

Metodologia para Alocação Ótima de Para-raios em Linhas de Transmissão *

Matheus Christino Marzochi * João Antônio de Vasconcelos **
Walace da Silva Castro *** Silvio Luis Vernieri Missé ****

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

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

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

**** Grupo Alupar - Rua Gomes de Carvalho 1996, 16^º andar, 04547-006, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: smisse@alupar.com.br).

Abstract: The application of transmission line surge arresters (TLSAs) is one of the main approaches found to boost the performance of overhead transmission lines (OHTLs) against atmospheric discharges. Thus, this work proposes a methodology for the optimal placement of TLSAs in OHTLs based on the combination of an optimization algorithm - inspired by General Variable Neighbourhood Search and Genetic Algorithm - and the ATP (Alternative Transient Program). The line performance estimation is made considering the little cited transfer effect of the atmospheric surge due to arresters operation. At the end, in order to analyze the functioning of the proposed procedure, experiments are carried out to optimize the positioning of TLSAs in two OHTLs. It may be inferred from the results that directing search considering the lightning surge transfer effect and favoring the positioning of TLSAs in the lowest phase(s) can reduce the amount of arresters necessary to satisfy the performance constraints, or at least diminish the application computational cost.

Resumo: A instalação de para-raios é uma das principais abordagens encontradas para melhorar o desempenho de linhas de transmissão (LTs) frente às descargas atmosféricas. Assim sendo, este trabalho propõe um modelo para otimizar a alocação de para-raios em LTs baseado na junção entre um algoritmo de otimização inspirado na meta-heurística busca em vizinhança variável geral e no algoritmo genético com o *software* ATP. A estimativa de desempenho da linha é feita tendo em conta o pouco citado efeito de transferência do surto atmosférico devido à operação dos para-raios. Com o objetivo de verificar o funcionamento da metodologia são realizados experimentos que otimizam o posicionamento de para-raios em duas LTs. Infere-se dos resultados que o direcionamento da busca considerando o efeito de transferência de surto e o favorecimento à alocação de para-raios nas fases mais baixas pode reduzir a quantidade de para-raios necessária para se atender aos limites de desempenho, ou ao menos reduzir o custo computacional da aplicação.

Keywords: Transmission Line Surge Arresters; Atmospheric Discharge; Genetic Algorithm; General Variable Neighbourhood Search; Alternative Transient Program.

Palavras-chave: Para-raios; Descarga Atmosférica; Algoritmo Genético; Busca em Vizinhança Variável Geral; ATP.

1. INTRODUÇÃO

A incidência de descargas atmosféricas é a principal origem de desligamentos não programados em linhas de transmissão (LTs) (EPRI, 2005; ANEEL, 2018). E em alguns casos, mesmo com a LT resguardada por cabos para-

raios, pode haver um número elevado de desligamentos em função do fenômeno de *backflashover*. Nesse cenário, uma das soluções mais preeminentes para melhoria do desempenho das LTs é a instalação de dispositivos para-raios em paralelo com a cadeia de isoladores (Sadovic et al., 1997; Munukutla et al., 2010; Gatta et al., 2015; Alipio et al., 2017).

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

Em (Visacro et al., 2020), uma consideração importante para o emprego de para-raios em LTs é analisada. De

forma sucinta, os autores concluem que o uso de para-raios pode melhorar o desempenho da torre atingida pela descarga atmosférica, mas pode piorar o comportamento em torres adjacentes à torre atingida. Esse mecanismo de transferência ainda é pouco mencionado e/ou incluso em estudos computacionais para melhoria do desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas mediante instalação de dispositivos para-raios.

Dada a complexidade do problema, o uso de técnicas de otimização é um caminho interessante para guiar o processo de posicionamento de para-raios em LTs. Esse problema pode ser anunciado da seguinte forma: dada uma LT, quais são os pontos em que os para-raios deverão ser posicionados de forma a proteger a linha e, simultaneamente, garantir uma solução viável economicamente. Até o momento atual, poucos trabalhos tocam esse problema na perspectiva da otimização (Kezunovic e Dokic, 2018; Shariatinasab e Azimi, 2020; Castro et al., 2022).

Este trabalho propõe um modelo para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs, o qual é baseada no acoplamento entre um algoritmo híbrido inspirado na busca em vizinhança variável geral GVNS (do inglês, *General Variable Neighborhood Search*) (Hansen e Mladenovic, 2003) e no algoritmo genético GA (do inglês, *Genetic Algorithm*) (Whitley, 1994) com o *software* ATP (do inglês, *Alternative Transient Program*). Vale destacar que, a modelagem considerada inclui o efeito de transferência de surto mencionado.

