

# Algoritmo para Alocação Ótima de Para-raios em Linhas de Transmissão Inspirado em Busca em Vizinhança Variável

Matheus Christino Marzochi

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

Wallace da Silva Castro

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

João Antônio de Vasconcelos

Laboratório de Computação Evolucionária - Universidade  
Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627,  
31270-901  
Belo Horizonte, MG, Brasil  
jvasconcelos@ufmg.br

Silvio Luis Vernieri Missé

Grupo Alupar - Rua Gomes de Carvalho 1996, 16º andar,  
04547-006  
São Paulo, SP, Brasil  
smisse@alupar.com.br

## ABSTRACT

The installation of transmission line surge arresters (TLSAs) has been one of the main solutions found to improve the performance of overhead transmission lines (OHTLs) against atmospheric discharges. Thus, this work proposes a methodology for the optimal placement of TLSAs in OHTLs, which is based on the coupling between an algorithm inspired by GVNS (General Variable Neighborhood Search) and the ATP (Alternative Transient Program) software. The line performance calculation is made considering the transfer effect of the lightning surge due to arresters operation. This transfer mechanism that can lead adjacent towers to flashover is rarely mentioned in the literature. A study is performed considering two transmission lines. At the end, in order to analyze the performance of the proposed methodology, experiments are carried out to optimize the positioning of TLSAs in the mentioned OHTLs. To validate the developed methodology, the results obtained are compared with the results acquired through the coupling of a GA (Genetic Algorithm) with the ATP and with the results achieved through a classic method for the placement of TLSAs based on the tower-footing impedances. The results show that aspects such as the lightning surge transfer effect and favoring the positioning of TLSAs in the lowest phase(s) should be considered in future studies for the design of algorithms for optimal placement of arresters on OHTLs.

## KEYWORDS

Linhas de Transmissão, Para-raios, Descarga Atmosférica, Busca em Vizinhança Variável, ATP.

## 1 INTRODUÇÃO

A incidência de descargas atmosféricas está entre as principais causas de desligamentos não programados das linhas de transmissão (LTs) [1]. Sabe-se que, em determinados casos, ainda que a linha esteja blindada por cabos para-raios, pode haver um número excessivo de desligamentos causados pelo fenômeno de *backflashover*. Nessas condições, uma das soluções encontradas para melhorar o desempenho da LT é o uso de dispositivos para-raios [2-6].

Em [6] é levantada uma consideração importante sobre o uso de para-raios em LTs. De forma resumida, os autores mostram que o uso de para-raios pode melhorar o desempenho da torre atingida pela descarga atmosférica, mas pode piorar o comportamento em torres adjacentes. Isso porque, parte da tensão resultante do surto atmosférico é transferida pelo condutor para as estruturas adjacentes devido à operação dos para-raios. Esse efeito é pouco citado e/ou incluído em estudos computacionais que consideram o uso de para-raios para melhorar a taxa de desligamentos da linha.

Por se tratar de um problema complexo, a utilização de ferramentas de otimização pode ser uma boa alternativa para direcionar a alocação de para-raios em linhas de transmissão. Tal problema pode ser formulado da seguinte forma: dada uma LT, quais são os locais em que os para-raios deverão ser instalados para permitir uma proteção da linha e, ao mesmo tempo, assegurar uma solução viável economicamente. Até o presente momento, pode-se dizer que existem poucos trabalhos que abordam esse problema do ponto de vista da otimização [7-11].

O presente trabalho propõe uma metodologia para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs, a qual é baseada no acoplamento entre um algoritmo inspirado na busca em vizinhança variável geral - GVNS (do inglês, *General Variable Neighborhood Search*) [12] e o *software* ATP (do inglês, *Alternative Transient Program*). Para verificar a efetividade da metodologia, um estudo é apresentado considerando duas linhas de transmissão: uma LT real de 230 kV, propriedade do Grupo Alupar e uma LT de 69 kV cujos dados pertencem ao Laboratório de Computação Evolucionária da UFMG, composta por dados reais que foram obtidos por meio de medições e estimativas. Para a LT de 230 kV um histórico com dados reais de desempenho permite verificar a validade da metodologia proposta, o que, muitas vezes, não é fácil de ser encontrado na literatura.

## 2 METODOLOGIA: OTIMIZAÇÃO

### 2.1 Formulação Matemática

O posicionamento ótimo de para-raios é formulado como um problema de otimização mono-objetivo restrito, o qual visa a minimização da quantidade de para-raios instalados na linha de transmissão.

O conjunto de equações apresentado a seguir exibe a formulação matemática considerada.

$$\text{Minimizar: } f(\mathbf{x}) = PR \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } g_1(\mathbf{x}) = Des_{LT} \leq Des_{max} \quad (2)$$

Em que, dado um arranjo de para-raios na linha,  $PR$  é a quantidade utilizada de para-raios,  $Des_{LT}$  é o desempenho estimado da linha com esse arranjo e  $Des_{max}$  é a quantidade máxima de desligamentos estabelecida a priori.

A restrição  $g_1(\mathbf{x})$  visa garantir que todas as soluções encontradas apresentem valores de desempenho abaixo do limite estipulado. Essa restrição é de grande importância para as concessionárias de energia, uma vez que o objetivo é manter o desempenho da linha sempre abaixo dos limites estabelecidos pelas agências reguladoras.

## 2.2 Descrição do Algoritmo de Otimização

A metodologia proposta é formada pelo acoplamento entre um módulo de otimização composto por um algoritmo de busca em vizinhança variável inspirado no GVNS adaptado para o problema e o ATP. O módulo de otimização testa diferentes arranjos de para-raios buscando encontrar uma estimativa da melhor solução possível. Cada solução candidata do problema é codificada por uma cadeia de *bits* que indicam os locais de instalação dos para-raios.

