

## OTIMIZAÇÃO APLICADA A LT'S COMPACTAS SUPTANDO MÚLTIPLOS CIRCUITOS: POSICIONAMENTO ÓTIMO DOS FEIXES DE CONDUTORES E SELEÇÃO ÓTIMA DE CABOS E DA TOPOLOGIA DA ESTRUTURA

JOÃO ANTÔNIO DE VASCONCELOS\*, DOUGLAS ANGELO TEIXEIRA<sup>\*†</sup>, MARCOS FELIPE DE OLIVEIRA RIBEIRO\*, RICARDO DE SOUZA RIBEIRO\*, EDINO BARBOSA GIUDICE FILHO<sup>‡</sup>

<sup>\*</sup>*Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31270-901  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, MG, Brasil*

<sup>†</sup>*Rua Dois, 300 - Village do Lago I - 39404-058  
Instituto Federal do Norte de Minas Gerais  
Montes Claros, MG, Brasil*

<sup>‡</sup>*Av. Barbacena, 1200 - Santo Agostinho - 30190-131  
CEMIG Distribuição S.A.  
Belo Horizonte, MG, Brasil*

Emails: [vasconcelos.joao.antonio@gmail.com](mailto:vasconcelos.joao.antonio@gmail.com), [douglas.teixeira@ifnmg.edu.br](mailto:douglas.teixeira@ifnmg.edu.br),  
[marcosfeliper@gmail.com](mailto:marcosfeliper@gmail.com), [rsribeiro916@gmail.com](mailto:rsribeiro916@gmail.com), [edino@cemig.com.br](mailto:edino@cemig.com.br)

**Abstract**— Due to the problem of the growing necessity to transmit large electric power packages in high voltage within large urban centers, the construction of compact transmission lines with multiple circuits (LTC) becomes interesting. In this context, this paper presents a new methodology for LTC's optimization implemented on Lion software, which includes since the selection of the topology of the structure until the choice of the conductor and protection cables and its optimal positioning. This methodology includes up to four circuits of 138 kV and 230 kV in the same tower and makes use of evolutionary optimization techniques to many objectives and decision making. The obtained results demonstrate the excellence of the proposed methodology.

**Keywords**— Compact transmission lines, Many Objective Optimization, Decision Making, Evolutionary Computation and Right of way.

**Resumo**— Devido ao problema da crescente necessidade de se transmitir grandes pacotes de energia elétrica em alta tensão dentro dos grandes centros urbanos, a construção de linhas de transmissão compactas com múltiplos circuitos (LTC) torna-se interessante. Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta uma nova metodologia para otimização de LTC's implementada no software Lion, que contempla desde a seleção da topologia da estrutura até a determinação do tipo e posicionamento ótimo dos cabos condutores e de proteção. Essa metodologia considera até quatro circuitos de 138 kV e 230 kV em uma mesma torre e faz uso de técnicas de otimização evolucionária para muitos objetivos e tomada de decisão. Os resultados obtidos demonstram a excelência da metodologia desenvolvida.

**Palavras-chave**— Linhas de transmissão compactas, Otimização com Muitos Objetivos, Tomada de Decisão, Computação Evolucionária e Faixa de Passagem.

### 1 Introdução

A utilização de linhas de transmissão compactas (LTCs) é uma alternativa interessante para se transmitir grandes quantidades de energia em alta tensão dentro de centros urbanos. Isso porque a área disponível para transmissão provavelmente se limita às faixas de passagem de linhas já presentes no local. Assim, no geral, pode-se dizer que são desejadas linhas que ocupem a menor faixa de passagem possível sem violar as normas técnicas vigentes. Dentro desse contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar um software de otimização para a configuração de linhas compactas com circuitos múltiplos de 138 kV e 230 kV simultaneamente, assim como a metodologia desenvolvida para a sua implementação. Essa metodologia abrange desde a seleção da topologia da estrutura, até a determinação do tipo e posicionamento ótimo dos cabos condutores e de proteção, para até quatro circuitos de 138 kV e 230 kV em uma mesma torre. Para

isso, são utilizadas técnicas de otimização evolucionária para muitos objetivos e algoritmos de tomada de decisão. O presente trabalho é fruto do P&D D0528, por título "Desenvolvimento de Software para Otimização de Topologias de Torres de Transmissão Suportando Múltiplos Circuitos", código ANEEL PD-4950-0528/2012 e todo o desenvolvimento está de acordo com as normas nacionais, como, por exemplo, a NBR 5422.

