

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

AUGUSTO OTTE HÜLSE

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO AUTOMATIZADO DA
FORÇA DO VENTO EM TORRES DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO EM PROCEDIMENTOS DE OTIMIZAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2015

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

AUGUSTO OTTE HÜLSE

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO AUTOMATIZADO DA
FORÇA DO VENTO EM TORRES DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO EM PROCEDIMENTOS DE OTIMIZAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Leandro Fleck
Fadel Miguel

FLORIANÓPOLIS, 2015

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

Hülse, Augusto Otte

Metodologia para cálculo automatizado da força do vento em torres de linhas de transmissão em procedimentos de otimização / Augusto Otte Hülse ; orientador, Leandro Fleck Fadel Miguel - Florianópolis, SC, 2015.
69 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Força do vento. 3. Torres de linhas de transmissão. 4. Automatização. 5. Otimização estrutural. I. Fleck Fadel Miguel, Leandro. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

AUGUSTO OTTE HULSE

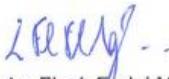
Metodologia para cálculo automatizado da força do vento em torres de linhas de transmissão em procedimentos de otimização

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 2015.

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. Ivo José Padaratz, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmão que me apoiaram incondicionalmente e são meus maiores exemplos

A minha namorada, por acompanhar toda a minha trajetória acadêmica e me orientar sabiamente em todos os momentos de dificuldades e incertezas.

Aos meus amigos e colegas de graduação que sempre estiveram ao meu lado e contribuíram para minha formação.

A todos os professores e funcionários da UFSC, principalmente ao meu orientador, Leandro Fleck Fadel Miguel, responsável pela transmissão do conhecimento indispensável para a realização desse trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento pessoa e profissional.

RESUMO

Este trabalho apresenta um método de cálculo automatizado da força do vento para torres de linhas de transmissão em procedimentos de otimização. Esta proposta segue as normativas para determinação da força do vento em estruturas da NBR 6123/1988. Durante a otimização, o algoritmo proposto calcula a força do vento para cada variação na forma da torre e mudança na seção transversal das barras que fazem parte da estrutura. Para analisar a influência da aplicação da metodologia em procedimentos de otimização estrutural foram realizadas otimizações dimensionais e geométricas. Os testes foram realizados em pares para poder comparar resultados entre utilizar a automatização do cálculo da força do vento e o uso de uma força fixa previamente definida. Para o teste, foi utilizada uma torre real de 115 kV e o algoritmo heurístico de otimização escolhido foi o *Backtracking Search Optimization Algorithm* (BSA). Os resultados para as otimizações dimensional e geométrica são apresentados e discutidos, além da análise de desempenho do algoritmo de cálculo da força do vento criado.

Palavras-chave: Força do vento; torres de linhas de transmissão; automatização; otimização estrutural.

ABSTRACT

This paper presents an automated method of calculating the wind load for transmission line towers in optimization procedures. This proposal follows the NBR 6123/1988 that regulates the determination of the wind forces applied in structures. During optimization, the proposed algorithm calculates the wind force for each variation in the tower shape and change in cross section of bars. To analyze the influence of the proposed methodology in structural optimization, size and size and shape optimizations were carried out. These tests were performed in pairs to compare results between the use of wind force calculation and the use of a previously defined fixed force. For the tests, a 115 kV tower were used and the heuristic optimization algorithm Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA) was chosen. The results for size and size and shape optimizations are presented and discussed.

Keywords: wind load; transmission line towers; automation; structural optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo iterativo de cálculo da força do vento para torres de linha de transmissão	28
Figura 2 – Etapas do algoritmo proposto para cálculo da força do vento	31
Figura 3 – Exemplos de perfis da velocidade do vento	33
Figura 4 – Influência da divisão dos painéis no perfil da velocidade do vento	34
Figura 5 – Exemplo de projeção do painel da face de uma torre	35
Figura 6 – Exemplo do cálculo da área bruta do painel de uma torre	36
Figura 7- Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular	37
Figura 8 – Formas de aplicação da força do vento nos painéis de uma torre	41
Figura 9 - Pseudocódigo geral BSA.....	44
Figura 10 – Seção transversal típica.....	45
Figura 11 - Vistas e cortes da torre e dimensão dos painéis	46
Figura 12 - Caso de carregamento	48
Figura 13 - Curva de convergência para a otimização dimensional com força fixa e variável	54
Figura 14 – Nós tomados como variáveis na otimização de geometria.....	58
Figura 15 - Curva de convergência para a otimização dimensional e geométrica com força fixa e variável	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Nomenclatura dos grupos de barras com suas dimensões originais.....	51
Quadro 2 - Propriedades geométricas dos perfis disponíveis....	52
Quadro 3 – Resultados da otimização dimensional para força fixa e variável	53
Quadro 4 – Força do vento final por painel do resultado com menor peso na otimização dimensional com força fixa e variável	55
Quadro 5 – Perfis dos resultados com menor peso na otimização dimensional com força fixa e variável	56
Quadro 6 - Resultados da otimização dimensional e geométrica para força fixa e variável	60
Quadro 7 - Força do vento final por painel do resultado com menor peso na otimização dimensional e geométrica com força fixa e variável.....	61
Quadro 8 - Perfis do resultado com menor peso na otimização dimensional e geométrica com força fixa e variável.....	62

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.2 OBJETIVOS	21
1.1.1 Objetivo Geral	21
1.1.2 Objetivos Específicos	21
1.3 METODOLOGIA	22
2. REVISÃO DE LITERATURA	23
3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	27
4. ALGORITMO PARA CÁLCULO DA FORÇA DO VENTO	31
4.1 ENTRADAS	32
4.2 PAINÉIS	32
4.3 ÁREAS	34
4.4 COEFICIENTES	36
4.5 FORÇAS	39
5. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	43
6. ESTUDO DE CASO	44
6.1 PROPRIEDADES	44
6.2 CASOS DE CARREGAMENTO	47
6.3 FORÇA DO VENTO	48
6.4 ANÁLISE ESTRUTURAL	49
6.5 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO	50
6.6 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL	50
6.7 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA	57
7. DISCUSSÕES	63

8. CONCLUSÃO	65
9. TRABALHOS FUTUROS	66
10. REFERENCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

O aumento da necessidade humana em usufruir de recursos e os avanços da tecnologia, provocaram o crescimento acelerado da produção e transmissão de energia elétrica. Para suprir a demanda cada vez maior, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, s. d.) a extensão de linhas de transmissão no Brasil era de 63.981 km em 1998, no entanto, esse número passou para 72.662 km em 2002 e alcançou 98.500 km em 2011. Essas linhas são compostas de torres metálicas treliçadas que suportam cabos condutores. Logo, por possuírem caráter primordial na distribuição de energia, bem como, por serem estruturas repetitivas ao longo de uma linha de transmissão, as torres tornam-se importantes objetos de estudo.

Em um projeto de uma torre, assim como em qualquer outro projeto na área da engenharia, existe o consumo em demasia de recursos financeiros, humano e de materiais (ARORA, 2004). O autor ainda afirma que com a evolução da computação, um enorme número de cálculos pode ser realizado em um pequeno espaço de tempo, o que permite atualmente projetar estruturas otimizadas com enorme rapidez. O mesmo continua sua citação, afirmando que a otimização de estruturas veem evoluindo durante as últimas décadas e, por consequência diversas metodologias numéricas, surgiram para suprir os problemas existentes na engenharia.

ARORA (2004) define o problema de otimização em quatro elementos básicos, sendo eles: função objetivo, variáveis de projeto, espaço do projeto e restrições. Nesse sentido, para desenvolver a otimização de qualquer estrutura é necessário definir uma função objetivo, ou seja, o que deseja-se melhorar no projeto. De acordo com o autor, esta função é associada aos parâmetros do sistema, a qual será minimizada ou maximizada durante o processo. No caso das torres de linhas de transmissão a principal necessidade dos projetistas é diminuir o peso final da estrutura pois, como afirmam Shea e Smith (2006), as torres representam de 30 a 40% do custo total de uma linha de transmissão, além disso, os custos de transporte, construção, manutenção e fundação estão diretamente ligados ao peso final das estruturas.

A análise dos trabalhos sobre otimização de torres de transmissão, como realizado por Miguel et al. (2012), Souza et al. (2014) entre outros, revela as seguintes variáveis de projeto nesse tipo de estrutura:

- Área das seções transversais dos membros da estrutura;
- Geometria da estrutura, que consiste na mudança na coordenada dos nós da estrutura;
- Topologia, que consiste em rearranjar a posição em que as barras se posicionam em relação aos nós existentes.

Além das variáveis e da função objetivo, outro fator importante em uma conjuntura de otimização são as restrições, as quais possuem a função de estabelecer as exigências para que a solução final seja considerada viável. Em torres de linhas de transmissão, a relação resistência das barras e esforços aplicados nas mesmas, são uma das principais restrições do problema. Estes esforços podem ser provenientes de inúmeros tipos de carregamentos, dentre eles, o mais importante é a ação do vento. De acordo com Li e Bai (2006), torres de transmissão são estruturas leves, flexíveis e sensíveis a cargas causadas pelo vento. Ainda relacionado ao mesmo tema, Zhang et. al (2013), afirmam que 60% dos acidentes causados em torres são consequência da sobrecarga de vento sofrida pela estrutura. Contudo, é visível a importância da correta aferição da força do vento quando se deseja projetar uma torre para linhas de transmissão.

No Brasil, a NBR 6123/1988, normatiza o cálculo da força do vento em estruturas. A mesma determina que a força do vento em estruturas reticuladas, como exemplo as torres, depende diretamente da área da face das barras que a constitui. Conforme apresentado anteriormente, as áreas dos elementos de uma treliça são uma das variáveis da otimização, logo, durante o processo de interação, a força do vento varia de acordo com a mudança das áreas.

Entretanto, nos estudos realizados por Guo e Li (2011), Souza et al. (2014) entre outros que serão citados posteriormente, a força do vento utilizada na otimização de torres de linhas de transmissão é mantida fixa durante todo o processo, ou seja, os esforços calculados para cada elemento não são os reais para as estruturas geradas na otimização. Com o intuito de analisar a influência da atualização da força do vento em um contexto de otimização de torres, este trabalho irá propor uma

metodologia para o cálculo automatizado da força do vento a cada ponto de projeto atualizado no processo de otimização.

Como citado anteriormente, diversas são as métodos para a otimização de estruturas. No caso das torres, os principais algoritmos utilizados são os heurísticos, pois estes se adaptam com variáveis contínuas e discretas, bem como, com o caráter não linear e não convexo (TORII et. al., 2012).

Segundo Miguel et. al. (2012), as principais vantagens desse tipo de algoritmos são:

- Quando corretamente configurados, não ficam presos em mínimos locais;
- Podem ser aplicados em funções não suaves ou descontínuas;
- Podem fornecer grupos de soluções quase ótimas, ao invés de apenas uma, fornecendo ao projetista uma gama de possibilidades;
- Podem ser facilmente adaptados para resolverem problemas que envolvam variáveis discretas e contínuas.

Para testar a metodologia de cálculo da força do vento, neste trabalho, será utilizado o algoritmo heurístico Backtracking Search Algorithm (BSA), o qual é evolucionário e se baseia no processo de mutação, recombinação e seleção desenvolvido por Civicioglu (2013).

