

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – ECV

RAFAEL RODRIGUES DE SOUZA

**Metodologia Para Otimização topológica,
Dimensional e Geométrica de Estruturas de Torres
de Linhas de Transmissão**

Florianópolis, 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – ECV

RAFAEL RODRIGUES DE SOUZA

**Metodologia Para Otimização topológica,
Dimensional e Geométrica de Estruturas de Torres
de Linhas de Transmissão**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso
de Engenharia Civil da Universidade Federal
de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Fleck Fadel
Miguel

Florianópolis, 2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Rafael Rodrigues de
Metodologia Para Otimização topológica, Dimensional e
Geométrica de Estruturas de Torres de Linhas de
Transmissão / Rafael Rodrigues de Souza ; orientador,
Leandro Fleck Fadel Miguel - Florianópolis, SC, 2014.
61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Otimização estrutural. 3.
Otimização topológica de torres de transmissão. 4.
Algoritmos Heurísticos. I. , Leandro Fleck Fadel Miguel.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

RAFAEL RODRIGUES DE SOUZA

Metodologia Para Otimização Topológica, Dimensional e Geométrica de Estruturas de Torres de Linhas de Transmissão

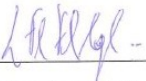
Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 9 de Julho de 2014.

Prof. Luiz Alberto Gómez, Dr.

Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wellison José de Santana Gomes, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Este trabalho apresenta um método de otimização topológica para torres de linha de transmissão de energia elétrica. Nesta proposta, a torre é dividida em módulos principais (*templates*), os quais podem assumir diferentes topologias pré-estabelecidas. Estas configurações são definidas não apenas em função da prática corrente de projeto como também da viabilidade da realização de ensaios de protótipos, possibilitando que a solução ótima tenha um caráter direto de aplicação industrial. Paralelamente, durante o procedimento de otimização as áreas e a geometria da torre são otimizadas simultaneamente à escolha da topologia. Para o exemplo numérico é utilizada a torre de transmissão estudada em Cigré Brochure 387 (2009). A estrutura é submetida a oito diferentes casos de carregamento e avaliada segundo restrições da norma NBR 8850/2003. Pela natureza não convexa do problema e considerando a presença de variáveis contínuas e discretas, a otimização foi conduzida através dos algoritmos heurísticos *Firefly Algorithm* (FA) e *Backtracking Search Optimization Algorithm* (BSA), permitindo uma comparação entre eles. Os resultados para otimização dimensional, geométrica e topológica são apresentados e discutidos, além de uma análise entre o desempenho dos dois algoritmos heurísticos avaliados. Por fim, esse procedimento calcula o número de parafusos necessários em cada barra, também de acordo com a norma NBR 8850/2003.

Palavras-chave: Otimização estrutural; Torres de linha de transmissão; Algoritmos heurísticos.

ABSTRACT

This paper presents a method for topology optimization of a transmission line tower. In this proposal, the tower is divided in modules (templates), which can assume different pre-established topologies. These configurations are defined not only in terms of the design practice, but also of the feasibility of prototype tests, allowing to obtain optimal solutions which can be directly used in industrial application. During the optimization process the size and shape of the structure are optimized simultaneously to the topology choice. The transmission line tower studied in Cigré Brochure 387 (2009) is adopted as a numerical example. The structure is submitted to eight different static load cases and evaluated with constraints from the ASCE 10/97 (NBR 8850/2003). Due to the non-convex nature of the problem and considering the presence of discrete variables in the procedure, the optimization was conducted through the heuristic algorithms Firefly Algorithm (FA) and Backtracking Search Algorithm (BSA). The results for the optimization of size, size and shape and size, shape and topology are shown and discussed, well as an analysis of the performance of the algorithms Firefly and BSA. Lastly this procedure calculates the bolts that are necessary in each member, also following the recommendation of the ASCE 10/97 (NBR 8850/2003).

Key-words: Structural optimization; Transmission line towers; heuristics algorithms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de variação topológica.....	22
Figura 2 - Comprimento de flambagem de uma estrutura com as faces transversal e longitudinal coincidentes (E) e distintas (D).	23
Figura 3 - Pseudocódigo do algoritmo Firefly	26
Figura 4 – Pseudocódigo geral BSA.....	28
Figura 5 – Pseudocódigo do processo de recombinação do BSA.	30
Figura 6 - Recombinação genética.....	31
Figura 7 - Vistas e corte da torre	32
Figura 8 - Foto torre construída	33
Figura 9 - Seção transversal típica	33
Figura 10 - Casos de carregamento 1,1D,2e2D	35
Figura 11 - Casos de carregamento 3,3D,4 e 4D	35
Figura 12 - Modelo com barras fictícias.....	37
Figura 13 – Modelo sem barras fictícias e com escala de cor.	37
Figura 14 – Agrupamento dos montantes	39
Figura 15 - Curva de convergência para a otimização dimensional dos algoritmos Firefly e BSA	43
Figura 16- Nós tomados como variáveis na otimização de geometria.....	44
Figura 17 – Variação geométrica.....	45
Figura 18 - Curva de convergência para a otimização dimensional e geométrica dos algoritmos Firefly e BSA.....	46
Figura 19 - Estruturas resultantes da combinação topológica	48
Figura 20 - Curva de convergência para a otimização dimensional, geométrica e topológica. dos algoritmos Firefly e BSA.....	49
Figura 21 - Vista 3D do resultado ótimo encontrado para a otimização de áreas, geometria e topologia	51

Figura 22 - Vista transversal da estrutura original (a) e melhor resultado para otimização de áreas (b), áreas e geometria (c) e áreas, geometria e topologia (d).....	52
Figura 23 - Vista transversal e longitudinal do melhor resultado encontrado para otimização dimensional, geométrica e topológica.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos perfis disponíveis.....	40
Tabela 2 – Valores para o melhor resultado de otimização de áreas	42
Tabela 3 - Valores para o melhor resultado de otimização dimensional e geométrica.....	47
Tabela 4 - Valores para o melhor resultado de otimização dimensional, geométrica e topológica.	49
Tabela 5 - Melhores resultados para os três casos de otimização estudados.....	51
Tabela 6 - Dimensionamento de parafusos para os melhores resultados em cada caso estudado para o algoritmo BSA.....	54

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	GENERALIDADES.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	Objetivos Gerais.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	METODOLOGIA.....	16
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	21
4.	ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO.....	25
4.1	ALGORITMO FIREFLY (FA)	26
4.2	ALGORITMO BSA.....	27
4.2.1	Inicialização.....	28
4.2.1	Seleção-I.....	28
4.2.2	Mutação.....	29
4.2.3	Recombinação.....	29
4.2.4	Seleção-II.....	31
5.	ESTUDO DE CASO.....	31
5.1	PROPRIEDADES.....	31
5.2	CASOS DE CARREGAMENTO.....	34
5.3	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	36
5.4	PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.....	38
5.5	OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL.....	38
5.6	OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA.....	43
5.7	OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E TOPOLÓGICA.....	48
6.	DIMENSIONAMENTO DOS PARAFUSOS.....	53
7.	DISCUSSÕES.....	54
8.	CONCLUSÃO.....	56
9.	TRABALHOS FUTUROS.....	58
10.	REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

O desenvolvimento de um projeto é um processo iterativo. A experiência do projetista, sua intuição e engenhosidade são necessárias para a elaboração de projetos na maioria das áreas de engenharia (aeroespacial, automotiva, civil, química, elétrica, mecânica, hidráulica e de transporte). Processos iterativos implicam na análise de diversas tentativas de projeto, uma após a outra, até que seja encontrada uma solução adequada para o problema. (ARORA, 2004).

Neste processo iterativo, as estruturas são avaliadas segundo as restrições adequadas. Entretanto mesmo uma estrutura que atenda as exigências pode necessitar de alterações para que tenha seu desempenho melhorado, ou até mesmo, podem ser encontradas mais de uma opção que atenda as exigências, logo essas soluções preliminares devem ser analisadas segundo outros critérios ótimos estabelecidos, para que a solução mais adequada seja finalmente encontrada. Estes critérios são em geral, o mínimo custo, a mínima quantidade de material, a máxima rigidez e a máxima carga resistida.

O fato de a busca por uma solução adequada depender muito do fator humano e do tempo de desenvolvimento (escasso na indústria em geral), fazem com que os projetos comumente sejam finalizados e entregues sem atingir o máximo de seu potencial. Desperdiçando material e dinheiro.

Evitar o desperdício, além de reduzir a influência da experiência e habilidade do projetista na estrutura final, são justificativas suficientes para o desenvolvimento de estudos e trabalhos em otimização estrutural.

Analisando Miguel *et al.* (2012); Torii *et al.* (2012) e outros, pode-se apontar como os principais alvos da otimização estrutural a definição de:

- (i) Áreas das seções transversais dos membros da estrutura (chamada otimização dimensional);
- (ii) Forma da estrutura ou geometria da estrutura, resumindo-se no caso de treliças às coordenadas dos nós (otimização de geometria);

- (iii) Topologia, que é a silhueta da estrutura ou o arranjo das barras que conectam os nós, (otimização de topologia ou topológica).

O desenvolvimento de um processo de otimização se inicia com a definição de pelo menos uma função objetivo, esta é uma medida do desempenho do sistema estrutural a ser melhorado. Esta função objetivo pode ser definida como, por exemplo, o custo final de construção, o volume ou o peso final do material escolhido. A função objetivo depende do que se deseja incluir no processo de otimização e certas características do sistema.

Segundo Arora (2004) a função objetivo deve ser influenciada direta ou indiretamente por uma ou mais características do problema, que são as variáveis de projeto. Caso não seja influenciada por estas, a função objetivo não tem significado. O autor faz notar também, que o resultado ótimo encontrado é o que leva ao *melhor* valor da função objetivo.

Portanto, segundo Arora (2004) pode-se definir o problema de otimização através de quatro elementos básicos:

- (i) Função objetivo: uma função associada aos parâmetros do sistema, que avalia seu desempenho. Durante a otimização essa função objetivo deve ser minimizada ou maximizada;
- (ii) Variáveis de projeto: os parâmetros estruturais que serão modificados e otimizados. Essas variáveis são definidas pelo projetista, com base nas características e comportamento da estrutura;
- (iii) Espaço de projeto: o conjunto de todas as possibilidades de solução geradas pelas combinações das variáveis de projeto;
- (iv) Restrições: são as exigências estabelecidas previamente, as quais as soluções geradas deverão respeitar a fim de serem consideradas viáveis.

Estruturas treliçadas são o alvo mais comum de estudos de otimização estrutural. Na construção civil treliças são encontradas em grandes coberturas, pontes e torres de transmissão de energia. Dentre essas três, muitos motivos fazem das torres as mais atrativas para estudos de otimização.

Em todo o mundo a principal fonte de energia utilizada industrialmente e domesticamente é a energia elétrica. Na maior

parte dos casos, esta energia é produzida em locais distantes dos grandes centros de consumo, demandando longas redes de transmissão. Tem-se como exemplo o Brasil, onde a principal matriz geradora é a hidráulica e a maior parte das usinas se encontra longe dos centros consumidores, principalmente na bacia do Rio Paraná e na bacia Amazônica, enquanto o principal polo consumidor é o centro-oeste. A extensão das linhas de transmissão no Brasil, segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) era de 63.981 km em 1998, esse número passou para 72.662 km em 2002 e alcançou 98.500 km em 2011.

Estas linhas de transmissão de energia são compostas basicamente de cabos condutores sustentados por torres, estas em sua grande maioria são estruturas metálicas treliçadas autoportantes. Logo, o papel de destaque das torres em todo o cenário de transmissão de energia, faz desta um importante objeto de estudo. Além disso, ao contrário de coberturas, pontes ou outras obras civis, que em geral são únicas, as torres são reproduzidas muitas vezes ao longo de uma linha de transmissão. Portanto neste caso, a construção civil se aproxima da indústria seriada, justificando um esforço maior na busca de uma estrutura ótima. Já que a economia gerada pela otimização de uma estrutura será multiplicada pelo seu grande número de repetições.

Segundo Kaveh et. al., (2008) as torres de linha de transmissão possuem diferentes classificações, por exemplo, com relação à sua função na linha, que define o tipo de isolador utilizado:

- Uma estrutura de suspensão, que suporta os condutores através de isoladores suspensos. Neste tipo de torre não existem cargas longitudinais, desde que os cabos estejam em uma condição intacta.
- Um estrutura de amarração ou ancoragem, onde os condutores são ligados à estrutura através de isoladores fixos. Este tipo de estrutura é geralmente dimensionada para cargas longitudinais iguais em ambos os lados.