O ATP, por sua vez, calcula as sobretensões impostas ao longo das cadeias de isoladores. Neste caso, considera-se que a linha de transmissão simulada está equipada com o arranjo de para-raios indicado pela solução candidata. A partir dos valores de sobretensão calculados, o desempenho da LT frente às descargas atmosféricas é estimado. Maiores detalhes desse cálculo serão apresentados na Seção 3.

A Figura 1 apresenta um fluxograma do algoritmo de alocação ótima de para-raios proposto. De início, um conjunto de arranjos é produzido por uma heurística construtiva. Essa heurística tem como finalidade acelerar o processo de busca pela solução. Neste trabalho, parte dos arranjos iniciais produzidos pela heurística construtiva é gerada de forma aleatória e parte de maneira determinística. Dentre os arranjos gerados de forma determinística, pode-se citar, por exemplo, a alocação de para-raios: i) em todas as torres; ii) nas estruturas localizadas em regiões de maior densidade de descargas atmosféricas; iii) nas estruturas com maior valor de impedância de aterramento e iv) nas estruturas com maior impacto na estimativa do número de desligamentos do arranjo original da LT.

Os arranjos iniciais são avaliados (equações (1) e (2)) e o melhor deles (arranjo com a menor quantidade de para-raios e que não viola as restrições) é escolhido como ponto de partida no processo de busca inspirado no GVNS. O melhor arranjo inicial é então perturbado algumas vezes (etapa *Shake*) e o melhor dentre os arranjos produzidos é utilizado na fase de busca local (etapa VND). Maiores detalhes sobre as etapas serão mostrados na Subseção 2.2.2.

A etapa VND busca descobrir o melhor arranjo dentre um conjunto de arranjos próximos (vizinhos) ao arranjo produzido na etapa *Shake*. Vale destacar que, nessa fase todos os arranjos vizinhos (arranjos possíveis contidos no conjunto de vizinhança) são avaliados.

Finalizada a fase VND, compara-se o melhor arranjo de para-raios encontrado nessa etapa com o melhor arranjo produzido desde

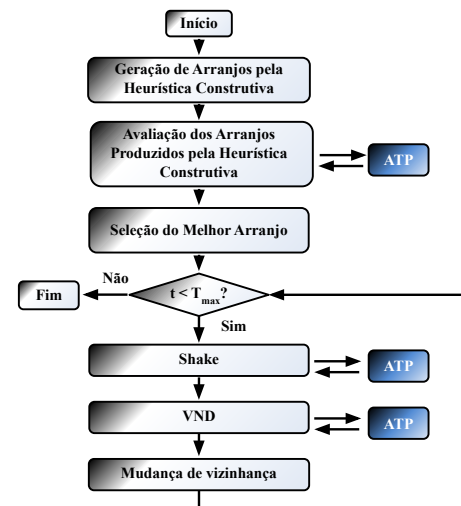


Figura 1: Fluxograma do algoritmo de busca em vizinhança variável (GVNS) proposto para alocação ótima de para-raios.

o início da execução do algoritmo. Caso haja melhora, esse novo melhor arranjo passa a ser o ponto de partida na próxima iteração do algoritmo. Contudo, se após  $i$  iterações não for produzida uma melhora, modifica-se para uma segunda vizinhança de busca na etapa Mudança de Vizinhança, retornando-se para a primeira vizinhança caso seja encontrada uma solução melhor.

O procedimento descrito se repete a cada iteração, até que o critério de parada seja atendido. No caso deste trabalho, apenas um critério é utilizado, um intervalo de tempo ( $T_{max}$ ) definido a priori.

2.2.1 Representação do Arranjo de Para-raios. O processo de otimização é feito considerando um modelo de alocação por fase. Nessa forma de alocação, cada *bit* representa a instalação ou não de para-raios em paralelo com a cadeia de isoladores de uma fase de uma torre.

A Figura 2 apresenta em detalhes um exemplo de arranjo para uma LT hipotética com 5 torres. O conjunto de *bits* “101-000-111-000-000” indica que as fases A e C da primeira torre devem receber a instalação de para-raios, já as torres 2, 4 e 5 não devem receber a

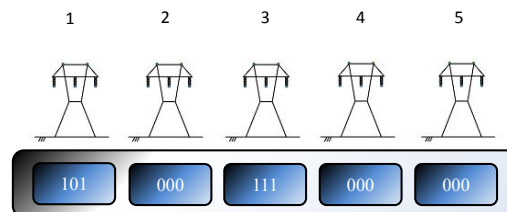


Figura 2: Representação binária da solução candidata. Exemplo de linha trifásica com cinco torres.

2.2.2 *Operadores do Algoritmo de Busca em Vizinhança Variável - Perturbação, Busca Local e Mudança de Vizinhança.* O processo de perturbação (*Shake*) proposto busca privilegiar as estruturas consideradas críticas em relação ao desempenho da LT. Desse modo, as torres da solução incumbente (melhor arranjo encontrado até o momento pelo algoritmo) são inicialmente divididas em duas listas:

- Torres sem para-raios ordenadas de forma decrescente com base no número de desligamentos estimados para cada torre da solução incumbente;
- Torres com para-raios ordenadas de forma crescente com base no número de desligamentos estimados para cada torre da configuração original da LT.

Realizada a divisão das torres em duas listas, gera-se um número aleatório que determina o percentual de torres modificadas na solução incumbente (torres que devem receber ou perder a instalação de para-raios) com um máximo pré-definido de 10% do total de estruturas da LT - percentual determinado experimentalmente de forma a não gerar soluções muito aleatórias ou muito similares a solução incumbente. Um segundo número aleatório determina dentre as torres modificadas da solução incumbente quantas devem receber a instalação de para-raios e quantas torres devem perder a instalação de para-raios com a restrição de que o número de torres que perdem deve ser superior ou igual ao de torres que recebem.

