

POSICIONAMENTO ÓTIMO DE PARA-RAIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO E ATP

WALACE CASTRO*[†] JOÃO ANTÔNIO DE VASCONCELOS[†]

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901,
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*†Laboratório de Computação Evolucionária
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901, Pampulha
Belo Horizonte, MG, Brasil*

Email: walace.s.castro@gmail.com, vasconcelos.joao.antonio@gmail.com

Abstract— The incidence of lightning on transmission lines can induce an excessive number of faults, even if the line in question is protected by guard wire. Under these conditions, the solution found to improve line performance is the use of surge arresters. However, so that there is not an excessive expenditure of resources, it is necessary to identify the places where such equipment should be installed. Thus, this paper proposes the development of a computer application that allows the determination of the optimal placement of the surge arrester in transmission lines. The application minimizes the risk of faults and reduces the costs associated with the protection.

Keywords— Lightning Surge, Transmission Lines, Surge Arresters, Genetic Algorithms, ATP, ATPDraw.

Resumo— A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão pode ocasionar um número excessivo de desligamentos, ainda que a linha em questão seja blindada por cabos guarda. Nessas condições, a solução encontrada para melhorar o desempenho da linha é a utilização de para-raios. Contudo, para que não haja um gasto excessivo de recursos, é necessário identificar os locais onde tais equipamentos deverão ser instalados. Assim, este trabalho apresenta uma aplicação computacional para o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. Na prática, o aplicativo visa garantir uma proteção eficaz da linha, e ao mesmo tempo, assegurar a viabilidade econômica da solução.

Palavras-chave— Descargas Atmosféricas, Linhas de Transmissão, Para-raios, Algoritmos Genéticos, ATP, ATPDraw.

1 Introdução

A incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão (LT) consiste na principal causa de desligamentos não programados da linha. Em contrapartida, os órgãos que regulamentam o setor elétrico impõem limites cada vez mais rígidos, no sentido de prezar pela qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

Em determinados casos (Viana, 2009), ainda que a linha em questão seja blindada por cabos para-raios, pode haver um número excessivo de desligamentos causados pelo *backflashover*. Nessas condições, o uso adicional de para-raios de óxido de zinco (ZnO) tem sido a solução encontrada para melhorar o desempenho da linha de transmissão. Contudo, é necessário identificar os locais onde os para-raios deverão ser instalados, para que não haja um gasto exacerbado de recursos financeiros.

Assim, visando garantir uma proteção eficaz da linha, e ao mesmo tempo, assegurar a viabilidade econômica da solução, uma aplicação computacional é desenvolvida para permitir o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. Tal problema pode ser resumido da seguinte maneira: dada uma LT, quais são os pontos onde

os para-raios deverão ser instalados, para permitir uma proteção da linha, e ao mesmo tempo, assegurar uma solução econômica?

Neste trabalho, essa questão é formulada como um problema de otimização mono-objetivo. O intuito é minimizar a quantidade de para-raios considerando uma taxa de desligamentos previamente definida (Vasconcelos et al., 2012). Pode-se usar, por exemplo, o número máximo de desligamentos estabelecido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema).

Vale ressaltar que, aspectos relativos ao fenômeno de falha de blindagem não são incluídos nesta análise. O intuito é proteger a linha contra desligamentos causados por *backflashover*. Além disso, a metodologia empregada é genérica, ou seja, a mesma pode ser aplicada a qualquer linha de transmissão com cabos para-raios, desde que os dados de entrada estejam disponíveis.

2 Metodologia

A estrutura funcional da metodologia é apresentada de forma resumida na Figura 1. A mesma é formada pela interação entre um algoritmo genético (Vasconcelos et al., 2001) e o ATP (do inglês, *Alternative Transient Program*) (Prikler and Høi-

dalén, 2002). Como cada bloco possui suas particularidades, os mesmos são detalhados a seguir.

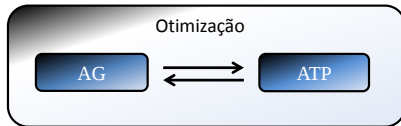


Figura 1: Estrutura funcional da metodologia.

2.1 Algoritmo Genético

A Figura 2 ilustra as principais funções do algoritmo genético implementado.