No enfoque de otimização, apesar das estruturas treliçadas possuírem uma análise relativamente simples (ŠILIH, 2010), alguns aspectos tornam o problema complexo como, por

exemplo, a presença de variáveis contínuas e discretas simultaneamente como também o caráter não linear e não convexo do problema de otimização de geometria (TORII *et al.*, 2012). Estes aspectos fazem com que os métodos convencionais de otimização, como os baseados em gradiente, por exemplo, tenham dificuldades em encontrar resultados ótimos.

Nesse contexto, os chamados algoritmos heurísticos são adequados para lidar com esse tipo de problema. Pode-se citar entre os algoritmos heurísticos mais conhecidos os *Genetic Algorithms* (GA) (LOPEZ *et al.*, 2009). Ao longo dos anos mais algoritmos foram desenvolvidos e aplicados em problemas de otimização, como a *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO) e *Harmonic search optimization* (HS), (MIGUEL *et al.* 2012).

Miguel *et al.*, 2012, mostra algumas vantagens conhecidas desses algoritmos:

- (i) Eles não precisam do gradiente da função, logo podem ser aplicados em problemas onde o gradiente é difícil de obter ou simplesmente não exista;
- (ii) Se corretamente configurados, não ficam presos em mínimos locais;
- (iii) Podem ser aplicados em funções não suaves ou descontínuas;
- (iv) Podem fornecer grupos de soluções quase ótimas, ao invés de apenas uma. Fornecendo ao projetista uma gama de possibilidades.
- (v) Podem ser facilmente adaptados para resolverem problemas que envolvam variáveis discretas e contínuas.

Neste trabalho foram utilizados dois algoritmos heurísticos que recentemente têm ganhado destaque na literatura por seus resultados promissores: o algoritmo *Firefly* (FA) desenvolvido por Yang em 2009, que se baseia no comportamento dos vaga-lumes e mostra resultados mais promissores para otimização dimensional, geométrica e topológica de treliças, comparados com *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Ant Colony Optimization* (ACO) (MIGUEL *et al.*, 2012). O outro algoritmo estudado é o chamado *Backtracking Search Algorithm*

(BSA), um algoritmo evolucionário baseado no processo de mutação, recombinação e seleção, desenvolvido recentemente por Civicioglu (2013).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Propor um método de otimização topológica global através de templates e que leve a um resultado final o mais próximo possível de uma aplicação prática industrial;

1.2.2 Objetivos específicos

- (i) Estudar o comportamento dos algoritmos e do processo de busca em um problema complexo, como uma torre de transmissão.
- (ii) Comparar as diferenças entre os algoritmos Firefly (FA) e *Backtracking search optimization* (BSA).
- (iii) Calcular ao final do processo o número de parafusos necessários em cada barra de acordo com a NBR 8850/2003 – Execução de Suportes Metálicos Trelaçados para Linhas de Transmissão – Procedimento.
- (iv) Otimizar as dimensões, geometria e topologia de uma torre de transmissão de energia elétrica;
- (v) Levar em consideração as restrições de esforço e esbeltez estabelecidas na NBR 8850/2003 – Execução de Suportes Metálicos Trelaçados para Linhas de Transmissão – Procedimento.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi a seguinte: Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica, com as análises realizadas a partir desta, os objetivos do trabalho foram traçados, deu-se então o desenvolvimento do procedimento para otimização da torre de transmissão de energia. A priori a torre foi desenhada no programa *Google sketchUp*, em seguida a mesma foi descrita matematicamente no programa *Matlab*, o mesmo foi

usado para a análise estrutural e todos os cálculos subsequentes necessários. As restrições seguindo a NBR 8850/2003 foram implementadas. Os algoritmos FA e BSA, foram usados no sentido de variar as seções transversais dos elementos, a geometria e topologia da estrutura. Sendo que a otimização de dimensões, otimização de dimensões e geometria e otimização de dimensões, geometria e topologia foram realizadas separadamente. Com a estrutura ótima encontrada o número de parafusos foi determinado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A otimização de estruturas treliçadas vem sendo considerada um tema importante de pesquisa nas últimas décadas. Cabe destacar, entretanto, que na maior parte desses estudos foi dada ênfase para a aplicação e o desenvolvimento de diferentes procedimentos de otimização em exemplos acadêmicos de estruturas treliçadas, normalmente submetidos a restrições simples, como tensão de escoamento ou carga de flambagem. No contexto de estruturas complexas submetidas a restrições mais severas impostas pelas normas, como torres de linha de transmissão, o número de trabalhos existente na literatura torna-se bastante reduzido. Isto pode ser verificado pela escassez de trabalhos abordando tal enfoque.

O primeiro aspecto estrutural a ser estudado em uma treliça é a otimização dimensional, é possível encontrar exemplo desse procedimento em Adeli e Kamal (1991), Goldberg e Samtani (1986), Sonmez (2011) e Rajeev e Krishnamoorthy (1992). Sabe-se, porém, que resultados melhores podem ser encontrados quando a topologia ou geometria da estrutura também são incorporados no processo de otimização (DOMINGUEZ et. al., 2006). Exemplos de otimização simultânea de áreas e geometria são encontrados em Wu e Chow (1995), Salajegheh e Vanderplaats (1993), Galante (1996), Soh e Yang (1996), Kelesoglu (2007) e outros.

Os métodos de otimização topológica usualmente empregados em treliças se baseiam em uma estrutura de partida, que contém todas as conectividades possíveis entre os nós (*ground structure*). Durante a otimização, permite-se que sejam descartadas algumas barras, dessa forma a topologia da

estrutura é variada. Estudos de otimização de áreas, geometria e topologia são encontrados em Tang et. al. (2005), Miguel et. al (2012), Grierson e Pak (1993), Rajan (1995), Hajela e Lee (1995), Shrestha e Ghaboussi (1998), Deb e Gulati (2001) e outros.

Em um contexto de otimização estrutural de torres treliçadas com enfoque acadêmico alguns trabalhos foram realizados. Rao (1995) apresenta um método para otimizar o peso e a geometria de uma torre de transmissão submetida a múltiplos casos de carregamentos estáticos. Natarajan and Santhakumar (1995) estuda a otimização baseada em confiabilidade de áreas e geometria de uma torre treliçada submetida a múltiplos casos de carregamento e avaliada segundo restrições de esforço.

Taniwaki e Ohkubo, (2004) apresenta a otimização de áreas, geometria e material de uma torre com 88,2 metros de altura onde os elementos são barras metálicas circulares. A estrutura é calculada como uma treliça plana, avaliada segundo restrições de esforço, deslocamento e esbeltez, sendo as resistências calculadas de acordo com o código Japonês. Neste estudo, a função objetivo a ser minimizada não é o peso da estrutura, mas sim o custo total, que envolve o custo do material e o custo do terreno ocupado pela base da torre.

Sivakumar et al, (2004) estudou a otimização discreta de áreas de uma torre treliçada submetida a restrições práticas, calculadas de acordo com a norma Indiana. Mathkari e Gardoni (2007) apresenta um método baseado em confiabilidade para a otimização de áreas, geometria e topologia de uma estrutura treliçada com um formato genérico de torre. A otimização de áreas é feita com valores discretos e a otimização topológica é feita por camadas, onde o número de camadas (andares) que a torre possui e a distância de cada camada em relação à base são considerados variáveis de projeto. Durante a otimização a estrutura é submetida a uma carga de vento variável e avaliada segundo restrições de deformação para o estado limite de serviço e restrição de esforço, calculada de acordo com a AISC LRFD manual (2001), para o estado limite último.

Outro exemplo de otimização de áreas e geometria de uma torre pode ser encontrado em Kaveh (2008). Neste estudo a estrutura é submetida a dois casos de carregamento,

considerando valores contínuos de áreas de seção transversal. São aplicadas restrições de esforço e esbeltez calculados segundo a norma da ASCE 10/97 e deslocamentos máximos em nós específicos.

Noilublao e Bureerat (2011) estudaram a otimização de áreas, geometria e topologia de uma torre treliçada genérica, considerando valores discretos de seção transversal. A estrutura é submetida a cargas estáticas e dinâmicas, sendo avaliada segundo restrições de esforço e esbeltez. Neste estudo a otimização topológica possui uma abordagem por camadas, semelhante à Mathkari e Gardoni (2007), entretanto, após a variação do número de camadas da estrutura é possível que as barras assumam valores nulos de área, sendo assim eliminadas.

Apesar dos avanços feitos por estes trabalhos, quando se busca uma aplicação industrial para a solução final encontrada no processo de otimização, algumas importantes considerações adicionais devem ser feitas, principalmente em relação à viabilidade construtiva da estrutura otimizada, bem como seu desempenho em ensaio de protótipo.

Em um contexto de otimização de torres de transmissão com enfoque em aplicação industrial, pode-se citar alguns trabalhos. Shea e Smith (2006) apresentam a otimização de áreas, geometria e topologia de uma torre real de grande escala, considerando valores discretos de áreas de seção transversal. A estrutura é submetida a múltiplos casos de carregamentos e restrições de esforço, flambagem, esbeltez, ângulo entre duas barras conectadas e ângulo da perna da torre. A otimização topológica é feita através de um conjunto de regras que descrevem as modificações permitidas na configuração da estrutura. No esquema, nós e elementos podem ser criados ou retirados, assim como movidos dentro de certos intervalos. Segundo os autores, com esta metodologia, a configuração resultante da otimização topológica não melhora a alternativa de projeto, quando comparada com a otimização apenas de áreas e geometria, além de não produzir um modelo estrutural realístico para a implementação prática de projeto. Por fim, a metodologia restringe a estrutura otimizada a apresentar simetria nas quatro faces, o que nem sempre é utilizado em torres de transmissão.

París et al. (2010) apresenta um estudo para a otimização de área e geometria de uma torre de linha de transmissão real,

submetida a múltiplos casos de carregamento e restrições de esforço e esbeltez segundo a norma espanhola. Como o procedimento não é capaz de lidar com um problema de variáveis mistas, a metodologia não é hábil para selecionar as seções transversais ótimas oriundas das tabelas de fabricantes.

Guo e Li (2011) realizaram a otimização de áreas, geometria e topologia de uma torre real de grande escala, considerando valores discretos de seção transversal. A estrutura é submetida a um carregamento de vento e avaliada segundo restrições de esforço, flambagem, esbeltez, ângulo entre duas barras conectadas, ângulo da perna da torre e comprimento das hastes. Neste estudo, a otimização topológica é efetuada no tronco inclinado da torre, através de dois métodos distintos. No primeiro, um conjunto de quatro regras é imposto de acordo com a distância entre dois nós adjacentes, a fim de determinar a configuração final da estrutura. No segundo, o tronco inclinado da estrutura é dividido em camadas, sendo oferecidas duas possibilidades de geometria para cada uma delas. Para os dois métodos, a solução final otimizada apresenta obrigatoriamente simetria nas quatro faces.

París et. al. (2012) realizaram a otimização de áreas e geometria de uma torre real considerando as áreas discretas e submetida a múltiplos casos de carregamento. A estrutura é avaliada segundo restrições calculadas de acordo com as normas espanhola e europeia. Os autores realizam a otimização através da divisão da estrutura em blocos. Durante a otimização, estes blocos tem sua geometria alterada de forma independente, como consequência, os montantes apresentam uma grande alternância de inclinação entre os blocos, inviabilizando o processo construtivo. Como em trabalhos anteriores, a estrutura otimizada adota uma solução com simetria nas quatro faces.