1.2 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um método automatizado de cálculo da força do vento para estruturas de torres de linhas de transmissão, o qual seja compatível com os procedimentos de otimização dimensional, geométrica e topológica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Tornar o método de cálculo da força do vento o mais próximo possível para aplicação prática industrial;
- Otimizar as dimensões e geometrias de uma torre de transmissão, considerando o cálculo e atualização da força do vento;

- Analisar o comportamento da força do vento durante o procedimento de otimização;
- Comparar os resultados da otimização, que considera a variação da força do vento, à outros em que a carga de vento é mantida fixa.

1.3 METODOLOGIA

Inicialmente, a realização da revisão bibliográfica, revelou a ausência do cálculo da força do vento a cada interação em otimizações de torres de transmissão de energia. Identificando essa ausência como uma oportunidade, o trabalho foi idealizado e os objetivos foram determinados.

O passo seguinte foi a escolha do projeto de uma torre em que as cargas de vento fossem conhecidas, fato esse importante para a realização dos testes e para a aferição do algoritmo em criação. Com o intuito de melhorar a visualização tridimensional, a torre foi desenhada no programa *Google SketchUp* e descrita matematicamente na plataforma *MatLab*, posteriormente.

Na mesma plataforma, o algoritmo para automatizar o cálculo da força do vento foi criado seguindo para isso os procedimentos descritos na NBR 6123/1988. Os principais passos propostos pelo algoritmo são: escolha da face em que a força será aplicada, projeção das barras dessa face e divisão da mesma em painéis, cálculo da área bruta e líquida de cada painel, cálculo da força do vento por painel e, por fim, distribuição da força nos nós desejados. A descrição detalhada pode ser analisada na Figura 2.

Ainda no software *MatLab*, a análise estrutural e todos os cálculos subsequentes necessários, foram realizados. O algoritmo BSA foi o escolhido para variar as seções transversais e a geometria da estrutura. Sendo que, a otimização de dimensões e de dimensão e geometria, foram realizadas separadamente e, testes com a força do vento fixa e variável, foram efetuados para ambos os casos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A recorrência, nas últimas décadas, do tema de otimização em um contexto acadêmico de estruturas treliçadas, demonstra sua importância e abrangência. Todavia, quando se tratam de problemas com restrições mais rigorosas impostas por normas de segurança, aplicadas em estruturas mais complexas como torres de linhas de transmissão, a quantidade de trabalhos publicados diminui consideravelmente.

Aspectos como a otimização das áreas das barras da estrutura (dimensional), otimização geométrica e topológica são encontrados nos trabalhos publicados sobre torres de transmissão. Em todos esses casos de otimização, a força do vento deveria variar a cada mudança dimensional, geométrica e topológica. Cabe ressaltar, entretanto, que isso não é considerado na maioria dos trabalhos publicados, os quais mantêm a mesma força do vento durante todo o processo.

Exemplificando as afirmações acima podem-se citar alguns trabalhos realizados em otimização de estruturas de torres. Noilublao e Bureerat (2011), apresenta um método para otimizar o peso, a geometria e a topologia de uma torre de transmissão de 50 metros de altura sujeita a três casos de carregamento com cargas estáticas e dinâmicas, dentre os quais, nenhum leva em consideração a força do vento. Da mesma maneira, Souza et. al (2014) consideraram oito casos de carregamento, os quais não mencionam a utilização da força do vento. Eles empregaram a otimização de dimensão de barras e topologia em uma torre genérica, utilizando para isso o algoritmo FireFly (FA).

Rao (1995) apresenta um método para otimizar o peso e a geometria de uma torre de transmissão submetida a múltiplos casos de carregamentos estáticos. Em seu trabalho, ele menciona a pressão do vento, porém não esclarece como esta foi considerada nos carregamentos. Sivakumar et. al. (2004), estudaram a otimização discreta de áreas de uma torre treliçada submetida a um caso de carregamento. A força do vento utilizada nesse único caso foi considerada constante durante o processo de otimização e o seu cálculo seguiu as normas Indianas.

Outros trabalhos também consideraram a força do vento fixa durante o processo de otimização. Kaveh et. al. (2008), realizaram um estudo em uma torre genérica, na qual foi aplicada otimização de área e geométrica. Neste estudo foram abordados dois casos de carregamento onde a força do vento estava presente. Os autores Nagavinothini e Subramanian (2015) utilizaram casos de carregamento que consideravam a força do vento fixa multiplicada por um fator de segurança para otimizar uma torre com 244 barras. Já os autores Mathkari e Gardoni (2007), apresentaram uma detalhada explicação sobre o cálculo da força do vento aplicada em seu modelo, todavia, não é especificado se esta é considerada fixa ou se os cálculos foram realizados a cada interação da otimização.

Em uma conjuntura de estudos em otimização com ênfase no âmbito acadêmico, os trabalhos referidos acima apresentam excelentes resultados. Entretanto, o enfoque em aplicação industrial é desejável quando se trata de torres de linhas de transmissão. Tanto a viabilidade construtiva e o desempenho em ensaio de protótipo, quanto a atualização do vento durante a otimização, são características indispensáveis para um projeto de torre com objetivo de construção real.

Dos trabalhos mencionados anteriormente, somente o proposto por Souza et. al. (2014) preocupou-se com a aplicação industrial. Em um cenário de otimização voltado para a prática, podem ser citados outros trabalhos. Shea e Smith (2006), por exemplo, estudaram a variação de área, geométrica e topológica de uma torre real de 63,4 metros de altura. Na abordagem, a estrutura real era submetida a três casos de carregamento pelo vento e quinze casos de carregamento devido à neve, contudo, para melhor funcionamento da otimização, foram selecionados sete carregamentos principais divididos em um proveniente do vento e sete de neve. Para tal estudo, vale ressaltar que a força do vento foi mantida fixa durante a otimização.

París et al. (2010) apresentaram um método para otimizar o peso e a geometria de uma torre de linha de transmissão real submetida a quatro casos de carregamento, sendo um deles o vento. A força do vento foi mantida fixa, bem como o método do seu cálculo não foi especificado. Os autores mencionam a presença de barras secundárias na estrutura e ressaltam tanto sua função para restringir a flambagem, quanto a sua relevância no cálculo da força do vento.

Em seu projeto, Guo e Li (2011), consideraram a força do vento fixa e seu cálculo foi realizado a partir do projeto da torre original, a qual era real e de grande porte. A carga do vento foi à única considerada para otimização de áreas, geométrica e topológica. Na mesma linha de raciocínio, París et al. (2012), apresentam a otimização dimensional e de geometria de uma torre real de grande escala utilizando múltiplos casos de carregamento, dentre os quais, um fixando a força do vento.

A análise dos referidos trabalhos realizados em otimização de torres de transmissão demonstra que as otimizações de área, geométrica e topológica estão bem difundidas. Além disso, é possível identificar metodologias distintas para cada uma dessas três frentes de otimização, as quais foram exploradas pelos pesquisadores.

Em geral, os projetos relacionados ao tema em questão, utilizam variadas quantidades de cargas a serem aplicadas na torre e consideram a força do vento como uma dessas cargas. Todavia, a força do vento apresenta-se fixa durante todo processo de otimização, fato este, que não condiz com a realidade, onde a força do vento depende da topologia e geometria da torre, bem como, da área das barras da estrutura.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

As torres de linhas de transmissão são muito sensíveis ao vento, pois desse derivam: forças, momentos fletores e tensão nos cabos (LOREDO-SOUZA E DAVENPORT, 2003). Logo, é possível notar a importância da consideração do vento quando se deseja dimensionar uma torre.

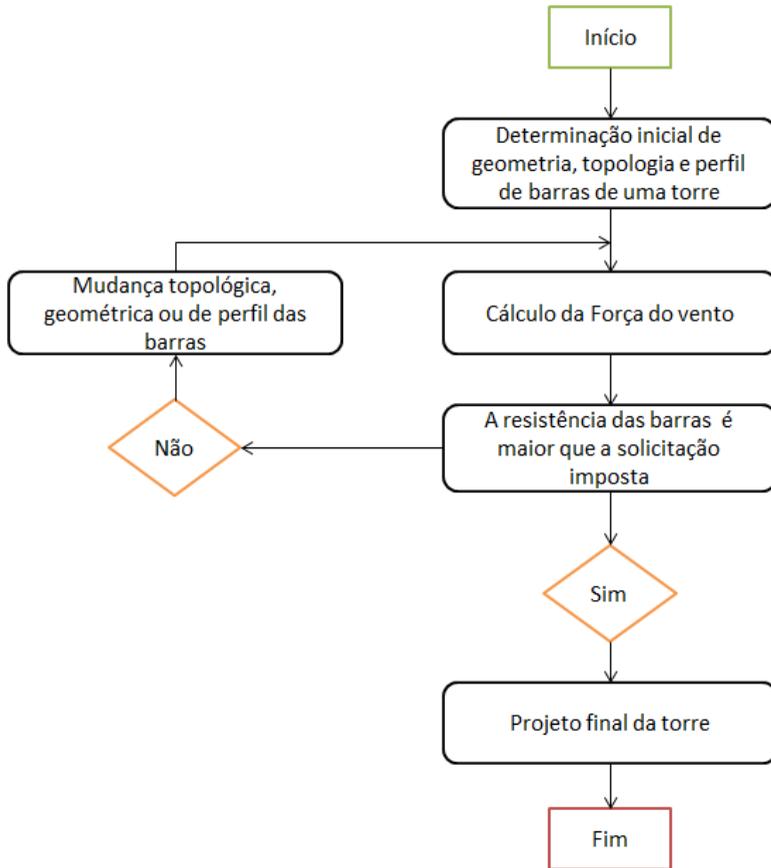
No Brasil, a NBR 6123/1988, estipula diretrizes para regular as forças do vento aplicadas nas torres de transmissão, as quais são enquadradas na seção de torres reticuladas. A norma também propõe a seguinte equação para o cálculo da força do vento:

$$F_a = C_a * q * A_e \quad (1)$$

Onde F_a é força de arrasto devido ao vento em N , C_a é o coeficiente de arrasto, q é a pressão dinâmica do vento em N/m^2 e A_e é a área frontal efetiva de uma das faces da torre, em m^2 .

Pode-se perceber pela Equação 1 que a força do vento aplicada em uma torre depende diretamente da área das barras que formam uma de suas faces. Tal fato torna interativo o processo de dimensionamento de uma torre, o qual de maneira simplificada pode ser descrito na seguinte forma: projeta-se uma torre com determinadas características morfológicas e, a partir deste design, calcula-se a força do vento. Caso a torre não resista a esse carregamento, o projeto deverá sofrer modificações e os passos anteriores deverão ser repetidos, até que o mesmo resista ao carregamento calculado. A Figura 1 exemplifica o processo interativo de cálculo da força do vento.

