.58
7/8 x 7/8	22	0.13	1.35	1.04	0.58	0.37	0.66	0.8	0.48	0.66
1 x 1	25	0.13	1.48	1.19	0.83	0.49	0.76	0.96	0.51	0.76
1 1/4 x 1 1/4	32	0.13	1.93	1.5	1.66	0.81	0.96	1.21	0.63	0.91
1 x 1	25	0.19	2.19	1.73	1.24	0.65	0.76	0.95	0.48	0.81
1 1/2 x 1 1/2	38	0.13	2.32	1.83	3.32	1.14	1.19	1.5	0.76	1.06
1 3/4 x 1 3/4	44	0.13	2.7	2.14	5.41	1.63	1.39	1.76	0.88	1.21
1 1/2 x 1 1/2	32	0.19	2.77	2.2	2.49	1.14	0.96	1.2	0.61	0.96
1 x 1	25	0.75	2.83	2.21	1.66	0.98	0.73	0.91	0.48	0.86
2 x 2	51	0.13	3.09	2.46	7.9	2.13	1.6	2.03	1.01	1.39
1 1/2 x 1 1/2	38	0.19	3.42	2.68	4.57	1.63	1.16	1.47	0.73	1.11
1 3/4 x 1 3/4	32	0.25	3.61	2.86	3.32	1.47	0.93	1.16	0.61	1.01
1 1/2 x 1 1/2	44	0.19	3.99	3.15	7.49	2.29	1.37	1.73	0.88	1.29
1 1/2 x 1 1/2	38	0.25	4.45	3.48	5.82	2.13	1.14	1.44	0.73	1.19
2 x 2	51	0.19	4.58	3.63	11.23	3.11	1.57	1.99	0.99	1.44
1 1/2 x 1 1/2	44	0.25	5.22	4.12	9.57	3.11	1.34	1.69	0.86	1.34
1 1/2 x 1 1/2	38	0.31	5.42	4.26	6.85	4.53	1.11	1.39	0.73	1.24
2 x 2	51	0.25	6.06	4.76	14.56	4.09	1.54	1.94	0.99	1.49
1 1/2 x 1 1/2	44	0.31	6.45	5.05	11.23	3.77	1.32	1.66	0.86	1.39
2 x 2	51	0.31	7.41	5.83	17.48	4.91	1.52	1.91	0.99	1.54
1 1/2 x 1 1/2	44	0.38	7.61	5.94	12.9	4.26	1.29	1.61	0.86	1.45
2 1/2 x 2 1/2	64	0.25	7.68	4.1	29.1	6.4	1.95	2.4	2.45	1.83
2 x 2	51	0.38	8.77	6.99	19.97	5.73	1.49	1.86	0.99	1.62
2 1/2 x 2 1/2	64	0.31	9.48	5	35.4	7.8	1.93	2.4	2.43	1.88
2 1/2 x 2 1/2	64	0.38	11.16	5.9	40.8	9.1	1.91	2.22	2.41	1.93
3 x 9.1	76	0.31	11.48	6.1	62.4	11.6	2.33	1.5	2.94	2.21
3 x 10.7	76	0.38	13.61	7.2	74.9	14	2.35	1.47	2.92	2.26
3 x 12.4	76	0.44	15.68	8.3	83.3	15.7	2.3	1.47	2.91	2.31
3 x 14.0	76	0.50	17.74	9.4	91.6	17.5	2.27	1.47	2.86	2.36
4 x 14.6	102	0.38	18.45	9.8	183.1	25.1	3.15	2	3.96	2.9
4 x 16.8	102	0.44	21.35	11.3	208.1	28.7	3.12	1.98	3.94	2.95
4" x 19.1	102	0.50	24.19	12.8	233.1	32.4	3.1	1.98	3.91	3
4" x 21.3	102	0.56	26.97	14.3	253.9	35.6	3.07	1.98	3.86	3.07
6" x 22.2	152	0.38	28.13	14.9	641.0	58.1	4.77	3.02	6.05	4.17
4" x 23.4	102	0.63	29.74	15.7	278.9	39.4	3.06	1.96	3.86	3.12
5" x 24.1	127	0.50	30.65	16.2	470.3	51.9	3.92	2.49	4.95	3.63
6" x 25.6	152	0.44	32.65	17.2	736.7	67.1	4.75	3.02	6.02	4.22
5" x 26.9	127	0.56	34.26	18.1	516.1	57.4	3.88	2.49	4.89	3.71
6" x 29.2	152	0.50	37.1	19.6	828.3	75.8	4.73	3	5.97	4.27
5" x 29.8	127	0.63	37.81	20	566.1	63.3	3.87	2.46	4.89	3.76
5" x 32.4	127	0.69	41.29	21.8	611.9	68.8	3.85	2.46	4.86	3.81
6" x 32.6	152	0.56	41.48	21.9	919.9	84.7	4.71	3	5.95	4.34
5" x 35.1	127	0.75	44.77	23.6	653.5	73.9	3.82	2.46	4.82	3.86
6" x 36.0	152	0.63	45.87	24.2	1007.3	93.2	4.69	2.97	5.94	4.39
8" x 39.3	203	0.50	50	26.4	2022.9	137.2	6.36	4.01	8.05	5.56
6" x 39.4	152	0.69	50.19	26.5	1090.5	101.4	4.86	2.97	5.9	4.45
6" x 42.7	152	0.75	54.45	28.7	1173.8	109.9	4.64	2.97	5.84	4.52
8" x 44.1	203	0.56	56	29.6	2251.8	153.3	6.34	4.01	8.02	5.61
6" x 46.1	152	0.81	58.65	31	1252.9	117.9	4.62	2.97	5.81	4.57
8" x 48.7	203	0.63	62	32.7	2472.4	168.9	6.31	4.01	7.97	5.66
6" x 49.3	152	0.88	62.77	33.1	1327.8	125.5	4.6	2.97	5.8	4.62
8" x 53.3	203	0.69	67.94	35.8	2688.8	184.4	6.29	4.01	7.95	5.72
8" x 57.9	203	0.75	73.81	38.9	2901.1	199.9	6.27	3.99	7.92	5.79
8" x 62.5	203	0.81	79.61	42	3109.2	215	6.25	3.99	7.89	5.84
8" x 67.0	203	0.88	85.35	45	3313.2	229.9	6.23	3.96	7.86	5.89
8" x 71.6	203	0.94	91.1	48.1	3508.8	244.3	6.21	3.96	7.84	5.94
8" x 75.9	203	1.00	96.77	51	3704.4	259.4	6.19	3.96	7.81	6.02