Analisando os trabalhos apresentados, observa-se que a otimização de áreas e geometria é bem estabelecida. Existindo uma espécie de consenso entre as metodologias aplicadas. Para a otimização de áreas, são consideradas variáveis discretas, usando valores reais de seção transversal, variando apenas de um caso para o outro a forma como os membros são agrupados e os perfis disponíveis. Para a otimização de geometria a diferença entre os métodos é um pouco maior, mas todos são essencialmente os mesmos. São aplicadas variações

geométricas, discretas ou contínuas, em nós específicos da torre. Entretanto, apesar da otimização topológica apresentar uma grande variação entre os métodos utilizados, todos adotam estratégias locais como mecanismo de alteração da configuração estrutural. O impacto no resultado final desses diferentes métodos é significativo.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

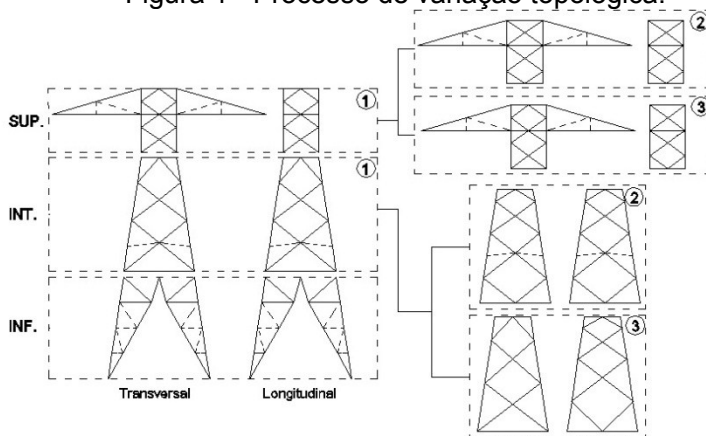
Como descrito anteriormente existem poucos trabalhos na literatura atual que abordam a otimização de torres de linha de transmissão buscando uma aplicação industrial. Adicionalmente, os métodos de otimização topológica adotados nesses estudos possuem algumas limitações, ligadas principalmente à sua característica local. Com isso a solução ótima pode não gerar uma melhora em relação à otimização de áreas e geometria (Shea e Smith, 2006), produzir uma estrutura inviável de ser construída (Shea e Smith, 2006; Paris et al., 2012) ou otimizar apenas uma parte da estrutura (Guo e Li, 2011). Além disso, em todos os trabalhos, restringiu-se a estrutura otimizada a apresentar simetria nas quatro faces. Esta solução nem sempre é adotada em torres de transmissão. Estruturas com simetria bilateral (onde as diagonais das faces transversais e longitudinais são distintas) é uma solução usual em torres convencionais, com altura média em torno de 50 metros, que representam a maior parte das torres construídas em uma linha de transmissão.

Buscando uma metodologia geral com enfoque em aplicação prática industrial, propõe-se neste trabalho um procedimento de otimização topológica com um caráter global, em que a estrutura é dividida em módulos correspondentes às suas partes principais como, por exemplo, tronco reto e tronco inclinado. Para isso, adota-se como ponto de partida para a determinação da solução otimizada, o fornecimento de um conjunto de opções de modelos de treliçamentos (*templates*) independentes para os diferentes módulos, frequentemente utilizados na prática industrial.

Este procedimento torna possível não apenas avaliar a melhor configuração da estrutura considerando algumas limitações anteriores, como a possibilidade de simetria bilateral, como também não abandona aspectos práticos importantes,

como o desempenho da estrutura em ensaio de protótipo (fundamental para torres de transmissão). Conforme mostrado por Cigré 387 (2009) a topologia da estrutura desempenha um papel fundamental no comportamento das estruturas observado em ensaios em verdadeira grandeza. Conforme comprovado experimentalmente, mesmo pequenas modificações podem afetar diretamente seu comportamento estrutural e a compatibilização com o modelo adotado para o projeto. Assim, o método de otimização topológica proposto neste trabalho permite que o resultado final encontrado tenha sua viabilidade construtiva e desempenho em ensaio de protótipo em conformidade com as exigências da indústria. A Figura 1 ilustra o processo de variação topológica.

Figura 1 - Processo de variação topológica.

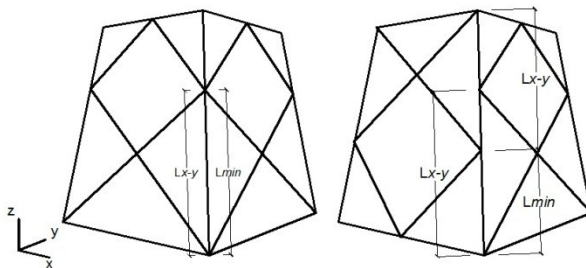


Adicionalmente, o caráter global deste método permite que outras particularidades sejam resolvidas mais facilmente, como a disposição e necessidade de barras de contraventamento e, dependendo do modelo estrutural adotado, as barras fictícias. Por fim, também permite-se a consideração de simetria bilateral na otimização topológica, que normalmente conduz a estruturas mais leves em torres de médio e pequeno porte, que representam a maior parte das torres construídas em uma linha de transmissão.

Este último aspecto (consideração de simetria bilateral), conduz a um cuidado adicional em relação à definição dos

comprimentos de flambagem das barras dos montantes da estrutura, o que torna a utilização de técnicas locais de otimização topológica, utilizadas em estudos anteriores, bem difíceis de serem aplicadas sob este enfoque. A Figura 2 ilustra um exemplo de duas estruturas, uma com as faces transversal e longitudinal coincidentes e outra com estas distintas. Considerando um perfil tipo cantoneira, no segundo caso existirá um comprimento de flambagem em cada plano e dois valores diferentes de raio de giração (um para os eixos $(x-y)$ e outro para o eixo de menor inércia (z)), demandando que o índice de esbeltez seja calculado em cada um dos eixos, a fim de encontrar o maior valor.

Figura 2 - Comprimento de flambagem de uma estrutura com as faces transversal e longitudinal coincidentes (E) e distintas (D).



Para um melhor entendimento do processo de otimização como um todo são estudados três casos separados, otimização de áreas, otimização de áreas e geometria e otimização de áreas, geometria e topologia.

Para a otimização de áreas, o algoritmo varia as seções transversais das barras, a partir de um grupo de perfis disponíveis ($\mathbf{A} \in \mathbb{R}^m$), sendo m as barras tomadas como variáveis de projeto e \mathbf{A} as áreas das seções transversais disponíveis. Uma vez que os valores de área da seção transversal são limitados pelos perfis disponibilizados pela indústria, este assume valores discretos. Na otimização de geometria são variadas as coordenadas dos nós q' considerados como variáveis de projeto ($\xi \in \mathbb{R}^{q'}$), onde ξ é a variação geométrica no nó q' , essas variações, a fim de atingir uma

solução final compatível com a prática de projeto, também assumem valores discretos, sendo então arredondados em centímetros.

Por fim a otimização de topologia é descrita pela variável, ($\tau \in R^s$), onde τ são os templates disponíveis e s o local onde a variação topológica será aplicada.

As variáveis de projeto se resumem então a \mathbf{A} , ξ e τ , que são agrupados no mesmo vetor $\mathbf{x} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_m, \xi_1, \dots, \xi_q, \tau_1, \dots, \tau_s]$, sendo o objetivo do processo de otimização reduzir o peso estrutural respeitando as restrições impostas. O problema pode ser formulado como:

Buscar \mathbf{X}

Que minimize $W(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^m \rho_j \ell_j(\xi) A_j$

Sujeito à

G1 \square tração : $|\sigma_j(\mathbf{X})| - \sigma_j^t \leq 0$ ou
 compressão : $|\sigma_j(\mathbf{X})| - \sigma_j^c \leq 0, j=1, \dots, m$

G2 \square $A_j^{min} \leq A_j \leq A_j^{max}, j=1, \dots, m$

G3 \square $\xi_j^{min} \leq \xi_j \leq \xi_j^{max}, j=1, \dots, q'$

(1)

G4 \square $\tau_j \in \tau_p, j=1, \dots, s$

G5 \square tração : $\lambda_j(\mathbf{X}) - \lambda_j^t \leq 0$ ou

compressão : $\lambda_j(\mathbf{X}) - \lambda_j^c(j) \leq 0, j=1, \dots, m$

G6 \square $w/t_j - w/t_{max} \leq 0, j=1, \dots, m$

Onde, W é o peso estrutural que varia em função de X , m é o número de barras, ρ é a densidade do material de cada barra, ℓ é o comprimento de cada barra que varia em função das coordenadas.

G1 até G6 são os grupos de restrições impostas. Onde $|\sigma_j(\mathbf{X})|$ é o módulo do esforço na barra j e deve ser inferior à σ_j^t e σ_j^c que são os estados limites últimos para tração e compressão respectivamente, calculados de acordo com a NBR 8850. ξ_j^{min} e ξ_j^{max} são as variações máximas e mínimas permitidas nos nós tomados como variáveis de projeto, τ_p é o conjunto de possibilidades topológicas disponíveis para variação, A_j^{min} e

A_j^{max} são respectivamente o menor e o maior valor de área da seção transversais disponível.

$\lambda_j(\mathbf{X})$ é a esbelteza efetiva na barra j e deve ser menor do que λ_j^t e λ_j^c , esbelteza efetiva máxima para barras tracionadas e comprimidas respectivamente, nas barras comprimidas o limite de esbelteza pode ser dividido entre montantes comprimidos e outras barras comprimidas. Seguindo as recomendações da NBR 8850 os valores λ_j^t e λ_j^c foram definidos como: 150 para montantes comprimidos, 200 para outras barras comprimidas e 250 para barras tracionadas.

Em G6 t representa a espessura da cantoneira e w a largura plana da aba, definida como a largura da aba subtraída da espessura da cantoneira e do raio de laminação. A razão w/t de cada barra j , deve ser inferior a w/t_{max} , que conforme a NBR 8850 possui o valor de 25.

As restrições G2, G3 e G4 limitam os perfis disponíveis, as variações permitidas e os templates fornecidos, o que possibilita controlar as configurações estruturais que podem ser geradas pelo algoritmo. Estas configurações são avaliadas segundo as restrições G1, G4 e G6, aquelas que não obedecerem estas restrições são eliminadas, isso é feito através da adição na função objetivo de uma penalização P_t . Esta penalização não só desclassificará essas configurações como fará com que as próximas buscas realizadas pelos algoritmos se afastem destes resultados não satisfatórios, observando isso, é importante que esta penalização seja proporcional ao tamanho da violação da restrição, afastando proporcionalmente a esta, a busca seguinte. Respeitando a equação 2:

$$P_t = h \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{|\sigma_j(\mathbf{X})| - \sigma_j^i}{\sigma_j^i} \right)^+ + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\lambda_j(\mathbf{X}) - \lambda_j^i}{\lambda_j^i} \right)^+ + \sum_{j=1}^m \left(\frac{w/t_j - w/t_{max}}{w/t_{max}} \right)^+ \right] \quad (2)$$

Onde, o índice i é substituído por t em caso de tração e c em caso de compressão, h é um parâmetro positivo, definido como $h = 1,0 \text{ e}+08$.

4. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

4.1 ALGORITMO FIREFLY (FA)

Desenvolvido recentemente por Yang (2009), o algoritmo metaheurístico Firefly é baseado no comportamento dos vaga-lumes. Para adaptar o comportamento natural dos vaga-lumes em uma metodologia numérica, Yang (2009) apresenta três regras: (1) Todos os vaga-lumes são unissex, assim a atratividade entre eles não dependerá do seu sexo; (2) a atratividade é proporcional ao seu brilho, ou seja, entre dois vaga-lumes o menos brilhante irá se mover na direção do mais brilhante. A atratividade e o brilho diminuem com o aumento da distância entre os vaga-lumes, caso não exista um mais brilhante que o outro, o vaga-lume irá se mover aleatoriamente. (3) o brilho de um vaga-lume é afetado ou determinado pelo formato da função objetivo. Baseados nessas regras o passos básicos do algoritmo podem ser escrito como o pseudocódigo da Figura 3.

Figura 3 - Pseudocódigo do algoritmo Firefly

Função objetivo $f(x)$, $x=(x_1, \dots, x_d)^T$
Gera população inicial de Fireflies $x_i (i=1, 2, \dots, n)$
Intensidade luminosa I_i em x_i é determinada por $f(x_i)$
Define o coeficiente de absorção luminosa α
Enquanto ($t < \text{MaxGeneration}$)
para $i=1:n$ todos os n fireflies
 para $j=1:i$ todos os n fireflies
 se ($I_j < I_i$), mover o firefly i até j em d -dimensão;
 fim se
 Atratividade varia com a distância r segundo $\exp[-\alpha r]$
 Calcular novas soluções e atualizar a intensidade luminosa
 fim para j
fim para i
Elencar os fireflies e encontrar o melhor valor atual
fim enquanto
Pós processamento dos resultados e visualização.

Fonte: YANG (2009)

Os dois aspectos mais importantes do algoritmo Firefly são a variação da intensidade luminosa e a formulação da atratividade. A intensidade luminosa emitida por um Firefly i é proporcional e regida pela função objetivo, $I(x) \propto f(x)$, já a intensidade luminosa de i percebida por j é inversamente

proporcional à distância entre os Fireflies i e j , multiplicado por γ . Portanto a intensidade luminosa do Firefly i percebida por j pode ser escrita como:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}, \quad (3)$$

Onde γ é o coeficiente de absorção da intensidade luminosa e r_{ij} é a distância relativa entre dois Fireflies. Uma vez que a atratividade de um Firefly é proporcional à sua intensidade luminosa vista por um Firefly adjacente, pode-se definir a atratividade β como:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}, \quad (4)$$

Onde, β_0 é a atratividade na posição $r=0$. Com isso é possível definir a movimentação de um Firefly como:

$$X_i = X_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (X_j - X_i) + \alpha (\text{rand} - \frac{1}{2}) \quad (5)$$

Onde rand é uma função que retorna um número pseudoaleatório. Portanto um Firefly menos brilhante i irá se mover na direção de um Firefly mais brilhante j , a partir da sua posição inicial (primeira parcela da equação 5), de acordo a atratividade de j percebida por i (segunda parcela da equação 5), além de uma terceira parcela aleatória, esta última tem a função de possibilitar ao algoritmo pesquisar mais amplamente o campo de buscas, dificultando que o mesmo fique preso em mínimos locais.