O procedimento de geração de novas soluções perturbando a solução incumbente é repetido até se produzirem  $n$  soluções, a melhor dentre elas é usada na fase de busca local (VND). A escolha de uma entre  $n$  soluções visa evitar um ponto de partida ruim para a fase de busca local. Com base em experimentos, sugere-se o uso de  $n = 16$  buscando um *trade-off* entre o custo computacional e a qualidade da solução de partida na fase de busca local.

A operação de busca local adotada (VND) busca encontrar a melhor solução em uma vizinhança, o que leva a avaliação de todas as soluções vizinhas. As estruturas sugeridas levam em conta o efeito de transferência de surto para às torres adjacentes devido à operação de para-raios. O efeito de transferência de surto é mais significativo nas torres imediatamente adjacentes à torre atingida por descarga atmosférica [6]. Em função desse resultado é proposta a escolha de vizinhanças formada por trecho contendo 3 torres consecutivas. A seguir são detalhadas as estruturas propostas:

- Vizinhança 1 - Busca da melhor configuração de posicionamento de para-raios considerando todas as possibilidades na(s) fase(s) mais baixa(s) em um trecho contendo 3 torres consecutivas (9 *bits* em LTs trifásicas). Esta vizinhança contém no máximo 512 ( $2^9$ ) soluções em LTs trifásicas.
- Vizinhança 2 - Busca da melhor configuração de posicionamento considerando todas as possibilidades em um trecho contendo 3 torres consecutivas, o que resulta em um número fixo de 512 soluções em LTs trifásicas.

Para as LTs analisadas, grande parte dos trechos possuem configuração com uma ou duas fases mais baixas, o que reduz significativamente o número total de possibilidades da Vizinhança 1. A adoção dessa estratégia visa direcionar a busca para a(s) fase(s) mais baixas das LTs. Caso todas as fases estejam a mesma altura, as duas vizinhanças se tornam idênticas.

Em LTs protegidas por cabo para-raios usualmente os condutores mais baixos possuem um pior fator de acoplamento com o cabo

guarda resultando em maiores valores de sobretensão nesses condutores [13]. Em [14] e [15] são utilizadas regras, ainda que sem o uso de ferramentas de otimização, que indicam o posicionamento ou não de para-raios com base na altura dos condutores e nos valores de resistência de aterramento das torres.

Caso após  $i$  iterações do algoritmo (etapa *Shake* seguida pelo VND) não seja encontrada uma solução melhor, muda-se para a vizinhança que realiza uma maior quantidade de avaliações (maior custo computacional) na fase de busca local. Caso seja encontrada uma solução melhor, atualiza-se a solução incumbente e retorna-se a vizinhança de menor cardinalidade (menor quantidade de avaliações). Neste trabalho, o procedimento de *Shake* não é modificado pela cardinalidade da vizinhança.

### 3 METODOLOGIA: ESTIMATIVA DO DESEMPENHO DA LINHA

#### 3.1 Modelagem Computacional

Para estimar o desempenho da linha de transmissão, utiliza-se o *software* ATP para construir um modelo computacional formado pela junção de vários componentes (Figura 3). São eles: as descargas atmosféricas, os vãos de linha, as torres, os para-raios e o sistema de aterramento.

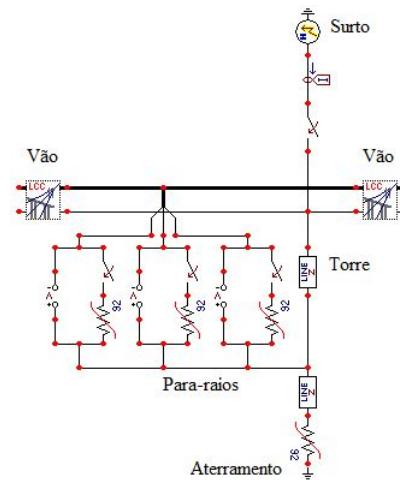


Figura 3: Trecho de linha modelado no ATPDraw. Por fins ilustrativos apenas uma única torre é exibida.

A torre é representada por dois trechos de linha de transmissão vertical com parâmetros distribuídos, ligados em série. O comprimento da parte inferior é dado pela distância entre o condutor 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 de propagação igual a 85% da velocidade da luz e ii) impedância de surto igual a  $200 \Omega$  [1][16].

Os parâmetros da LT são retratados considerando a variação na frequência por meio do modelo de JMarti. A forma de onda da descarga atmosférica foi modelada considerando representação

triangular  $1.2/50 \mu s$  [17]. Os para-raios, por seu lado, são representados por elementos não lineares dada a sua curva característica  $V \times I$  [18].

O sistema de aterramento, por sua vez, é modelado por uma resistência concentrada cujo valor é definido igual ao valor da resistência de aterramento em baixa frequência. Tal modelagem desconsidera o efeito de ionização do solo, resultando em uma estimativa mais cautelosa para o número de desligamentos.

Uma vez modelada a linha, o ATP simula a incidência de descargas atmosféricas na primeira estrutura e calcula as sobretensões geradas nesta situação. Em seguida, um procedimento análogo é feito considerando a incidência de descargas atmosféricas nas estruturas 2, 3, 4 e, assim, sucessivamente. Quando a última estrutura da linha é simulada, o desempenho da LT é então estimado por meio de uma média ponderada da quantidade de desligamentos que ocorrem em cada uma das estruturas.