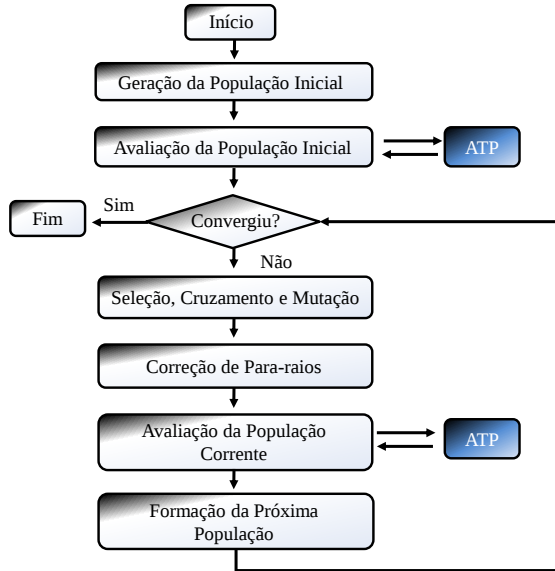


Figura 2: Fluxograma do algoritmo de posicionamento ótimo de para-raios.

De maneira geral, o indivíduo, isto é, a solução candidata do problema de alocação de para-raios, fornece os locais onde esses equipamentos serão instalados. Sendo assim, cada indivíduo corresponde a uma configuração de para-raios que será simulada no ATP. O ATP, por sua vez, é o responsável por calcular as sobretensões impostas ao longo da cadeia de isoladores. Essas sobretensões são utilizadas para calcular a taxa de desligamentos da linha. Maiores detalhes sobre esse cálculo são apresentados na Seção 3.

De acordo com o número de desligamentos e a quantidade de para-raios, uma *fitness* é atribuída para cada indivíduo da população. Após essa etapa, o critério de parada¹ é verificado e caso não seja atendido, os processos de seleção, cruzamento e mutação são realizados.

Após a etapa de reprodução, os novos indivíduos são avaliados e unificados com a população anterior. A partir daí, somente os melhores são selecionados para compor a população da próxima geração.

¹O critério de parada adotado é baseado em um número máximo de gerações, ou quando não ocorre mudança do melhor indivíduo durante um conjunto subsequente de T gerações.

O procedimento descrito se repete até que o critério de parada seja atendido. Ao final, a melhor solução encontrada é fornecida.

2.1.1 Representação dos Indivíduos

No âmbito deste trabalho, um indivíduo é representado por uma cadeia de caracteres binários (*bits*), onde o valor 1 na posição j indica a instalação de para-raios nessa posição. Vale ressaltar que, o processo de otimização pode ser realizado considerando a alocação por torre ou fase. Dependendo do tipo de configuração escolhida, a representação do indivíduo sofre alterações.

No caso de alocação por torre, cada caractere representa uma estrutura. Ou seja, dada uma linha com cinco torres, por exemplo, um indivíduo com a configuração 10100 indica a instalação de para-raios em todas as fases das torres 1 e 3. Por outro lado, no segundo tipo de alocação, essa representação é expandida para que cada *bit* represente uma fase (111-000-111-000-000, em caso de um circuito trifásico).

2.1.2 Avaliação da População

Neste trabalho, a *fitness* é definida basicamente pela utilização de dois fatores. São eles:

$$\begin{cases} h_1 = \frac{(1, 2 PR_{max} - PR_{Ind})}{(1, 2 PR_{max})} \\ h_2 = \frac{1}{(des_{alvo} - des_{ind})^2 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- PR_{max} é a quantidade máxima de para-raios que podem ser alocados na LT;
- PR_{Ind} é a quantidade de para-raios da configuração do indivíduo;
- des_{alvo} é o desempenho alvo da LT estabelecido a priori (restrição de desligamento);
- des_{ind} é o desempenho estimado com a configuração de para-raios do indivíduo;
- h_1 é o termo proveniente do número de para-raios. Neste caso, quanto menor for a quantidade de para-raios do indivíduo, maior será o valor de h_1 e, vice-versa;
- h_2 é o termo proveniente da taxa de desligamentos. Neste caso, quanto mais próximo o des_{ind} estiver do desligamento alvo, maior será o valor de h_2 e, vice-versa.