Para verificar a eficácia do modelo, 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 pertencente à base de dados do Laboratório de Computação Evolucionária da UFMG, composta por dados reais obtidos por meio de medições e estimativas. Para a LT de 230 kV um histórico de desligamentos permite a comparação com os resultados da metodologia proposta.

2. METODOLOGIA: OTIMIZAÇÃO

2.1 Formulação Matemática

A alocação ótima de para-raios é expressa neste trabalho como um problema de otimização mono-objetivo restrito, o qual busca a minimização da quantidade de para-raios instalados na linha de transmissão. As equações abaixo mostram a formulação matemática utilizada.

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

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

Em que, dado um arranjo de para-raios na linha, P_R representa a quantidade de para-raios proposta pela metodologia, Des_{LT} retrata o desempenho estimado da linha com esse arranjo. Por último, Des_{max} simboliza a quantidade máxima pré-estabelecida de desligamentos. Vale enfatizar que, a restrição - $g(\mathbf{x})$ - visa garantir que todas as soluções obtidas possuam valores de desempenho abaixo do limite pré-definido pela respectiva agência reguladora.

2.2 Descrição do Algoritmo de Otimização

O modelo proposto é composto pela interação entre um módulo de otimização formado por um algoritmo híbrido - algoritmo baseado nos métodos GVNS e GA com operadores adaptados para o problema - e o *software* ATP. De forma resumida, o módulo de otimização propõe e avalia diferentes arranjos de distribuição de para-raios ao longo da LT, almejando encontrar a melhor solução possível, isto é, a solução ótima. Cada uma das soluções candidatas do problema é representada por uma cadeia de caracteres binários que designam os locais de posicionamento dos para-raios.

O ATP, por seu lado, computa as sobretensões nas cadeias de isoladores, devido à incidência de descargas atmosféricas no topo das torres, considerando que a linha de transmissão simulada está equipada com o arranjo de para-raios indicado pela solução candidata. Com base nos valores de sobretensão calculados, o desempenho da LT frente às descargas atmosféricas é estimado. Esse cálculo é detalhado na Seção 3.

A Figura 1 exibe um fluxograma do algoritmo de alocação ótima de para-raios proposto. De início, um conjunto de soluções é produzido por uma heurística construtiva com o objetivo de acelerar o processo de busca pela solução.

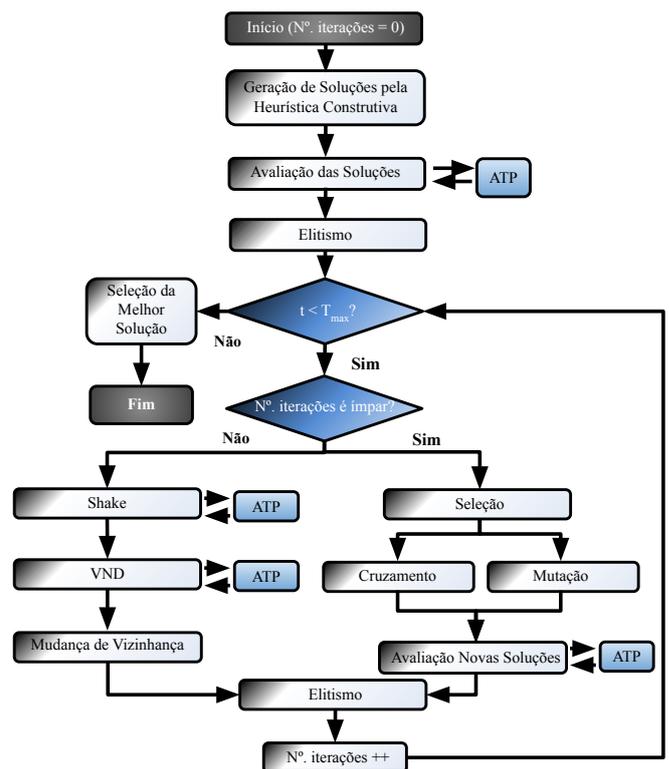


Figura 1. Fluxograma do algoritmo proposto para alocação ótima de para-raios.

Nessa heurística construtiva algumas das soluções iniciais são geradas de forma aleatória e outras de maneira determinística. Dentre as soluções geradas de forma determinística, pode-se apontar 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 da configuração original da LT.

As soluções iniciais são avaliadas (equações (1) e (2)) e as M melhores são escolhidas - etapa *Elitismo* - para compor uma população arquivo (Pop_{Arq}) responsável por armazenar as melhores soluções até então encontradas. Essa população arquivo é usada como ponto de partida no algoritmo inspirado nos métodos GVNS e GA.