Figura 1 – Processo iterativo de cálculo da força do vento para torres de linha de transmissão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Na revisão de literatura abordada anteriormente, os estudos baseavam-se em projetos de torres, as quais, quando originalmente projetadas, já haviam passado manualmente pela análise descrita acima. Logo, a carga do vento para a estrutura era conhecida e fixada no início da otimização, sendo mantida deste modo até o final. Todavia, como a força do vento depende das variações dimensional, geométrica e topológica que ocorrem durante a otimização, a metodologia não produz resultados reais. Resumidamente, o que se verificou nos trabalhos analisados é que a força era calculada a partir do projeto original e,

independentemente do formato que a torre assumisse durante a otimização, os esforços atuantes eram sempre determinados a partir da aplicação de uma força fixa.

A ausência da atualização da força do vento pode gerar algumas incertezas, uma vez que, ao final da otimização, a força inicial fixada pode estar superdimensionada, ou seja, poderia acarretar em um projeto final com peso maior. Ou, ainda, a força pode estar subdimensionada, o que resultaria em uma estrutura final com esforços aplicados menores que os reais e, logo, esta não seria confiável.

Com o intuito de minimizar as incertezas e automatizar o processo de determinação da força do vento, este trabalho propõe uma metodologia de cálculo da força do vento, o qual seja compatível com modelos de otimização de torres de transmissão. O objetivo é que o algoritmo proposto respeite os pressupostos da NBR 6123/1988 e que, para qualquer torre criada durante o processo de otimização, os esforços que nela atuem sejam os reais.

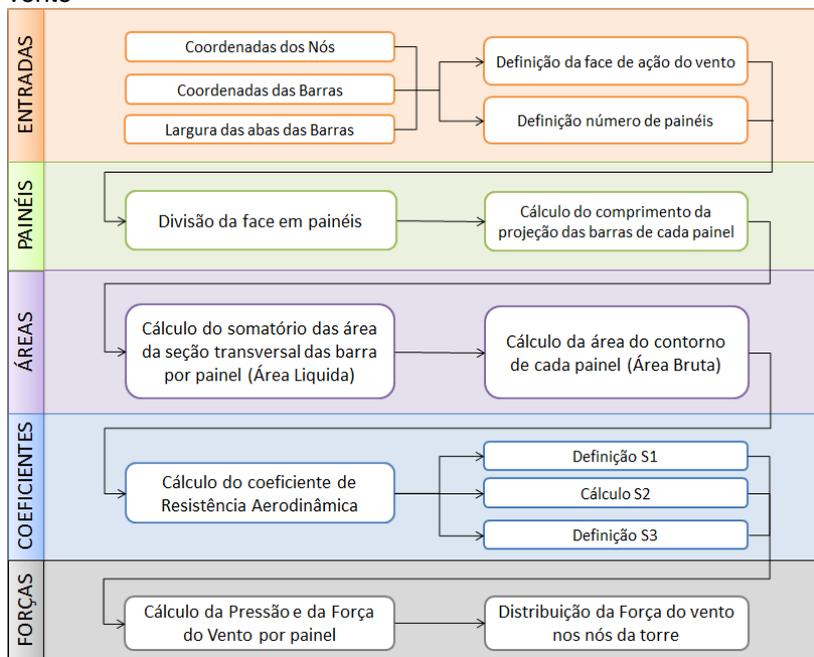
Para testar a metodologia proposta, será realizada a otimização de áreas e geométrica de uma torre de 115 kV, utilizando para isso, o algoritmo BSA. Para a otimização de áreas, o algoritmo varia as seções transversais das barras, a partir de um grupo de perfis disponíveis ($\mathbf{A} \in \mathbb{R}^m$), 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.

4. ALGORITMO PARA CÁLCULO DA FORÇA DO VENTO

A análise do problema citado anteriormente, gerou oportunidade para a criação de um algoritmo para determinação da força do vento em torres de transmissão. O software *MatLab* foi o escolhido para o desenvolvimento, visto que a otimização no algoritmo BSA foi realizada neste mesmo programa.

A Figura 2 exibe as cinco principais etapas e seus desdobramentos, os quais foram seguidos pelo algoritmo para cálculo da força do vento.

Figura 2 – Etapas do algoritmo proposto para cálculo da força do vento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Antes mesmo da criação da metodologia, algumas premissas foram definidas com o objetivo de servirem como guia para todo o processo. São elas:

- Deve-se seguir as determinações impostas pela NBR 6123/1988;

- Criar um algoritmo simples, a fim de não sobrecarregar a otimização, e que atenda qualquer torre com corpo piramidal;
- A quantidade de painéis e os coeficientes necessários devem ser definidos pelo projetista, com o propósito de o produto final ser aplicável em um contexto industrial;
- Ao final deve-se distribuir a força do vento nos nós das extremidades superior e inferior de cada painel, respeitando possíveis restrições estruturais.

4.1 ENTRADAS

Independentemente do modelo da torre, o primeiro passo para que esta possa ser otimizada é descrevê-la matematicamente. Para o cálculo da força do vento é necessário descrever as coordenadas dos nós, assim como, o tipo de perfil de cada barra. Outras duas entradas muito importantes são o número de painéis que a torre será dividida e a escolha da face de atuação da força do vento. Essas duas informações são determinadas pelo projetista no início da otimização e mantêm-se constantes durante todo o processo.

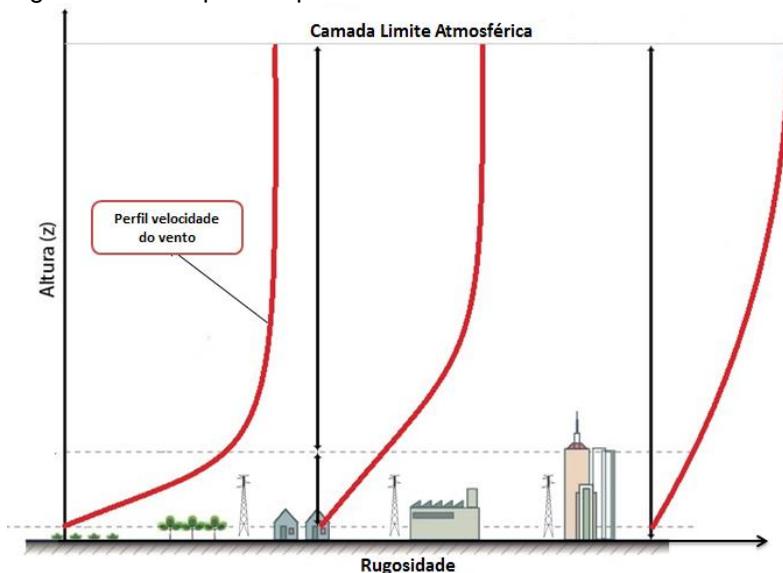
Segundo Blessmann (1990), em edificações com altura superior a dez metros, existe a necessidade de adotar perfil escalonado para encontrar resultados mais precisos de pressão do vento e, por conseguinte, torres com mais de 10 metros necessitam ser divididas em painéis. A quantidade dos painéis está intimamente relacionada com seu tamanho e cabe ao projetista, através de seu conhecimento, decidir qual melhor opção. O algoritmo proposto busca sempre gerar painéis de tamanhos iguais, na quantidade informada pelo projetista.

A escolha da face novamente depende do projetista e existem duas disponíveis para decisão: face longitudinal e transversal ao cabeamento da linha de transmissão. É válido ressaltar que, o método deste trabalho, assume que a força do vento será sempre perpendicular a face selecionada.

4.2 PAINÉIS

Segundo a NBR 6123/1988, a velocidade do vento varia de acordo com a altura acima do terreno, bem como, com a rugosidade do mesmo.

Figura 3 – Exemplos de perfis da velocidade do vento

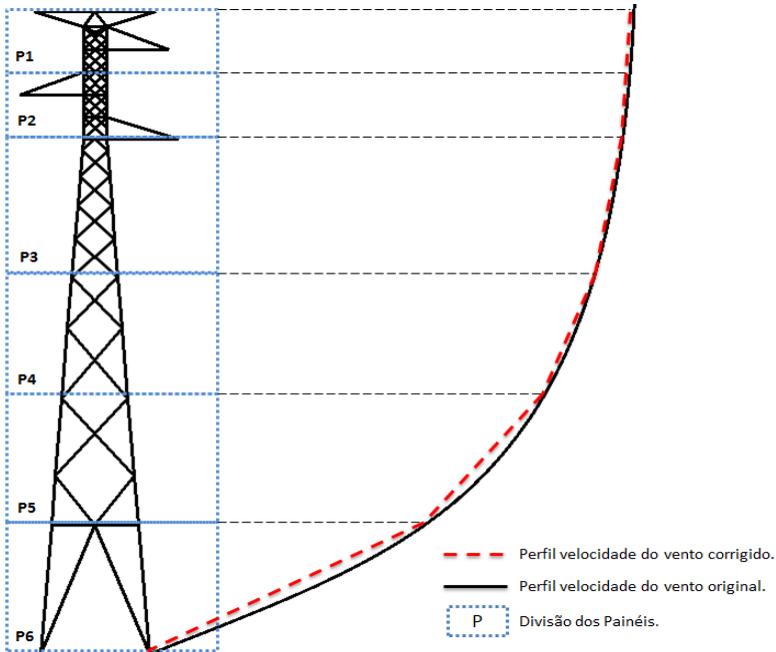


Fonte: Adaptado do Atlas Eólico do Estado da Bahia, 2013.

Na Figura 3 pode-se perceber exemplos de diferentes tipos de perfis da velocidade do vento, os quais, variam de acordo com a rugosidade e altura do terreno. Quando se tratam de torres, a mesma premissa é verdadeira, uma vez que ao longo do eixo z , a velocidade do vento incidente na torre é variável e comporta-se de maneira não linear. Para corrigir essa diferença de velocidade ao longo do comprimento da torre é necessário dividi-la em painéis, sendo que cada painel, representa aproximadamente um segmento de reta do perfil. Essa discretização trabalhar com valores médios menos precisos de força do vento em cada painel, entretanto facilita os cálculos e torna o algoritmo proposto mais leve.

Segundo a metodologia proposta, a Figura 4 simula como é realizada a divisão de painéis em uma torre e como a divisão influi no perfil da velocidade do vento.

Figura 4 – Influência da divisão dos painéis no perfil da velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

O limite superior e inferior de cada painel é limitado em coordenadas coincidentes com as dos nós da torre, ou seja, nessas condições, uma barra jamais será segmentada e sempre pertencerá a dois painéis distintos.

A divisão dos painéis é muito importante para o algoritmo proposto, uma vez que as etapas posteriores, como a determinação das áreas, o cálculo da pressão e força do vento e a distribuição das forças, serão realizadas por painel.

4.3 ÁREAS

Pela Equação 1 é possível averiguar que, a força do vento, depende diretamente do somatório da área da seção transversal das barras que formam os painéis da face conhecidos usualmente como área líquida. A área líquida de um painel pode ser calculada pela Equação 2.