Finalmente, uma vez que os termos h_1 e h_2 são apresentados, a *fitness* é calculada pela Equação 2. Vale ressaltar que, quando dois indivíduos possuem o mesmo valor de *fitness*, o desempate é realizado considerando o desempenho da linha.

$$\begin{cases} h = 100 h_1 & \text{se } des_{ind} \leq des_{alvo} \\ h = 80 h_1 h_2 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2)$$

2.1.3 Processo de Mutação

A mutação, implementada neste trabalho, algumas vezes é definida de forma determinística para acelerar o processo de busca pela solução. Mais especificamente, para cada torre, uma probabilidade p é sorteada e se a mesma for menor que 30%, o *bit* de mutação é determinado de maneira aleatória. Caso contrário, ele é definido de forma determinística valendo-se de informações da linha de transmissão. Neste último caso, utiliza-se os valores da resistência de aterramento por meio da curva de probabilidade mostrada na Figura 3.

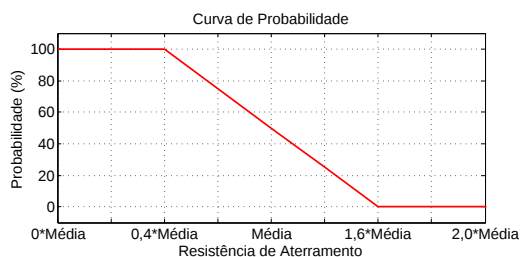


Figura 3: Probabilidade do bit determinístico ser nulo.

De forma geral, o intuito da curva é adicionar ou remover para-raios de acordo com o valor da resistência de aterramento. Quando esse valor é bem abaixo da média, o *bit* determinístico possui 100% de probabilidade de ser nulo. Caso contrário, quando a torre possui alto valor de resistência, esse *bit* assume valor unitário (0% de probabilidade de ser nulo) indicando que aquela torre necessita de proteção. Valores intermediários possuem probabilidades de acordo com a rampa (Figura 3).

2.2 Cálculo de Transitórios via ATP

Para o cálculo de transitórios, alguns componentes são modelados no ATPDraw. São eles: descarga atmosférica, vãos de linha, torre, para-raios e aterramento. A título de ilustração, a Figura 4 exibe a representação de um trecho de linha modelado no ATPDraw.

Neste estudo, os parâmetros elétricos da linha são retratados considerando a variação na frequência por meio do modelo de JMarti (Rodrigues, Guimarães, Chaves and Boaventura, 2014). Além disso, considera-se a modelagem com quatro vãos de linha adjacentes (exceto nas extremidades da LT), a partir do local atingido pela descarga atmosférica (de Castro Assis et al., 2012).

Em relação às torres, como existe uma grande variedade de estruturas e formas, a modelagem é feita de forma simplificada. O modelo implementado considera que a torre é representada por dois trechos de linha de transmissão vertical, ligados em série, conforme (Rodrigues, Guimarães, Chaves and Boaventura, 2014). O comprimento da parte inferior é dado pela distância entre o condu-

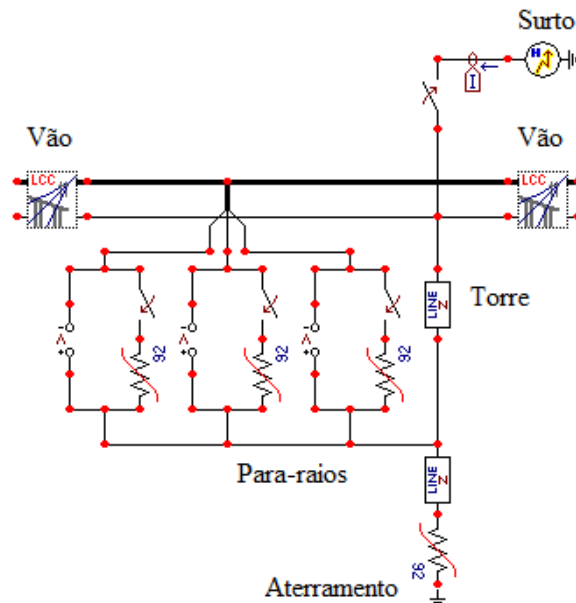


Figura 4: Trecho de linha modelado no ATPDraw. A linha em questão possui três fases e um cabo para-raios. O trecho ilustrado é constituído por: uma descarga atmosférica, dois vãos de linha, uma torre, três para-raios e uma resistência de aterramento.

tor mais baixo e o solo. Já no trecho superior, esse valor é determinado pela distância entre esse condutor e o cabo para-raios. Cada trecho assume: i) velocidade igual a 85% da velocidade da luz e ii) impedância de surto definida igual a 200 Ω .