Devem ser definidos previamente quatro diferentes parâmetros para o Algoritmo Firefly, são eles: β_0 , γ , α e o intervalo de variação do número aleatório. Sendo estes definidos com base em trabalhos já publicados.

4.2 ALGORITMO BSA

O *Backtracking search algorithm* é um algoritmo evolucionário iterativo desenvolvido por Civicioglu (2013) para resolver problemas de otimização numérica com o objetivo de ser um minimizador global. Para isso funciona em cinco etapas

distintas: Inicialização, seleção-I, mutação, recombinação e seleção-II. A Figura 4 mostra o pseudocódigo geral do algoritmo BSA.

Figura 4 – Pseudocódigo geral BSA

1. Inicialização

Repetir

2. Seleção - I

Geração da população experimental

3. Mutação

4. Recombinação

fim

5. Seleção- II

Até Critérios de parada a serem atingidos

Fonte: CIVICIOGLU (2013)

Segundo Civicioglu (2013) as cinco etapas do BSA podem ser descritas como:

4.2.1 Inicialização

A população inicial do BSA é definida pela equação 6.

$$P_{i,j} \sim U(\text{low}_j, \text{up}_j) \quad (6)$$

Para $i=1,2,3,\dots,N$ e $j=1,2,3,\dots,D$, onde N representa o tamanho da população e D a dimensão do problema. U é a distribuição uniforme e cada $P_{i,j}$ é um elemento na população P .

4.2.1 Seleção-I

Na etapa de seleção-I a população histórica ($oldP$) é determinada e usada para calcular a direção de busca. $oldP$ é determinado a partir da equação 7.

$$oldP_{i,j} \sim U(\text{low}_j, \text{up}_j) \quad (7)$$

O algoritmo tem a opção de redefinir $oldP$ no começo de cada iteração, através de um comando “se-então” mostrado na equação 8.

$$\text{se } a < b \text{ então } oldP := P \mid a, b \sim U(0,1) \quad (8)$$

Onde $:=$ é um operador de atualização. A equação 8 garante que a população histórica $oldP$ tenha 50% de chance de assumir o valor de uma população pertencente a uma geração anterior selecionada aleatoriamente, e 50% de chance de não ser alterada, dessa forma $oldP$ é lembrado até que seja mudado. Isso garante que o BSA possua uma memória das gerações anteriores.

Depois da determinação de $oldP$ a equação 9 é usada para alterar aleatoriamente a ordem dos indivíduos em $oldP$.

$$oldP := \text{permuta}(oldP) \quad (9)$$

4.2.2 Mutação

O processo de mutação do algoritmo BSA gera a forma inicial da população experimental, *mutante*, usando a equação 10.

$$mutante = P + F \cdot (oldP - P) \quad (10)$$

Na equação 10m F é um parâmetro que controla a amplitude da matriz de direção de busca ($oldP - P$). Uma vez que a população histórica é envolvida neste cálculo, a população experimental é gerada se servindo da experiência de gerações anteriores.

4.2.3 Recombinação

A população experimental definida na etapa anterior e chamada de *mutante*, nesta etapa é recombinada e assume sua forma final T . Indivíduos da população experimental que geram o menor valor de mínimo global de acordo com o problema de otimização são usados para evoluir os elementos da população. O processo de recombinação do BSA calcula uma matriz de valores binários *map* com N linhas e D colunas, que indicará quais indivíduos de T serão manipulados usando os indivíduos relevantes de P . Se $map_{n,m} = 1$, onde $n \in \{1,2,3,\dots,N\}$ e $m \in \{1,2,3,\dots,D\}$, T é atualizado para $T_{n,m} := P_{n,m}$. A Figura 5 mostra o pseudocódigo do processo de recombinação do BSA

Para a definição de *map*, o algoritmo escolhe entre duas estratégias, aleatoriamente, na primeira, é usado o parâmetro *índice de mistura* que controla o número de elementos de um determinado indivíduo, em uma população experimental que irão sofrer mutação, usando $[\text{índice de mistura} \cdot \text{rdn} \cdot D]$. Na segunda, é permitido que apenas um indivíduo da população experimental, escolhido aleatoriamente, sofra mutação.

Como resultado do processo de recombinação alguns indivíduos da população experimental podem extrapolar o espaço de busca, por isso, ao final da etapa de recombinação os indivíduos que se encontram além do espaço de busca são regenerados.

Figura 5 – Pseudocódigo do processo de recombinação do BSA.

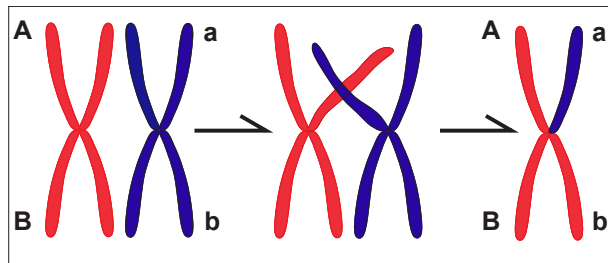
```

Entrada: Mutante, índice de mistura, N e D.
Saída: T: População experimental.
map(1:N,1:D) = 1           // map inicial é uma matriz unidade
N por D
  se a < b | a, b ~ U(0,1) então
    para i de 1 até N fazer
      mapi,u(indice de mistura.rnd.D)
        = 0 | u = permuta((1,2,3, ..., D))
      fim
    se não
      para i de 1 até N fazer mapi,randi(dim) = 0,
    fim
  T := Mutante           // T inicial
  para i de 1 até N fazer
    para j de 1 até D fazer
      se mapi,j = 1 então Tij := Pij
    fim
  fim
fim

```

Fonte: CIVICIOGLU (2013)

Figura 6 - Recombinação genética.



Fonte: ASSIS (2014)

Na Figura 6, acima, o cromossomo vermelho representa a população **P** no início de uma iteração e cada braço do cromossomo representa uma variável da população. Pode-se observar na Figura 6 que, ao fim do processo de recombinação o indivíduo A de **P** (braço superior direito do cromossomo vermelho) tem uma de suas variáveis atualizadas, (ASSIS, 2014).

4.2.4 Seleção-II

Nesta etapa os T_{iS} que geram o menor valor de mínimo global comparados com o seu correspondente P_{iS} , são usados para atualizar os valores de P_{iS} . Se o melhor indivíduo de uma população **P** (P_{best}), gera um valor de mínimo global menor que o valor gerado pelo melhor indivíduo encontrado até ao momento, este é atualizado para P_{best} e o valor gerado por ele é atualizado como mínimo global atual.

5. ESTUDO DE CASO

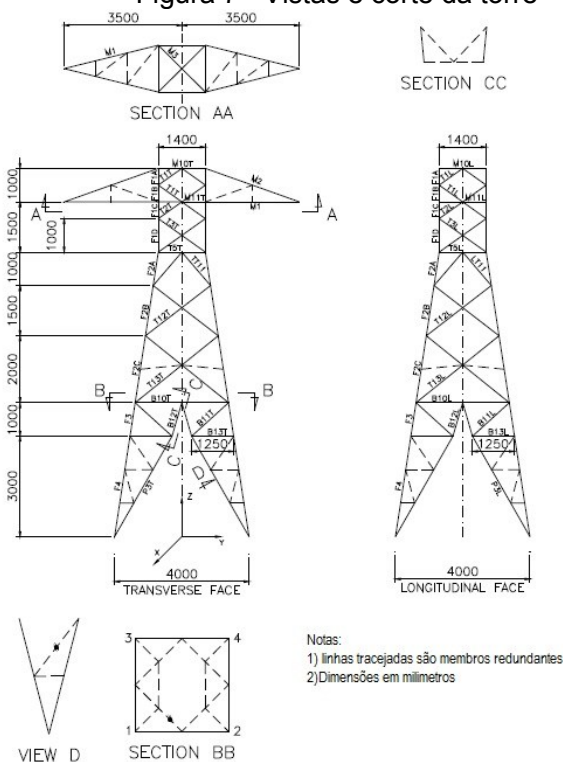
5.1 PROPRIEDADES

Como exemplo numérico de otimização de torre de linha de transmissão foi usada neste trabalho a *Structure1*, publicada em Cigré Brochure 387 (2009) e usada também em Souza et. al. (2014). Nesta publicação estão descritos as dimensões, os perfis usados em cada barra, as características mecânicas e geométricas dos perfis e do parafuso escolhido, a disposição das

barras redundantes, os casos de carregamento aplicados, bem como os esforços calculados em barras chaves para cada caso de carregamento. As Figuras 7 e 8 apresentam respectivamente as vistas e cortes da torre e uma foto da mesma construída.

Os perfis usados são do tipo cantoneira, com seção transversal típica apresentada na Figura 9, aço ASTM A572 GRADE 50, com tensão de escoamento de 3515 Kgf/cm². Os parafusos usados foram da série M12 com 12 mm de diâmetro com cisalhamento tomado pelo corpo.

Figura 7 - Vistas e corte da torre



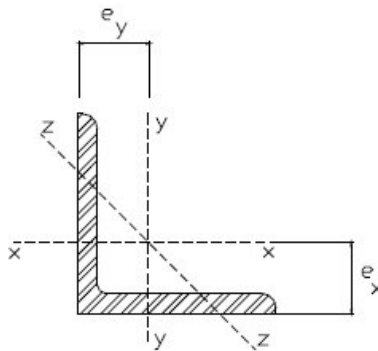
Fonte: CIGRÉ 387 (2009)

Figura 8 - Foto torre construída



Fonte: CIGRÉ 387 (2009)

Figura 9 - Seção transversal típica



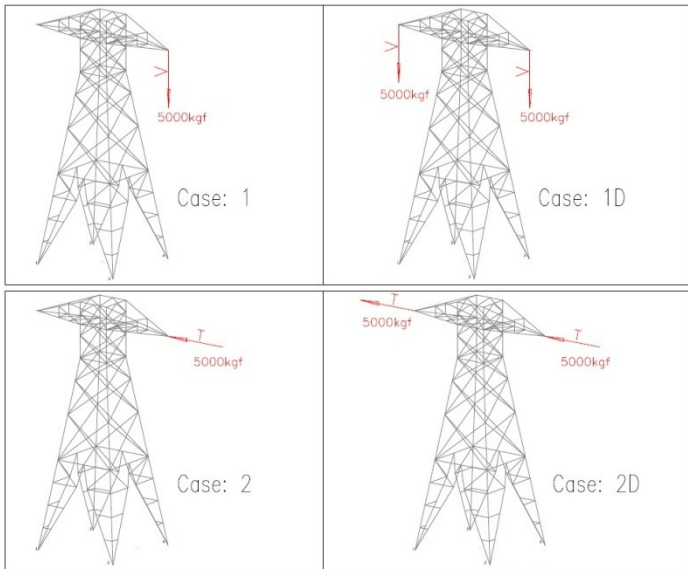
Fonte: CIGRÈ 387 (2009)

5.2 CASOS DE CARREGAMENTO

São apresentadas nas Figuras 10 e 11, as oito hipóteses de carregamento às quais a estrutura está submetida, constituídas de uma carga de 5000 kgf aplicada nas direções longitudinal, transversal e vertical separadamente, de maneira simétrica (casos 1D, 2D e 3D) e assimétrica (casos 1, 2 e 3), tendo mais dois casos com a combinação das cargas nas três direções, também de maneira simétrica e assimétrica, (casos 4D e 4) respectivamente.