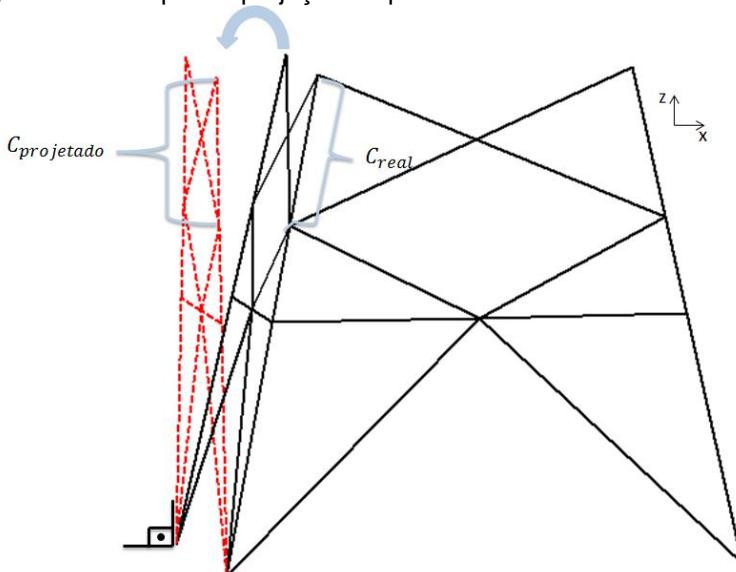
$$\text{Área}_{\text{líquida}} = \sum C_{\text{barra}} * L_{\text{barra}} \quad (2)$$

Onde C_{barra} é o comprimento projetado da barra, em metros e L_{barra} é largura da barra, também em metros. O comprimento é medido pelo algoritmo, enquanto a largura, é uma característica do perfil e sua informação provém do fabricante. Ressalta-se que os tipos de perfis são uma das variáveis da otimização.

De acordo com a NBR 6123/1988, o comprimento das barras deve ser medido através da projeção ortogonal de uma das faces da torre sobre um plano paralelo a esta face. Como as torres de linhas de transmissão possuem geralmente uma parte de seu tronco inclinado em relação ao eixo de sua altura z , é necessário que esse tronco inclinado, seja projetado até um plano paralelo ao eixo z .

A Figura 5 demonstra uma simulação de como a metodologia proposta é capaz de projetar um painel de uma torre de transmissão, onde C_{real} e $C_{\text{projetado}}$, são os comprimentos reais e projetados da barra, respectivamente.

Figura 5 – Exemplo de projeção do painel da face de uma torre



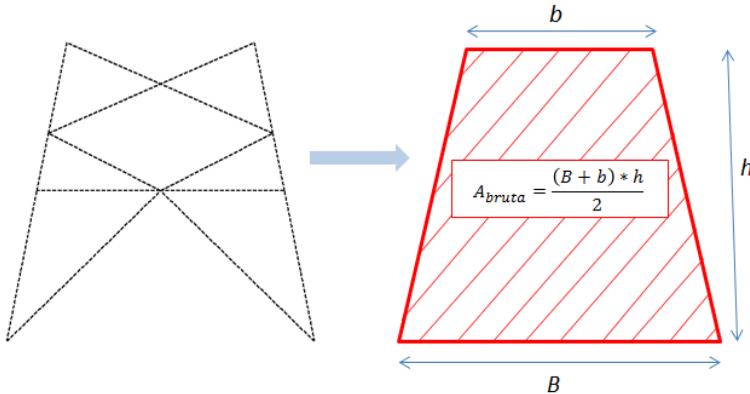
Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Caso a torre possua uma parte de seu tronco reto, ou seja, paralelo ao eixo z, o comprimento utilizado será o real, dado que:

$$C_{real} = C_{projetado}$$

Outra medida de área importante para a determinação da força do vento é a área bruta, esta que, será utilizada para determinação do coeficiente de resistência aerodinâmica, o qual será explicado nos próximos tópicos. De acordo com a NBR 6123/1988, a área bruta equivale à área da figura geométrica formada pelo contorno do painel. Como essa medida depende do formato do painel, o algoritmo proposto reconhece essa forma e realiza os cálculos necessários. Um exemplo deste cálculo pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Exemplo do cálculo da área bruta do painel de uma torre



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Dentro de um contexto de otimização geométrica, a área bruta varia a cada interação, visto que a forma do painel depende da geometria que a torre assumirá no decorrer do processo.

4.4 COEFICIENTES

O principal coeficiente para a definição da força do vento em torres de linhas de transmissão é o coeficiente de resistência aerodinâmica, também conhecido como coeficiente de arrasto. De acordo com Holmes (2014), o coeficiente de arrasto é um número adimensional, o qual representa a resistência de um corpo em um meio fluido. Em um contexto de torres com

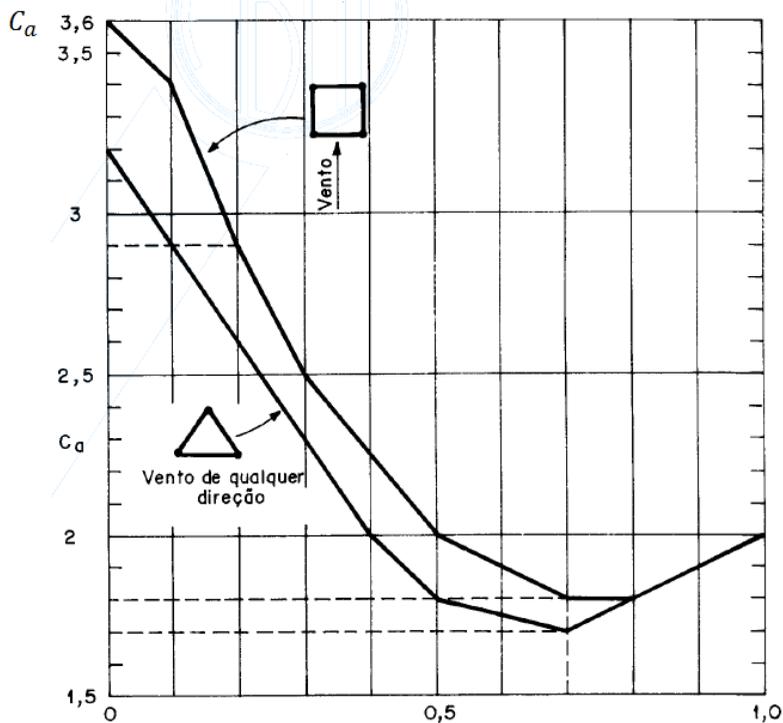
treliçamento, o mesmo autor afirma que o coeficiente aerodinâmico depende do índice de vazios da estrutura, ou seja, da quantidade presente de vazios em área em uma face da torre. A NBR 6123/1988 define com outras palavras e indica que o coeficiente de arrasto depende do índice de área exposta (ϕ), propondo a seguinte fórmula para cálculo:

$$\phi_{\text{painel}} = \frac{A_{\text{liquida}}}{A_{\text{bruta}}} \quad (3)$$

Onde A_{liquida} e A_{bruta} são definidas como área líquida e bruta de um mesmo painel, respectivamente, ambas medidas em m^2 .

O gráfico demonstrado na Figura 7, extraído da NBR 6123/1988, é utilizado para determinar o coeficiente de arrasto (C_a) em estruturas reticuladas com vento perpendicular a face, onde de um ϕ calculado, um C_a respectivo é definido. Na metodologia proposta, a mesma figura foi descrita matematicamente com o objetivo de que a cada interação da otimização, novos coeficientes de arrasto fossem encontrados.

Figura 7- Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular



Ø
 Fonte: NBR 6123, 1988.

Outros três coeficientes são utilizados para cálculo da força do vento, conforme a NBR 6123/1988, sendo estes descritos a seguir:

- S_1 : é o fator topográfico, o qual leva em consideração as variações do relevo do terreno;
- S_2 : considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação;
- S_3 : é o fator estatístico, o qual considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

As tabelas com valores de S_1 e S_3 podem ser encontradas na NBR 6123/1988. Esses dois fatores são escolhidos pelo projetista no início do processo e se mantêm fixos durante todo o procedimento de otimização.

O coeficiente S_2 é definido pela Equação 4 e é responsável por corrigir o perfil de velocidade atuante em uma estrutura, visto que este, depende além de outros fatores, da altura média do painel.

$$S_2 = b * F_r * (z/10)^p \quad (4)$$

Onde b , p e F_r são parâmetros meteorológicos, os quais podem ser encontrados na NBR 6123/1988. A variável z , no entanto, é a altura média de cada painel da torre de transmissão. É válido destacar que o cálculo do coeficiente S_2 acontece a cada interação dentro da otimização.

4.5 FORÇAS

Como foi mencionado em tópicos anteriores, por meio da Equação 1, a força do vento depende diretamente do coeficiente de arrasto, da área líquida e da pressão dinâmica do vento.

Segundo a NBR 1623/1988, a pressão dinâmica do vento (q) é correlata à velocidade característica (V_k), em condições normais de temperatura e pressão. O autor Holmes (2014) completa afirmando que a pressão dinâmica do vento depende da altura na qual a velocidade característica é medida.

As Equações 5 e 6, mensuram a pressão dinâmica e a velocidade característica do vento, respectivamente.

$$q = \frac{1}{2} * \rho * V_k^2 \quad (5)$$

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (6)$$

Onde ρ é a densidade do ar, com valor fixo de 1,2922 kg.m³. Enquanto a definição de V_0 , em m/s, é citada pela norma como velocidade básica do vento, a qual equivale à medida de uma rajada de 3 segundos, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano. O valor de V_0 é definido pelo projetista no momento inicial da otimização e, o mesmo, permanece constante. Os valores padrões para este parâmetro podem ser identificados no mapa das isopletras, incluso na NBR 6123/1988.

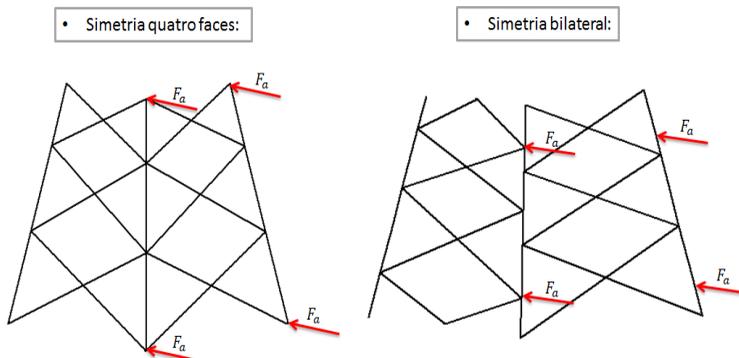
Uma vez que os parâmetros para o cálculo da força do vento foram definidos, a sua determinação pode ser feita por meio da aplicação direta da Equação 1. Os valores de força encontrados pelo algoritmo são particulares para cada painel e estão inicialmente aplicados nos seus centros geométricos. Como se deseja criar uma metodologia com aplicação industrial é fundamental redistribuir as forças dentro de cada painel, exposto que, para a realização de testes em protótipos em escala real, é necessário que os pontos de aplicação sejam nos nós da torre.

Para este trabalho, a força do vento será sempre dividida nos nós das extremidades superior e inferior dos painéis. Tanto da face a barlavento quanto da face a sotavento. Como os nós das extremidades dos painéis são sempre coincidentes à dois painéis centrais quaisquer, a sobreposição de esforços será considerada. Entretanto, esta escolha é plausível apenas quando se tratam de torres com simetria nas quatro faces, pois os nós de aplicação da carga de vento são coincidentes entre as faces perpendiculares.