As torres utilizadas em cada execução do ATP variam de acordo com a estrutura atingida pela descarga atmosférica. Em situações onde as extremidades da linha não estão envolvidas, as simulações sempre consideram três vãos para cada lado, a partir da torre atingida pela descarga atmosférica. As descargas atmosféricas na parte inicial da linha são simuladas considerando o trecho formado pelas sete torres iniciais, enquanto que a incidência de descargas no final da LT considera o trecho com as últimas sete torres.

Diante do que foi descrito, independentemente do local atingido pela descarga atmosférica, as simulações feitas sempre consideram um trecho de linha formado por sete torres. De acordo com o estudo [19], dois vãos adjacentes (cinco torres no total) são suficientes para modelar o problema de forma adequada quando a simulação feita considera somente descargas atmosféricas que atingem diretamente a torre. No entanto, por precaução, o modelo considerado neste trabalho faz uso de 3 vãos adjacentes.

Por fim, é importante ressaltar que a metodologia faz uso de duas estratégias computacionais para reduzir o custo da aplicação. A primeira delas consiste em avaliar os indivíduos de forma concorrente por meio da utilização de múltiplas *threads*. Já a segunda faz uso de uma memória para armazenar os trechos de linha que já foram simulados.

### 3.2 Desempenho de Linhas de Transmissão

O desempenho da linha de transmissão é estimado por meio da quantidade de descargas atmosféricas que atingem a linha e da probabilidade de ocorrer uma descarga capaz de provocar uma ruptura na cadeia de isoladores. Além disso, vale ressaltar que, aspectos relacionados à falha de blindagem não são incluídos na modelagem e que o número de desligamentos é calculado considerando apenas a incidência direta de descargas atmosféricas na torre. Para fins ilustrativos, a Figura 4 exibe uma situação de ruptura do isolamento por *backflashover*. Além disso, detalham-se alguns dos principais componentes de uma LT.

De acordo com [21], o número de descargas atmosféricas que atingem a linha por 100 km por ano,  $N_L$ , pode ser calculado de acordo com a Equação 3. Na qual,  $N_g$  é a densidade de descargas atmosféricas (raios/  $km^2$ / ano),  $H_t$  é a altura da linha de transmissão ( $m$ ) e  $d_{pr}$  é a distância entre os cabos para-raios ( $m$ ).

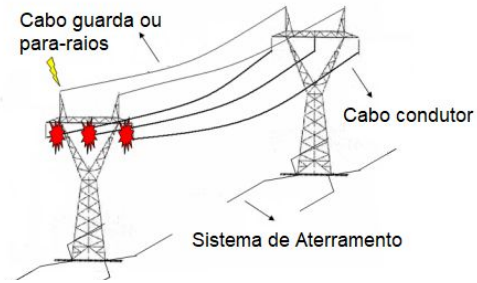


Figura 4: Disruptura do isolamento de uma LT provocada pela sobretensão resultante nos isoladores em função da incidência direta de descarga em uma torre. Figura adaptada de [20].

$$N_L = \frac{N_g}{10} \left[ 2 \left( 14H_t^{0,6} \right) + d_{pr} \right] \quad (3)$$

A suportabilidade da cadeia de isoladores, por sua vez, é avaliada por meio da curva tensão x tempo dada pela Equação 4 [17]. Em que,  $V_d$  é a tensão crítica disruptiva ( $kV$ ),  $L$  é o comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ ) e  $t$  é o instante de tempo de ruptura ( $\mu s$ ).

$$V_d = 400L + \frac{710L}{t^{0,75}} \quad (4)$$

Por meio da curva  $V \times t$  e da sobretensão calculada pelo ATP, a corrente crítica,  $I_{cc}$ , capaz de provocar uma ruptura na cadeia de isoladores é calculada de acordo com [17]. A partir daí, a Equação 5 é utilizada para quantificar a probabilidade de se ter uma corrente de descarga cuja amplitude ultrapasse  $I_{cc}$  ( $kA$ ).

$$P(I_{cc}) = \frac{1}{1 + \left( \frac{I_{cc}}{45} \right)^{3,9}} \quad (5)$$

Para as LTs consideradas neste trabalho, os parâmetros extraídos das medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo (vide [22]) são mais representativos que aqueles indicados em [17] e [21]. Por esse motivo, a Equação (5) é utilizada [5], uma vez que tanto a Estação do Morro do Cachimbo, quanto as linhas consideradas neste trabalho estão localizadas no Brasil e possuem latitudes próximas.

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

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

em que, o valor 0,6 corresponde ao fator de correção quando a metodologia considera apenas a incidência de descargas atmosféricas na torre [21].

O uso da Equação (6) assume que alguns parâmetros da linha, como a altura e a impedância de aterramento de cada estrutura são constantes. Como essa condição nem sempre é verdadeira, a metodologia usada neste trabalho divide cada torre da LT e seus vãos adjacentes em uma seção de linha diferente e, por meio das simulações feitas no ATP, calcula o número de desligamentos que ocorre em cada uma.

Além disso, a modelagem também considera o efeito de transferência do surto atmosférico devido à operação dos para-raios. Por esse motivo, o desempenho da linha de transmissão é calculado pela Equação 7, proposta em [11] da seguinte forma:

$$LFOR = \frac{\sum_{i=1}^n [(1 - \alpha_i) BFR_i + \alpha_i AFOR_{ij}] L_i}{L} \quad (7)$$

Em que:

- $LFOR$  (do inglês, *Lightning Flashover Rate*) é a taxa total de desligamentos da linha de transmissão;
- $BFR_i$  (do inglês, *Backflashover Rate*) é a parcela da taxa de desligamentos causados pelo *backflashover* na estrutura  $i$ ;
- $AFOR_{ij}$  (do inglês, *Adjacent Flashover Rate*) é a parcela da taxa de desligamentos causados pelo *flashover* devido ao efeito de transferência do surto atmosférico para a estrutura  $j$ , a qual é adjacente a  $i$ ;
- $\alpha_i$  é um *bit* que indica quando a estrutura  $i$  possui para-raios em todas as fases. Neste caso, o *bit* assume o valor unitário, caso contrário,  $\alpha_i$  é igual a zero;
- $n$  é o número de estruturas da linha de transmissão;
- $i$  é a estrutura atingida pela descarga atmosférica;
- $j$  é a estrutura adjacente a  $i$ ;
- $L_i$  é o comprimento do vão da estrutura  $i$ ;
- $L$  é comprimento total da linha de transmissão.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Dados das Linhas de Transmissão

Para avaliar a efetividade da metodologia proposta, realizaram-se simulações considerando duas linhas de transmissão: uma LT real de 230 kV propriedade do Grupo Alupar e uma LT de 69 kV cujos dados pertencem à base de dados do Laboratório de Computação Evolucionária da UFMG. A LT de 230 kV possui aproximadamente 105 km de extensão. A Tabela 1 apresenta os dados gerais dessa LT, a qual possui um circuito trifásico e dois cabos guarda.

Tabela 1: Características gerais da LT de 230 kV em análise.

Característica	Valor
Quantidade de torres	231
Classe de tensão (kV)	230
Quantidade de para-raios na linha	6
Comprimento da cadeia de isoladores (m)	2,190

A Figura 5-a, no que lhe diz respeito, mostra a distribuição das alturas das torres, enquanto que a Figura 5-b exibe o comprimento dos vãos. Analisando a Figura 5-a, nota-se que a maioria das estruturas possui altura entre 30 e 40 metros. Observando a Figura 5-b, verifica-se que o comprimento do vão típico está na faixa de 400 a 600 metros.

Por fim, a Figura 5-c mostra a distribuição dos valores da resistência de aterramento das estruturas ao longo da linha. Como pode ser visto, a maioria das estruturas tem resistência de aterramento entre 10 e 40  $\Omega$ .

A segunda linha de transmissão considerada neste trabalho apresenta circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A Tabela

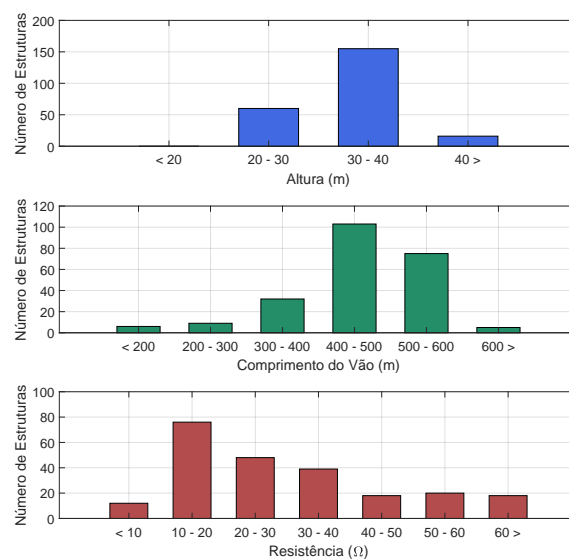


Figura 5: Número de estruturas da LT de 230 kV em análise por: a) faixa de altura, b) faixa de comprimento do vão e c) faixa de resistência de aterramento.

2 exibe as características gerais dessa linha, como, por exemplo, a quantidade de torres e o comprimento da cadeia de isoladores. Os valores considerados para a resistividade do solo e densidade de descargas atmosféricas ( $N_g$ ) são constantes para todas as torres.

Tabela 2: Características gerais da LT de 69 kV em análise.

Característica	Valor
Quantidade de torres	56
Classe de tensão (kV)	69
Quantidade de para-raios na linha	12
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000
Comprimento da cadeia de isoladores (m)	0,875
$N_g$ (raios/km <sup>2</sup> /ano)	6,0

O perfil de altura das estruturas (Figura 6-a) mostra que a maioria das torres apresenta altura entre 20 e 30 metros. O perfil de comprimento dos vãos (Figura 6-b), por seu lado, fornece que os maiores valores estão na região central da linha analisada, tomando como exemplo, as torres de número 19, 22 e 35. Em relação aos valores de resistência de aterramento (Figura 6-c), é possível observar que a região final da linha apresenta um acréscimo considerável nesses valores.

Além do mencionado, vale destacar que essa linha apresenta 12 para-raios instalados nas torres de índices 1, 2, 230 e 231. Por último, vale apontar que o desempenho estimado pela metodologia proposta é de 16,84 desligamentos/100 km/ano.

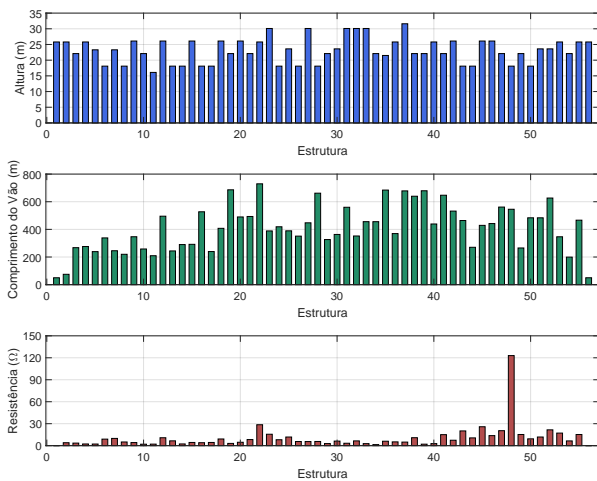


Figura 6: Perfil das estruturas da LT de 69 kV em estudo: a) altura, b) comprimento do vão e c) resistência de aterramento.