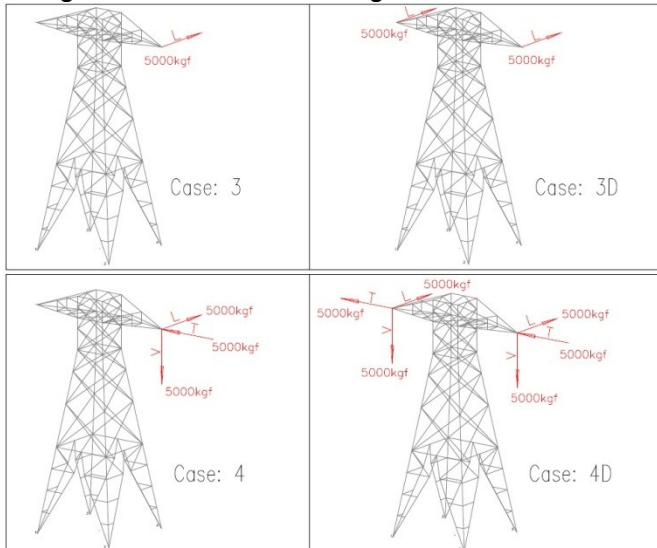
Durante o processo de otimização a estrutura é calculada para os oito casos de carregamento, sendo aceitas apenas as que respeitem as restrições em todos os casos.

Figura 10 - Casos de carregamento 1,1D,2e2D



Fonte: CIGRÈ 387 (2009)

Figura 11 - Casos de carregamento 3,3D,4 e 4D



Fonte: CIGRÈ 387 (2009)

5.3 ANÁLISE ESTRUTURAL

A estrutura foi analisada através do método da rigidez (SUSSKIND, 1991; SORIANO, 2005), onde as barras foram modeladas como elementos de treliça espacial. Assim, cada membro possui seis graus de liberdade de translação, três em cada nó. O cálculo foi feito considerando análise linear geométrica e física da estrutura, portanto o material é considerado em regime elástico-linear limitado a pequenas deformações.

Como a torre não é construída como uma treliça espacial, ou seja, não é formada de tetraedros perfeitos, ocorre a presença de nós planos em alguns locais do modelo. Para a estabilização destes nós, alguns elementos da estrutura (como os montantes, por exemplo) podem ser modelados com elementos de pórtico espacial ou através da introdução de barras fictícias. Neste trabalho foram adotadas barras fictícias como solução. No modelo estas barras possuem uma seção transversal insignificante logo, não influenciam significativamente nos esforços e deslocamentos calculados.

Além das barras reais e fictícias, são utilizadas no projeto barras redundantes (ou barras de contraventamento), sem função estrutural, destinadas apenas a reduzir o comprimento de flambagem de barras esbeltas. Por esse motivo, estas barras não são usadas no modelo estrutural, aparecendo apenas no cálculo do índice de esbeltez de cada barra.

O modelo final possui então 166 barras reais, 32 barras fictícias e 76 barras redundantes. As Figuras 12 e 13 mostram imagens do modelo, com (12) e sem (13) as barras fictícias, além disso, na Figura 12 tem-se uma escala ilustrativa de cores, com azul para tração e vermelho para compressão, nesta imagem a estrutura está submetida ao carregamento 4D.

Figura 12 - Modelo com barras fictícias.

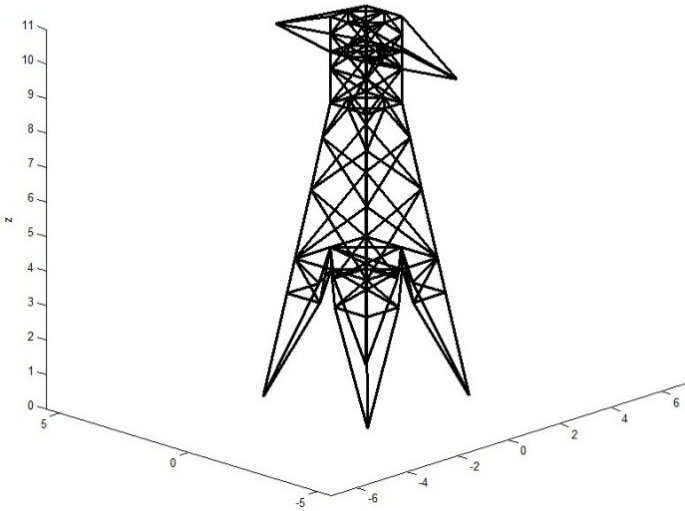
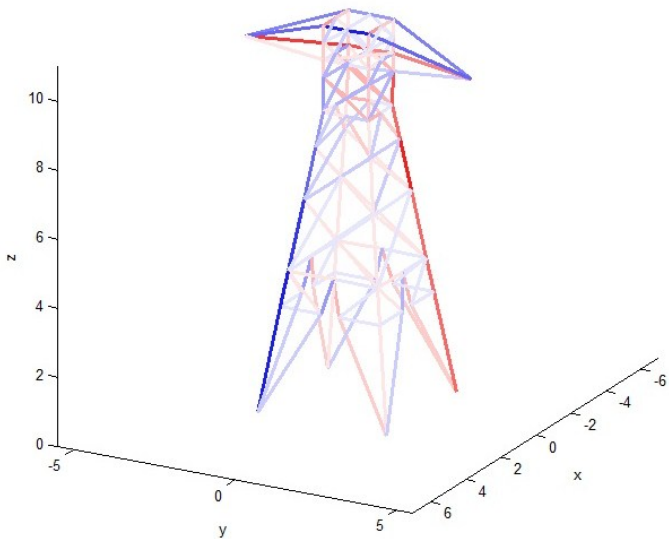


Figura 13 – Modelo sem barras fictícias e com escala de cor.



5.4 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Para avaliar com mais clareza o desempenho dos algoritmos estudados e o comportamento do problema, foram realizados três estudos separados. Otimização de áreas, otimização de áreas e geometria e otimização de áreas, geometria e topologia. Sendo cada um deles estudado com o algoritmo Firefly e com o algoritmo BSA. Os resultados apresentados são as áreas das seções transversais para cada grupo, as variações geométricas e a combinação estrutural resultante.

É importante ressaltar que durante o processo de otimização é considerado no peso estrutural além das barras reais, das barras secundárias localizadas no trecho intermediário da torre (próximo à barra F2C, Figura 7). Isto porque em um possível treliçamento defasado essas barras seriam desnecessárias e então eliminadas. Logo se deve considera-las no peso estrutural.

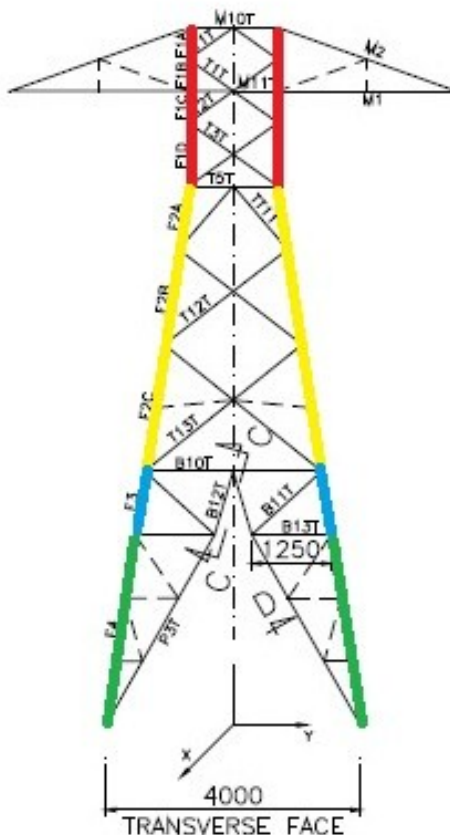
5.5 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL

Primeiramente é necessário definir quais barras serão tomadas como variáveis de projeto e a possibilidade de agrupá-las, adotando o grupo como variável. É importante ressaltar que quanto maior o número de variáveis (tamanho do vetor X) e quanto maior a abrangência das mesmas (A_j^{min} e A_j^{max} , ξ_j^{min} e ξ_j^{max}) existirão mais possibilidades. Com isso, mais chamadas da função objetivo serão necessárias para encontrar valores quase ótimos de $W(X)$. Logo se deve reduzir o máximo possível as variáveis, agrupando as barras por serem simétricas ou para atender exigências construtivas em função dos comprimentos das barras reais, por exemplo.

Neste trabalho o agrupamento das barras e os perfis usados na estrutura original segue a adotada em Cigré Brochure 387 (2009), onde as barras são divididas em quarenta grupos. A nomenclatura dos mesmos é mostrada na Figura 7, (B10L, B10T, B11L; B11T; B12L; B12T; B13L; B13T; F1A; F1B; F1C; F1D; F2A; F2B; F2C; F3; F4; M1; M2; M3; M10L; M10T; M11L; M11T; P3L; P3T; T5L; T5T; LT11; TT11; T12L; T12T; T13L; T13T).

Entretanto, analisando características práticas de projeto e construção de torres, observa-se que as barras dos montantes do trecho inclinado e do trecho reto devem ser tomadas como uma única variável, já que na prática esses elementos serão apenas uma barra. Assim, os grupos F1A; F1B; F1C; F1D; F2A; F2B; F2C; F3; F4 se tornarão F1; F2; F3 e F4. A Figura 14 mostra o agrupamento dos montantes. A cor vermelha indica o grupo F1, a cor amarela indica o grupo F2, a cor azul indica o grupo F3 e a cor verde indica o grupo F4.

Figura 14 – Agrupamento dos montantes



Fonte: adaptado de CIGRÈ 387 (2009)

As variáveis de projeto então são definidas como o vetor $\mathbf{X} = (A_1, \dots, A_{35})$, sendo A_j , a área de seção transversal para cada grupo.

Os perfis disponíveis são treze cantoneiras de abas iguais com seção transversal típica mostrada na Figura 9 e propriedades geométricas mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos perfis disponíveis

Size and Thickness (mm)	Weight kg/m	Area cm ²	Axis X-X / Y-Y				Axis Z-Z	B/T
			I cm ⁴	S cm ³	r cm	e _s cm		
L 40 X 40 X 3.0	1.84	2.35	3.45	1.18	1.21	1.07	0.78	10.33
L 40 X 40 X 5.0	2.97	3.79	5.43	1.91	1.2	1.16	0.77	5.8
L 45 X 45 X 3.0	2.09	2.66	4.93	1.49	1.36	1.18	0.88	11.67
L 45 X 45 X 5.0	3.38	4.3	7.84	2.43	1.35	1.28	0.87	6.6
L 50 X 50 X 5.0	3.77	4.8	11	3.05	1.51	1.4	0.97	7.6
L 50 X 50 X 6.0	4.47	5.69	12.8	3.61	1.5	1.45	0.97	6.17
L 65 X 65 X 5.0	4.95	6.31	24.7	5.21	1.98	1.76	1.28	10.2
L 65 X 65 X 6.0	5.91	7.53	29.2	6.21	1.97	1.8	1.27	8.33
L 75 X 75 X 5.0	5.78	7.36	38.6	7.01	2.29	1.99	1.48	12
L 75 X 75 X 6.0	6.87	8.75	45.6	8.35	2.28	2.04	1.47	9.83
L 75 X 75 X 8.0	9.03	11.5	58.9	11	2.26	2.13	1.45	7.12
L 90 X 90 X 6.0	8.3	10.6	80.3	12.2	2.76	2.41	1.78	12.17
L 90 X 90 X 7.0	9.58	12.2	92.4	14.1	2.75	2.46	1.77	10.28

Fonte: CIGRÈ 387 (2009)

Os parâmetros utilizados no FA foram $n=10$ Fireflies, $S = 15000$ iterações, resultando em 150000 chamadas da função objetivo. Estes parâmetros foram estabelecidos levando-se em consideração o tempo de processamento e a complexidade do problema.

Para o algoritmo BSA os parâmetros foram definidos com uma população $P=30$ e 5000 ciclos, resultando em 150000 chamadas da função objetivo. O número de chamadas foi definido a fim obter uma comparação justa entre o desempenho dos dois algoritmos.

A Tabela 2 mostra os resultados encontrados para a otimização de áreas com os algoritmos Firefly e BSA, bem como a média e o desvio padrão, calculados a partir de 25 rodadas independentes de cada algoritmo. O algoritmo Firefly atingiu 1050,0168 Kg como melhor peso, 1061,0904 Kg como média e 9,2737 kg de desvio padrão. Enquanto o algoritmo BSA obteve

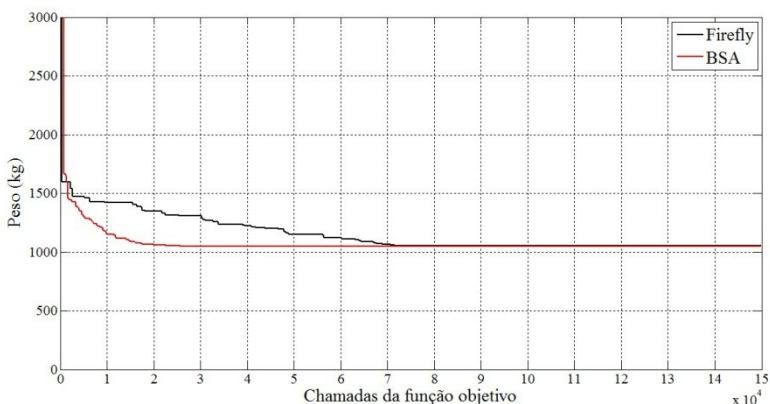
1046,5900 como melhor resultado, 1046,9956 Kg de média e 0,6634 kg como desvio padrão. A Figura 15 apresenta as curvas de convergência típicas dos dois algoritmos, mostrando que, neste caso estudado, além de levar a melhores resultados, o algoritmo BSA tem um tempo de convergência mais curto.