Formada a população Pop_{Arq} o algoritmo entra em um laço (*loop*), permanecendo nesse laço 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.

A cada iteração do laço dois caminhos podem ser seguidos. Cada um desses caminhos é escolhido de forma alternada. Na iteração inicial é escolhido o primeiro caminho, na segunda iteração é escolhido o segundo, segue-se nessa alternância até que o critério de parada seja satisfeito. O primeiro caminho é inspirado no algoritmo GVNS e constituído pelos operadores de perturbação (*Shake*), busca local (*VND*) e *Mudança de Vizinhança*. O segundo caminho, por sua vez, é inspirado no algoritmo GA e composto pelos operadores de *Seleção*, *Cruzamento* e *Mutação*.

Ao final de cada iteração do laço, independente do caminho seguido, é executado um processo de *Elitismo* para atualizar as soluções armazenadas em Pop_{Arq} , nesse processo de atualização são levadas em consideração as novas soluções produzidas e as soluções que estavam presentes em Pop_{Arq} . As M melhores soluções até então encontradas são armazenadas em Pop_{Arq} . Por fim, o número de iterações é incrementado ($N^{\circ} \text{ iterações} ++$).

Quando o critério de parada é atendido, o algoritmo seleciona a melhor dentre as M soluções presentes em Pop_{Arq} e chega ao seu término (*Fim*). Os operadores são apresentados detalhadamente em 2.2.2 - Operadores Inspirados no GVNS (Caminho 1) e 2.2.3 - Operadores Inspirados no GA (Caminho 2).

Representação do Arranjo de Para-raios O processo de otimização desenvolvido possibilita a alocação de para-raios por torre ou por fase. Na alocação por torre, cada caractere representa o posicionamento ou não de para-raios em todas as fases de uma estrutura. Na alocação por fase, por sua vez, cada caractere representa o posicionamento ou não de dispositivo para-raios em uma fase de uma torre.

A Figura 2 exibe um arranjo para uma LT hipotética com 5 torres. A parte a) dessa Figura ilustra a alocação por torre, a sequência de caracteres "1-0-1-0-0" indica que a primeira e a terceira estrutura devem receber a instalação de dispositivos para-raios em todas as suas fases, enquanto as demais torres não devem receber para-raios.

Na parte b) da Figura 2 é exemplificado o posicionamento por fase. O conjunto de caracteres "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 instalação de nenhum dispositivo, enquanto a torre 3 deve adotar para-raios em todas as fases.

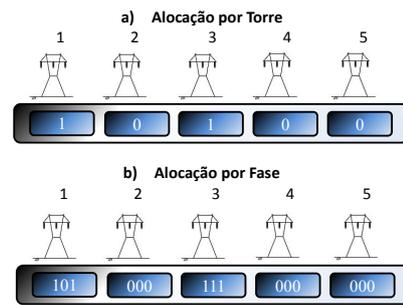


Figura 2. Representação binária da solução: a) alocação por torre, b) alocação por fase. Linha trifásica hipotética com cinco torres.

Operadores Inspirados no GVNS (Caminho 1) O processo de perturbação (*Shake*) proposto busca privilegiar as estruturas consideradas críticas em relação ao desempenho da LT. Para cada uma das M soluções presentes em Pop_{Arq} , repete-se um procedimento de dividir as torres em duas listas:

- Lista A - Composta pelas torres sem para-raios ordenadas de forma decrescente com base no número de desligamentos estimado para cada torre da solução em questão oriunda de Pop_{Arq} ;
- Lista B - Constituída pelas torres com para-raios organizadas em ordem crescente segundo o número de desligamentos estimado para cada torre da configuração original da LT.

Associados a ordenação dessas duas listas são criados pesos contendo a probabilidade de cada uma das torres ser escolhida. Os valores dos pesos são atribuídos seguindo uma distribuição geométrica. Quanto menor o índice de uma torre na lista, maior a probabilidade dessa torre ser escolhida.

Realizada a divisão das torres em duas listas, para cada uma das soluções presentes em Pop_{Arq} é gerado um número aleatório que determina o percentual de torres modificadas (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.

O procedimento de geração de novas soluções perturbando as soluções vindas de Pop_{Arq} é repetido até se produzirem n soluções para cada uma das M soluções provenientes de Pop_{Arq} . A melhor dentre essas n soluções é usada na fase de busca local (*VND*). Desse modo, ao final da etapa de *Shake* é produzida uma nova população Pop_{Shake} com M novas soluções.

