

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Matheus Christino Marzochi

**METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE PARA-RAIOS EM LINHAS  
DE TRANSMISSÃO OBJETIVANDO A MELHORIA DO DESEMPENHO  
FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Belo Horizonte

2022

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE PARA-RAIOS EM  
LINHAS DE TRANSMISSÃO OBJETIVANDO A MELHORIA DO  
DESEMPENHO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Matheus Christino Marzochi

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. João Antônio de Vasconcelos

Belo Horizonte - MG

Maio de 2022



M393m

Marzochi, Matheus Christino.

Metodologia para alocação ótima de para-raios em linhas de transmissão objetivando a melhoria do desempenho frente às descargas atmosféricas [recurso eletrônico] / Matheus Christino Marzochi. – 2022.  
1 recurso online (137 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: João Antônio de Vasconcelos.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 129-137.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Linha de transmissão - Teses. 3. Para-raios - Teses. 4. Raio - Teses. 5. Otimização - Teses. 6. Algoritmos genéticos - Teses. I. Vasconcelos, João Antônio de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

### FOLHA DE APROVAÇÃO

" Metodologia para Alocação Ótima de Para-raios em Linhas de Transmissão Objetivando a Melhoria do Desempenho Frente às Descargas Atmosféricas"

**MATHEUS CHRISTINO MARZOCHI**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 31 de maio de 2022, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Márcio Matias Afonso (Engenharia Elétrica (CEFET MG))

Prof. Dr. Ricardo Luiz da Silva Adriano (DEE (UFMG))

Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes (DEE (UFMG))

Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos (DEE (UFMG)) - Orientador

Belo Horizonte, 31 de maio de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **João Antonio de Vasconcelos, Presidente de comissão**, em 10/06/2022, às 09:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1494391** e o código CRC **D8F18DA2**.

*Dedico este trabalho aos meus pais Maurício  
Gonçalves Marzochi e Maria Cristina Vieira  
Marzochi.*

---

---

# Agradecimentos

---

Agradeço em primeiro lugar à Deus por guiar meus passos e me ajudar a vencer os obstáculos impostos.

Ao meu pai Mauricio e à minha mãe Cristina por todo a educação, suporte, dedicação e amor. À minha irmã, Myrelle, pelo companheirismo. Às minhas avós, Aurea e Luzia, pelo amor e carinho. Ao meu avô Valdioliro que, lá do céu, com certeza está acompanhando minha jornada.

Agradeço ao professor João Antônio de Vasconcelos pela orientação, pelos conselhos e por todas as oportunidades concedidas.

Aos amigos do Laboratório de Computação Evolucionária, pela amizade e pelo espírito voluntário. Especialmente aos amigos Wallace Castro e Diego Rocha.

O desenvolvimento deste trabalho está vinculado ao P&D denominado: "Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas através da Alocação Ótima de Para-Raios via Algoritmos de Otimização Acoplados com o ATP", com apoio financeiro da Alupar Investimento S.A. Dessa forma, agradeço à toda equipe do projeto.

Por fim, ao CNPq por ter financiado boa parte dos meus estudos.

A todos, o meu muito obrigado.

---

# Agradecimento Especial

---

Às empresas do Grupo Alupar (Empresa de Transmissão de Energia do Mato Grosso S.A. (ETEM), Transmissora Matogrossense de Energia S.A. (TME), Empresa de Transmissão do Espírito Santo S.A. (ETES) e a Empresa de Transmissão de Várzea Grande S.A. (ETVG)) e à ANEEL, pelo apoio técnico e financeiro durante o desenvolvimento desta Dissertação, a qual esteve vinculada ao P&D: “Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas através da Alocação Ótima de Para-Raios via Algoritmos de Otimização Acoplados com o ATP”. Além disso, gostaria de agradecer nominalmente ao Sívio Misse (Alupar), Fábio Mangile (Genus Consultoria) e Marcos Vinícius Oliveira dos Santos (ETES-ETEM-TME-ETVG-ETAP-ETC).

A todos, o meu muito obrigado.

*“Alguns confiam em carros e outros em cavalos, mas nós confiamos no nome do Senhor nosso Deus.”*

Salmos 20:7

---

# Resumo

---

A incidência direta de descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão (LTs) é um dos principais obstáculos para a oferta contínua de energia elétrica. Uma prática comum para mitigar os efeitos das descargas atmosféricas nas LTs é a instalação de cabos para-raios no topo das torres. Contudo, mesmo LTs protegidas por cabos para-raios podem apresentar um número elevado de desligamentos. Nesse contexto, buscando melhorar o desempenho das LTs, uma das principais alternativas é o uso de dispositivos para-raios. No entanto, é importante identificar os locais onde tais dispositivos devem ser instalados para evitar um gasto excessivo de recursos financeiros. Assim sendo, com o intuito de atender os limites de desligamentos definidos pelos órgãos reguladores e levando em consideração o aspecto financeiro através da minimização da quantidade de para-raios usados, esta dissertação propõe uma metodologia para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs. Essa metodologia é baseada na junção entre um algoritmo de otimização inspirado na meta-heurística busca em vizinhança variável geral e no algoritmo genético com o *software* ATP (do inglês, *Alternative Transient Program*). O cálculo de desempenho da linha leva em consideração o efeito de transferência do surto atmosférico devido à operação dos para-raios. Esse mecanismo de transferência que pode levar as torres adjacentes ao *flashover* é pouco mencionado na literatura. Com o objetivo de analisar o funcionamento da metodologia proposta são realizadas simulações que otimizam o posicionamento de para-raios em múltiplas LTs. Para validar a metodologia desenvolvida, os resultados alcançados são comparados com outros obtidos pelo uso de um algoritmo genético com o ATP, e do uso da busca em vizinhança variável geral com o ATP. Os resultados também são comparados com métodos clássicos para o posicionamento de para-raios. Infere-se que aspectos como o efeito de transferência de surto atmosférico e o favorecimento ao posicionamento de para-raios na(s) fase(s) mais baixa(s) devem ser considerados no projeto de algoritmos para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs.

**Palavras-chave:** Linhas de Transmissão, Para-raios, Descargas Atmosféricas, Otimização Mono-objetivo; Algoritmo Genético, Busca em Vizinhança Variável Geral, Simulação de Transientes Eletromagnéticos.