Os para-raios e a impedância de aterramento são representados por elementos não lineares a partir das curvas $V \times I$ (de Castro Assis et al., 2012). No caso do aterramento, a não linearidade é calculada por meio das expressões formuladas e propostas pelo (CIGRÉ, 1991).

Por fim, a representação da descarga atmosférica merece um destaque a mais e, por isso, é detalhada a seguir.

2.2.1 Descarga Atmosférica

Tradicionalmente, a descarga atmosférica é representada em estudos computacionais por uma função dupla exponencial, CIGRE ou triangular. Contudo, como pode ser observado na Figura 5, essas formas de onda apresentam diferenças significativas em relação ao surto atmosférico real (Rodrigues, Tamashiro, Piccini, Rezende, Guimarães and Chaves, 2014).

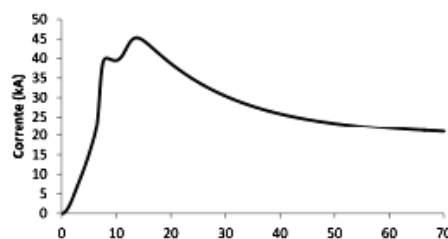


Figura 5: Forma de onda representativa das correntes médias de primeiras descargas de retorno registradas na Estação Morro do Cachimbo. Figura retirada de (Rodrigues, Tamashiro, Piccini, Rezende, Guimarães and Chaves, 2014).

Assim, baseado na literatura (Conti and Visacro, 2007), a corrente de retorno é representada, neste trabalho, pela soma de sete funções de Heidler. O intuito é retratar as primeiras descargas de retorno medianas que são obtidas a partir de medições feitas na estação do Morro do Cachimbo (Figura 5). Os parâmetros utilizados são extraídos de (Conti and Visacro, 2007) e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros Utilizados para Modelagem da Fonte de Corrente de Heidler.

Forma de Onda	$I_0[kA]$	n	$\tau_1[\mu s]$	$\tau_2[\mu s]$
1	6	2	3	76
2	5	3	3,5	10
3	5	5	4,8	30
4	8	9	6	26
5	16,5	30	7	23,2
6	17	2	70	200
7	12	14	12	26

3 Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas

O desempenho da linha de transmissão é estimado por meio: i) da quantidade de descargas atmosféricas que atingem a linha e ii) da probabilidade de ocorrer uma descarga capaz de provocar uma disrupção na cadeia de isoladores (de Souza Filho, 2013). Além disso, vale ressaltar que, neste trabalho, o número de desligamentos é calculado considerando apenas a incidência de descargas atmosféricas na torre. Maiores detalhes sobre essa aproximação podem ser vistos em (de Souza Filho, 2013).

3.1 Número de Descargas Atmosféricas

De acordo com (CIGRÉ, 1991), o número de descargas atmosféricas por 100 km de linha por ano, N_L , que incidem na linha pode ser calculado como:

$$N_L = \frac{N_g}{10} (2R_a + d_{pr}) \quad (3)$$

onde, N_g é a densidade local de descargas atmosféricas (raios/ km^2 / ano), R_a é o raio de atração (m) e d_{pr} é a distância entre os cabos para-raios (m). Caso a linha apresente apenas um condutor de blindagem, d_{pr} será igual a zero.