Em estruturas com simetria bilateral, onde as diagonais das faces transversais e longitudinais são distintas, os nós das extremidades dos painéis não são coincidentes. Por consequência, caso a força do vento seja aplicada nesses nós, haverá instabilidade nas barras da face perpendicular. Para que isso não ocorra, o algoritmo reconhece a probabilidade de instabilidade e, aplica a força em pontos considerados estáveis.

A Figura 8 apresenta como são aplicadas as cargas de vento em painéis de torres com simetria nas quatro faces e bilateral.

Figura 8 – Formas de aplicação da força do vento nos painéis de uma torre



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

5. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Algoritmos de otimização são geralmente iterativos, ou seja, eles começam com um valor inicial \mathbf{d}_0 da variável \mathbf{d} e gera uma sequência de pontos $\{\mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_n\}$, as quais supostamente convergem para a solução do problema de otimização. A estratégia usada para passar de um ponto para o outro é que distingue os diferentes tipos de algoritmos de otimização. A maioria das estratégias propostas na literatura empregam os valores da função objetivo, restrições e também a primeira e segunda derivadas destas funções. Alguns algoritmos acumulam a informação coletada durante as interações, enquanto outros somente utilizam a última informação computada obtida pelo ponto presente (LOPEZ E BECK, 2013). Os mesmos autores afirmam que os algoritmos são classificados de acordo com as informações que eles necessitam, segue a classificação:

- Métodos que utilizam somente a função objetivo e as restrições. Por exemplo: Algoritmos genéticos padrões;
- Métodos de primeira ordem, os quais utilizam a derivada da função objetivo e restrições. Por exemplo: Método do gradiente e método da penalidade;
- Métodos de segunda ordem, os quais utilizam a segunda derivada da função. Por exemplo: Método de Newton.

De acordo com Lopez e Beck (2013), os algoritmos podem também ser classificados como:

- Local: aqueles algoritmos que convergem para um mínimo local;
- Global: aqueles algoritmos que são capazes de convergir para um mínimo global.

Muitos são os métodos locais e globais existentes na literatura, entre os métodos locais mais populares pode-se citar: métodos de Newton e método direto. Os globais envolvem geralmente uso de probabilidade, são exemplos de métodos globais: Algoritmo genético e algoritmos de procura aleatória.

O algoritmo de otimização escolhido para realização dos testes neste trabalho foi o *Backtracking search algorithm* (BSA). O algoritmo é evolucionário, iterativo e foi desenvolvido por Civicioglu (2013) com o propósito de ser um minimizador global em problemas de otimização numérica. Segundo o próprio, o BSA possui uma estrutura simples, rápida e capaz de resolver

problemas multimodais, logo, é facilmente adaptável aos diferentes problemas numéricos de otimização.

As características descritas acima e os ótimos resultados encontrados por Souza (2014) em seu estudo utilizando o método BSA, influenciaram para a escolha do mesmo como algoritmo de otimização base deste trabalho.

O BSA possui as seguintes cinco etapas principais para funcionamento: inicialização, seleção-I, mutação, recombinação e seleção-II. A Figura 9 apresenta o pseudocódigo geral do algoritmo BSA.

Figura 9 - 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: Adaptado de CIVICIOGLU, 2013.

Simplificadamente, de acordo com Civicioglu (2013) as cinco etapas do BSA, podem ser descritas como:

- I. *Inicialização*: a população inicial do BSA é definida;
- II. *Seleção-I*: a população histórica é determinada e é empregada para calcular a direção da busca;
- III. *Mutação*: o método de mutação do algoritmo BSA constrói a forma inicial da população experimental, *mutante*;
- IV. *Recombinação*: a população experimental gerada na etapa anterior chamada de *mutante*, nesta etapa é recombinada e assume sua forma final;
- V. *Seleção-II*: nesta etapa existe a comparação entre os melhores indivíduos de uma população, para que se possa decidir qual o valor do mínimo global atual.

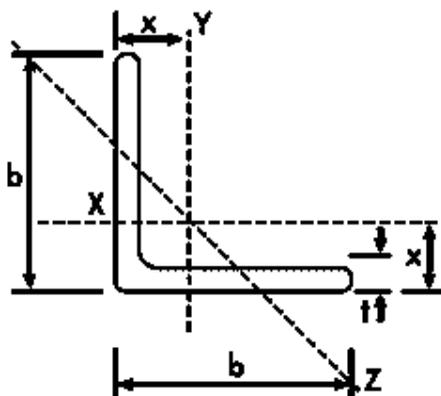
6. ESTUDO DE CASO

6.1 PROPRIEDADES

Para a realização dos exemplos numéricos de otimização, foi considerada como base dos experimentos, uma torre real de linha de alta tensão de 115 kV com projeto usual.

Os perfis da torre são do tipo cantoneira produzidas em aço ASTM A572 GRADE 50, com tensão de escoamento de 344,70 MPa. A Figura 10 apresenta uma seção transversal típica de cantoneira.

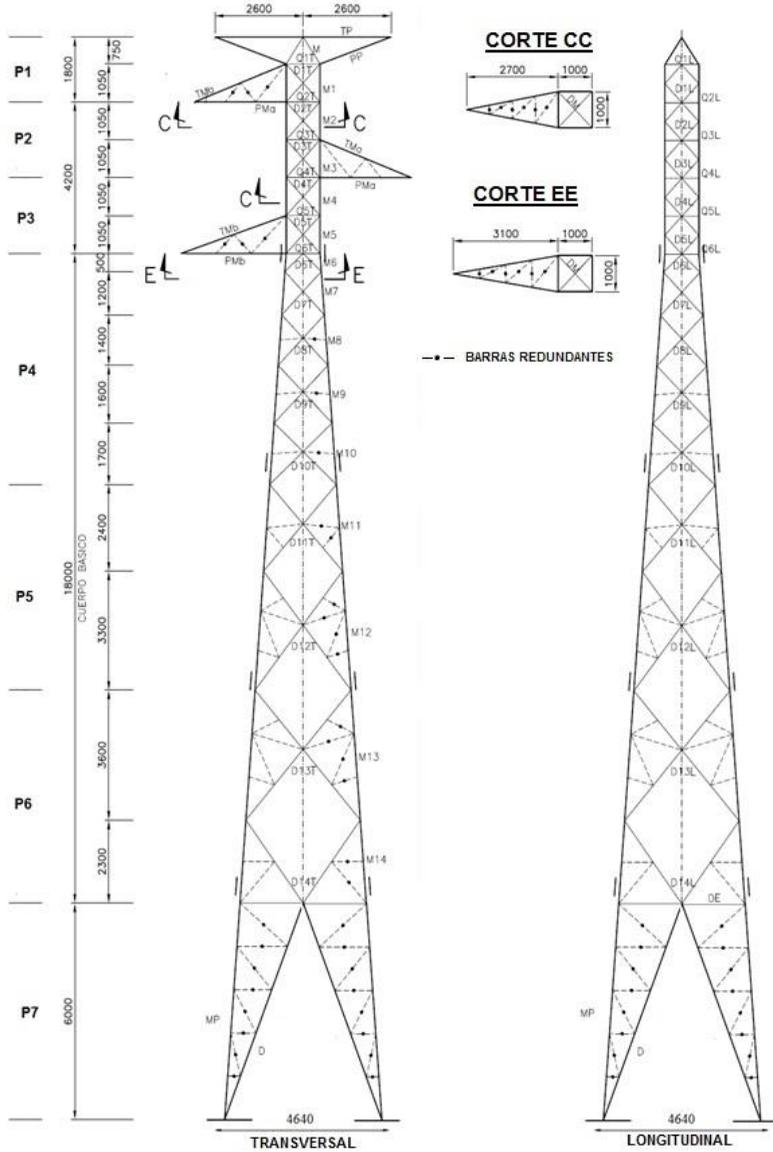
Figura 10 – Seção transversal típica



Fonte: Catálogo GERDAU de barras e perfis, 2009

A Figura 11 apresenta os cortes e as vistas da torre, além das dimensões dos painéis.

Figura 11 - Vistas e cortes da torre e dimensão dos painéis



Fonte: Projeto padrão de torre de 115 kV, 2007.

6.2 CASOS DE CARREGAMENTO

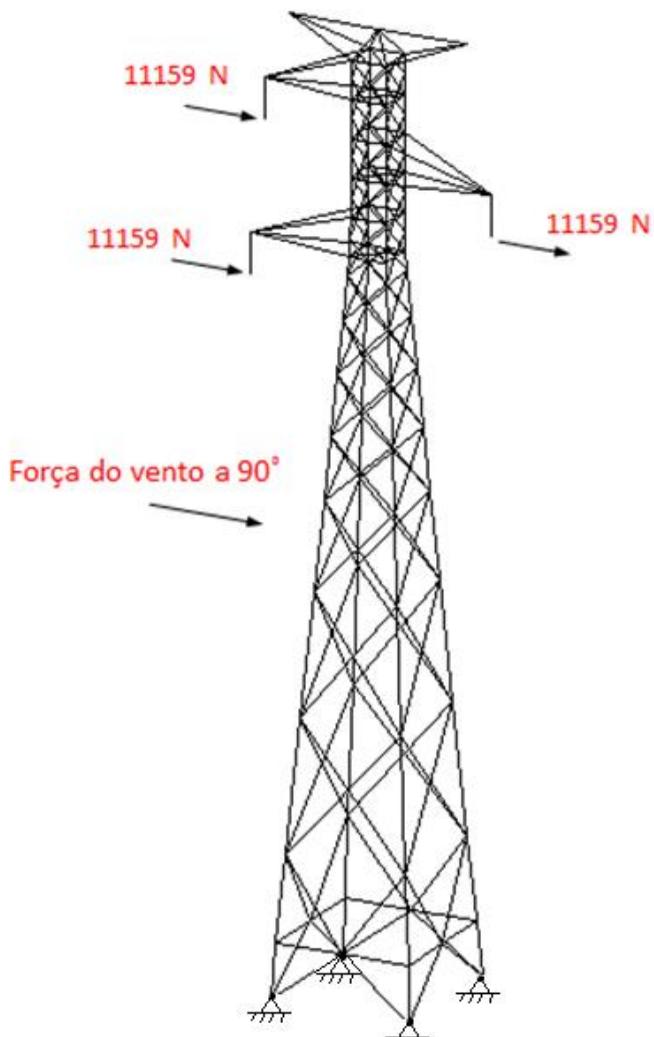
Para obter resultados que traduzam fielmente a influência da atualização da força do vento em um contexto de otimização, somente uma hipótese de carregamento foi considerada. Esta hipótese consiste na força do vento aplicada a 90° da face longitudinal da torre em conjunto com a força do vento imposta nos cabos.

Os resultados das otimizações alcançados neste trabalho não foram comparados com o peso da torre original, visto que esta, foi calculada considerando 4 casos de carregamento. Ao contrário do que foi realizado, por exemplo, nos estudos de Guo e Li (2011) que consideraram somente a força do vento e, ao final, compararam os resultados com a torre original, a qual havia sido dimensionada para mais casos de carregamento.

A carga de vento aplicada nos cabos é proveniente do projeto final da torre existente, a qual foi considerada fixa com valor de 11.159 N, independente do caso de otimização estudado. E, a força do vento no corpo da torre, foi aplicada na face com maior área líquida, ou seja, o pior caso.