---

---

# Abstract

---

The direct incidence of atmospheric discharges on overhead transmission lines (OHTLs) is one of the main obstacles to the continuous supply of electricity. A common practice to mitigate the effects of lightning in OHTLs is the installation of overhead ground wires (OHGWs). However, even an OHTL protected by OHGW can present a high number of outages. In this context, seeking to improve the performance of OHTLs, one of the main alternatives is the use of transmission line surge arresters (TLSAs). However, it is important to identify the locations where such devices must be installed to avoid excessive expenditure of financial resources. Therefore, in order to meet the outages limits defined by regulatory agencies and taking into account the financial aspect by minimizing the amount of TLSAs used, this work proposes a methodology for the optimal positioning of TLSAs in OHTLs. This methodology is based on the combination of an optimization algorithm - inspired by General Variable Neighbourhood Search and Genetic Algorithm - with the ATP (Alternative Transient Program). The line performance calculation is made considering the transfer effect of the atmospheric surge due to arresters operation. This transfer mechanism that can lead adjacent towers to flashover is rarely mentioned in the literature. In order to analyze the behavior of the proposed approach, experiments are carried out to optimize the positioning of TLSAs in multiple OHTLs. To validate the developed procedure, the results obtained are compared with others that are provided by coupling a Genetic Algorithm with ATP, and with the results achieved by coupling a General Variable Neighbourhood Search algorithm with ATP. They are also compared to classical methods for the positioning of TLSAs. It is possible to conclude that aspects such as the atmospheric surge transfer effect and favoring the positioning of lightning arresters in the lowest phase(s) should be taken into account in studies for the optimal placement of TLSAs in OHTLs.

**Keywords:** Transmission Line Surge Arresters, Atmospheric Discharge, Single Objective Optimization, Genetic Algorithm, General Variable Neighborhood Search, Alternative Transient Program.



---

# Lista de Figuras

---

2.1	Situação característica de um <i>flashover</i> - falha de blindagem. Figura retirada de (Uglešić et al., 2009). . . . .	28
2.2	Situação característica de um <i>backflashover</i> . Figura retirada de (Uglešić et al., 2009). . . . .	28
2.3	Percentuais da geração de energia relativa à origem da mesma. Figura adaptada do SIGA (Sistema de Informações de Geração da ANEEL) referentes ao ano de 2021 (SIGA/ANEEL, 2021). . . . .	30
2.4	Extensão das linhas de transmissão do SIN no ano de 2019 - horizonte com as linhas previstas até 2024. Figura obtida da ferramenta de mapas do SIN (SIN/ANEEL, 2019). . . . .	31
2.5	Distribuição global da densidade média anual de descargas atmosféricas (descargas atmosféricas/( $km^2 \cdot ano$ )) no intervalo 2010-2020. Figura adaptada de (Kaplan & Lau, 2021). . . . .	32
2.6	Classificação dos desligamentos forçados analisados quanto à sua origem. Figura adaptada do Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão da ANEEL - Edição 2018 (ANEEL, 2018). . .	37
2.7	Estratificação dos desligamentos forçados analisados em relação ao tipo de rede (Básica ou Rede) e local (Linha de Transmissão ou Subestação). Figura retirada do Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão da ANEEL - Edição 2018 (ANEEL, 2018). . . . .	38
3.1	Estrutura funcional da metodologia. . . . .	45

3.2	Representação binária da solução: a) alocação por torre, b) alocação por fase. Linha trifásica hipotética com cinco torres. . . . .	47
3.3	Linha do tempo com alguns dos principais EAs propostos. Figura adaptada de (Yu & Gen, 2010). . . . .	49
3.4	Fluxograma do algoritmo GA adaptado para o problema de alocação ótima de para-raios. . . . .	54
3.5	Fluxograma do algoritmo GVNS adaptado para o problema de alocação ótima de para-raios. . . . .	55
3.6	Fluxograma do algoritmo híbrido desenvolvido para o problema de alocação ótima de para-raios. . . . .	59
3.7	Ilustração das torres selecionadas para simulação no ATP em uma LT fictícia com 30 estruturas. . . . .	63
3.8	Exemplo de situação em que dois arranjos de para-raios diferem em apenas uma torre em uma LT hipotética com 30 estruturas. Figura adaptada de (Castro, 2022). . . . .	64
3.9	Esquema de mapeamento de trechos simulados em uma memória auxiliar. Figura adaptada de (Castro, 2022). . . . .	65
4.1	Trecho de uma LT trifásica com um cabo guarda modelado no ATPDraw. . . . .	68
4.2	Forma de onda da corrente: representativa, dupla exponencial, CIGRÉ e triangular. . . . .	70
4.3	Representação das torres por dois trechos de linha de transmissão vertical ligados em série. Figura retirada de (Castro, 2016). . . . .	71
4.4	Curva $V \times I$ do para-raios. Figura retirada de (Castro, 2016). . . . .	72
5.1	Número de estruturas por faixa de altura da LT de 230 kV em estudo. . . . .	80
5.2	Número de estruturas por faixa de comprimento do vão da LT de 230 kV em análise. . . . .	80
5.3	Número de estruturas por faixa de resistência de aterramento da LT de 230 kV estudada. . . . .	81

5.4	Número de estruturas por faixa de resistividade do solo da LT de 230 kV analisada. . . . .	81
5.5	Número de estruturas por faixa de densidade de descargas da LT de 230 kV em questão. . . . .	82
5.6	Silhueta do tipo mais comum de torre da linha de transmissão examinada.	84
5.7	Sobretensões impelidas na cadeia de isoladores da torre de índice 151. Amplitude da corrente de retorno igual a 45 kA. . . . .	85
5.8	Sobretensões na cadeia de isoladores da torre de índice 151 antes (curvas tracejadas) e após a instalação de para-raios nas 3 fases dessa torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 70 kA. . . . .	86
5.9	Sobretensões nos isoladores das torres de índices 151 e 152 sem a adição de para-raios. Amplitude da corrente de retorno igual a 70 kA. . . . .	88
5.10	Sobretensões nos isoladores das torres de índices 151 e 152 após adição de para-raios nas 3 fases da estrutura de número 151. Amplitude da corrente de retorno igual a 120 kA. . . . .	88
5.11	Sobretensões nos isoladores das torres de índices 151 e 152 após adição de para-raios nas 3 fases das estruturas de número 150, 151 e 152. Amplitude da corrente de retorno igual a 120 kA. . . . .	90
5.12	Valores estimados de corrente crítica para a configuração original da LT em estudo. O gráfico mostra os valores de corrente crítica levando em consideração as fases de cada torre na sequência ABC. . . . .	91
5.13	Valores estimados de corrente crítica para a solução alcançada no processo de otimização. O arranjo obtido possui um desempenho 1,98 desligamentos / 100 km / ano e faz uso de 165 para-raios. . . . .	96
5.14	Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo considerando a alocação por torre para os algoritmos implementados. .	98
5.15	Valores estimados de corrente crítica para a solução alcançada na otimização. O arranjo obtido possui um desempenho 2,00 desligamentos / 100 km / ano e faz uso de 128 para-raios. . . . .	99
5.16	Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo considerando a alocação por fase. . . . .	100