A escolha de uma entre n soluções visa evitar um ponto de partida ruim para a fase de busca local. Com base em experimentos se sugere uso de $n = 16$ buscando um *trade-off* entre 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. As estruturas de vizinhanças 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 signifi-

ficativo nas torres imediatamente adjacentes à torre atingida por descarga atmosférica (Visacro et al., 2020). Em função desse resultado é proposta a escolha de vizinhanças formada por trecho contendo 3 torres consecutivas.

Para a alocação por torre somente uma estrutura de vizinhança é utilizada. Nessa vizinhança é procurado o melhor arranjo de para-raios considerando todas as possibilidades em um trecho formado por 3 torres adjacentes. Ou seja, procura-se a melhor dentre as 8 (2^3) possibilidades de arranjos.

Para a alocação por fase, por seu turno, são utilizadas duas estruturas de vizinhança:

- 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 caracteres em LTs trifásicas). Esta vizinhança contém no máximo 512 (2^9) soluções em LTs trifásicas.
- Vizinhança 2 - Busca da melhor configuração 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.

Em LTs protegidas por cabo guarda geralmente os condutores mais baixos possuem um pior fator de acoplamento com o cabo guarda, o que resulta em maiores valores de sobretensão nesses condutores (Bakar et al., 2013). Em um cenário em que todas as fases estão a mesma altura, as duas vizinhanças se tornam idênticas. Alguns trabalhos na literatura (Babuder et al., 1999; Tarchini e Gimenez, 2003) fazem uso de regras, ainda que sem o uso da 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 (fase de *Shake* seguida pelo VND) não seja produzida uma solução melhor, muda-se para a vizinhança que realiza uma maior quantidade de avaliações na etapa de busca local na alocação por fase. Caso seja encontrada uma solução melhor, retorna-se a vizinhança de menor cardinalidade (menor quantidade de avaliações). Na alocação por torre tal mecanismo não é utilizado tendo em vista que somente uma estrutura de vizinhança é empregada.

Ao final da etapa de busca local são produzidas M novas soluções a partir das M soluções originárias de Pop_{Shake} . Essas M novas soluções constituem a população Pop_{VND} . Na etapa de *Elitismo* são escolhidas as M melhores soluções presentes no conjunto de tamanho $2M$ formado pela união das populações Pop_{VND} e Pop_{Arq} .

Operadores Inspirados no GA (Caminho 2) Na etapa de seleção, um torneio binário simples é utilizado. Resumidamente, duas soluções são escolhidas aleatoriamente, comparadas e a melhor é utilizada na etapa de cruzamento ou mutação. Esse procedimento é repetido até se obter M soluções. As operações de cruzamento e mutação, por

sua vez, são efetuadas em paralelo. Um número $p \in [0, 1]$ é gerado aleatoriamente de uma distribuição uniforme. Se o número gerado for menor do que 0,90 a operação de cruzamento é executada, caso contrário é realizada a operação de mutação.

A etapa de cruzamento é implementada baseada em um método consagrado na literatura para problemas combinatorios (Ramos-Figueroa et al., 2020). Dois arranjos de para-raios são escolhidos de forma aleatória, a partir da população Pop_{Arq} , e então o processo de cruzamento é realizado considerando dois pontos de corte (Vasconcelos et al., 2001).

Em relação à operação de mutação, consideram-se dois mecanismos simples que possuem a mesma frequência de ocorrência. O primeiro mecanismo inverte um caractere de uma posição escolhida aleatoriamente da solução, em outras palavras, um valor unitário se torna zero após a mutação e, vice-versa. O segundo mecanismo sorteia duas posições da solução com caracteres diferentes e realiza uma inversão dos valores dos caracteres.

Realiza a etapa de cruzamento ou mutação são produzidas M novas soluções. Essas M novas soluções constituem a população $Pop_{Reprodução}$. Na etapa de *Elitismo* são escolhidas as M melhores soluções presentes no conjunto formado pela união das populações $Pop_{Reprodução}$ e Pop_{Arq} .

3. METODOLOGIA: ESTIMATIVA DO DESEMPENHO DA LINHA

3.1 Modelagem Computacional

Para estimar o desempenho da linha de transmissão, emprega-se o ATP para simular um modelo computacional formado pela junção dos seguintes elementos: descargas atmosféricas, vãos de linha, torres, para-raios e sistema de aterramento.

A forma de onda da descarga atmosférica foi modelada considerando a representação triangular $1.2/50 \mu s$ (IEEE et al., 1985). Já os parâmetros da linha de transmissão são retratados levando em conta a variação na frequência por meio do modelo de JMarti. A torre, no que lhe diz respeito, é reproduzida por dois trechos de linha de transmissão vertical com parâmetros distribuídos, ligados em série.