## 4.2 Limites para o Número de Desligamentos Causados por Descargas Atmosféricas

Com o objetivo de garantir qualidade na energia fornecida pelas concessionárias, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) define limites aceitáveis para o número de desligamentos das LTs causados por descargas atmosféricas ( $Des_{max}$ ). O limite utilizado para LTs de 230 kV da Rede Básica - da qual a primeira LT considerada faz parte - é de 2,0 desligamentos/100 km/ano [23].

Para instalações com tensão inferior a 230 kV, avalia-se a qualidade da energia entregue pelas concessionárias com base em indicadores de continuidade e tempo de atendimento a ocorrências emergenciais [24]. Entretanto, não existe uma relação direta entre os indicadores citados e o número de desligamentos decorrentes do fenômeno de *backflashover*. Pesando-se as incertezas vinculadas foi adotado um critério de 5,00 desligamentos/100 km/ano. Vale destacar que, na literatura são encontrados projetos que utilizam como referência um valor de 10,00 a 12,00 desligamentos/100 km/ano para linhas de transmissão com classe de tensão próxima [25, 26].

## 4.3 Validação da Estimativa de Desempenho

Para fins de comparação, uma análise é feita utilizando a metodologia proposta e o Programa IEEE Flash [17]. Vale ressaltar que, essa análise leva em consideração somente a LT de 230 kV. Dados operacionais dessa LT, registrados pelo Grupo Alupar, mostram que no período de 2012 a 2017, a linha em estudo teve em média 6,20 desligamentos/100 km/ano, o qual está bem acima do limite de 2 desligamentos/100 km/ano. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os dados de desligamentos observados e aqueles estimados considerando a metodologia proposta e o Programa IEEE Flash.

Como pode ser visto na Tabela 3, a metodologia proposta estima um número ligeiramente menor de desligamentos da linha (98,5%), enquanto que os resultados obtidos com o Programa IEEE Flash são superiores (37,7%). Em um cenário repleto de incertezas, pode-se dizer que esses resultados apresentam uma margem de erro aceitável.

Tabela 3: Comparação de desempenho estimado considerando: i) as medições; ii) a metodologia proposta e iii) o Programa IEEE Flash.

Metodologia	LFOR
	Desligamentos/100 km/ano
Medições	6,20
Metodologia Proposta	6,11
Programa IEEE Flash	8,54

## 4.4 Alocação Ótima de Para-raios

Com o objetivo de melhorar o desempenho das linhas de transmissão apresentadas, o posicionamento ótimo de para-raios é utilizado. A restrição da quantidade máxima de desligamentos é considerada igual aos limites estabelecidos na Subseção 4.2.

Com a finalidade de validar a metodologia desenvolvida, os resultados obtidos são comparados com outros alcançados através do acoplamento de um algoritmo genético - GA (do inglês, *Genetic Algorithm*) com o ATP. De início, a população inicial do algoritmo genético é criada por meio da mesma heurística construtiva descrita. Essa população inicial é então avaliada (equações (1) e (2)) e se o critério de parada não for atendido (intervalo de tempo pré-definido), uma nova população é formada por meio dos processos de seleção, cruzamento e mutação.

Para analisar o funcionamento da metodologia proposta são realizados experimentos que otimizam o posicionamento de para-raios nas LTs apresentadas. Os experimentos são repetidos 30 vezes para o algoritmo proposto, como também para o algoritmo usado como base de comparação. No caso do GA, a população é constituída por 512 indivíduos.<sup>1</sup>

O intervalo de tempo definido como critério de parada é calculado em função do tamanho da entrada da instância testada (número de torres da LT). Adota-se uma regra em que o tempo em minutos deve ser 1,3 vezes maior do que a quantidade de torres. Seguindo essa regra é estipulado um tempo de aproximadamente 300 min para a LT de 230 kV e cerca de 73 min para a LT de 69 kV.

**4.4.1 Linha de Transmissão de 230 kV.** A Figura 7 exibe um *box plot* que fornece informações sobre a distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos executados para a LT de 230 kV considerando os algoritmos GA e GVNS. Em cada uma das execuções realizadas, armazenou-se a melhor solução encontrada no processo de busca. Vale ressaltar que, todas as soluções obtidas para ambos algoritmos atendem a restrição de 2,0 desligamentos/100 km/ano.

A Figura 8, por sua vez, exibe a evolução da qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo. Ao analisar tal resultado, juntamente com aqueles apresentados na Figura 7, é possível perceber um desempenho superior para o algoritmo GVNS na LT de 230 kV. Vale enfatizar que, o desempenho original estimado para essa LT com 6 dispositivos para-raios é de 6,11 desligamentos/100 km/ano. Esses resultados corroboram com a premissa de que o uso de para-raios pode melhorar de forma significativa o desempenho de linhas de transmissão.

<sup>1</sup>Nesses experimentos é utilizado um computador Intel i7-4771, 3,50 GHz, 8,00 GB RAM, sistema operacional Windows 7 Professional. Os algoritmos estão implementados na linguagem Java versão 11.0.2.

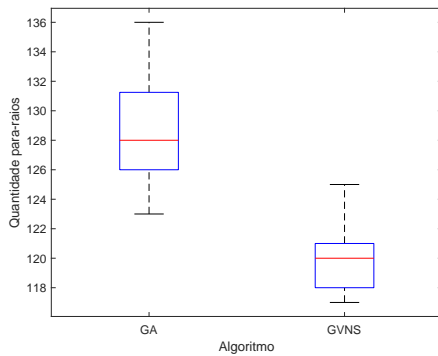


Figura 7: Distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos executados para a LT de 230 kV.