5.17	Distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos realizados para a LT em estudo: a) alocação por torre e b) alocação por fase. . . . .	101
6.1	Perfil das estruturas da segunda LT analisada: a) altura, b) comprimento do vão posterior e c) resistência de aterramento. . . . .	106
6.2	Configuração inicial de para-raios da segunda LT. Utilização de 12 para-raios situados nas estruturas de índices: 1, 2, 55 e 56. . . . .	106
6.3	Perfil das estruturas da terceira LT analisada: a) altura, b) comprimento do vão posterior e c) resistência de aterramento. . . . .	108
6.4	Configuração inicial de para-raios da terceira LT. Utilização de 12 para-raios instalados nas estruturas de índices: 1, 2, 42 e 43. . . . .	108
6.5	Perfil do comprimento dos vãos posteriores das estruturas. Quarta linha de transmissão. . . . .	109
6.6	Configuração inicial de para-raios da quarta LT. Utilização de 6 para-raios instalados nas estruturas de índices: 1 e 61. . . . .	109
6.7	Geometria das torres da quinta LT examinada. Figura retirada de (Rodrigues et al., 2014a). . . . .	110
6.8	a) Perfil da densidade de descargas atmosféricas ao longo da extensão da LT. b) Perfil da resistência de aterramento das estruturas. Quinta linha de transmissão. . . . .	110
6.9	Distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos realizados considerando o posicionamento por fase para as LTs avaliadas: LT 1, LT 2, LT 3, LT 4 e LT 5. . . . .	114
6.10	Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo para as LTs testadas considerando o posicionamento por fase: LT 1, LT 2, LT 3, LT 4 e LT 5. . . . .	116
6.11	Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a segunda LT. Desempenho de 4,99 desligamentos / 100 km / ano com a utilização de 31 para-raios. . . . .	117
6.12	Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a terceira LT. Desempenho de 4,79 desligamentos / 100 km / ano com a utilização de 19 para-raios. . . . .	117

6.13	Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a quarta LT. Desempenho de 4,98 desligamentos / 100 km / ano com a utilização de 33 para-raios. . . . .	117
6.14	Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a quinta LT. Desempenho de 1,00 desligamento / 100 km / ano com a utilização de 29 para-raios. . . . .	118
6.15	Validação da premissa de normalidade dos resíduos. . . . .	122
6.16	Comparação múltipla das médias: teste de Dunnett para contrastes com nível de confiança de 95%. . . . .	123

---

---

# Lista de Tabelas

---

1.1	Principais diferenças entre esta dissertação e o trabalho desenvolvido em (Castro, 2022). . . . .	24
2.1	Número máximo de desligamentos por descargas atmosféricas para linhas de transmissão aéreas em corrente alternada de tensão igual ou superior a 230 kV de acordo com limites estabelecido pelo ONS. Tabela adaptada dos Procedimentos de Rede: Submódulo 2.7 (ONS, 2020). . . .	39
4.1	Parâmetros utilizados para modelagem da fonte de corrente de Heidler.	69
4.2	Trechos de linha utilizados na simulação de uma LT genérica com 30 estruturas. Por fins ilustrativos, apenas alguns trechos são exibidos. . . .	71
4.3	Configurações utilizadas nesta dissertação. . . . .	74
5.1	Características gerais da linha de transmissão de 230 kV em análise. . . .	80
5.2	Principais características da torre de índice 151 da LT de 230 kV em análise.	83
5.3	Principais características da torre de índice 152 da LT de 230 kV em estudo.	83
5.4	Registro histórico dos desligamentos causados por descargas atmosféricas - dados provenientes das medições do Grupo Alupar. . . . .	92
5.5	Geometria das estruturas utilizada no programa IEEE-Flash. . . . .	93
5.6	Distribuição dos valores de resistência de aterramento utilizados no <i>software</i> IEEE-Flash. . . . .	93

5.7	Comparação de desempenho estimado considerando: i) as medições de campo; ii) a metodologia proposta e iii) o programa IEEE Flash. . . . .	94
5.8	Análise das estratégias para redução do custo computacional. Média de dez execuções levando em consideração a alocação por torre. Um estudo mais detalhado é realizado em (Castro, 2016). . . . .	97
5.9	Análise das estratégias para redução do custo computacional. Média de dez execuções levando em consideração a alocação por fase. Um estudo mais detalhado é efetuado em (Castro, 2016). . . . .	100
5.10	Estratégia proposta em (Tarchini & Gimenez, 2003) para o posicionamento de para-raios em LTs. . . . .	102
5.11	Quantidade de para-raios e número de desligamentos estimados para arranjos clássicos e a metodologia proposta. . . . .	102
6.1	Características gerais da segunda linha de transmissão analisada. . . . .	106
6.2	Características gerais da terceira linha de transmissão. . . . .	107
6.3	Características gerais da quarta linha de transmissão. . . . .	109
6.4	Características gerais da quinta linha de transmissão. . . . .	110
6.5	Desempenhos especificados e estimados. . . . .	111
6.6	Quantidade média de para-raios obtida nos experimentos computacionais realizados considerando o posicionamento por torre para as LTs avaliadas. . . . .	112
6.7	Quantidade média estimada de desligamentos / 100 km / ano para as LTs analisadas considerando o posicionamento por torre. . . . .	112
6.8	Quantidade média estimada de desligamentos / 100 km / ano para as LTs analisadas considerando o posicionamento por fase. . . . .	113

---

# Sumário

---

<b>Resumo</b>	<b>8</b>
<b>Abstract</b>	<b>9</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>20</b>
1.1 O Problema . . . . .	20
1.2 Objetivos . . . . .	22
1.3 Contribuições . . . . .	23
1.4 Organização do Texto . . . . .	24
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>27</b>
2.1 Descrição do Problema . . . . .	27
2.2 Tópicos Complementares . . . . .	29
2.2.1 Linhas de Transmissão . . . . .	29
2.2.2 Descargas Atmosféricas . . . . .	30
2.2.3 Aplicação de Para-raios em Linhas de Transmissão . . . . .	34
2.2.4 Alternativas à Aplicação de Para-raios em Linhas de Transmissão . . . . .	35
2.3 Desligamentos em Linhas de Transmissão . . . . .	36
2.3.1 Definições e Principais Causas de Desligamentos . . . . .	36
2.3.2 Medição do Número de Desligamentos . . . . .	37
2.3.3 Principais Fatores que Influenciam nos Desligamentos Causados por Descargas Atmosféricas em LTs . . . . .	39
2.4 Revisão Bibliográfica . . . . .	41
2.5 Conclusão . . . . .	44
<b>3 Metodologia: Otimização</b>	<b>45</b>
3.1 Descrição Geral da Metodologia . . . . .	45
3.2 Formulação Matemática . . . . .	46
3.3 Representação do Arranjo de Para-raios . . . . .	47
3.4 Introdução aos Algoritmos Evolucionários . . . . .	48
3.5 Introdução aos Algoritmos de Busca em Vizinhança Variável . . . . .	50
3.6 Geração das Soluções Iniciais - Heurística Construtiva . . . . .	52
3.7 Algoritmo GA Adaptado para o Problema . . . . .	53
3.7.1 Seleção, Cruzamento e Mutação . . . . .	54
3.8 Algoritmo GVNS Adaptado para o Problema . . . . .	55
3.8.1 Perturbação e Busca Local . . . . .	56
3.9 Algoritmo Híbrido (GA+GVNS) Adaptado para o Problema . . . . .	58
3.9.1 Operadores Inspirados no GVNS - Caminho 1 . . . . .	60