### 2 Metodologia

Na modelagem do problema de otimização foram adotados circuitos com tensões de 138 kV e 230 kV, de modo que pode se ter um ou dois circuitos por nível de tensão. Além disso, por questões de segurança na manutenção de linhas vivas, os circuitos de 230 kV são posicionados acima dos circuitos de 138 kV. A base de dados utilizada no processo de otimização é composta por 76 condutores de alumínio de alma de aço (CAA) e 26

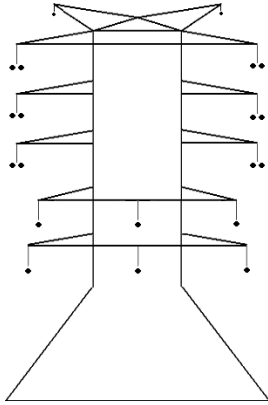


Figura 1: Exemplo de solução para o problema. Os dois circuitos de 138 kV estão dispostos na horizontal, enquanto os circuitos de 230 kV estão posicionados verticalmente.

cabos para-raios. Além destas informações, ela também compreende as alternativas topológicas e os parâmetros ambientais, regionais, estruturais e elétricos, que são dados de entrada.

Cada uma dessas alternativas topológicas define o número e a configuração dos circuitos para cada nível de tensão. Essa configuração é indicada, no banco de dados, por “H” para horizontal, “V” para vertical, “D” para delta e “Di” para delta invertido. Foram utilizadas 25600 alternativas topológicas, para quatro potências independentes, que diferem na configuração dos circuitos e no número de condutores por feixe, de modo que cada feixe possa conter de um a quatro condutores. A título de exemplo, a Figura 1 apresenta a alternativa topológica H-H-V-V, com um condutor para os circuitos de 138 kV, dois condutores por feixe para os circuitos de 230 kV e dois cabos guarda.

Para obter os parâmetros da linha de transmissão utilizou-se o método das imagens para calcular a matriz de coeficientes de Maxwell. Em seguida, calculou-se os parâmetros transversais e longitudinais com a resistividade nula e diferente de zero, respectivamente. Para representar a resistividade diferente de zero foi acrescida a profundidade de penetração no cálculo dos coeficientes de Maxwell.

## 2.1 Soluções Candidatas

As soluções candidatas foram codificadas com parâmetros e variáveis de otimização necessários nos cálculos das funções objetivo e de restrição. Os parâmetros são: a alternativa topológica, que assume valores discretos, e as coordenadas do centro de cada feixe de condutores, as quais assumem valores reais. Cabe ressaltar que, quando se define a alternativa topológica, define-se também o número de condutores por feixe de cada circuito.

Analogamente, as variáveis de otimização podem assumir valores reais ou discretos. O conjunto das que assumem valores reais é composto por quatro tamanhos de raio de feixe e quatro valores de alturas adicionais, de modo que se tenha um valor de raio e um de altura por circuito. Já as variáveis

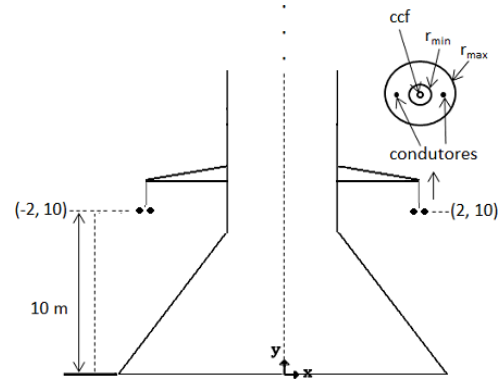


Figura 2: Espaço de busca para posicionar os condutores, em que,  $ccf$  representa as coordenadas do centro do feixe,  $r_{min}$  e  $r_{max}$  representam os raios mínimos e máximos para posicionamento dos condutores, respectivamente.

de natureza discreta são formadas pelos quatro tipos de condutores, um para cada circuito, e o tipo do cabo guarda. Assim, uma solução candidata do problema de otimização tem no total 13 variáveis de otimização e 5 parâmetros.