Ainda de acordo com (CIGRÉ, 1991), a expressão sugerida para o cálculo do raio de atração é dada pela Equação 4. Na qual, H_t é a altura da linha de transmissão (m).

$$R_a = 14H_t^{0,6} \quad (4)$$

3.2 Probabilidade Acumulada

A suportabilidade da cadeia de isoladores é avaliada por meio da curva tensão x tempo (de Castro Assis et al., 2012):

$$V_d = 400L + \frac{710L}{t^{0,75}} \quad (5)$$

em que, V_d é a tensão crítica disruptiva (kV), L é comprimento da cadeia de isoladores (m) e t é o instante de tempo de disrupção (μs).

Através da curva $V \times t$ e da sobretensão resultante na cadeia de isoladores (calculada pelo ATP), a corrente crítica capaz de provocar uma disrupção na cadeia é calculada, I_{cc} . A partir daí, é necessário quantificar a probabilidade de se ter uma corrente de descarga cuja amplitude ultrapasse I_{cc} . Essa probabilidade é dada pela Equação 6.

$$P(I_{cc}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{cc}}{31}\right)^{2,6}} \quad (6)$$

Onde: $P(I_{cc})$ é a probabilidade da corrente I_{cc} (kA) ser excedida.

3.3 Número de Desligamentos

De posse da probabilidade e da estimativa do número de descargas (N_L), a taxa de desligamentos causados por *backflashover* pode ser calculado como:

$$BFR = 0,6 N_L P(I_{cc}) \quad (7)$$

onde, o valor 0,6 corresponde ao fator de correção para considerar o efeito das descargas que incidem ao longo do vão (de Souza Filho, 2013).

O uso da Equação 7 assume que algumas variáveis da LT, como: altura e resistência de aterramento são constantes durante todo o percurso da mesma. Como essa condição nem sempre é verdadeira, uma das formas de se contornar essa limitação é dividir a linha em vários trechos de comprimento L_n e estimar o número de desligamentos em cada seção separadamente. Por fim, a Equação 8 permite combiná-los por meio de uma média ponderada.

$$BFR = \frac{BFR_1 L_1 + BFR_2 L_2 + \dots + BFR_n L_n}{L} \quad (8)$$

4 Resultados

Os experimentos são conduzidos utilizando dados de uma LT real considerando os dois tipos de alocação: i) torre e ii) fase. Em cada simulação, o algoritmo genético é executado por 36 gerações, com um tamanho de população igual a 20 indivíduos.

A LT em questão possui circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A altura das torres, a resistência de aterramento e o comprimento dos vãos assumem valores diferentes durante o percurso da linha e são mostrados na Figura 6. As demais características são apresentadas na Tabela 2.

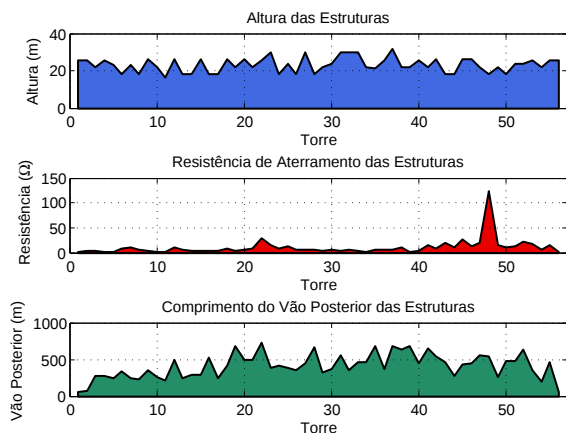


Figura 6: Altura das torres, resistência de aterramento e comprimento dos vãos posteriores da LT em estudo.

Tabela 2: Características Gerais da Linha de Transmissão.

Característica	Valor
Quantidade de Torres	56
Classe de Tensão (kV)	69
Resistividade do Solo (Ωm)	1000
Comprimento da Cadeia de Isoladores (m)	0,87
N_g (raios/km ² /ano)	6,00

O desempenho exigido é definido com base nos limites de desligamentos estabelecidos pela ANEEL. De acordo com (de Souza Filho, 2013), para linhas de transmissão com classe de tensão inferior a 230 kV, pode-se adotar um limite máximo de 5 desligamentos/ 100 km de linha/ ano.

4.1 Alocação por Torre

A Figura 7 mostra a configuração de para-raios obtida ao final da otimização.