Tabela 2 – Valores para o melhor resultado de otimização de áreas

GRUPO	Algoritmos		GRUPO	Algoritmos	
	FA	BSA		FA	BSA
B10L	2,35	2,35	M11T	7,36	6,31
B10T	2,35	2,35	P3L	4,30	4,30
B11L	2,35	2,35	P3T	3,79	3,79
B11T	2,35	2,35	T1L	2,35	2,35
B12L	2,35	2,35	T1T	3,79	3,79
B12T	2,35	2,35	T2L	3,79	3,79
B13L	2,66	2,35	T2T	3,79	3,79
B13T	2,35	2,35	T3L	3,79	3,79
F1	6,31	6,31	T3T	3,79	3,79
F2	10,60	10,60	T5L	4,30	4,30
F3	10,60	10,60	T5T	2,66	2,66
F4	10,60	10,60	LT11	6,31	6,31
M1	7,36	7,36	TT11	5,69	5,69
M2	5,69	5,69	T12L	4,80	4,80
M3	3,79	2,66	T12T	4,30	4,30
M10L	2,35	2,35	T13L	6,31	6,31
M10T	4,80	4,80	T13T	4,80	4,80
M11L	2,66	4,30			
Peso total (Kg)	1050,0168	1046,5900			
Media* (Kg)	1061,0904	1046,9956			
D.P.*	9,2737	0,6634			

*Resultados estatísticos para 25 rodadas.

Figura 15 - Curva de convergência para a otimização dimensional dos algoritmos Firefly e BSA



Destaca-se que o peso da estrutura original não foi usado como parâmetro de comparação, pois se sabe que certas barras da estrutura original tiveram suas áreas propositalmente elevadas, devido a critérios não considerados neste trabalho, como detalhes de construção e montagem.

Além disso, como um dos principais objetivos deste trabalho é mostrar a eficiência do método de otimização topológica adotado, será usado como valor de comparação o melhor resultado encontrado para a otimização de áreas. No caso 1046,5900 Kg.

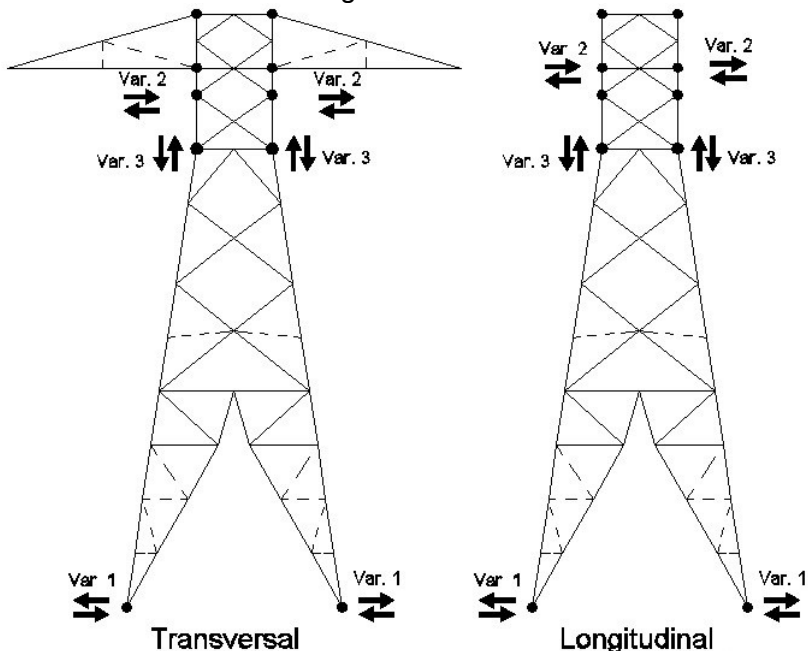
5.6 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA

Outra análise foi feita realizando a otimização de geometria, simultaneamente à otimização de áreas já descrita. Nesta, são variadas as coordenadas nodais resultando em novos formatos estruturais, estas variações tem como objetivo encontrar um arranjo que distribua melhor entre os membros as cargas aplicadas, possibilitando o uso de barras com seções transversais menores e, conseqüentemente, levando a uma estrutura mais leve.

Os nós tomados como variáveis de projeto são mostradas nas Figuras 16 e 17, onde a variação 1 (Var. 1) é aplicada horizontalmente nos quatro nós da base, a variação 2 (Var. 2) é

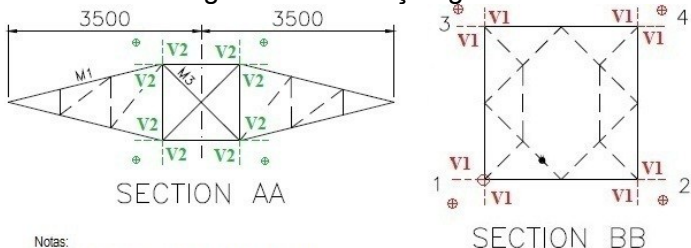
aplicada horizontalmente nos vinte nós do topo e a variação 3 (Var. 3) é aplicada verticalmente nos quatro nós intermediários que dividem o trecho superior e o intermediário. Os dois nós extremos, onde as cargas são aplicadas são mantidos imóveis.

Figura 16- Nós tomados como variáveis na otimização de geometria.



Fonte: Adaptado de CIGRÉ 387 (2009).

Figura 17 – Variação geométrica



- Notas:
- 1) Linhas tracejadas são membros redundantes
 - 2) Dimensões em milímetros
 - 3) \oplus é a nova posição nodal

Fonte: Adaptado de CIGRÉ 387 (2009).

O vetor \mathbf{X} agora possui o seguinte formato $\mathbf{X} = (A_1, \dots, A_{35}, \xi_1, \xi_2, \xi_3)$, onde ξ_{q_i} é a variação (V1, V2 e V3) mostrada na Figura 16. Este valor ξ_{q_i} nas variações 1 e 2, é somado às coordenadas horizontais dos nós, como mostrado na Figura 15, logo a variação resultante é a hipotenusa gerada por estes catetos, (isto faz com que a estrutura se abra uniformemente para valores positivos de ξ , se feche uniformemente para valores negativos ou permaneça como a original quando o valor for igual zero). Na variação 3, o valor ξ é aplicado na coordenada vertical dos nós mostrado na Figura 17 (isto faz com que o trecho reto aumente para valores negativos de ξ , diminua para valores positivos ou permaneça como a original quando o valor for igual a zero).

Aplicadas estas três variações, os demais nós encontrados no trecho intermediário da torre também são alterados, seguindo a variação geométrica de toda a estrutura, além de manter a distância relativa entre os nós, proporcional à estrutura original e arredondando suas coordenadas verticais em um centímetro.

As variações mínimas e máximas permitidas em cada um dos três locais foram:

- Variação 1: $\xi_1^{min} = -20$ centímetros e $\xi_1^{max} = 20$ centímetros;
- Variação 2: $\xi_2^{min} = -10$ centímetros e $\xi_2^{max} = 10$ centímetros;

- Variação 3: $\xi_3^{min} = -20$ centímetros e $\xi_3^{max} = 20$ centímetros.

Em todos os três as variações assumem valores discretos a cada centímetro, contidos nos limites apresentados.

Os parâmetros dos algoritmos foram mantidos como no caso anterior, portanto Firefly e BSA efetuam 150000 chamadas da função objetivo. A Figura 18 mostra as curvas de convergência de um resultado típico. O melhor resultado encontrado para o algoritmo Firefly foi 1041,7086 Kg, as 25 execuções do algoritmo resultaram em uma média de 1062,8268 Kg e 12,2431 Kg de desvio padrão. Enquanto que para o algoritmo BSA o melhor resultado foi 1032,2062 Kg, com 1035,6044Kg de média e um desvio padrão de 2,5535. Observa-se que melhores resultados foram novamente encontrados com o algoritmo BSA. Além disso, o peso da estrutura foi reduzido em relação à otimização apenas de áreas. A Tabela 3 apresenta os valores de área e variações para os resultados ótimos encontrados com os dois algoritmos.

Figura 18 - Curva de convergência para a otimização dimensional e geométrica dos algoritmos Firefly e BSA

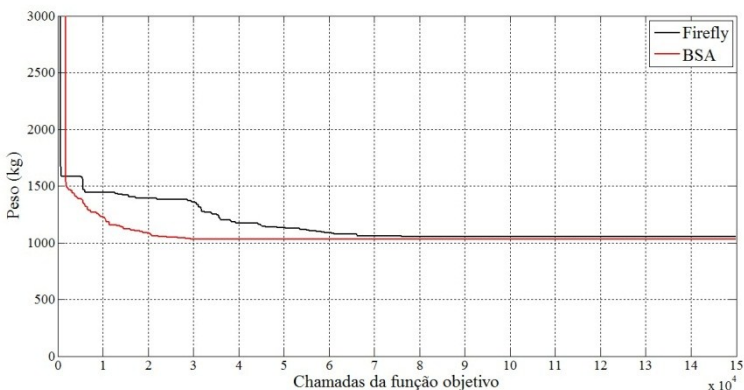


Tabela 3 - Valores para o melhor resultado de otimização dimensional e geométrica.

GRUPO	Algoritmos		GRUPO	Algoritmos	
	FA	BSA		FA	BSA
B10L	2,66	2,35	M11T	7,36	7,36
B10T	2,66	2,35	P3L	4,30	4,30
B11L	2,35	2,66	P3T	4,30	2,66
B11T	2,66	2,35	T1L	2,35	2,35
B12L	2,66	2,35	T1T	3,79	4,30
B12T	2,35	2,35	T2L	2,66	4,30
B13L	2,35	2,35	T2T	2,66	4,30
B13T	2,35	2,35	T3L	3,79	4,30
F1	4,80	6,31	T3T	3,79	4,30
F2	10,60	10,60	T5L	4,30	4,30
F3	10,60	10,60	T5T	2,66	2,66
F4	10,60	10,60	LT11	6,31	6,31
M1	7,36	7,36	TT11	4,80	4,80
M2	4,80	4,80	T12L	4,80	4,80
M3	2,66	2,66	T12T	4,30	4,30
M10L	2,66	2,35	T13L	6,31	6,31
M10T	4,80	4,30	T13T	4,80	4,80
M11L	2,66	2,66			
V1 (cm)	-0,01	-0,09			
V2 (cm)	0,04	0,04			
V3 (cm)	0,18	-0,20			
Peso total (Kg)	1041,7086	1032,2062			
Media* (Kg)	1062,8268	1035,6044			
D.P.*	12,2431	2,5535			
(%)Redução	0,47%	1,37%			

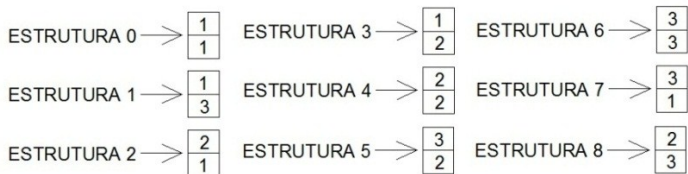
*Resultados estatísticos para 25 rodadas.

5.7 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E TOPOLÓGICA

Como descrito anteriormente, a variação topológica é feita através da divisão da torre em três partes principais e fornecendo para as partes superior e intermediária três opções topológicas, como mostrado na Figura 1.

Durante a otimização, as duas partes da estrutura variam livre e independentemente entre as três possibilidades disponíveis. O resultado são nove possíveis estruturas, como mostrado na Figura 20.

Figura 19 - Estruturas resultantes da combinação topológica



As estruturas de 0 a 8 são escolhidas através de duas variáveis adicionais, as quais podem assumir valores 1; 2 ou 3. Destaca-se que as Estruturas 1, 5, 6, 7 e 8 possuem o treliçamento da face transversal e longitudinal distintos, esta característica torna o cálculo do comprimento de flambagem bastante específico, conforme mencionado na Seção 2.