Durante o procedimento de otimização, a estrutura da torre é calculada para o caso de carregamento, sendo aceitos apenas os dados que respeitem as restrições da hipótese. A Figura 12 apresenta o caso de carregamento a qual a estrutura foi submetida.

Figura 12 - Caso de carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

6.3 FORÇA DO VENTO

No projeto da torre original, o cálculo da força do vento foi realizado fixando alguns parâmetros, sendo estes:

- Coeficiente de arrasto fixo, $C_a=2$;
- Pressão dinâmica do vento fixa, $q=175 \text{ Kgf/m}^2$;
- Painéis, seus limites são apresentados na Figura 11.

Para que a comparação da otimização entre força do vento fixa e variável fosse justa, os três parâmetros descritos foram igualmente adotados, permitindo que a metodologia proposta calculasse a força do vento a cada interação do processo de otimização.

Os valores de força do vento por painel da torre original, os quais foram utilizados na otimização com força fixa são apresentados na Tabela 4.

6.4 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para realização da análise estrutural, foi escolhido o método da rigidez (SUSSEKIND, 1991; SORIANO, 2005), o qual considera as barras como elementos de treliça espacial, onde todos os nós possuem três graus de liberdade de translação.

Como a torre não se constitui de tetraedros perfeitos, ou seja, ela não é construída como uma treliça espacial é primordial corrigir os nós planos que podem ocorrer em alguns locais do modelo. Existem duas soluções para a estabilização destes nós podendo ocorrer por meio da modelagem de alguns elementos da estrutura como elementos de pórtico espacial ou pela introdução de barras fictícias. Neste trabalho, foram adotadas barras fictícias como caminho e, para que estas barras não influenciassem significativamente nos esforços e deslocamentos calculados, suas seções transversais foram consideradas praticamente nulas.

Para completar o modelo, além das barras reais e fictícias, foram utilizadas barras de contraventamento ou barras redundantes, as quais não possuem função estrutural. Estas são destinadas para redução do comprimento de flambagem de barras esbeltas e fazem parte do cálculo da área líquida para determinação da força do vento.

A dimensão das barras redundantes foi mantida fixa e o seu valor pode ser obtido no Quadro 1, enquanto suas posições são apresentadas na Figura 11, onde estas, estão representadas por linhas pontilhadas com identificação circular preta ao centro.

O modelo final da torre apresentou 294 barras reais, 42 fictícias e 205 barras de contraventamento.

6.5 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Com o objetivo de melhor avaliar a influência da atualização da força do vento em um contexto de otimização, dois estudos foram realizados. O primeiro se refere à otimização de áreas e o segundo à otimização de áreas e geometria. Em ambos os casos, o objetivo é comparar os resultados quando a força do vento é mantida fixa e quando a força do vento é calculada durante a otimização.

Durante o procedimento, não somente o peso das barras reais foi considerado, como também o peso das barras redundantes, visto que estas fazem parte do projeto da estrutura.

6.6 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL

Para a realização da otimização dimensional, é necessário definir quais barras serão tomadas como variáveis de projeto e de que forma estas serão agrupadas. É pertinente combinar as barras em grupos, uma vez que, quanto maior o número de variáveis e quanto maior a abrangência das mesmas, mais possibilidades de combinações serão criada. Por consequência, o esforço computacional requerido para a otimização pode tornar todo processo inviável.

As barras devem ser agrupadas em razão de simetria ou para atender exigências construtivas. Neste trabalho, o agrupamento das barras e os perfis usados na estrutura, seguem a do projeto original da torre, onde as barras são divididas em 55 grupos. O Quadro 1 apresenta a nomenclatura dos grupos, bem como, as dimensões originais das cantoneiras utilizadas no projeto da torre.

Quadro 1 – Nomenclatura dos grupos de barras com suas dimensões originais

NOME	Largura e Espessura (mm)	NOME	Largura e Espessura (mm)	NOME	Largura e Espessura (mm)
PP	50 X 50 X 4,0	D9L	45 X 45 X 3,0	D14T	45 X 45 X 3,0
TP	45 X 45 X 3,0	D10L	45 X 45 X 3,0	Q1T	40 X 40 X 3,0
PMa	50 X 50 X 3,0	D11L	50 X 50 X 3,0	Q2T	50 X 50 X 3,0
TMa	40 X 40 X 3,0	D12L	50 X 50 X 3,0	Q3T	40 X 40 X 3,0
PMb	50 X 50 X 4,0	D13L	45 X 45 X 3,0	Q4T	50 X 50 X 3,0
TMb	45 X 45 X 3,0	D14L	50 X 50 X 3,0	Q5T	40 X 40 X 3,0
M	40 X 40 X 3,0	D1T	40 X 40 X 3,0	Q6T	50 X 50 X 3,0
M1-5	50 X 50 X 4,0	D2T	40 X 40 X 3,0	Q1L	40 X 40 X 3,0
M6-10	60 X 60 X 5,0	D3T	40 X 40 X 3,0	Q2L	40 X 40 X 3,0
M11-12	75 X 75 X 5,0	D4T	40 X 40 X 3,0	Q3L	40 X 40 X 3,0
M13-14	75 X 75 X 6,0	D5T	40 X 40 X 3,0	Q4L	40 X 40 X 3,0
D1L	40 X 40 X 3,0	D6T	40 X 40 X 3,0	Q5L	40 X 40 X 3,0
D2L	40 X 40 X 3,0	D7T	40 X 40 X 3,0	Q6L	40 X 40 X 3,0
D3L	40 X 40 X 3,0	D8T	45 X 45 X 3,0	DM2	40 X 40 X 3,0
D4L	40 X 40 X 3,0	D9T	45 X 45 X 3,0	DE	50 X 50 X 3,0
D5L	40 X 40 X 3,0	D10T	45 X 45 X 3,0	D	45 X 45 X 3,0
D6L	40 X 40 X 3,0	D11T	45 X 45 X 3,0	MP	75 X 75 X 6,0
D7L	45 X 45 X 3,0	D12T	45 X 45 X 3,0	REDUNDANTES	40 X 40 X 3,0
D8L	45 X 45 X 3,0	D13T	40 X 40 X 3,0		

Fonte: Adaptado de Projeto padrão de torre de 115 kV, 2007

Por meio das informações apresentadas, as variáveis de projeto foram definidas como $\mathbf{X}=(A_1, \dots, A_{55})$, sendo A_j , a área de seção transversal para cada grupo.

Como perfis disponíveis, foram selecionadas 15 cantoneiras de abas iguais com seção transversal típica demonstrada na Figura 10 e com propriedades geométricas, conforme exposto no Quadro 2.

Quadro 2 - Propriedades geométricas dos perfis disponíveis

b	Peso Nominal	t	Área	I_x = I_y	W_x = W_y	r_x = r_y	r_z mín	x
(mm)	(Kg/m)	(mm)	mm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
40,00	1,87	3,00	23,10	3,58	1,24	1,24	0,79	1,11
40,00	2,42	4,00	30,80	4,47	1,55	1,22	0,79	1,15
40,00	3,00	5,00	37,50	5,56	1,97	1,22	0,79	1,18
45,00	2,12	3,00	26,10	5,16	1,58	1,41	0,89	1,23
45,00	2,77	4,00	34,40	6,67	2,07	1,39	0,89	1,28
50,00	2,36	3,00	29,10	7,15	1,96	1,57	0,99	1,35
50,00	3,09	4,00	38,40	9,26	2,57	1,55	0,99	1,40
60,00	3,64	4,00	46,40	16,31	3,75	1,88	1,19	1,65
60,00	4,57	5,00	58,20	19,40	4,45	1,82	1,17	1,64
65,00	3,96	4,00	50,40	20,90	4,42	2,03	1,29	1,77
65,00	4,98	5,00	63,40	24,70	5,20	2,01	1,28	1,84
75,00	5,71	5,00	72,70	38,70	7,06	2,31	1,48	2,02
75,00	6,87	6,00	87,20	45,70	8,40	2,30	1,48	2,05
75,00	7,92	7,00	101,00	52,60	9,73	2,28	1,46	2,09
90,00	8,30	6,00	106,00	80,30	12,20	2,76	1,78	2,41

Fonte: Adaptado de GERDAU, 2009.

Os parâmetros utilizados no algoritmo BSA foram: população P=30 e 4.000 ciclos, resultando em 120.000 chamadas da função objetivo. Esse critério foi definido para ambos os testes, a fim de obter uma comparação justa.

O Quadro 3 apresenta os resultados da otimização de áreas com a força do vento fixa e variável, tal como a média e o desvio padrão. A amostra escolhida foi de 10 rodadas com o propósito de obter um montante de resultados considerável para comparação. Para a força do vento fixa, o melhor resultado

obtido, foi um peso de 1910,36 kg, uma média de 1910,36kg e um desvio padrão de 0,00Kg. Para a otimização com força do vento variável o melhor resultado foi de 1910,36Kg, uma média de 1910,36Kg e um desvio padrão de 0,00Kg.

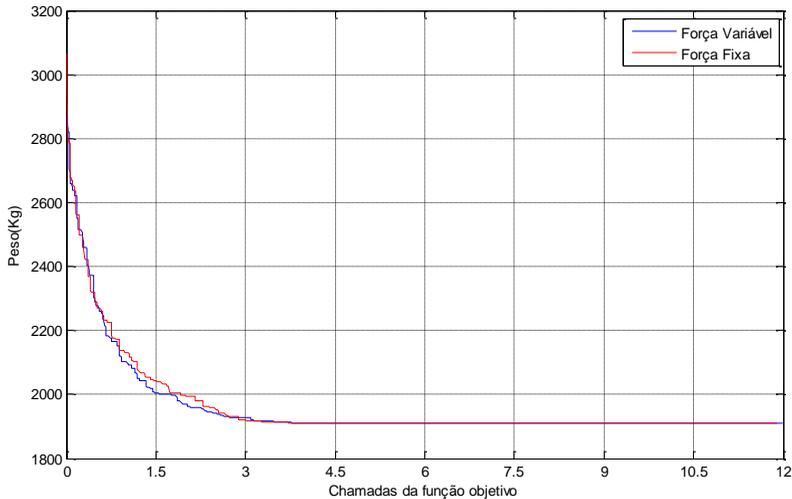
Quadro 3 – Resultados da otimização dimensional para força fixa e variável

FORÇA DO VENTO FIXA		FORÇA DO VENTO VARIÁVEL	
Número da rodada	Peso (Kg)	Número da rodada	Peso (Kg)
1	1910,3609	1	1910,3609
2	1910,3609	2	1910,3609
3	1910,3609	3	1910,3609
4	1910,3609	4	1910,3609
5	1910,3609	5	1910,3609
6	1910,3609	6	1910,3609
7	1910,3609	7	1910,3609
8	1910,3609	8	1910,3609
9	1910,3609	9	1910,3609
10	1910,3609	10	1910,3609
Média (Kg)	1910,3609	Média (Kg)	1910,3609
Desvio Padrão (Kg)	0,0000	Desvio Padrão (Kg)	0,0000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

A Figura 13 apresenta as curvas de convergência típicas dos dois casos apresentados.

Figura 13 - Curva de convergência para a otimização dimensional com força fixa e variável



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

As curvas de convergência demonstradas no gráfico acima, confirmam que, para ambos os casos, a variação da força do vento não muda a forma típica da convergência do algoritmo.