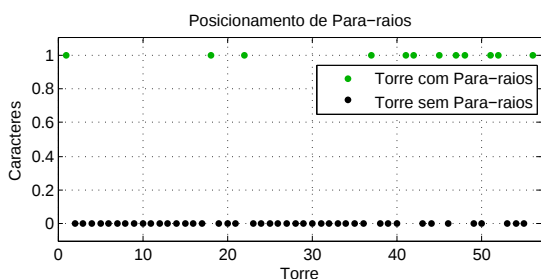


Figura 7: Configuração de para-raios obtida ao final da otimização. Desempenho de 4,82 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 36 para-raios.

Conforme o posicionamento mostrado, os para-raios são distribuídos em 12 das 56 torres disponíveis. Como cada torre possui três fases, é necessário instalar um total de 36 para-raios. Essa configuração permite um desempenho de 4,82 desligamentos/ 100 km de linha/ ano.

Os valores de corrente crítica são exibidos na Figura 8. Na mesma, é possível identificar que o menor valor obtido é cerca de 48 kA. Já a probabilidade de uma corrente de descarga possuir um valor de pico maior do que esse é de aproxi-

madamente 24%. Na prática, isso mostra que a LT está protegida contra boa parte das descargas atmosféricas.

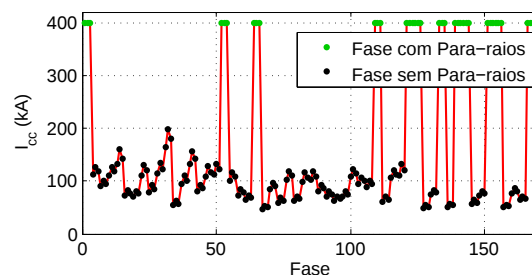


Figura 8: Valores de corrente crítica para a solução encontrada.

A Figura 9, por sua vez, apresenta a evolução da *fitness* e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração. Pode-se dizer que, a partir da vigésima quarta geração, o algoritmo atinge a convergência, uma vez que a configuração do melhor indivíduo praticamente não se altera mais.

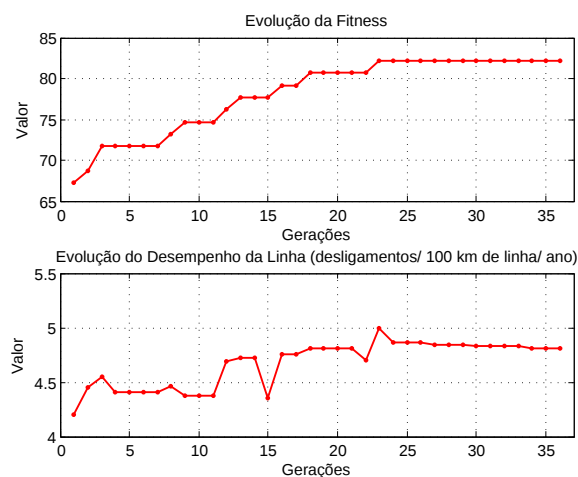


Figura 9: Evolução da *fitness* e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração.

4.2 Alocação por Fase

Em teoria, se comparado ao posicionamento por torre, o processo de alocação por fase tende a apresentar soluções com um número menor, ou no mínimo igual de para-raios. Isso porque neste tipo de alocação, o espaço de busca é maior e ainda engloba as mesmas configurações da alocação por torre.

Na prática, a validade dessa afirmação é verificada por meio de uma comparação. A Figura 10 mostra os resultados, para cada tipo de alocação, da quantidade de para-raios e do desempenho da linha em 30 simulações.

Primeiramente, pode-se notar que nenhuma configuração obtida viola a restrição de desempenho. O valor máximo em questão é de 4,99 desligamentos/ 100 km de linha/ ano, o qual é inferior ao limite preestabelecido. Vale ressaltar que, caso queira uma margem de segurança, o usuário pode