Os para-raios, por sua vez, são reproduzidos por elementos não lineares dada a sua curva característica $V \times I$ (Assis et al., 2017). Por fim, o sistema de aterramento é modelado por uma resistência concentrada cujo valor é definido igual ao valor da resistência de aterramento em baixa frequência. O modelo empregado não considera o efeito de ionização do solo.

Uma vez modelada a linha, o ATP simula a incidência de descargas atmosféricas na primeira estrutura e estima as sobretensões geradas nesta situação. Em seguida, um procedimento semelhante é feito levando em consideração 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. Independentemente do local atingido pela descarga, as simulações sempre consideram um trecho de linha composto por sete torres.

De acordo com (Banjanin e Savić, 2016), dois vãos adjacentes (cinco torres no total) são suficientes para modelar o problema de forma satisfatória quando a simulação considera somente descargas atmosféricas que atingem diretamente a torre. Contudo, por precaução, o modelo considerado neste trabalho faz uso de 3 vãos adjacentes. Por último, vale realçar que a metodologia faz uso das estratégias para redução do custo computacional desenvolvidas em (Castro, 2016).

3.2 Desempenho de Linhas de Transmissão

O desempenho das LTs é estimado neste trabalho por meio da quantidade de descargas atmosféricas que incidem na linha e da probabilidade de ocorrer uma descarga capaz de provocar uma disrupção na cadeia de isoladores. Questões relacionadas à falha de blindagem não são consideradas.

O número de descargas atmosféricas que atingem a linha por 100 km por ano, N_L , é calculado com base em (CIGRÉ et al., 1991). Esse número é 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).

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

A suportabilidade da cadeia de isoladores, por seu lado, é estimada por meio da curva tensão x tempo dada pela Equação 4 (IEEE et al., 1985). 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 disrupção (μs).

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

Por meio da curva $V \times t$ e da sobretensão calculada pelo ATP, a corrente crítica, I_{cc} , capaz de provocar uma disrupção na cadeia de isoladores é calculada de acordo com (IEEE et al., 1985). Neste ponto, utiliza-se a Equação 5 para ponderar a probabilidade de se ter uma corrente de descarga com amplitude superior a 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 (Visacro et al., 2012)) são mais representativos que aqueles indicados em (IEEE et al., 1985) e (CIGRÉ et al., 1991). Por esse motivo, usa-se a Equação (5) (Alipio et al., 2017).

A partir do número de descargas que incidem na linha (N_L) e da probabilidade $P(I_{cc})$, a taxa de desligamentos

decorrentes do fenômeno *backflashover* pode ser calculada como:

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

em que, o valor 0,6 é um fator de correção empregado devido a consideração na metodologia somente da incidência de descargas atmosféricas na torre (CIGRÉ et al., 1991).

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 premissa 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, estima o número de desligamentos que ocorre em cada uma.

Por último, enfatiza-se a inclusão no modelo do efeito de transferência do surto devido à operação dos para-raios. Em função disso, o desempenho da LT é calculado pela Equação 7, proposta em (Castro et al., 2022).

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

Em que:

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

4. RESULTADOS

4.1 Dados das Linhas de Transmissão

Para avaliar a metodologia proposta, realizaram-se simulações considerando duas linhas de transmissão: uma LT real de 230 kV e uma LT de 69 kV. A LT de 230 kV possui aproximadamente 105 km de extensão e fica localizada na região Centro-Oeste do Brasil. A Tabela 1 apresenta os dados gerais dessa LT, a qual possui um circuito trifásico e dois cabos guarda. Um detalhamento maior dos dados dessa LT é apresentado em (Castro et al., 2022).

A segunda linha de transmissão considerada possui circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A Tabela 2 exhibe as características gerais dessa linha, como, por

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

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	43
Classe de tensão (kV)	69
Quantidade de para-raios na linha	12
Resistividade do solo (Ωm)	1000
Comprimento da cadeia de isoladores (m)	0,875
N_g (raios/km ² /ano)	6,0

4.2 Limites para o Número de Desligamentos Causados por Descargas Atmosféricas

Visando assegurar qualidade na energia fornecida pelas concessionárias, os órgãos reguladores do setor elétrico definem limites toleráveis para o número de desligamentos das LTs causados por descargas atmosféricas (DES_{max}). No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) delimita os limites utilizados para LTs com classe de tensão igual ou superior a 230 kV da Rede Básica - da qual a primeira LT considerada faz parte. O limite para LTs de 230 kV é de 2,00 desligamentos/100 km/ano (ONS, 2020).