Os parâmetros dos algoritmos foram mantidos os mesmos, os resultados encontrados são mostrados na Tabela 4, enquanto a curva de convergência para um resultado típico é mostrada na Figura 20. O melhor resultado para o algoritmo Firefly foi 1009,7100 Kg, com média de 1027,6811 kg e 12,0737 de desvio padrão. Para o algoritmo BSA o melhor resultado foi 993,3766 Kg, 999,1411 Kg de média e 5,7884 de desvio padrão. Destaca-se que o resultado para a otimização topológica resultou na configuração estrutural número 8, mostrada na Figura 19, para ambos os algoritmos.

Figura 20 - Curva de convergência para a otimização dimensional, geométrica e topológica. dos algoritmos Firefly e BSA

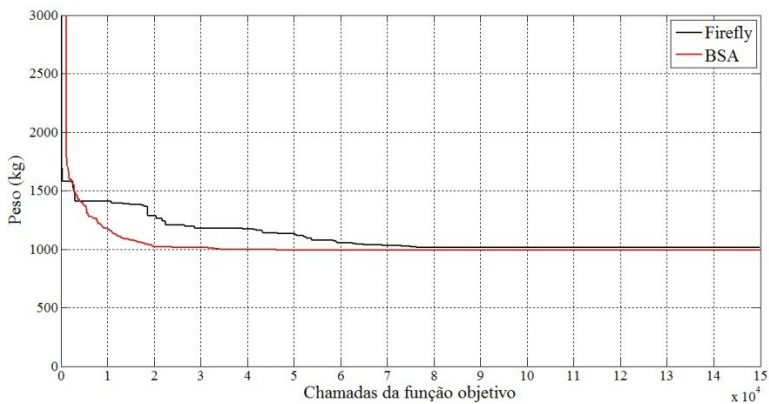


Tabela 4 - Valores para o melhor resultado de otimização dimensional, geométrica e topológica.

GRUPO	Algoritmos		GRUPO	Algoritmos	
	FA	BSA		FA	BSA
B10L	2,35	2,35	M11T	7,36	8,75
B10T	2,35	2,35	P3L	4,30	4,30
B11L	2,35	2,35	P3T	4,30	3,79
B11T	2,35	2,35	T1L	2,35	2,35
B12L	2,35	2,35	T1T	2,66	2,66
B12T	2,35	2,35	T2L	3,79	4,30
B13L	2,35	2,35	T2T	3,79	4,30
B13T	2,35	2,35	T3L	3,79	4,30
F1	6,31	6,31	T3T	4,30	4,30
F2	10,60	10,60	T5L	3,79	2,35
F3	10,60	10,60	T5T	2,66	2,35
F4	10,60	10,60	LT11	3,79	2,66
M1	7,36	7,53	TT11	5,69	4,80
M2	6,31	4,80	T12L	4,30	4,30
M3	5,69	2,35	T12T	4,80	4,80
M10L	2,35	2,66	T13L	4,80	4,80
M10T	5,69	4,30	T13T	4,80	4,80
M11L	2,35	2,35			
V1 (cm)	0,1	-0,06			
V2 (cm)	-0,1	0,02			
V3 (cm)	-0,01	-0,2			
Top. Superior	2	2			
Top. Intermed.	3	3			
Peso total (Kg)	1009,7100	993,3766			
Media* (Kg)	1027,6811	999,1411			
D.P.*	12,0737	5,7884			
(%)Redução	3,52%	5,08%			

*Resultados estatísticos para 25 rodadas.

Uma vista 3D do melhor resultado ótimo encontrado para a otimização de áreas, geometria e topologia é mostrada na Figura 21. A Tabela 5 apresenta os melhores resultados para os três casos estudados, além do percentual de redução de cada caso. Finalmente a Figura 22 apresenta a vista transversal da estrutura original e das estruturas ótimas encontradas em cada caso. Para evidenciar o treliçamento com simetria bilateral encontrado como topologia ótima, a Figura 23 mostra as faces transversal e longitudinal do melhor resultado encontrado para a otimização dimensional, geométrica e topológica.

Tabela 5 - Melhores resultados para os três casos de otimização estudados

Otimização	Peso (kg)	% de redução
Dimensional*	1046,5900	-
Dimensional e geométrica*	1032,2062	1,37%
Dimensional, geométrica e topológica*	993,3766	5,08%

* Resultados obtidos com o algoritmo BSA

Figura 21 - Vista 3D do resultado ótimo encontrado para a otimização de áreas, geometria e topologia

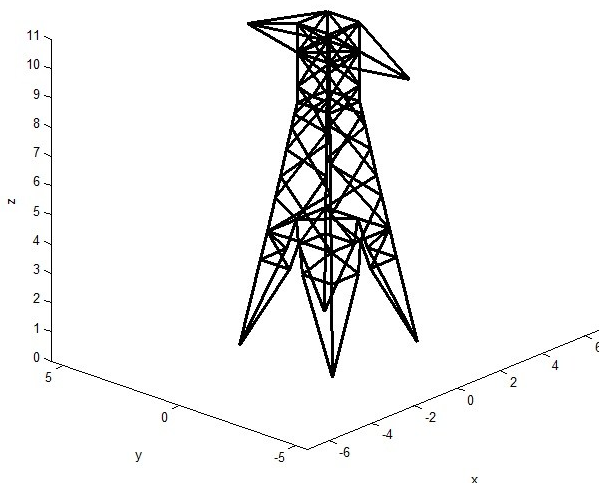


Figura 22 - Vista transversal da estrutura original (a) e melhor resultado para otimização de áreas (b), áreas e geometria (c) e áreas, geometria e topologia (d).

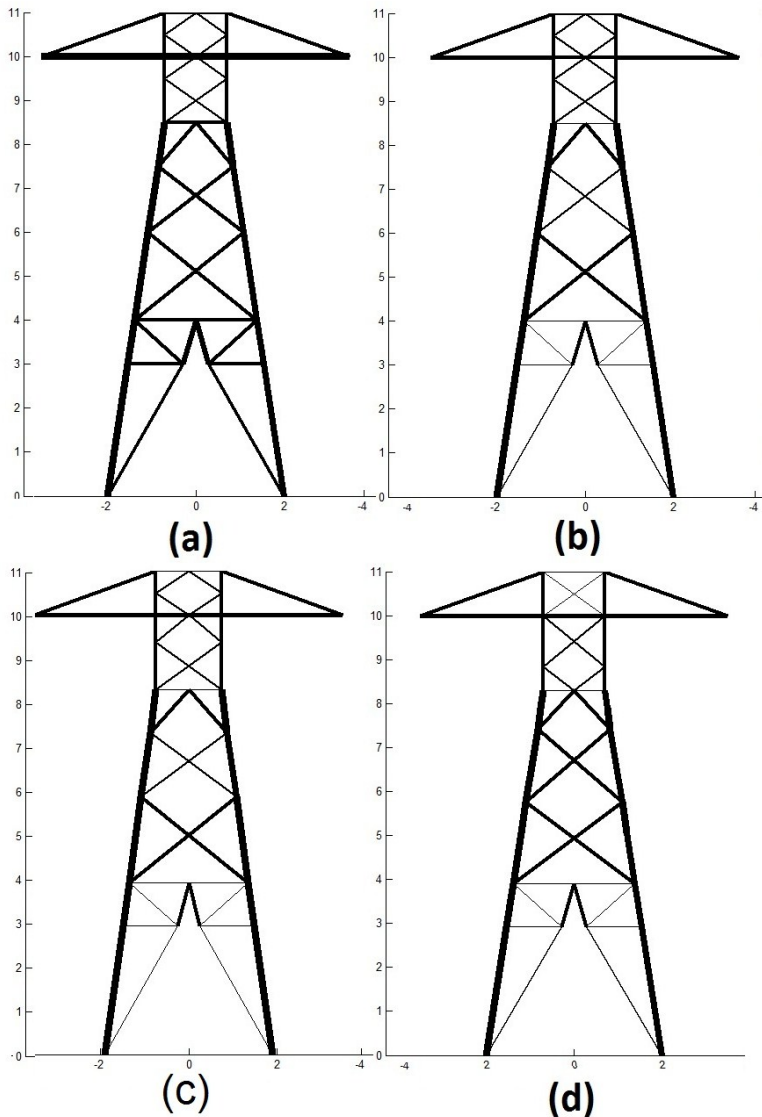
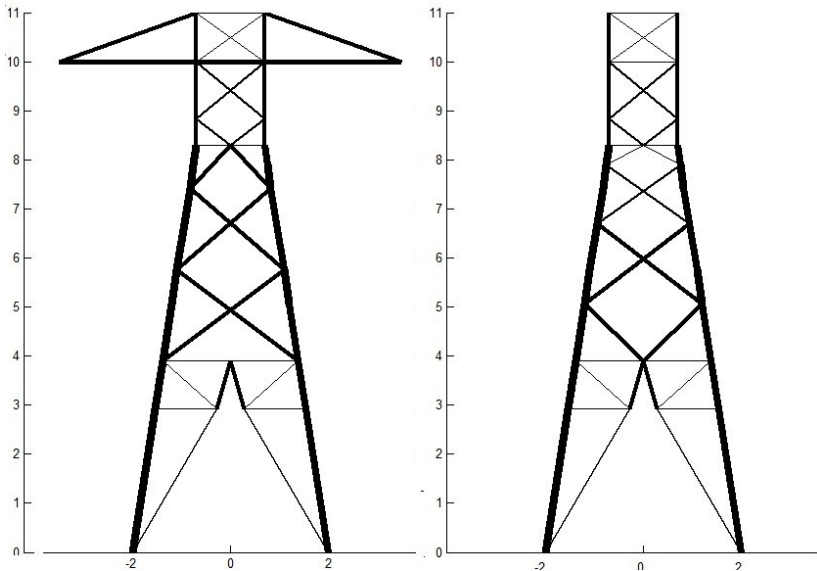


Figura 23 - Vista transversal e longitudinal do melhor resultado encontrado para otimização dimensional, geométrica e topológica.



6. DIMENSIONAMENTO DOS PARAFUSOS

Como dito anteriormente, os parafusos foram dimensionados de acordo com a NBR 8850 – Execução de Suportes Metálicos Trelaçados para Linhas de Transmissão – Procedimento. Sendo feitas as verificações de tração e cisalhamento combinados nos parafusos, com cisalhamento tomado no corpo e verificação de esmagamento do perfil.

Foram considerados dois parafusos da série M12 de 12 mm de diâmetro alinhados nos montantes e um nas demais barras. A Tabela 6 mostra o número de parafusos por grupo de barras para os melhores resultados em cada caso de otimização estudado.

Tabela 6 - Dimensionamento de parafusos para os melhores resultados em cada caso estudado para o algoritmo BSA.

GRUPO	Caso de otimização			GRUPO	Caso de otimização		
	5,5	5,6	5,7		5,5	5,6	5,7
B10L	1	1	1	M10L	2	2	2
B10T	1	1	1	M10T	7	7	6
B11L	1	1	1	M11L	4	3	2
B11T	1	1	1	M11T	10	10	8
B12L	3	3	3	P3L	3	3	3
B12T	3	2	3	P3T	2	2	2
B13L	1	1	1	T1L	1	1	1
B13T	1	1	1	T1T	4	4	4
F1A	4	4	4	T2L	4	4	4
F1B	0	0	0	T2T	4	4	4
F1C	0	0	0	T3L	4	4	4
F1D	8	8	10	T3T	4	4	4
F2A	10	10	12	T5L	4	4	2
F2B	0	0	0	T5T	3	3	2
F2C	0	0	0	LT11	4	4	3
F3	16	18	18	TT11	3	3	3
F4	16	18	18	T12L	3	3	3
M1	11	11	11	T12T	2	2	2
M2	8	7	7	T13L	2	2	3
M3	2	2	2	T13T	2	2	2

7. DISCUSSÕES

Neste trabalho foi considerada a linearidade física e geométrica da estrutura. Essa consideração foi adotada principalmente porque essa consideração é feita também na prática industrial. Onde as estruturas são projetadas

justamente para que esses efeitos de não linearidade sejam insignificantes.

Como a estrutura usada neste trabalho apresenta deslocamentos pequenos o equilíbrio pode ser feito na configuração indeformada. Entretanto, em torres grande altura e com deslocamentos significativos, a verificação da não-linearidade geométrica se torna importante.

Os carregamentos elaborados em Cigré 387 (2009) e usados neste trabalho, não envolvem uma carga típica de vento, distribuída verticalmente, os quais afetariam a estrutura otimizada. Entretanto, os carregamentos aplicados foram feitos de modo a simular os efeitos dos carregamentos de vento.