Dessa forma, a representação matemática de uma solução candidata ( $\mathbf{x}$ ) para o problema de otimização é mostrado em (1). Ela é formada pela alternativa topológica ( $at$ ), pelos vetores com as coordenadas do centro de cada feixe ( $ccf$ ), pelas alturas adicionais ( $h_{ad}$ ), pelos raios dos feixes ( $rf$ ) e pelo vetor com o tipo de condutor de cada circuito, mais o tipo do cabo guarda ( $cc$ ).

$$\mathbf{x} = \{at, ccf, h_{ad}, rf, cc\} \quad (1)$$

Definidas as variáveis de uma solução candidata, os condutores são posicionados com base em um plano definido pelos eixos horizontal e vertical, cuja origem é a interseção do plano ao nível do solo com o plano ao centro da torre, como mostra a Figura 2. Esse posicionamento é realizado dentro de um espaço de busca circular, dado pelo tamanho do raio e pelas coordenadas espaciais que definem o centro do círculo do feixe. Além disso, as posições dos cabos devem satisfazer às restrições de distância entre cabo e solo para o condutor mais baixo e às de distâncias mínimas entre duas fases e entre fase e terra. Isso, para cada nível de tensão, calculadas conforme apresentado em (EPRI, 2008).

Os valores das alturas adicionais, podem variar de 0 a 20 m. Já o raio de cada feixe, que auxilia no posicionamento dos condutores, pode variar de 3 a 20 vezes o diâmetro do condutor posicionado. O posicionamento dos condutores é feito de forma simétrica para facilitar a utilização de espaçadores comerciais, conforme Figura 3, na qual todas as distâncias  $d$  entre condutores adjacentes são iguais.

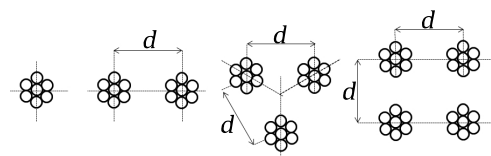


Figura 3: Posicionamento dos condutores.

## 2.2 Funções Objetivo e de Restrição

Com intuito de avaliar se uma determinada solução é promissora, são considerados os seguintes sete objetivos: minimização da altura da torre, maximização da ampacidade excedente, minimização do custo dos condutores, minimização das perdas dos condutores, minimização do esforço mecânico na estrutura, maximização da potência característica e minimização da faixa de passagem. Essas funções objetivo são identificadas, respectivamente, de  $f_1(\mathbf{x})$  a  $f_7(\mathbf{x})$  ao longo do texto.

Por sua vez, na verificação da factibilidade de uma determinada solução, são consideradas as restrições de carga de ruptura do cabo, ampacidade do condutor, efeito corona, rádio interferência, ruído audível, distâncias de segurança conforme NBR 5422, campo elétrico, campo magnético, distância de segurança entre circuitos e espaço de busca para o posicionamento dos condutores. Essas restrições são identificadas de  $g_1(\mathbf{x})$  a  $g_9(\mathbf{x})$ , respectivamente.

Assim, a formulação final do problema de otimização é mostrada abaixo, conforme foi proposto em (Vasconcelos et al., 2015):

$$\begin{aligned} \min \mathbf{FO}(\mathbf{x}) &= \{f_1(\mathbf{x}), \dots, f_7(\mathbf{x})\} \\ s.a : \mathbf{G}(\mathbf{x}) &= \{g_1(\mathbf{x}), \dots, g_9(\mathbf{x})\} \\ \mathbf{x} &= \{at, ccf, h_{ad}, rf, cc\} \in \mathbf{X} \end{aligned}$$

As funções objetivo de minimização da altura da torre e da faixa de passagem são dadas por estrutura, então possuem apenas um valor por solução. Já as demais funções objetivo são inicialmente formadas por vetores de quatro posições, uma para cada circuito. Assim, o custo, as perdas e os esforços mecânicos são obtidos pela soma das contribuições de cada circuito da torre. Já os objetivos  $f_2(\mathbf{x})$  e  $f_6(\mathbf{x})$  são obtidos pela soma do inverso, do valor da ampacidade excedente para  $f_2(\mathbf{x})$  e da potência característica por circuito para  $f_6(\mathbf{x})$ . Isto é feito, para que ao minimizá-las, obtenha-se a maximização da ampacidade excedente e da potência característica da estrutura.