3.9.2	Operadores Inspirados no GA - Caminho 2 . . . . .	61
3.10	Estratégias para Redução do Custo Computacional . . . . .	61
3.10.1	Chamadas ao ATP de Forma Concorrente . . . . .	63
3.10.2	Armazenamento das Avaliações do ATP em Memória Auxiliar . . . . .	64
3.11	Conclusão . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Metodologia: Cálculo do Desempenho de LTs Frente às Descargas Atmosféricas</b>	<b>67</b>
4.1	Modelo Computacional . . . . .	67
4.1.1	Descarga Atmosférica . . . . .	67
4.1.2	Vãos de Linha . . . . .	69
4.1.3	Torres . . . . .	71
4.1.4	Para-raios . . . . .	72
4.1.5	Aterramento . . . . .	72
4.2	Resumo da Modelagem Empregada . . . . .	73
4.3	Desempenho de Linhas de Transmissão . . . . .	74
4.3.1	Número de Descargas Atmosféricas . . . . .	74
4.3.2	Probabilidade Acumulada . . . . .	75
4.3.3	Cálculo da Taxa de Desligamentos . . . . .	76
4.4	Conclusão . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Resultados: Estudo de uma Linha de Transmissão Real de 230 kV</b>	<b>79</b>
5.1	Dados Utilizados . . . . .	79
5.2	Sobretensão na Cadeia de Isoladores . . . . .	82
5.2.1	Desconsideração do Efeito de Transferência de Sobretensão . . . . .	84
5.2.2	Inclusão do Efeito de Transferência de Sobretensão . . . . .	87
5.3	Cálculo da Taxa de Desligamentos . . . . .	89
5.4	Estimativa da Taxa de Desligamentos . . . . .	91
5.4.1	Estimativa Utilizando o IEEE Flash . . . . .	92
5.5	Posicionamento Ótimo de Para-raios . . . . .	95
5.5.1	Posicionamento Ótimo por Torre . . . . .	96
5.5.2	Posicionamento Ótimo por Fase . . . . .	98
5.5.3	Comparação Estratégias de Alocação . . . . .	101
5.6	Conclusão . . . . .	103
<b>6</b>	<b>Resultados: Estudo de Múltiplos Casos</b>	<b>105</b>
6.1	Dados Utilizados . . . . .	105
6.1.1	Linha 2 . . . . .	105
6.1.2	Linha 3 . . . . .	107
6.1.3	Linha 4 . . . . .	107
6.1.4	Linha 5 . . . . .	108
6.2	Estimativa de Desempenho das Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas . . . . .	111
6.3	Posicionamento Ótimo de Para-raios . . . . .	111
6.4	Comparação Estatística dos Algoritmos . . . . .	118
6.4.1	Planejamento Experimental . . . . .	118
6.4.2	Análise Exploratória dos Dados . . . . .	120
6.4.3	Análise Estatística . . . . .	120
6.4.4	Verificação das Premissas . . . . .	121

6.4.5	Estimativa da Potência do Teste . . . . .	121
6.4.6	Comparações Múltiplas . . . . .	122
6.5	Conclusão . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Conclusões e Propostas de Continuidade</b>	<b>125</b>
7.1	Considerações Iniciais . . . . .	125
7.2	Avaliações Conclusivas . . . . .	125
7.2.1	Conclusões Gerais . . . . .	125
7.2.2	Estimativa de Desempenho da Linha de Transmissão . . . . .	126
7.2.3	Tipos de Alocação . . . . .	127
7.2.4	Algoritmos de Otimização Implementados . . . . .	127
7.3	Propostas de Continuidade . . . . .	128
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>137</b>

---

# Introdução

---

Este capítulo aborda as principais motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho. Ademais, os objetivos, as contribuições e a organização do texto também são expostos.

## 1.1 O Problema

Uma vasta parcela da geração de energia elétrica no Brasil é realizada em locais distantes dos grandes centros consumidores, destacando-se as usinas hidrelétricas como principais colaboradoras para geração de energia elétrica no Brasil (EPE, 2020). Ligando os pontos de geração e centros consumidores está a etapa de transporte de energia elétrica, etapa essa fundamental para o suprimento das necessidades e demandas do país.

Dada a importância dos sistemas de transporte de energia elétrica, a operação desses sistemas com segurança é um tema de grande preocupação em todo o mundo. As condições básicas para o bom funcionamento desses sistemas incluem: garantia da continuidade da oferta de energia e manutenção da tensão nos barramentos dentro de uma faixa adequada de variação (Vasconcelos et al., 2012).

Diversos equipamentos e recursos são utilizados para o transporte de energia elétrica, destacando-se as linhas de transmissão (LTs). A operação dos sistemas de transporte de energia elétrica com segurança passa pelo bom funcionamento das LTs. E conforme a sua localização, aspectos ambientais (relevo, características do solo, etc.) e características de projeto (o comprimento e a altura das linhas de transmissão, entre outros parâmetros), uma LT pode se tornar um ponto preferencial para a incidência de descargas atmosféricas.

A exposição das LTs está diretamente ligada ao fato da incidência direta de descargas elétricas sobre linhas de transmissão ser a sua principal causa de desligamentos forçados (EPRI, 2005). De acordo com a literatura (Viana, 2009), a incidência direta de descargas

elétricas é responsável por cerca de 65% dos desligamentos forçados em LTs. De forma ainda mais desfavorável, o Brasil possui uma das maiores taxas de ocorrência de descargas atmosféricas do mundo, o que leva a um elevado estresse sobre as linhas de transmissão (Dias et al., 2010).

Conhece-se que, em determinados cenários, mesmo que a LT esteja protegida por cabos para-raios, pode haver um número excessivo de desligamentos causados pelo fenômeno de *backflashover*. Nessas condições, uma das possíveis alternativas para melhorar do desempenho das LTs é o uso de dispositivos para-raios (Sadovic et al., 1997; Munukutla et al., 2010; Gatta et al., 2015; Alipio et al., 2017; Visacro et al., 2020).

Os para-raios de linha são instalados em paralelo com a cadeia de isoladores. Em geral, torres localizadas em regiões com alta densidade de descargas atmosféricas e/ou que tenham um elevado valor de impedância de aterramento possuem maior tendência a serem protegidas com para-raios (Gatta et al., 2015; Alipio et al., 2017). Contudo, é indispensável salientar que o uso bem-sucedido de para-raios em LTs depende de uma série de características da linha e, por esse motivo, é recomendável que a definição da quantidade e localização desses equipamentos seja feita por meio de estudos que considerem aspectos técnicos e econômicos (Sadovic et al., 1997).