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 (ANEEL, 2021). Contudo, não existe uma relação direta entre os indicadores mencionados e o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas. Este trabalho utilizou como referência trabalhos com classe de tensão próxima que usam como base um valor de 10,00 a 12,00 desligamentos/100 km/ano (Assis et al., 2012; Calenzani e Lopes, 2020). Com o objetivo de ser mais cauteloso considerando as incertezas envolvidas foi adotado um critério de 5,00 desligamentos/100 km/ano.

4.3 Validação da Estimativa de Desempenho

Com fins comparativos uma análise é feita utilizando a metodologia proposta e o Programa IEEE Flash (IEEE et al., 1985). Dados de operação da LT de 230 kV em estudo, registrados pelo Grupo Alupar, mostram que entre os anos de 2012 e 2017, essa linha teve em média 6,2 desligamentos/100 km/ano, valor consideravelmente acima do limite de 2,0 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, enquanto que os resultados obtidos com o Programa

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	5,81
Programa IEEE Flash	8,54

IEEE Flash são superiores. Em um cenário com várias incertezas, pode-se afirmar que esses resultados exibem uma margem de erro aceitável.

4.4 Alocação Ótima de Para-raios

Com o objetivo de validar a metodologia proposta, os resultados obtidos são comparados com os resultados alcançados através do acoplamento de um algoritmo genético - GA com o ATP. Para começar, a população inicial do algoritmo genético é criada por meio da mesma heurística construtiva. Essa população inicial é então avaliada (equações (1) e (2)) e caso o critério de parada não seja 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 cada um dos algoritmos (algoritmo híbrido GA+GVNS proposto e algoritmo GA). O algoritmo genético é constituído por 512 indivíduos.¹

O intervalo de tempo utilizado como critério de parada é fixado com base no tamanho da entrada da instância avaliada (número de caracteres da instância). Para a representação por fase o número de caracteres é três vezes maior do que a representação por torre para LTs trifásicas. É estabelecida uma regra em que o tempo em minutos deve ser 0,4 vezes a quantidade de caracteres. Seguindo essa regra é adotado um tempo de aproximadamente 92 min para a representação por torre da LT de 230 kV e cerca de 277 min para a representação por fase dessa LT. Já para a LT de 69 kV é utilizado um período de tempo de aproximadamente 17 min para a representação por torre e por volta de 52 min para a representação por fase.

A Figura 3 exibe um *box plot* com informações sobre a distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos. Em cada uma das execuções se armazenou a melhor solução obtida na busca. Vale destacar que, todas as soluções obtidas atendem ao limite no número desligamentos.

O desempenho original estimado para a LT de 230 kV com 6 dispositivos para-raios é de 5,81 desligamentos/100 km/ano. A disposição original dos 12 para-raios instalados na LT de 69 kV, por sua vez, possui uma estimativa de 10,40 desligamentos/100 km/ano. Os resultados das simulações confirmam que o uso de para-raios pode melhorar o desempenho de LTs de modo a se atender os limites de desligamentos estabelecidos pelos órgãos reguladores.

¹ Nos experimentos foi utilizado um computador Intel i7-4771, 3,50 GHz, 8,00 GB RAM, 64 bits, sistema operacional Windows 7 Professional. A implementação se dá na linguagem Java versão 11.0.2.

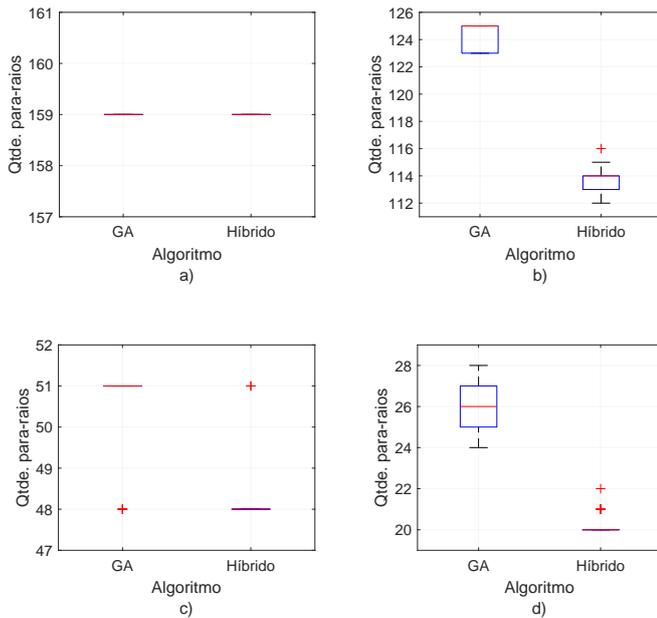


Figura 3. Distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos realizados para as LTs avaliadas: a) LT 230 kV - alocação por torre, b) LT 230 kV - alocação por fase, c) LT 69 kV - alocação por torre e d) LT 69 kV - alocação por fase.