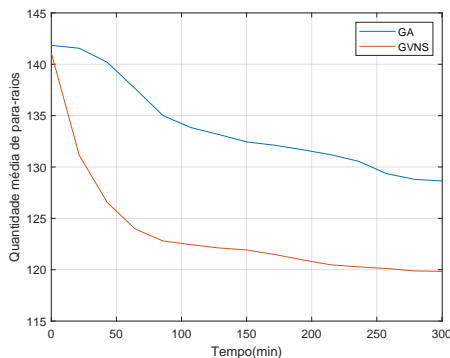


Figura 8: Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo para a LT de 230 kV.

Para verificar a efetividade da metodologia proposta, outra análise comparativa é feita considerando duas soluções clássicas de posicionamento de para-raios baseadas nos valores de impedância de aterramento. A primeira delas considera a instalação de para-raios em todas as estruturas com impedância de aterramento maior do que 20 Ω, enquanto que a segunda utiliza a mesma estratégia, mas considerando o valor de 30 Ω. A Tabela 4 mostra o desempenho estimado e a quantidade de para-raios considerando essas formas de posicionamento e outra solução obtida considerando uma das execuções do algoritmo proposto para a LT de 230 kV (Figura 7).

Tabela 4: Quantidade de para-raios e número de desligamentos estimados para arranjos clássicos e a metodologia proposta.

Posicionamento de Para-raios	Qtde. de Para-raios	LFOR Desligamentos/100 km/ano
20 Ω	435	0.57
30 Ω	291	1.04
GVNS	120	2.00

A Tabela 4 mostra que o método de posicionamento clássico fornece soluções que são capazes de atender ao limite estabelecido pela ANEEL. Contudo, a solução encontrada pela abordagem proposta atende o critério desempenho e utiliza uma quantidade bem menor de para-raios. Sendo assim, apesar de ser uma solução muitas vezes utilizada na literatura, o método de posicionamento clássico baseado nos valores de impedância de aterramento não é capaz de alocar os recursos de forma ótima.

4.4.2 *Linha de Transmissão de 69 kV.* A Figura 9 exibe a distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos executados para a LT de 69 kV considerando os algoritmos GA e GVNS. Vale enfatizar que todas as soluções obtidas para ambos algoritmos atendem a restrição de 5,0 desligamentos/100 km/ano.

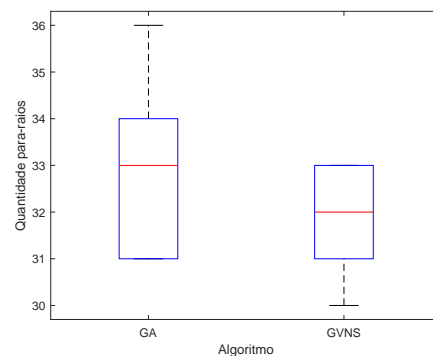


Figura 9: Distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos executados para a LT de 69 kV.

A análise dos resultados da Figura 9 em conjunto com aqueles apresentados na Figura 10 possibilita a observação de um desempenho ligeiramente superior para o algoritmo proposto neste trabalho. Vale destacar que, o desempenho original dessa LT com 12 dispositivos para-raios é de 16,84 desligamentos/100 km/ano.

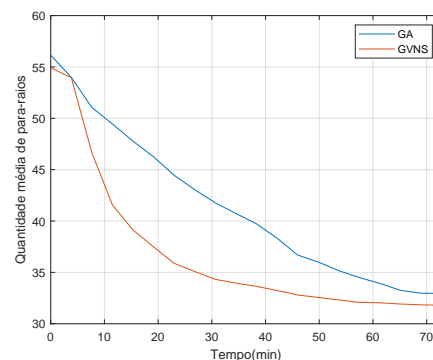


Figura 10: Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo para a LT de 69 kV.

## 5 CONCLUSÕES

A instalação de dispositivos para-raios tem sido uma das soluções encontradas para melhorar o desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas. Diante disso, este trabalho apresenta uma metodologia para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs, a qual visa garantir o desempenho da linha e, ao mesmo tempo, fornecer uma solução economicamente viável. A metodologia possui caráter genérico e flexível, uma vez que pode ser aplicada a diferentes LTs.

Em relação ao cálculo de desempenho da linha, o procedimento usado neste trabalho baseia-se em uma abordagem mais detalhada, na qual o ATP é executado para simular a incidência de descargas atmosféricas em cada uma das estruturas da LT. Dessa forma, ao invés de utilizar valores médios, o desempenho é estimado considerando os dados específicos de cada torre.

Outra contribuição deste trabalho é o direcionamento da busca durante o processo de otimização, o que se mostra importante em função do tamanho do espaço de busca do problema. Dentre os fatores utilizados para o direcionamento, incluem-se técnicas clássicas como o favorecimento do posicionamento de para-raios na(s) fase(s) mais baixa(s) das torres críticas - geralmente acompanhadas por valores elevados de resistência de aterramento - e o pouco explorado efeito de transferência do surto para as torres adjacentes devido à operação de para-raios.

Dois estudos de casos foram apresentados, um considerando uma LT de 230 kV e outro uma LT de 69 kV. No primeiro caso, o posicionamento de para-raios pelo algoritmo proposto sugere o uso de menos da metade do número de dispositivos indicado pelo método de posicionamento baseado no valor da impedância de aterramento. Esse valor também é inferior ao número de para-raios sugerido pelo algoritmo usado como base de comparação. No segundo estudo de caso, os resultados obtidos também podem ser considerados favoráveis ao algoritmo apresentado, uma vez que a quantidade de para-raios necessária para atender o limite de deslocamentos estabelecido foi inferior ao algoritmo usado como base de comparação.