Em (Shih et al., 1985), um resultado interessante é notado após a aplicação de para-raios em uma linha de transmissão em região montanhosa. Em poucas palavras, os autores apontam que a aplicação de para-raios pode melhorar o comportamento da torre atingida pela descarga atmosférica, mas pode piorar o funcionamento em torres adjacentes. Isso em razão de parte da tensão resultante do surto atmosférico ser transferida pelo condutor para as estruturas adjacentes devido à atividade dos para-raios. Esse mecanismo de transferência ainda é pouco mencionado e/ou inserido em trabalhos computacionais que consideram o uso de para-raios para aprimorar a taxa de desligamentos das LTs.

Por se tratar de um problema complexo, o emprego de técnicas de otimização pode ser uma boa opção para orientar o processo de posicionamento de para-raios em LTs. Tal problema pode ser formulado da seguinte maneira: dada uma LT, quais são os locais em que os para-raios devem ser instalados de forma a permitir uma proteção da linha e, ao mesmo tempo, assegurar uma solução economicamente exequível. Até o momento atual, pode-se dizer que existem poucos estudos que abordam esse problema da perspectiva da otimização (Shariatinasab et al., 2009; Vahidi et al., 2010; Kezunovic & Dokic, 2018; Shariatinasab & Azimi, 2020; Castro et al., 2022).

Esta dissertação propõe uma metodologia para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs, a qual é baseada na junção entre um algoritmo inspirado em busca em

vizinhança variável - VNS (do inglês, *Variable Neighbourhood Search*) (Mladenović & Hansen, 1997) e algoritmos evolucionários com o *software* ATP (do inglês, *Alternative Transient Program*). Vale destacar que o procedimento usado para estimar o desempenho da linha fundamenta-se em uma abordagem mais minuciosa, 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 tendo em conta os dados específicos de cada torre. Além do mais, quando uma torre atingida por uma descarga atmosférica possui para-raios em todas as suas fases, o modelo proposto considera o efeito de transferência do surto para as torres adjacentes em razão da operação dos para-raios.

Vale destacar que, parte das atividades deste trabalho foram desenvolvidas dentro do P&D intitulado: “*Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas através da Alocação Ótima de Para-Raios via Algoritmos de Otimização Acoplados com o ATP*”. Esse projeto foi desenvolvido com a finalidade de atender uma demanda da empresa Alupar, uma *holding* de controle nacional privado que atua nos segmentos de transmissão e geração de energia.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é o desenvolvimento de uma metodologia para a alocação ótima de para-raios buscando a melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. O intuito é reduzir a taxa de desligamentos das LTs de forma que se enquadrem nos limites estipulados pelos órgãos reguladores, bem como evitar um gasto desnecessário de recursos financeiros através do uso da menor quantidade possível de dispositivos para-raios. Tendo em vista o caráter combinatório desse problema e a elevada quantidade de possibilidades de posicionamento de para-raios, este trabalho busca tornar mais eficiente a busca pela disposição ótima de para-raios.

A implementação dessa metodologia pode ser empregada em qualquer LT blindada por cabos para-raios, desde que todas as informações essenciais sejam fornecidas adequadamente. Vale destacar que, como a principal causa de desligamentos não programados em LTs é a incidência direta de descargas atmosféricas, a aplicação visa fornecer uma solução adequada para esse problema.

Além do mais, outro benefício da aplicação de para-raios é a amenização dos efeitos adversos causados pelas descargas atmosféricas, uma vez que a proteção contra as sobretensões é aumentada. Isto é de grande relevância para a garantia do fornecimento

de energia elétrica aos consumidores dentro de níveis de segurança toleráveis aos equipamentos.

Em adição ao objetivo geral, seguem abaixo os objetivos específicos:

- Estudo das ferramentas para análise do desempenho de linhas de transmissão;
- Formulação do problema do ponto de vista da otimização;
- Desenvolvimento de um módulo de otimização em linguagem Java, o qual é formado por um algoritmo de otimização híbrido inspirado em meta-heurísticas de busca em vizinhança variável e evolucionárias. Além disso, dois algoritmos são implementados como base de referência: um algoritmo inspirado na busca em vizinhança variável geral (GVNS) e outro embasado no algoritmo genético (GA);
- Integração entre os módulos desenvolvidos e ajustes finais;
- Estudo de técnicas para comparação estatística de algoritmos e planejamento de experimentos.

## 1.3 Contribuições

Esta dissertação apresenta como principal contribuição o desenvolvimento de um *software* que sugere o posicionamento ótimo de para-raios com base na interação de um algoritmo de otimização híbrido (baseado em meta-heurísticas de busca em vizinhança variável e evolucionárias) com o ATP para a avaliação das soluções. Vale destacar que, o algoritmo proposto faz uso de operadores e uma representação que levam em consideração aspectos intrínsecos do problema. Além disso, uma heurística construtiva é utilizada para acelerar o processo de busca.

Vale salientar que, este trabalho contém similaridades aos trabalhos produzidos em (Castro et al., 2022) e (Castro, 2022), destacando-se que os trabalhos mencionados também foram desenvolvidos no contexto do P&D citado. Contudo, algumas diferenças podem ser apontadas, essas diferenças são explicitadas na Tabela 1.1. Entre as diferenças é possível ressaltar o uso de operadores que exploram melhor o espaço de busca das soluções, como o operador de busca local que auxilia no refino da solução.

Tabela 1.1: Principais diferenças entre esta dissertação e o trabalho desenvolvido em (Castro, 2022).

Item	Dissertação	Referência (Castro, 2022)
Otimização	Mono-objetiva	Multiobjetiva
Algoritmos	GA, GVNS e Híbrido (GA + GVNS)	NSGA-II e SPEA2
Operadores	Seleção, cruzamento, mutação, perturbação ( <i>shake</i> ), busca local ( <i>VND</i> ) e elitismo	Seleção, cruzamento, mutação e elitismo
Forma de onda da corrente de retorno	Representativa	Triangular
Aterramento	Inclui efeito de ionização do solo	Desconsidera efeito de ionização do solo
Suportabilidade da cadeia de isoladores	Curva $V \times t$	Método DE ( <i>Disruptive Effect</i> )

Por último, em relação às publicações, os seguintes trabalhos foram aceitos:

- Marzochi, M.C.; Vasconcelos, J. A.; Castro, W. S.; Misse, S.L.V.. Algoritmo para Alocação Ótima de Para-raios em Linhas de Transmissão Inspirado em Busca em Vizinhaça Variável. COTB 2022 - Computer On The Beach, Itajaí (SC) de 05 a 07 de maio de 2022.
- Marzochi, M.C.; Vasconcelos, J. A.; Castro, W. S.; Misse, S.L.V.. Metodologia para Alocação Ótima de Para-raios em Linhas de Transmissão. SBSE 2022 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Santa Maria (RS) de 10 a 13 de julho de 2022.