Para examinar a metodologia proposta, uma análise comparativa é feita considerando duas soluções clássicas de posicionamento de para-raios baseadas nos valores de impedância de aterramento para a LT de 230 kV. A primeira delas considera a instalação de para-raios em todas as estruturas com impedância de aterramento maior do que 20 Ω , enquanto a segunda utiliza a mesma estratégia, mas tendo em conta o valor de 30 Ω . A Tabela 4 exibe o desempenho estimado e a quantidade de para-raios considerando essas formas de posicionamento e duas soluções obtidas com o algoritmo proposto, uma solução para a alocação por torre e outra por fase (Figura 3-a e Figura 3-b).

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
Híbrido (Torre)	159	1.99
Híbrido (Fase)	113	2.00

A Tabela 4 mostra que o método de posicionamento clássico fornece soluções que são capazes de atender ao limite estabelecido pelo ONS. Contudo, ambas as soluções encontradas pela abordagem proposta atendem o critério de desempenho e utilizam uma quantidade significativamente menor de para-raios. Dessa forma, apesar de ser uma solução muito usada, o método de posicionamento clássico não aloca os para-raios de forma ótima.

Através da análise da Figura 3 é possível perceber que o posicionamento por fase sugere cerca de 46 para-raios a menos para proteger a LT de 230 kV se comparado ao posicionamento por torre para o algoritmo híbrido. Para

a LT de 69 kV são necessários aproximadamente 28 para-raios a menos para a alocação por fase. Vale lembrar que o posicionamento por fase é mais flexível e tende a apresentar soluções com um número menor ou no mínimo igual de para-raios. Por outro lado, o tempo de execução necessário para convergência na alocação por fase é maior.

A Figura 4 exibe a qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo. Os benefícios do uso da heurística construtiva para gerar as soluções iniciais podem ser facilmente observados, uma vez que o melhor arranjo da primeira iteração já pode ser considerado uma boa solução.

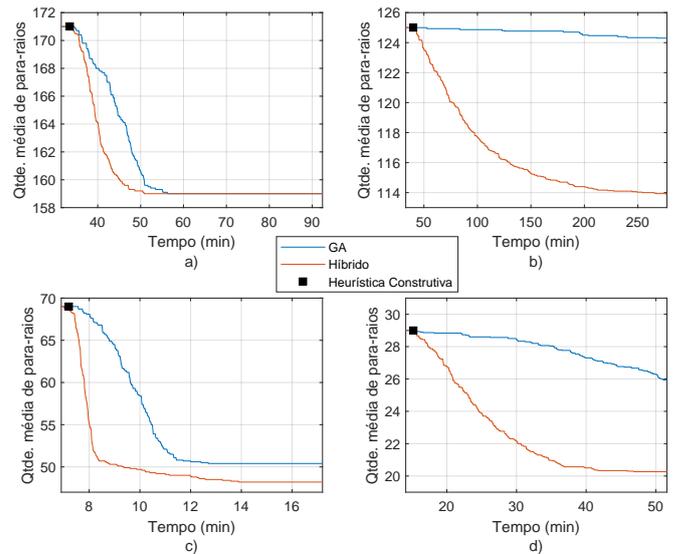


Figura 4. Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo para as LTs testadas: a) LT 230 kV - alocação por torre, b) LT 230 kV - alocação por fase, c) LT 69 kV - alocação por torre e d) LT 69 kV - alocação por fase.

Através da análise dos resultados das Figuras 3 e 4 é possível perceber um desempenho superior para o algoritmo híbrido. Principalmente na alocação de para-raios por fase. Vale salientar que, em todas as instâncias avaliadas o algoritmo proposto apresentou um custo computacional menor para produzir soluções melhores ou tão boas quanto o algoritmo usado como base de comparação.

5. CONCLUSÕES

O posicionamento de para-raios vem sendo uma das principais soluções para melhorar o desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma metodologia genérica para a alocação ótima de para-raios em LTs, que busca garantir um bom desempenho da linha de modo financeiramente viável.