Adicionalmente, o vento em um processo de otimização leva ainda a uma dificuldade específica. Uma vez que a força de vento depende diretamente da área líquida da estrutura, logo dos perfis usados. Durante o processo, a cada iteração, uma nova estrutura é gerada, resultando em uma nova força de vento. Dessa forma a cada iteração a estrutura seria otimizada para um esforço diferente, tornando o processo de convergência mais trabalhoso.

Outra discussão interessante a respeito da otimização estrutural são as variáveis de projeto. Para a otimização dimensional, as barras são agrupadas, onde os grupos são tomados como as variáveis. Isso leva a uma dúvida em relação à como e quanto agrupar as barras, de modo que, em um agrupamento bastante específico, resultando em diversos grupos com poucas barras, o processo de otimização teria mais liberdade e teoricamente mais chances de encontrar melhores resultados. Por outro lado, mais grupos significam mais variáveis e mais possibilidades, o que exigirá mais chamadas da função objetiva, a um ponto onde o custo computacional possa inviabilizar o problema. Além disso,

do ponto de vista prático não é interessante que se tenha um grande número de perfis diferentes em uma estrutura, adicionalmente, certas barras devem ser obrigatoriamente iguais, como é caso, por exemplo, de trechos dos montantes, forçando seu agrupamento.

Quanto à variação geométrica e topológica, a relação entre as possibilidades de estruturas e o custo computacional é a mesma. Na otimização geométrica outro fator é importante em torres de transmissão, que são os critérios elétricos, como por exemplo, as distâncias mínimas entre a estrutura e o cabo condutor, o que restringe as variações permitidas. Além disso, as variações devem ser restringidas de modo a controlar o resultado final, evitando estruturas não usuais.

Com relação à modelagem estrutura, o modelo adotado neste trabalho, treliça espacial, exige que os nós plano existentes no modelo sejam compensados, uma vez que a estrutura não é construída em tetraedros perfeitos. Foi adotada como solução a inclusão de barras fictícias. Entretanto, existe outra solução possível, que seria a modelagem dos montantes como elementos de pórtico espacial, que incluem a rigidez a flexão. Entretanto neste último irão aparecer esforços fletores, que caso a estrutura seja bem escolhida serão pequenos e não afetaram o processo de dimensionamento.

8. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a otimização dimensional, geométrica e topológica, com a otimização de topologia sendo feita através de templates. A estrutura foi submetida a oito casos de carregamento considerando restrições de esforço e esbeltez de acordo com a norma NBR 8850.

Analisando os resultados obtidos com o emprego dos algoritmos Firefly e BSA, observa-se que estes podem ser aplicados em problemas de otimização de estruturas reais e

complexas, se adaptando facilmente a problemas com variáveis mistas ou discretas e diversas restrições.

A comparação dos resultados e das curvas de convergência dos dois algoritmos mostra um desempenho significativamente melhor do algoritmo BSA. Onde, mesmo nos casos onde os resultados ótimos encontrados pelos dois algoritmos foi muito semelhante, a convergência do BSA é mais rápida. Além disso, levando em consideração o caráter probabilístico dos algoritmos heurísticos, os valores de média e desvio padrão são um importante indício do seu desempenho. Nos estudos realizados observa-se resultados de média e desvio padrão significativamente melhores para o algoritmo BSA. Mostrando não só sua capacidade de atingir resultados ótimos como também a capacidade de fazê-lo em cada rodada.

Os resultados mostram também que com a otimização simultânea de mais características da estrutura (áreas, geometria e topologia) melhores resultados podem ser encontrados. O método de otimização topológica apresentado neste trabalho mostra que a abordagem global usada leva a melhores resultados, comparada com a otimização apenas de áreas e geometria. Além disso, o fato de o melhor resultado obtido na otimização topológica ser uma estrutura com treliçamento defasado corrobora a importância de incluir esse tipo de estrutura no processo de otimização, dificuldade encontrada até então nos trabalhos apresentados na literatura.

Adicionalmente, a otimização topológica com a abordagem global apresentada neste trabalho fundamenta uma base para que essa ferramenta seja usada no desenvolvimento de projetos de torre e não somente na otimização de uma estrutura conhecida. A partir de uma biblioteca contendo diversos templates, o projetista, baseado nas exigências de cada projeto (posição e número de cabos, distância elétrica, altura máxima, dimensões da base, etc.) escolhe os templates adequados e os fornece para a otimização, os adaptando às dimensões necessárias. Com isso, o processo de otimização busca a estrutura com uma configuração ótima ou quase ótima de áreas, geometria e topologia simultaneamente.

Essa possibilidade é bastante importante, pois os métodos de otimização estudados e publicados atualmente são baseados na otimização de uma estrutura já projetada, detalhada ou até

mesmo já construída. Poder buscar com maior facilidade uma estrutura ótima já nas fases iniciais de concepção e desenvolvimento do projeto, torna a otimização estrutural mais útil e a aproxima de uma real aplicação prática industrial.

9. TRABALHOS FUTUROS

Para a elaboração de trabalhos futuros sugere-se:

- Análise estrutural considerando a não linearidade geométrica;
- Consideração do estado limite de serviço, verificando a deformação e vibração máximas;
- Submeter a estrutura às cargas de vento;
- Desenvolvimento de uma biblioteca de templates e de uma ferramenta para desenvolvimento de projetos ótimos de torres de linha de transmissão;
- Elaboração de método híbrido de otimização global/local, em que em cada template pode-se variar o número de diagonais em consideração.

10. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – **ANEEL** “Linha do tempo, transmissão de energia elétrica” Acessado em 10/03/2014, Disponível em <
http://www.aneel.gov.br/15anos/linha_do_tempo/transmissao.htm
>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8850**. Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão – Procedimento. 2003.

ASCE – American Society of Civil Engineers, Design of latticed steel transmission line towers (**10;97**), 2000.

AISC LRFD Manual – **325-01** (2001), LRFD Manual of steel Construction, 3rd Edn., American Institute of Steel Construction.

ADELI, H.; KAMAL, O. Efficient optimization of plane trusses. **Advances in Engineering Software**, p. (3) 116-122, 1991.

Assis, A. R. M. G, Avaliação do desempenho do algoritmo Backtracking Search Optimization adaptado para o tratamento de restrições através de penalização adaptativa (BSA-MPA) em problemas de engenharia. **Dissertação (Mestrado em**

Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

ARORA, J. **Introduction to optimum design**. San Diego: Elsevier, 2004.

CIVICIOGLU, P. Backtracking search optimization Algorithm for numerical optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, p. Vol. 219 - pp. 8121-8144, 2013.

COHN, M. Z.; DINOVIETZER, A. S. Application of structural optimization. **Journal of structural engineering**, p. (2) 617–650., 1994.

DEB K., GULATI S. Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms. **Finite Elem Anal Des** 2001;37:447-67

DOMINGUEZ, A.; STIHARU, I.; SEDAGHATI, R. Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithms. **Research in Engineering Design**, p. (17) 73–84, 2006.

GALANTE M. Genetic algorithms as an approach to optimize real world structures. **Int J Numer Methods Eng** 1996;39:361-82

GOLDBERG, D. E.; SAMTANI, M. P. **Engineering optimization via genetic algorithms**. Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computations. Alabama: ASCE. 1986. p. 471-482.

GUO, H. Y.; LI, Z. L. Structural topology optimization of high-voltage transmission tower with discrete variables. **Structural and Mult. Dsci. Optm.**, p. 43,851-861, 2011.

GRIERSON D.E. E PAK W.H. Optimal sizing, geometrical and topological design using a genetic algorithms. **Struct Optim**1993; 6:151-9

HAJELA P., LEE E. Genetic algorithms in truss topological optimization. **Int. J. Solid Struct** 1995;32(22):3341-57.

KAVEH, A.; GHOLIPOUR, Y.; RAHAMI, H. Optimal Design of Transmission Towers Using Genetic Algorithm and Neural Networks. **International Journal of Space Structures**, p. Vol 23. No. 1, 2008.

KELESOGLU O. Fuzzy multiobjective optimization of tress-structures using genetic algoritihm. **Adv Eng Softw** 2007;38?717-21

LOPEZ, R. H.; LUERSEN, M. A.; CURSI, E. S. Optimization of laminated composites considering different failure criteria. **Compos B Eng**, p. 40(8): 731-40, 2009.

MATHAKARI, S.; GARDONI, P. Reliability-Based Optimal Design of Electrical Transmission Towers Using Multi-Objective Genetic Algorithm. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, p. 22, 282-292, 2007.

MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. A hybrid approach for damage detection of structures under operational conditions. **Journal of Sound and Vibration**, p. (18) 4241–4260, 2013.

NOILUBLAO, N.; BUREERAT, S. Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms. **Computers & Structures**, p. Vol. 89. pp. 25312538, 2011.

PARÍS, J.; Martínez, S.; Navarrina, F.; Colominas, I.; Casteleiro, M.. Structural Optimization of High Voltage Transmission Line Towers considering Continuum and Discrete Design Variables. **Computer Aided Optimum Design in Engineering XII**. 2012.

PARÍS, J., Martínez, S., Navarrina, F., Colominas I., Casteleiro, M. 2010. Structural optimization of high tension towers 2nd International Conference on Engineering Optimization September 6-9, Lisbon, Portugal.

RAJAN S.D. Sizing, shape and topology design optimization of trusses using a genetic algorithm. **J. Struct Eng** 1995;121(10):1480=7

RAJEEV S. E KRISHNAMOORTHY C.S. Discrete optimization of structures using genetic algorithms. **Journal of Structural Engineering** 1992; 118(5):1233-50

S. ŞILIH, S. . K. S. A. P. M. . Shape and discrete sizing optimization of timber trusses by considering of joint flexibility. **Adv Eng Softw**, p. Volume 41, issue 2, pp. 286-294, 2010.

SAKA, P. M. Shape Optimization of Trusses, **Journal of Structural Division. ASCE**, p. (106) 1155-1174, 1980.

SALAJEGHEH, E.; VANDERPLAATS, G. N. Optimum design of trusses with discrete sizing and shape variables. **Structural Optimization**, p. 6, 79-85, 1993.

SHEA, K.; SMITH, I. F. C. Improving Full-Scale Transmission Tower Design through Topology and Shape Optimization. **Journal of Structure Engineering**, p. Vol. 132, No. 5, 2006.

SHERESTHA S.M., GHABOUSSI J. Evolution of optimum structural shapes using genetic algorithms. **J. Struct Eng** 1998;123(11):1331-8

SIVAKUMAR, P., RAJARAMAN, A., SAMUEL KNIGHT, G. M., RAMACHANDRAMURTHY, D.S. Object-Oriented Optimization Approach Using Genetic Algorithms for Lattice Towers. **J. Comput. Civ. Eng.**, 2004.18:162-171.

SOH C.K. E YANG J. Fuzzy controlled genetic algorithm search for shape optimization **J Comput Civ Eng** 1996; 10(2):143-50

SONMEZ, M. Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm. **Struct Multidisc Optim**, p. 43:85-87, 2011.

SORIANO, H., L., Análise de estruturas - Formulação matricial e implementação computacional, **Editora Ciência Moderna Ltda**, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

SOUZA, R. R., Miguel, L., F., F., Lopez, R. H. e Miguel, L., F., F. On the size and shape optimization of transmission line towers. **Proceedings of Pan-American congress of applied mechanics**. Santiago, Chile. 24-28 Março, 2014.

SUSSEKIND, J., C., Curso de análise estrutural - **Ed. Globo**, Porto Alegre, Vol. 2 e 3 11^a ed., 1991

TANG, W.; TONG, L.; GU, Y. Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables. **Int. J Numer. Meth. Engng**, p. (62) 1737–1762, 2005.

TANIWAKI, K.; OHKUBO, S. Optimal synthesis method for transmission tower truss. **Industrial Application**, p. 26, 441-454, 2004.

TORII, A. J.; LOPEZ, R. H.; BIONDINI, F. An approach to reliability-based shape and topology optimization of trusses structures. **Eng Optim**, p. Vol. 44, pp. 37-53, 2012.

Working Group B2.08. Influence of the hyperstatic modeling on the behavior of transmission line lattice structures. **Cigré Brochure 387**, 2009.

WU, S. J.; CHOW, P. T. Integrated discrete and configuration optimization of trusses using genetic algorithms, **Comput. Struct. Comput. Struct.**, p. (4) 695–702, 1995.

YANG, X.-S. "Firefly algorithms for multimodal optimization". In: **Stochastic algorithms: foundations and application, SAGA. Lecture notes in computer sciences**, p. Volume 5792, pp. 169-178, 2009.