## 1.4 Organização do Texto

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos. O Capítulo 2 realiza uma descrição mais detalhada do problema e uma revisão bibliográfica apresentando um quadro sobre: i) metodologias para avaliação do desempenho de LTs, ii) melhoria no desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas com a utilização de para-raios e iii) utilização de ferramentas de otimização para a alocação ótima de para-raios em linhas de transmissão.

O Capítulo 3, por sua vez, apresenta todo o desenvolvimento do projeto, passando pela modelagem matemática e pelo módulo de otimização. Neste último caso, o trabalho desenvolvido é mostrado em detalhes, como, por exemplo, o algoritmo proposto

---

implementado em Java. Em seguida, o Capítulo 4 exhibe o módulo utilizado para a estimativa do desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas.

Posteriormente, no Capítulo 5, são apresentados os resultados das simulações da metodologia desenvolvida para o posicionamento ótimo de para-raios com o objetivo de melhorar o desempenho de uma LT de 230 kV. Com o objetivo de mostrar a consistência da metodologia desenvolvida, outras quatro LTs são simuladas no Capítulo 6. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas, acompanhada por sugestões para trabalhos futuros.





## Fundamentação Teórica

Este Capítulo apresenta uma revisão bibliográfica relativa às áreas associadas ao problema de posicionamento ótimo de para-raios em LTs. Para contextualizar, é apresentada uma perspectiva do cenário das linhas de transmissão no Brasil, assim como algumas informações relevantes.

Nessa revisão bibliográfica, é exibida uma visão geral sobre as metodologias utilizadas para estimar o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Além disso, também é destacada a melhoria do desempenho de LTs com a utilização de para-raios conectados em paralelo com a cadeia de isoladores. Ao final do Capítulo, são examinados alguns trabalhos que fazem uso de técnicas de otimização para a alocação ótima de para-raios.

### 2.1 Descrição do Problema

A incidência direta de descargas atmosféricas é a principal fonte de desligamentos não programados em LTs (EPRI, 2005). Essa constatação pode ser elucidada pelo destaque das linhas de transmissão em relação ao ambiente que as cercam, resultando numa alta exposição e, por conseguinte, favorecendo a incidência de descargas atmosféricas.

A compreensão dos fenômenos associados à incidência de descargas atmosféricas são de suma importância no setor elétrico, especialmente no que se refere ao desempenho de LTs. Neste caso, dois fenômenos associados aos desligamentos forçados de linhas de transmissão possuem um maior destaque: o *flashover* e o *backflashover* (Kindermann, 1992).

O *flashover* se dá quando uma descarga atmosférica atinge de modo direto um cabo condutor, propagando ondas de corrente e tensão com elevadas amplitudes. Em situações onde a sobretensão resultante é maior que a suportabilidade do isolador, uma descarga disruptiva pode ocorrer estabelecendo um arco elétrico entre o cabo condutor e a torre. Através desse arco, a corrente da descarga flui para a estrutura aterrada e

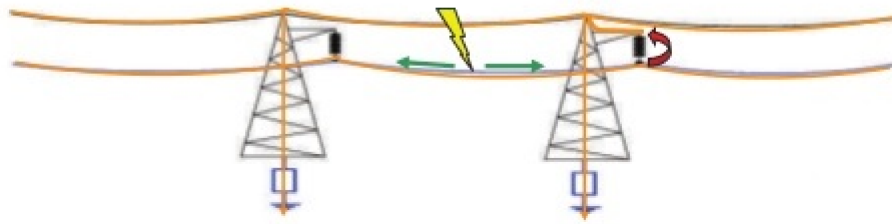


Figura 2.1: Situação característica de um *flashover* - falha de blindagem. Figura retirada de (Uglešić et al., 2009).

segue em direção ao solo. O arco elétrico mantém-se caracterizando o curto-circuito fase-terra (EPRI, 2005). A Figura 2.1 ilustra a ocorrência de um *flashover*.

Uma alternativa para reduzir o número de desligamentos causado pelo *flashover* é a instalação de cabo guarda no topo das torres. Esse cabo, tem como função atrair para si as descargas atmosféricas, que na sua inexistência, atingiriam diretamente os cabos condutores e que levariam a LT ao desligamento. Contudo, é importante ressaltar que mesmo LTs protegidas por cabos para-raios podem possuir uma quantidade elevada de desligamentos decorrentes do fenômeno de *backflashover*.

O *backflashover*, por sua vez, acontece quando a descarga atinge diretamente a torre ou o próprio cabo guarda. Nesta situação, dependendo dos valores de impedância de aterramento e geometria da estrutura atingida, entre outros fatores, a sobretensão resultante pode alcançar valores elevados e resultar em uma descarga disruptiva. Resumidamente, um arco elétrico é estabelecido da estrutura aterrada para o condutor energizado (Mobarakei et al., 2012) (EPRI, 2005). A Figura 2.2 ilustra a ocorrência de um *backflashover*.

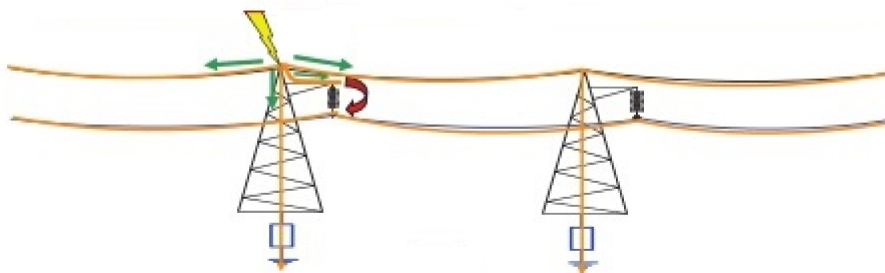


Figura 2.2: Situação característica de um *backflashover*. Figura retirada de (Uglešić et al., 2009).

Pode-se afirmar que, entre as principais alternativas para diminuir a quantidade de desligamentos resultantes do fenômeno *backflashover* está a adição de para-raios. Por essa razão, aplicações envolvendo o uso de para-raios em LTs vêm sendo uma temática de muito interesse, com diversos resultados comprovando o aumento da confiabilidade da linha de transmissão após a instalação de dispositivos para-raios (Martinez & Castro-Aranda, 2009).

Em adição às dificuldades naturais descritas nos parágrafos anteriores, está a imposição de limites sobre as concessionárias do setor elétrico (ONS, 2020). Sendo o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas o principal parâmetro de interesse para avaliação do desempenho das LTs.