Por sua vez, a minimização da altura da torre ( $f_1$ ) permite diminuir o custo da fundação, o gasto para sua construção e a ação dos ventos na mesma. Neste trabalho, essa altura é definida como sendo a altura do cabo de proteção e todo o cálculo é feito para se respeitar a distância mínima entre o cabo e o solo para linhas de 138 kV prescrita na NBR 5422 (ABNT, 1985). Assim, uma vez identificada a altura do condutor mais próximo ao solo, os demais condutores são posicionados a partir das distâncias mínimas fase-fase e fase-terra. As distâncias fase-terra e fase-fase para 138 kV são 1,4 m e 1,8 m e para 230 kV 1,7 m e 2,1 m respectivamente.

Quanto a segunda função objetivo, ela busca maximizar a ampacidade excedente nos cabos condutores ( $f_2$ ), isto é, a diferença entre a corrente

máxima (ampacidade) que o feixe de condutores pode transmitir e a corrente elétrica para transmitir a potência nominal do circuito. A ampacidade dos cabos é calculada para cada um dos condutores a partir de dados do condutor e das condições ambientais do local onde a linha será construída, conforme (CIGRÉ, 2014). Assim, uma vez definida a potência que cada circuito deve transportar, define-se a corrente nominal que deve circular pela linha de transmissão. A partir desta informação, busca-se no banco de dados quais condutores podem conduzir no mínimo a corrente nominal e no máximo até 50% acima desse valor.

A minimização do custo dos condutores, terceira função objetivo ( $f_3$ ), auxilia na busca por soluções com reduzido custo dos cabos. Calcula-se o custo pela multiplicação da massa do cabo para 1 km de comprimento de linha pelo preço por unidade de massa.

A quarta função objetivo, minimização das perdas dos condutores ( $f_4$ ), considera as perdas provenientes do aquecimento dos cabos (efeito Joule) e as perdas relacionadas à ionização do ar em volta do condutor (efeito corona), (Maruvada et al., 1989). De modo simplificado, ela é definida por quantos kW de perdas ocorrem por km de linha.

A quinta função objetivo, minimização dos esforços mecânicos nas estruturas ( $f_5$ ), é calculada considerando as estruturas de suspensão. O vento exerce uma pressão sobre os condutores, que é proporcional à sua velocidade e resulta em uma força perpendicular ao eixo longitudinal dos cabos (Labegallini et al., 1992). Combinado com o peso do próprio condutor por unidade de comprimento, chega-se a uma força resultante, a qual deseja-se minimizar.

A maximização da potência característica, sexta função objetivo ( $f_6$ ), visa aumentar a capacidade de transmissão da linha. A partir da variação do tipo e número de condutores busca-se elevar sua potência característica, conforme abordado em (Kießling et al., 2003).

A sétima função objetivo, minimização da faixa de passagem ( $f_7$ ), é determinante para o projeto de uma linha de transmissão compacta. Ela deve ser calculada levando-se em conta o balanço dos cabos, efeitos eletromagnéticos e o posicionamento das fundações de suportes e estais. Elas podem ser obtidas tanto para estruturas com condutores dos dois lados da torre quanto apenas em um dos lados da estrutura, (ABNT, 1985).

O software desenvolvido permite também a transformação de objetivos em restrições. Assim, objetivos de minimização podem ser tratados como restrições de valor máximo, e objetivos de maximização como restrições de valor mínimo. Essas transformações são facultativas, cada objetivo pode ser ativado ou desativado na interface do software, e, quando desativados, a restrição transformada equivalente pode ser usada.

Por sua vez, as funções de restrição são definidas de modo que as soluções atendam às normas técnicas e especificações exigidas pela concessionária de energia elétrica. Analogamente às funções objetivo, as restrições são definidas por circuito, caso em que se tem um vetor de restrições, ou para a estrutura como um todo, caso em que há apenas um valor.

Durante o processo de otimização é realizado o cálculo da penalidade  $P(\mathbf{x})$  atribuída à solução que viole alguma restrição, de acordo com (2), na qual  $N_{res}$  é o número de restrições considerada.