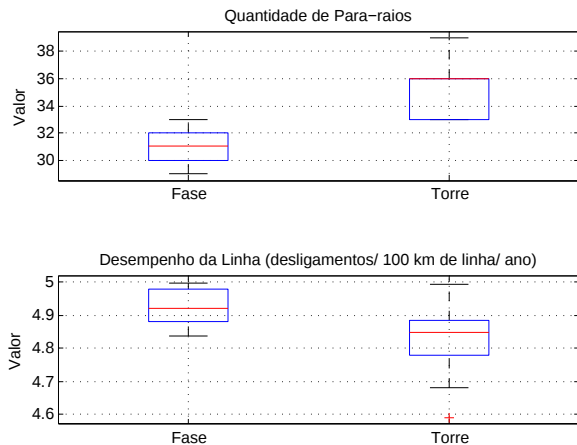


Figura 10: Distribuição da quantidade de para-raios e do desempenho da linha. Para cada tipo de alocação são realizadas trinta execuções.

definir um limite mais baixo do que o estipulado pela norma.

Além disso, as soluções obtidas pela alocação por fase, quando não são iguais, apresentam uma quantidade menor de para-raios. Mais especificamente, ao considerar os valores mais próximos das medianas, a alocação por fase sugere a instalação de 31 para-raios. Se comparado ao posicionamento por torre, essa solução requer cinco para-raios a menos para proteger a mesma linha de transmissão (31×36).

Essa diferença sugere que, na prática, há um ganho considerável quando se usa a alocação por fase. Contudo, esse tipo de posicionamento é mais caro computacionalmente e, por consequência, demanda um tempo maior de execução. No exemplo simulado, o tempo médio de execução aumenta de 10 para cerca de 40 minutos.

5 Conclusões

Neste trabalho é apresentada uma aplicação computacional para o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. Os resultados mostram que a aplicação permite diminuir a quantidade de desligamentos da linha, o que, por consequência, melhora a qualidade da energia fornecida aos consumidores. Além disso, a aplicação se mostra bastante genérica e flexível. A mesma pode ser aplicada a diferentes LTs considerando a alocação de para-raios por torre ou fase.

Finalmente, em trabalhos futuros, pode-se considerar a utilização do Método DE para se determinar a suportabilidade da cadeia de isoladores. Este modelo tem se mostrado mais adequado do que a curva $V \times t$, quando a forma de onda do surto atmosférico se difere do padrão.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do CNPq e da CAPES - Brasil.

Referências

- CIGRÉ (1991). *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*, Cigré Brochure 63.
- Conti, A. D. and Visacro, S. (2007). Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **49**(2): 448–451.
- de Castro Assis, S., Filho, E. B. G., Coutinho, R. M., Almeida, J. H. M., Teixeira, A. M. N. and de Franco, J. L. (2012). *Metodologia de Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas Considerando Para-Raios ZnO*, SBSE 2012, Goiânia- GO, Brasil.
- de Souza Filho, R. E. (2013). *Avaliação de Metodologias para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Prikler, L. and Høidalen, H. K. (2002). *ATPDraw for Windows 9x/ NT/ 2000/ XP*, Users' Manual, Version 3.5, Release No. 1.0.
- Rodrigues, A. R., Guimarães, G. C., Chaves, M. L. R. and Boaventura, W. C. (2014). *Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas aplicada à Coordenação de Isolamento*, SBSE 2014, Foz do Iguaçu- PR, Brasil.
- Rodrigues, A. R., Tamashiro, M. A., Piccini, A. R., Rezende, J. O., Guimarães, G. C. and Chaves, M. L. R. (2014). *Modelagem Computacional da Corrente de Retorno em Descargas Atmosféricas para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão*, XII CEEL, Uberlândia- MG, Brasil.
- Vasconcelos, J. A., Araújo, A. E. A., Braga, M. A. F., Lima, F. L. R., Lavarini, G. V. M., Alves, L. C., Martins, M. B., Teixeira, F. B., Senna, S. L., Tavares, I. C., Franco, J. L. and Abreu, S. R. (2012). *Software para Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão e de Distribuição*, SBSE 2012, Goiânia- GO, Brasil.
- Vasconcelos, J. A., Ramirez, J. A., Takahashi, R. H. C. and Saldanha, R. R. (2001). Improvements in genetic algorithms, *IEEE Transactions on Magnetics* **37**(5): 3414–3417.
- Viana, J. C. C. (2009). *Estudo de Aplicação de Para-raios ZnO em Linhas de Transmissão em Regiões de Nível Cerâmico e Resistência de Aterramento Elevados*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.