A força final por painel do caso com menor peso nas otimizações com força fixa e variável será apresentada a seguir. O painel 4 (P4) foi o único em que houve um aumento da força do vento (8,11%) em relação a força fixa. A maior diminuição (-12,14%) foi constatada no painel 6 (P6), conforme verifica-se no Quadro 4.

Quadro 4 – Força do vento final por painel do resultado com menor peso na otimização dimensional com força fixa e variável

Painel	(A) Força do vento FIXA (N)	(B) Força do vento VÁRIAVEL (N)	B-A (N)	%
P1	2669,4	2537,50	-132,24	-4,95
P2	1791,68	1719,60	-72,08	-4,02
P3	2975,04	2828,72	-146,32	-4,92
P4	6257,85	6765,19	507,34	8,11
P5	7119,29	6597,11	-522,18	-7,33
P6	7492,88	6583,26	-909,61	-12,14
P7	8401,92	8401,92	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

O Quadro 5 exibe os perfis utilizados no melhor caso dos testes realizados. Percebe-se que tanto para o melhor resultado de força fixa, quanto para força variável, os perfis escolhidos pelo algoritmo foram idênticos.

Quadro 5 – Perfis dos resultados com menor peso na otimização dimensional com força fixa e variável

Grupo	b x b x t (mm)		Grupo	b x b x t (mm)	
	Força Fixa	Força Variável		Força Fixa	Força Variável
PP	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D4T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
TP	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D5T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
PMa	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D6T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
TMa	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D7T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
PMb	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D8T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
TMb	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D9T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
M	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D10T	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0
M1-5	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0	D11T	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0
M6-10	65 X 65 X 5,0	65 X 65 X 5,0	D12T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
M11-12	75 X 75 X 5,0	75 X 75 X 5,0	D13T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
M13-14	75 X 75 X 5,0	75 X 75 X 5,0	D14T	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0
D1L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q1T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D2L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q2T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D3L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q3T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D4L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q4T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D5L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q5T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D6L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q6T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D7L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q1L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D8L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q2L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D9L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q3L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D10L	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0	Q4L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D11L	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0	Q5L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D12L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q6L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D13L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	DM2	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
D14L	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0	DE	50 X 50 X 3,0	50 X 50 X 3,0
D1T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0
D2T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	MP	75 X 75 X 6,0	75 X 75 X 6,0
D3T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Pode-se perceber que os perfis utilizados na maioria dos grupos de barras é o menor disponibilizado (40 x 40 x 3,0). Por este motivo, a força do vento com menor intensidade no caso de otimização com força variável, não causou nenhuma alteração nos resultados, visto que a indisponibilidade de perfis com dimensões menores restringiu o problema.

Os grupos que não estão dimensionados para o menor perfil disponível, são aqueles em que, a relação entre a resistência das barras e os esforços aplicados impossibilita essa escolha ou nos grupos onde a escolha do perfil é restringida pela esbeltez das barras.

6.7 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA

A análise da otimização geométrica foi realizada em conjunto com a otimização de áreas, a qual, foi descrita anteriormente. Nesta otimização, as coordenadas nodais são as variáveis do problema, logo, durante o processo, novos formatos estruturais são criados. Essas variações na estrutura fazem com que os esforços nas barras sejam rearranjados, possibilitando assim o uso de barras com seções transversais menores e, conseqüentemente, permitindo a construção de uma estrutura mais leve.

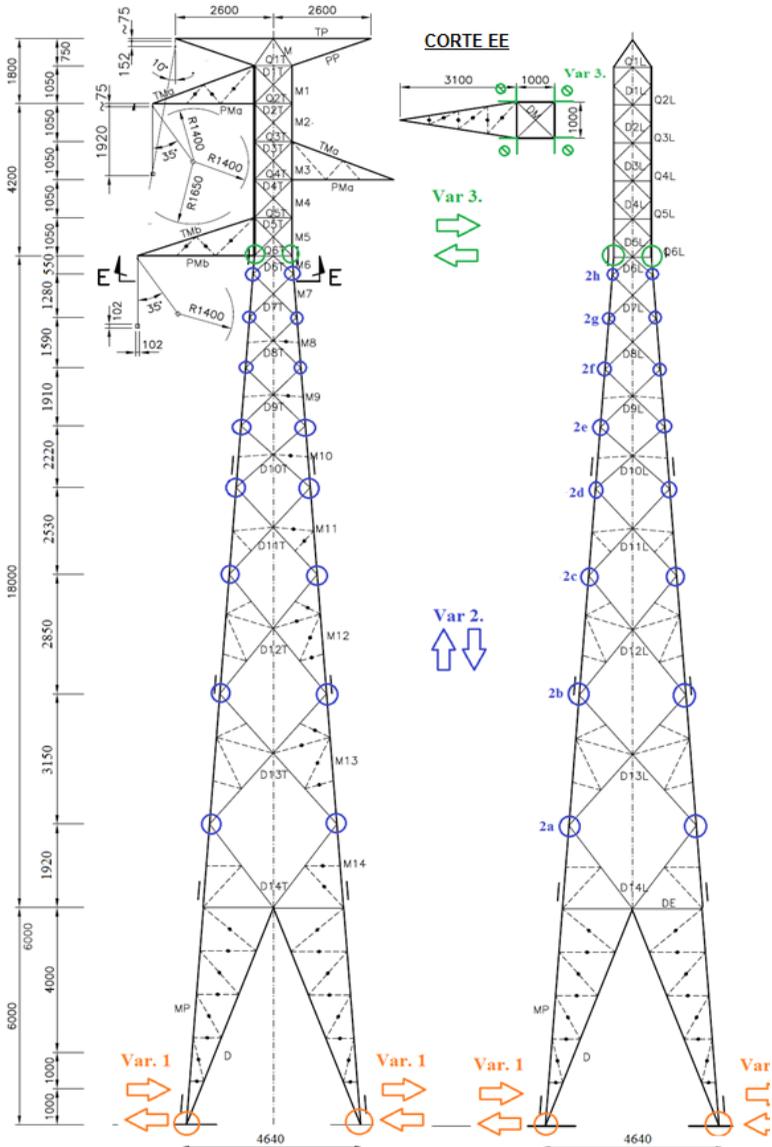
Três variações foram escolhidas para realização dos testes. A variação 1 (Var. 1) é aplicada horizontalmente nos quatro nós da base, enquanto a variação 2 (Var. 2) é imposta verticalmente nos 8 nós que formam os montantes do tronco inclinado. Por fim, a variação 3 (Var. 3) é aplicada horizontalmente nos nós que formam os montantes do tronco reto.

A Partir dessas variações o vetor \mathbf{X} passa a possuir a seguinte forma: $\mathbf{X} = (A_1, \dots, A_{55}, \xi_1, \xi_2, \xi_3)$, no qual ξ_q , são as variações Var. 1, Var. 2 e Var. 3. Nas variações horizontais o valor de ξ_q é a hipotenusa do deslocamento dos nós nos eixos em que é permitida a variação. Por conseqüência, a estrutura aumenta a abertura de forma igual para valores positivos de ξ_q e, para valores negativos, a estrutura diminui a abertura uniformemente.

Nas variações verticais (Var. 2), o valor de ξ_q é imposto na coordenada vertical dos nós que formam os montantes do tronco inclinado, podendo assumir valores positivos quando o nó sobe em relação sua altura inicial e valores negativos quando ocorre o oposto.

A Figura 14 apresenta a posição dessas variações.

Figura 14 – Nós tomados como variáveis na otimização de geometria



Fonte: Adaptação do projeto padrão de torre de 115 kV, 2007.

Os valores das variações máximas e mínimas permitidas em cada um dos três locais foram:

- Variação 1: $\xi_{\min} = -30 \text{ cm}$ e $\xi_{\max} = +30 \text{ cm}$;
- Variação 2 (2a, 2b, 2c): $\xi_{\min} = -40 \text{ cm}$ e $\xi_{\max} = +40 \text{ cm}$;
- Variação 2 (2d, 2e, 2f, 2g, 2h): $\xi_{\min} = -30 \text{ cm}$ e $\xi_{\max} = +30 \text{ cm}$;
- Variação 3: $\xi_{\min} = -10 \text{ cm}$ e $\xi_{\max} = +10 \text{ cm}$.

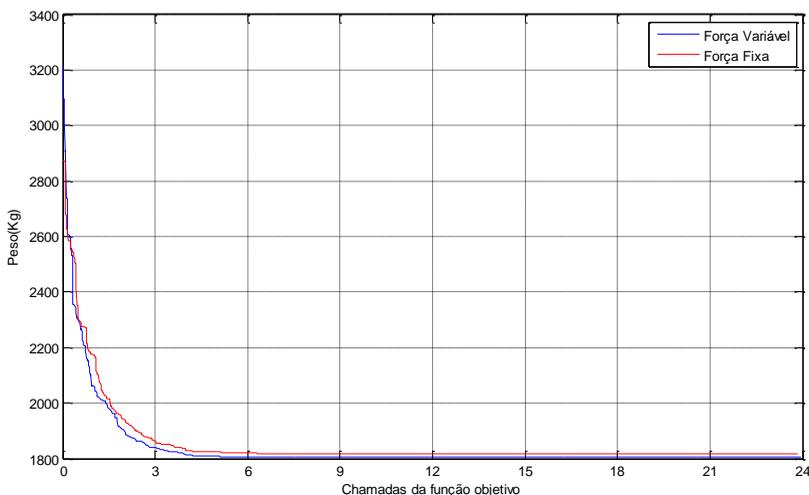
Os valores da variação 3 respeitam as distâncias mínimas necessárias entre a estrutura e os cabos de tensão.

Para a otimização dimensional e geométrica, foram definidos uma população de $P=30$ e 8.000 ciclos, resultando em 240.000 chamadas da função objetivo. Nesse teste, o número de rodadas manteve-se o mesmo do teste anterior.

O melhor resultado encontrado para a otimização de áreas e geometrias com força do vento fixa foi de 1.816,20 Kg, com uma média de 1.823,42 Kg e desvio padrão de 5,79 Kg. Com a força do vento variável, o resultado mínimo foi menor, apresentando um valor de 1.806,65 Kg, com média de 1.812,85 Kg e desvio padrão de 8,37 Kg.

A Figura 15 apresenta a curva de convergência típica para cada um dos casos estudados.

Figura 15 - Curva de convergência para a otimização dimensional e geométrica com força fixa e variável



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

As informações descritas anteriormente, podem ser analisadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Resultados da otimização dimensional e geométrica para força fixa e variável

FORÇA DO VENTO VARIÁVEL		FORÇA DO VENTO FIXA	
Número da rodada	Peso (Kg)	Número da rodada	Peso (Kg)
1	1812,9307	1	1828,6428
2	1828,3811	2	1817,3742
3	1807,1096	3	1828,6667
4	1827,9566	4	1818,8325
5	1807,0129	5	1817,4192
6	1808,5187	6	1816,2085
7	1807,0129	7	1828,6718
8	1806,6542	8	1818,8324
9	1811,4962	9	1828,7605
10	1811,4938	10	1828,4163
Média (Kg)	1812,8567	Média (Kg)	1823,1825
Desvio Padrão (Kg)	8,3755	Desvio Padrão (Kg)	5,7924

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

As curvas de convergência demonstradas no gráfico acima, confirmam que, para ambos os casos, a variação da força do vento não muda a forma típica da convergência do algoritmo.