## 2.2 Tópicos Complementares

Esta seção tem o propósito de contextualizar e auxiliar o entendimento do problema, sendo mostradas algumas informações e tópicos adicionais que abordam as principais definições relacionadas ao problema de posicionamento ótimo de para-raios. Assim sendo, os seguintes tópicos são tocados: Linhas de Transmissão e Descargas Atmosféricas.

### 2.2.1 Linhas de Transmissão

No Brasil, o órgão responsável por coordenar e controlar a operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Além de coordenar e controlar o Sistema Interligado Nacional (SIN), sistema que interliga as fontes geradoras de energia no Brasil, o ONS é também responsável pelo planejamento dos sistemas isolados do país (ONS, 2022b). Esse órgão está sob fiscalização e orientação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), agência criada com o intuito de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica no Brasil.

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (SIN/ANEEL, 2021). Para ilustrar o atual cenário, a Figura 2.3 exibe os percentuais da geração de energia elétrica no Brasil com base na origem da mesma.

A Figura 2.3 ressalta a importância das usinas hidrelétricas na geração de energia no Brasil. Como a maioria das usinas hidrelétricas estão localizadas em pontos distantes dos grandes centros consumidores (cidades e indústrias), o transporte de energia e, conseqüentemente, as linhas de transmissão possuem um papel essencial para garantir a qualidade da energia entregue aos consumidores.

O SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. Através da interconexão desses subsistemas via malha

### Matriz de Energia Elétrica Brasileira

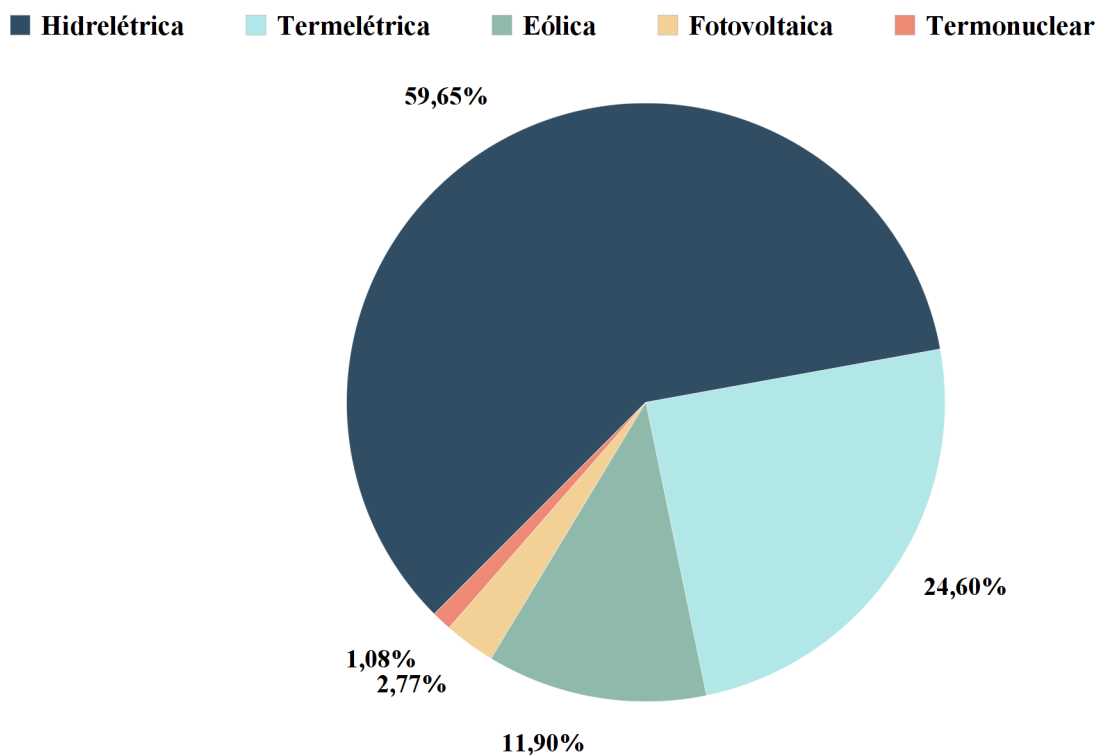


Figura 2.3: Percentuais da geração de energia relativa à origem da mesma. Figura adaptada do SIGA (Sistema de Informações de Geração da ANEEL) referentes ao ano de 2021 (SIGA/ANEEL, 2021).

de transmissão é possível alcançar ganhos sinérgicos e tirar benefício dos diversos regimes hidrológicos das bacias (SIN/ANEEL, 2021). A Figura 2.4 mostra a malha formada pelas LTs integrantes do sistema de transmissão brasileiro. Até dezembro de 2021, o sistema de transmissão brasileiro era composto por aproximadamente 156 mil km de linhas de transmissão (ONS, 2021).

#### 2.2.2 Descargas Atmosféricas

Descargas atmosféricas são precisadas como descargas elétricas de grande extensão (alguns quilômetros) e de grande intensidade (picos de intensidade de corrente acima de um quiloampere) que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera (geralmente tempestades) (INPE, 2022). Uma descarga se inicia quando o campo elétrico produzido por estas cargas ultrapassa a rigidez dielétrica do ar em um dado local na atmosfera.