Um estudo considerando uma LT real de 230 kV é exibido. Com base na análise dos resultados é possível afirmar que o posicionamento de para-raios pelo algoritmo proposto sugere o uso de uma quantidade significativamente menor de dispositivos em comparação ao posicionamento baseado no valor da impedância de aterramento. Esse valor também é inferior ao número de para-raios sugerido pelo algoritmo usado como referência. Uma segunda LT de 69 kV também

apresentou resultados positivos ao algoritmo introduzido neste trabalho.

Os seguintes fatores ajudam a justificar a superioridade do 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.

REFERÊNCIAS

- Alipio, R., Duarte, M.H., Dias, J.C., e De Miranda, A.S. (2017). Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical brazilian conditions. In *2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, 365–369. IEEE.
- ANEEL (2018). *Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/avisos-e-comunicados/-/asset_publisher/xVhS2p1F8dhn/content/relatorio-de-analise-de-desligamentos-forcados-do-sistema-de-transmissao-edicao-2017/656808?inheritRedirect=false.
- ANEEL (2021). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>.
- Assis, S.d.C., Boaventura, W.d.C., Paulino, J.O.S., e Markiewicz, R.L. (2017). 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.
- Assis, S.d.C., Giudice Filho, E.B., Coutinho, R.M., Almeida, J.H.M., Teixeira, A.M.N., e Franco, J.L.d. (2012). Metodologia de análise de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas considerando para-raios zno.
- Babuder, M., Kenda, M., Kotar, P., Brocard, E., Tartier, S., Joulie, R., e Sadovic, S. (1999). 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, 250–253. IET.
- Bakar, A.H.A., Talib, D.N.A., Mokhlis, H., e Illias, H.A. (2013). Lightning back flashover double circuit tripping pattern of 132 kv lines in malaysia. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 45(1), 235–241.
- Banjanin, M.S. e Savić, M.S. (2016). Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 26(1), 79–93.
- Calenzani, H.T. e Lopes, I.J.d.S. (2020). 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).
- Castro, W.S. (2016). *Posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão*. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- Castro, W.S., Lopes, I.J., Missé, S.L., e Vasconcelos, J.A. (2022). Optimal placement of surge arresters for transmission lines lightning performance improvement. *Electric Power Systems Research*, 202, 107583.
- CIGRÉ, W.G. et al. (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *CIGRE SC33. 10 (1991)*.
- EPRI, A. (2005). *Transmission Line Reference Book—200 kV and Above*. Electric Power Research Institute.
- Gatta, F.M., Geri, A., Lauria, S., Maccioni, M., e Palone, F. (2015). Tower grounding improvement versus line surge arresters: Comparison of remedial measures for high-bfor subtransmission lines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 4952–4960.
- Hansen, P. e Mladenovic, N. (2003). A tutorial on variable neighborhood search. *Les Cahiers du GERAD ISSN*, 711, 2440.
- IEEE, W.G. et al. (1985). A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines. *IEEE Trans. Power App. Syst*, 104(4), 919–932.
- Kezunovic, M. e Dokic, T. (2018). 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*.
- Munukutla, K., Vittal, V., Heydt, G.T., Chipman, D., e Keel, B. (2010). A practical evaluation of surge arrester placement for transmission line lightning protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3), 1742–1748.
- ONS (2020). *Submódulo 2.7: Requisitos mínimos para linhas de transmissão. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020*. Disponível em http://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.7-RQ_2020.12.pdf.
- Ramos-Figueroa, O., Quiroz-Castellanos, M., Mezura-Montes, E., e Kharel, R. (2020). Variation operators for grouping genetic algorithms: A review. *Swarm and Evolutionary Computation*, 100796.
- Sadovic, S., Joulie, R., Tartier, S., e Brocard, E. (1997). 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.
- Shariatinasab, R. e Azimi, R. (2020). A methodology for optimal design of transmission lines to protection against lightning surges in presence of arresters. *Advanced Electromagnetics*, 9(1), 105–110.
- Tarchini, J. e Gimenez, W. (2003). Line surge arrester selection to improve lightning performance of transmission lines. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, volume 2, 6–pp. IEEE.
- Vasconcelos, J.A., Ramirez, J.A., Takahashi, R.H.C., e Saldanha, R.R. (2001). Improvements in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(5), 3414–3417. doi:10.1109/20.952626.
- Visacro, S., Mesquita, C.R., De Conti, A., e Silveira, F.H. (2012). Updated statistics of lightning currents measured at morro do cachimbo station. *Atmospheric Research*, 117, 55–63.
- Visacro, S., Silveira, F.H., Pereira, B., e Gomes, R.M. (2020). Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 180, 106064.
- Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. *Statistics and computing*, 4(2), 65–85.