Os resultados demonstram uma melhora de 0,52% entre o melhor resultado de força fixa e força variável para otimização de área e geometria. Valor este que, em uma única torre pode ser pouco representativo, porém, considerando inúmeras estruturas em uma linha de transmissão, o montante final de economia em aço pode ser interessante para os investidores do projeto.

O Quadro 7 apresenta a força final por painel dos casos com menor peso nas otimizações com força fixa e variável. O painel 4 (P4) foi o único que apresentou um aumento da força do

vento (2,08%) em relação à força original. A maior taxa de diminuição (-18,90%) ocorreu no painel 6 (P6).

Quadro 7 - Força do vento final por painel do resultado com menor peso na otimização dimensional e geométrica com força fixa e variável

Painel	(A) Força do vento FIXA (N)	(B) Força do vento VÁRIÁVEL (N)	B-A (N)	%
P1	2669,74	2655,91	-13,83	-0,52
P2	1791,68	1689,89	-101,79	-5,68
P3	2975,04	2755,14	-219,90	-7,39
P4	6257,85	6387,72	129,87	2,08
P5	7119,29	6342,25	-777,05	-10,91
P6	7492,88	6076,60	-1416,27	-18,90
P7	8401,92	8020,45	-381,47	-4,54

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

As variações geométricas na estrutura acarretaram em diminuições maiores na força do vento comparando com a otimização somente de áreas.

O Quadro 8 apresenta os perfis e as variações geométricas escolhidas pelo algoritmo no melhor resultado em cada caso estudado.

Quadro 8 - Perfis do resultado com menor peso na otimização dimensional e geométrica com força fixa e variável

Grupo	b x b x t (mm)		Grupo	b x b x t (mm)		Grupo	b x b x t (mm)	
	Força Fixa	Força Variável		Força Fixa	Força Variável		Força Fixa	Força Variável
PP	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D12L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q6T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
TP	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D13L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q1L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
PMa	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D14L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q2L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
TMa	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D1T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q3L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
PMb	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D2T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q4L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
TMb	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D3T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q5L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
M	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D4T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q6L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
M1-5	50 X 50 X 3,0	50 X 50 X 3,0	D5T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	DM2	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0
M6-10	65 X 65 X 5,0	65 X 65 X 5,0	D6T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	DE	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0
M11-12	75 X 75 X 5,0	75 X 75 X 5,0	D7T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D	45 X 45 X 3,0	45 X 45 X 3,0
M13-14	75 X 75 X 5,0	75 X 75 X 5,0	D8T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	MP	75 X 75 X 6,0	75 X 75 X 6,0
D1L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D9T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Variações Geométricas (cm)		
D2L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D10T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 1	-0,15	-0,13
D3L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D11T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2a	-0,17	-0,15
D4L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D12T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2b	-0,04	0,00
D5L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D13T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2c	0,00	0,03
D6L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	D14T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2d	-0,1	-0,07
D7L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q1T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2e	0,30	0,3
D8L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q2T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2f	0,30	0,300
D9L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q3T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2g	0,15	0,15
D10L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q4T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 2h	-0,27	-0,3
D11L	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Q5T	40 X 40 X 3,0	40 X 40 X 3,0	Var. 3	-0,07	-0,08

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Novamente, os perfis resultantes na maioria dos grupos foi o menor disponibilizado (40 x 40 x 3,0), porém, neste experimento, as variações geométricas possibilitaram que, com forças menores aplicadas, uma estrutura com peso menor pudesse ser gerada.

7. DISCUSSÕES

A metodologia proposta neste trabalho mostrou-se uma ferramenta muito útil para calcular automaticamente a força do vento dentro de otimizações de torres de transmissão. Além disso, percebeu-se ao longo do seu desenvolvimento que esta possui outra função importante que é a possibilidade de otimizar torres ainda não previamente projetadas.

Nos trabalhos publicados analisados, as torres otimizadas eram projetos finais existentes pois, a partir destas, eram calculadas as cargas de vento que seriam utilizadas na otimização. O algoritmo apresentado no desenvolvimento deste estudo, propicia a oportunidade de otimizar uma torre sem que esta possua um projeto final, visto que pode-se calcular a força do vento dentro da própria otimização, o que por consequência, torna a otimização mais útil, rápida e a aproxima de uma real aplicação prática industrial.

Os resultados obtidos neste trabalho, demonstram uma redução da intensidade da força do vento, quando esta é calculada durante a otimização. Essa diminuição, por conseguinte, reduz também o momento fletor gerado pela carga na base da estrutura. Isso infere que resultados melhores possam ser obtidos em torres de maior dimensão, visto que estas, possuem braços de alavanca maiores.

Outra discussão interessante é sobre as variáveis de projeto. Principalmente ao fazer referência sobre a otimização dimensional, na qual as barras são agrupadas de maneira subjetiva, levando primordialmente em consideração restrições construtivas. Existem inúmeras possibilidades de agrupamentos, as quais podem ser mais eficientes e conduzirem a melhores resultados. Em contrapartida, esses novos arranjos podem vir a ser inviáveis por conta do esforço computacional que pode ser gerado no procedimento de otimização.

Por fim, o algoritmo BSA apresentou excelente comportamento na otimização, tanto para a força fixa quanto para a atualizada, pois suas características são compatíveis com o tipo de problema de estruturas de torres de linha de transmissão. Todavia, existem inúmeros algoritmos heurísticos, os quais podem ser testados, a fim de obter resultados ainda melhores.

8. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido uma metodologia de automatização do cálculo da força do vento compatível com processo de otimização dimensional, geométrica e topológica de torres de linha de transmissão. Para a sua concepção, foram respeitadas as normativas da NBR 6123/1988 e, para testá-la no algoritmo de otimização BSA, a estrutura foi submetida a um caso de carregamento, o qual era composto essencialmente pela força do vento. A otimização foi realizada em pares, a fim de comparar os resultados quando a força do vento era mantida fixa e quando esta era atualizada.

A comparação das curvas de convergência demonstrou que a tendência do algoritmo independe se a força é mantida fixa ou variável durante a otimização. Os resultados da otimização dimensional apontaram que, independentemente da força aplicada na estrutura, o algoritmo de otimização selecionava para a maioria dos grupos de barra, o menor perfil disponibilizado. Logo, a indisponibilidade de perfis com dimensões menores restringiu o problema.

Já na otimização dimensional e geométrica, os melhores resultados encontrados sucederam quando a força era atualizada a cada interação do processo, uma vez que as variações geométricas permitiram que, com forças menores aplicadas, uma estrutura com peso inferior fosse gerada.

A metodologia proposta mostrou-se uma excelente ferramenta para tornar os resultados de otimização de torres de linha de transmissão compatíveis com a aplicação prática industrial, visto que viabiliza o cálculo da força real aplicada na estrutura durante a otimização. Além disso, a metodologia propicia otimizar torres sem que seja necessário um projeto já definido, pois como a força do vento é calculada durante a otimização, não se faz necessária a determinação de uma força fixa inicial proveniente de um projeto já existente.

9. TRABALHOS FUTUROS

Para elaboração de trabalhos futuros são sugeridas as seguintes abordagens:

- Ampliar o algoritmo para que este seja compatível com todos os tipos de torres, não somente com corpo piramidal;
- Realizar os mesmos testes deste trabalho em torres de maior dimensão;
- Realizar os mesmos testes deste trabalho em torres com simetria bilateral;
- Realizar testes de influência da metodologia proposta em casos de otimização topológica;
- Utilizar outros algoritmos heurísticos para examinar a atualização da força do vento em otimizações.

10. REFERENCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Linha do tempo, transmissão de energia elétrica**, Disponível em <http://www.aneel.gov.br/15anos/linha_do_tempo/transmissao.html>. Acesso em: 13 abr. 2015.

ARORA, J. **Introduction to optimum design**, 2ª ed, San Diego: Elsevier, 2004, p. 728.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**. Forças devidas ai vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

BLESSMANN, J. **Tópicos de norma do vento**. 2ª ed, Porto Alegre: Editora da universidade Federal de Rio Grande do Sul, 1990, p. 96.

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

GERDAU, **Catálogo barras e perfis**. Disponível em: <<https://www.comercialgerdau.com.br/produtos/download.asp>>. Acesso em: 18 abr. 2015.

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

HOLMES, D. J. **Wind Loading of Structures**. 3ª ed. Austrália: CRC Press, 2014, p. 412.

KAVEH, A.; GHOLIPOUR, Y.; RAHAMI, H. **Optimal Design of Transmission Towers Using Genetic Algorithm and Neural Networks**. International Journal of Space Structures, v. 23, n. 1, p. 1-19, 2008.

Li, H. N.; Bai, H. F. **High-voltage Transmission Tower-line System Subjected to Disaster Loads**. Progress in Natural Science, p. 899–911, 2006.

LOREDO-SOUZA, M. A.; DAVENPORT, G. A. **The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, p. 995-1005, 2003.

MATHAKARI, S.; GARDONI, P. **Reliability-Based Optimal Design of Electrical Transmission Towers Using Multi-Objective Genetic Algorithm.** Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, p. 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. 4241–4260, 2013.

NAGAVINOTHINI, R.; SUBRAMANIAN, C. **Analysis and optimum design of transmission line tower using cuckoo search algorithm.** International Journal Of Engineering Research & Technology, v.4, p. 738-741, 2015.

NOILUBLAO, N.; BUREERAT, S. **Simultaneous topology, shape and sizing optimization of a three-dimensional slender truss tower using multi objective evolutionary algorithms.** Computers & Structures, v. 89, p. 2531-2538, 2011.

PARÍS, J., Martínez, S., Navarrina, F., Colominas I., Casteleiro, M. **Structural optimization of high tension towers 2nd International Conference on Engineering Optimization.** Setembro 06-09, Lisboa, Portugal, 2010.

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.

RAO, V. G. **Optimum designs for transmission line towers,** Computers & Structures, v. 57, p. 81-92, 1995.

Secretaria de Ciência e Tecnologia – SECTI, **Circulação Atmosférica**, Disponível em: <
http://www.secti.ba.gov.br/atlasWEB/climatologia_p1.html>.
Acesso em: 21 mai. 2015.

SHEA, K.; SMITH, I. F. C. **Improving Full-Scale Transmission Tower Design through Topology and Shape Optimization**. Journal of Structure Engineering, v. 132, n. 5, 2006.

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, p. 162-171, 2004.

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

SOUZA, R. R. **Metodologia para otimização topológica, dimensional e geométrica de estruturas de torres de linhas de transmissão** [trabalho de conclusão de curso], Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

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**, 11ª ed, Porto Alegre: Globo, 1991, v. 2.

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

ZHANG, T.; LIN, Y. Y.; BAI, F. H. **Numerical analysis of transmission towers-lines construction on wind force**. Journal of applied Sciences, p. 1587-1591, 2013.

BECK, T. A; LOPEZ, H. R. **Optimization Under Uncertainties. Optimization of Structures and Components**, p. 25.