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{N_{res}} \{\max[0, g_j(\mathbf{x})]\}^2 \quad (2)$$

### 2.3 Algoritmo de otimização

Foi utilizado um algoritmo de otimização baseado no algoritmo de estimativa de distribuição (*Estimation of Distribution Algorithm* - EDA) (Larraanaga and Lozano, 2001). Ele calcula medidas estatísticas relativas às variáveis reais das soluções candidatas, como média e desvio padrão, para criar modelos probabilísticos. Então, a partir desses, amostram-se valores para as variáveis que caracterizarão novas soluções candidatas. Assim, para uma dada população de soluções candidatas  $Pop(t)$  na geração  $t$ , o algoritmo EDA executa as seguintes etapas:

- Seleção: São selecionadas 70% das soluções de  $Pop(t)$  para formar a população de pais  $Q(t)$ .
- Modelagem: Um modelo probabilístico  $p(x)$  é construído, para cada variável, com base na distribuição normal e informações estatísticas das soluções candidatas em  $Q(t)$ .
- Amostragem: Amostram-se novas soluções candidatas a partir do modelo probabilístico.
- Substituição: É realizada uma seleção para sobrevivência, em que se escolhe entre as soluções em  $Pop(t)$  e as novas amostradas, aquelas que irão formar a nova população  $Pop(t+1)$ .

Neste trabalho, o método de seleção para sobrevivência utilizado foi o torneio binário, o qual escolhe os indivíduos que integrarão a população na próxima geração do algoritmo. Inicialmente, o método de seleção realiza um embaralhamento aleatório dos indivíduos dentro da população. Então, cada indivíduo participará de dois torneios com outros indivíduos da população corrente, de forma aleatória. No torneio, propriamente dito, primeiramente são realizadas comparações entre os índices de violação de restrição dos indivíduos. Em caso de empate no valor do índice de violação de restrição, serão consideradas as relações de dominância entre os indivíduos. Entretanto, caso os dois indivíduos sejam não dominados, é aplicado um método de tomada de decisão para atribuir uma nota a cada um deles, e assim, é selecionada a solução que obtiver a maior nota.

### 2.4 Tomada de Decisão

No processo de tomada de decisão implementou-se o SMARTS (Simple Multi-Attribute Rating Technique using Swings) (Parreiras et al., 2006). Nesse método, para se determinar a nota de uma solução candidata, é utilizado um procedimento que atribui diferentes pesos a funções de pertinência definidas a partir dos objetivos adotados, onde a soma dos pesos tem valor unitário. Assim, tendo em vista que na modelagem matemática do problema há sete objetivos, deve-se avaliar a importância de cada um deles em relação aos demais para a determinação dos pesos, dentro do contexto de cada projeto de linha de transmissão.

Para se realizar o cálculo das funções de pertinência para uma dada solução  $\mathbf{x}_i$ , primeiramente atribui-se para cada objetivo um valor correspondente à avaliação da função pseudo-objetivo  $\phi_n(\mathbf{x}_i, r_p)$ , definida em (3). Nesta expressão  $r_p$ , é um parâmetro de penalidade e  $P(\mathbf{x}_i)$  é uma função de penalidade dada em (2). Note que quanto menor o valor de  $\phi_n(\mathbf{x}_i, r_p)$  melhor é a solução, uma vez que deseja-se minimizar  $f_n(\mathbf{x}_i)$  e  $P(\mathbf{x}_i)$  é nulo quando todas as restrições são satisfeitas.

$$\phi_n(\mathbf{x}_i, r_p) = f_n(\mathbf{x}_i) + r_p \cdot P(\mathbf{x}_i) \quad (3)$$

O cálculo da função de pertinência  $u_n(\mathbf{x}_i, r_p)$  para cada um dos  $n$  objetivos é realizado conforme (4). Para isto, tomam-se os valores máximos e mínimos para cada um dos  $n$  pseudo-objetivos. Note que quanto menor o valor de  $\phi_n(\mathbf{x}_i, r_p)$  maior será o valor de  $u_n(\mathbf{x}_i, r_p)$ . O conjunto  $\Phi_n$  é definido como o conjunto de todas as funções pseudo-objetivo  $\phi_n(\mathbf{x}_i, r_p)$  avaliadas para cada solução candidata.

$$u_n(\mathbf{x}_i, r_p) = \frac{\max[\Phi_n] - \phi_n(\mathbf{x}_i, r_p)}{\max[\Phi_n] - \min[\Phi_n]} \quad (4)$$

Após o cálculo de todas as pertinências, faz-se o somatório da multiplicação do peso de cada objetivo ( $w_n$ ) pela função de pertinência  $u_n(\mathbf{x}_i, r_p)$  em cada solução candidata  $i$ , conforme (5), na qual  $N_{obj}$  é o número de objetivos. Assim, obtém-se a nota final  $U_i(\mathbf{x}_i, r_p)$  de cada solução candidata, onde uma solução com maior nota é preferível em relação a uma solução de menor nota. Isso torna possível ordenar as soluções candidatas da melhor até a pior conforme os pesos atribuídos no método.