Três fatores ajudam a explicar os resultados obtidos pelo algoritmo proposto: o direcionamento da busca para torres consideradas críticas em relação ao desempenho da LT; a consideração do efeito de transferência do surto atmosférico e o favorecimento do posicionamento de para-raios na(s) fase(s) mais baixa(s) das torres críticas. Os resultados apresentados mostram que os aspectos apontados devem ser considerados no projeto de futuros algoritmos para o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do grupo Alupar, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e CAPES - Brasil.

## REFERÊNCIAS

- [1] AC EPRI. *Transmission Line Reference Book—200 kV and Above*. Electric Power Research Institute, 2005.
- [2] S Sadovic, R Joulie, S Tartier, and E Brocard. Use of line surge arresters for the improvement of the lightning performance of 63 kv and 90 kv shielded and unshielded transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(3): 1232–1240, 1997.
- [3] Karthik Munukutla, Vijay Vittal, Gerald T Heydt, Daryl Chipman, and Brian Keel. A practical evaluation of surge arrester placement for transmission line

- lightning protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3):1742–1748, 2010.
- [4] Fabio Massimo Gatta, Alberto Geri, Stefano Lauria, Marco Maccioni, and Francesco Palone. Tower grounding improvement versus line surge arresters: Comparison of remedial measures for high-voltage subtransmission lines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6):4952–4960, 2015.
- [5] Rafael Alipio, Matheus HR Duarte, Jéssica CA Dias, and Audine S De Miranda. Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical brazilian conditions. In *2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, pages 365–369. IEEE, 2017.
- [6] Silverio Visacro, Fernando H Silveira, Barbara Pereira, and Rafael M Gomes. Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 180:106064, 2020.
- [7] Reza Shariatinasab, Behrooz Vahidi, SH Hosseinian, and Akihiro Ametani. Probabilistic evaluation of optimal location of surge arresters on ehv and uhv networks due to switching and lightning surges. *IEEE transactions on power delivery*, 24(4): 1903–1911, 2009.
- [8] B Vahidi, MR Bank Tavakoli, and SH Hosseinian. Determining arresters best positions in power system for lightning shielding failure protection using simulation optimization approach. *European transactions on electrical power*, 20(3): 255–276, 2010.
- [9] M Kezunovic and T Dokic. Optimal placement of line surge arresters based on predictive risk framework using spatiotemporally correlated big data. *CIGRE General Session, Session Papers & Proceedings, C4-202\_2018, Paris, France, Aug. 2018, 2018*.
- [10] Reza Shariatinasab and Reza Azimi. A methodology for optimal design of transmission lines to protection against lightning surges in presence of arresters. *Advanced Electromagnetics*, 9(1):105–110, 2020.
- [11] Wallace S Castro, Ivan JS Lopes, Silvio LV Missé, and João A Vasconcelos. Optimal placement of surge arresters for transmission lines lightning performance improvement. *Electric Power Systems Research*, 202:107583, 2022.
- [12] Pierre Hansen and Nenad Mladenovic. A tutorial on variable neighborhood search. *Les Cahiers du GERAD ISSN*, 711:2440, 2003.
- [13] Ab Halim Abu Bakar, Dian Najihah Abu Talib, Hazlie Mokhlis, and Hazlee Azil Illias. Lightning back flashover double circuit tripping pattern of 132 kv lines in malaysia. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 45(1): 235–241, 2013.
- [14] M Babuder, M Kenda, P Kotar, E Brocard, S Tartier, R Joulie, and S Sadovic. Lightning performance improvement of 123 kv transmission line by use of line surge arresters. In *1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, volume 2, pages 250–253. IET, 1999.
- [15] JA Tarchini and W Gimenez. Line surge arrester selection to improve lightning performance of transmission lines. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, volume 2, pages 6–pp. IEEE, 2003.
- [16] Michael A Sargent and Mat Darveniza. Tower surge impedance. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88(5):680–687, 1969.
- [17] IEEE Working Group et al. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines. *IEEE Trans. Power App. Syst*, 104(4):919–932, 1985.
- [18] Sandro de Castro Assis, Wallace do Couto Boaventura, José Osvaldo Saldanha Paulino, and Rubens Leopoldo Markiewicz. Lightning performance of transmission line with and without surge arresters: Comparison between a monte carlo method and field experience. *Electric Power Systems Research*, 149:169–177, 2017.
- [19] Mladen S Banjanin and Milan S Savić. Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 26(1):79–93, 2016.
- [20] Leandro Veloso Cunha. Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura a meio de vão. 2010.
- [21] CIGRE Working Group et al. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *CIGRE SC33. 10 (1991)*, 1991.
- [22] Silverio Visacro, Claudia R Mesquita, Alberto De Conti, and Fernando H Silveira. Updated statistics of lightning currents measured at morro do cachimbo station. *Atmospheric Research*, 117:55–63, 2012.
- [23] ONS. *Submódulo 2.4: Requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas. Operador Nacional do Sistema Elétrico*, 2011, 2011. URL [http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%202%2FSubm%C3%B3dulo%202.4%2FSubm%C3%B3dulo%202.4\\_Rev\\_2.0.pdf](http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%202%2FSubm%C3%B3dulo%202.4%2FSubm%C3%B3dulo%202.4_Rev_2.0.pdf). Disponível no.
- [24] ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*, 2021. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>.
- [25] Sandro de Castro Assis, Edino B Giudice Filho, Roberto Márcio Coutinho, João Henrique Magalhães Almeida, André Matias Nunes Teixeira, and Jorge Luiz de Franco. Metodologia de análise de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas considerando para-raios zno. 2012.
- [26] Henrique Tassara Calenzani and Ivan José da Silva Lopes. Desempenho de linhas de distribuição de 138 kv frente a descargas atmosféricas: Um estudo de caso de uma linha real. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 1(1), 2020.