$$U_i(\mathbf{x}_i, r_p) = \sum_{n=1}^{N_{obj}} w_n u_n(\mathbf{x}_i, r_p) \quad (5)$$

### 2.5 Software implementado

A metodologia foi implementada em linguagem Java como parte de um software, chamado Lion, para uso interno da CEMIG Distribuição. Através de uma interface *web* o usuário configura as condições de simulação, os parâmetros do algoritmo de otimização e o conjunto de objetivos e restrições que se deseja utilizar. A tela de escolha das funções



Figura 4: Tela principal do software Lion.



Figura 5: Tela de resultados do software Lion.

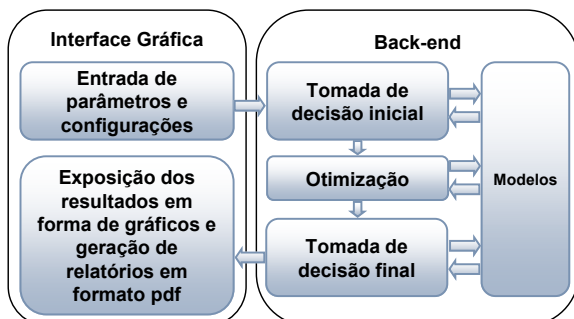


Figura 6: Diagrama simplificado de uso do software Lion.

objetivo é mostrada na Figura 4, na qual além de escolher quais objetivos serão utilizados, o usuário pode definir os pesos dados a cada objetivo e os parâmetros da etapa de tomada de decisão.

Iniciada a otimização, o *back-end* realiza todo o processo e para isso, utiliza os modelos para calcular os valores das funções objetivo e funções de restrição. Finalizado o processo de otimização, a tomada de decisão atribui notas a todas as soluções factíveis encontradas, e as três melhores são apresentadas ao usuário em um gráfico de coordenadas paralelas, como mostrado na Figura 5. Neste, no eixo das abscissas estão as funções objetivo utilizadas e, no eixo das ordenadas, os valores normalizados dos objetivos. A normalização é feita de modo que o valor zero indica um objetivo ruim,

enquanto a unidade, um bom, independentemente do objetivo ser de minimização ou maximização. A Figura 6 mostra um diagrama simplificado de uso da ferramenta implementada.

Além disso, o usuário pode gerar relatórios com as características estruturais e elétricas das soluções, bem como relatórios de carregamento mecânico das estruturas sob diferentes condições.

### 3 Resultados Computacionais

Duas simulações foram realizadas utilizando a metodologia proposta, ambas fixadas em quatro potências independentes, duas com potência de 145MVA em 138kV e duas com potência de 350MVA em 230kV. O algoritmo de otimização foi configurado para executar 20 gerações, com 100 alternativas topológicas para a tomada de decisão inicial e 10 indivíduos por subpopulação. Cada simulação foi repetida 30 vezes, e o melhor resultado obtido em cada uma é apresentado.

No 1º caso foram utilizados os sete objetivos apresentados, com um vetor de pesos  $w = \{0,30; 0,05; 0,25; 0,25; 0,05; 0,05; 0,05\}$ , priorizando os objetivos de minimização da altura da torre, do custo e das perdas por efeitos Joule e corona. A Figura 7 mostra o melhor resultado com o posicionamento e o tipo dos condutores.

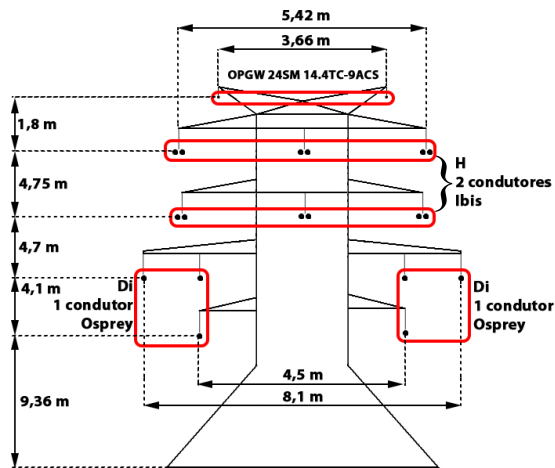


Figura 7: Topologia da solução obtida para o 1º caso.

No 2º caso, o objetivo de minimização da faixa de passagem ( $f_7$ ) foi transformado em uma restrição de faixa de passagem máxima de 10m. O conjunto de pesos utilizado foi  $w = \{0,30; 0,06; 0,26; 0,26; 0,06; 0,06\}$ . A Figura 8 mostra a melhor solução obtida com o posicionamento e o tipo dos condutores. A Tabela 1 apresenta os melhores valores obtidos para os objetivos em cada simulação realizada. A linha  $F_p$  representa a faixa de passagem, que é também o objetivo  $f_7$  no 1º caso.

Tabela 1: Valores das funções objetivo.

| $f_{obj}$     | Simulações |           |
|---------------|------------|-----------|
|               | 1º caso    | 2º caso   |
| $f_1[m]$      | 24,79      | 26,54     |
| $f_2[A]$      | 975,14     | 857,55    |
| $f_3[R\$/km]$ | 203543,28  | 235462,11 |
| $f_4[kW/km]$  | 673        | 553,59    |
| $f_5[kg f]$   | 23080,74   | 20291,92  |
| $f_6[MW]$     | 503,09     | 426,95    |
| $F_p[m]$      | 12,25      | 9,86      |

#### 4 Conclusões

A metodologia incorporada ao software Lion mostrou-se capaz de resolver o problema descrito de posicionamento ótimo do feixe de condutores e seleção ótima de cabos e da topologia da estrutura. Sua aplicação permite às concessionárias do setor elétrico o aproveitamento das reduzidas faixas de passagem em centros urbanos para criar verdadeiros “corredores de potência”. A metodologia utilizada é bem flexível, podendo ser facilmente adaptada para simular diferentes necessidades da concessionária, já que é possível determinar a importância relativa de cada objetivo, quais objetivos deseja-se utilizar ou se algum deles será transformado em restrição. No geral, foram encontradas soluções com número reduzido de condutores por fase, o que é condizente com a prática.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à CEMIG Distribuição, FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo suporte financeiro.

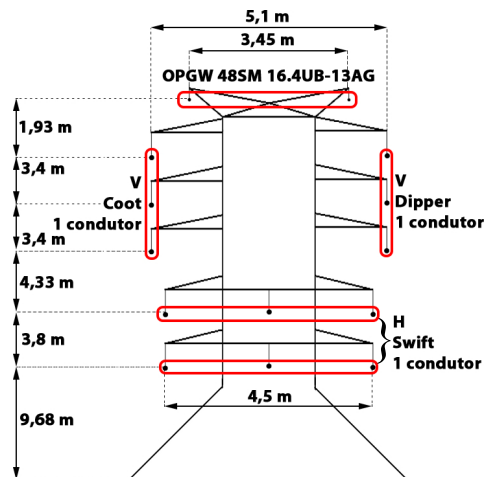


Figura 8: Topologia da solução obtida para o 2º caso.

#### Referências

- ABNT (1985). *NBR 5422: Projeto Eletromecânico de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*.
- CIGRÉ (2014). *Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines*, CIGRÉ Technical brochure N° 601.
- EPRI (2008). *Transmission Line Reference Book: 115-345 kV Compact Line Design*, Electric Power Research Institute.
- Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco, J. F. and Kaintzyk, U. (2003). *Overhead Power Line*, Springer, 763 p.
- Labegalini, P. R., Labegalini, J. A., Fuchs, R. D. and Almeida, M. T. (1992). *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*, Edgard Blucher, São Paulo.
- Larraanaga, P. and Lozano, J. A. (2001). *Estimation of Distribution Algorithms: A New Tool for Evolutionary Computation*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA.
- Maruvada, P. S., Nguyen, D. H. and Zadeh, H. H. (1989). Studies on Modeling Corona Attenuation of Dynamic Overvoltages, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4(2): 1441–1449.
- Parreiras, R. O., Maciel, J. H. R. D. and Vasconcelos, J. A. (2006). The a Posteriore Decision in Multiobjective Optimization Problems with Smarts, Promethee II and a Fuzzy Algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics, EUA* 42: 1139–1142.
- Vasconcelos, J., Araújo, A., Miranda, G., Adriano, R., Gontijo, C., Silva, J., Mól, R.S., R. M., Teixeira, D., Lima, P., Miranda, L. and Giúdice, E. (2015). Otimização de Estruturas de Transmissão Suportando Múltiplos Circuitos de 138 e 230 kV, *CITENEL- Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*.