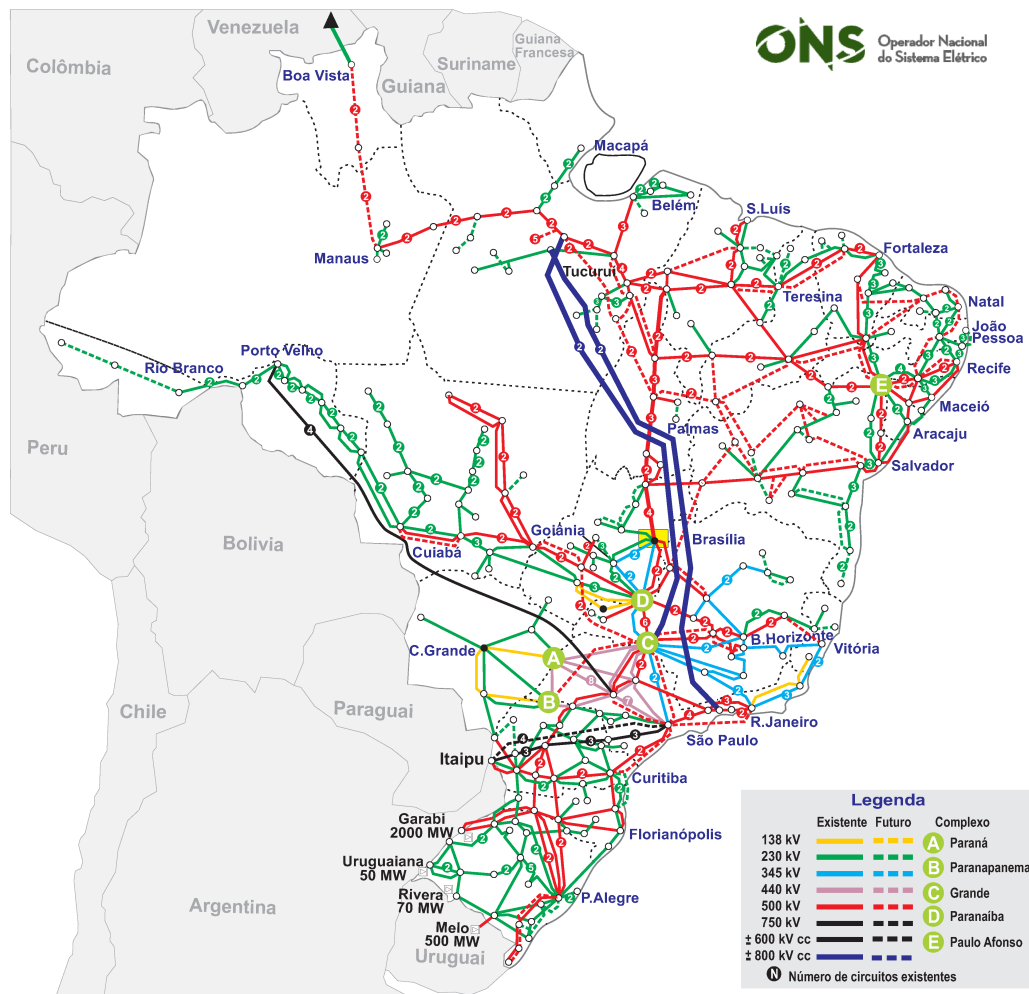


Figura 2.4: Extensão das linhas de transmissão do SIN no ano de 2019 - horizonte com as linhas previstas até 2024. Figura obtida da ferramenta de mapas do SIN (SIN/ANEEL, 2019).

Cerca de 10 milhões de descargas atmosféricas ocorrem no mundo por dia, o que equivale a cerca de três bilhões por ano. Ainda que a maior parte da superfície terrestre seja coberta por água, menos de 10% do total de descargas ocorrem nos oceanos. Isso pode ser explicado pela menor variação de temperatura ao longo do dia, do relevo menos acidentado e da menor concentração de aerossóis em relação à superfície sobre os continentes (INPE/ELAT, 2022a).

Observações de satélite ratificam que a maior parte das descargas ocorre sobre os continentes e em regiões tropicais. De maneira geral, as regiões no hemisfério norte com maior densidade de descargas são o centro da África, sul da Ásia e sul dos Estados Unidos. No hemisfério sul, por sua vez, as principais regiões são o Brasil (com exceção da região Nordeste), sul da África, ilha de Madagascar, Indonésia e norte da Austrália (INPE/ELAT, 2022a). A Figura 2.5 exibe a distribuição global da densidade média anual de descargas atmosféricas no intervalo 2010-2020.

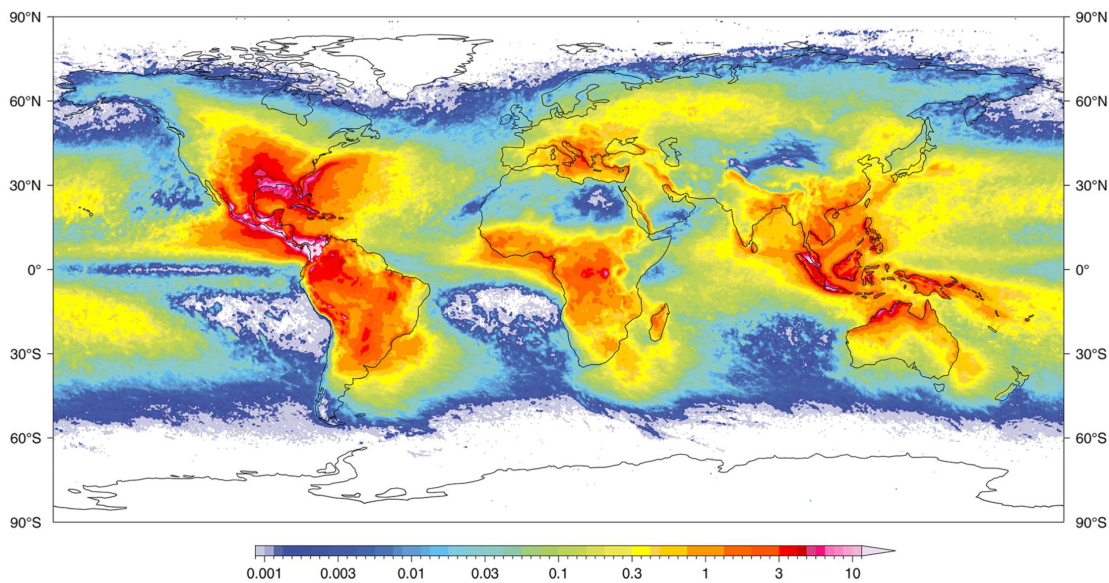


Figura 2.5: Distribuição global da densidade média anual de descargas atmosféricas (descargas atmosféricas/( $km^2 \cdot ano$ )) no intervalo 2010-2020. Figura adaptada de (Kaplan & Lau, 2021).

Em termos gerais, as descargas atmosféricas podem ser classificadas em dois grupos: descargas no solo e descargas na nuvem. As descargas no solo podem se originar no solo (descarga solo-nuvem) ou em uma nuvem do tipo Cumulonimbus (descarga nuvem-solo). Mais de 99% das descargas no solo são do tipo nuvem-solo. Descargas solo-nuvem são pouco comuns e, de forma geral, ocorrem no topo de montanhas e em estruturas altas, como torres (INPE/ELAT, 2022b). Em regiões com tempestades frequentes no inverno também é possível encontrar esse tipo de descarga (Nucci, 2010).

As descargas no solo também são subclassificadas em termos do sinal da carga líquida transportada da nuvem para o solo, como descargas negativas ou positivas. Cerca de 90% das descargas do tipo nuvem-solo e solo-nuvem são negativas (INPE/ELAT, 2022b). No que se refere as linhas de transmissão, somente as descargas nuvem-solo podem provocar sobretensões capazes de resultar em desligamentos.

Descargas na nuvem originam-se dentro das nuvens do tipo Cumulonimbus e propagam-se dentro (descarga intranuvem) ou fora da nuvem rumo à outra nuvem (descarga nuvem-nuvem) ou, ainda, fora da nuvem numa direção qualquer (descarga para o ar). Cerca de 70% do total de descargas atmosféricas são do tipo intranuvem. Ainda que elas sejam a maioria das descargas, elas não são tão estudadas quanto as descargas no solo, em parte porque elas são menos perigosas e por serem mais dificilmente detectadas por estarem escondidas pelas nuvens (INPE/ELAT, 2022b).

### **Formação de uma Descarga Negativa Nuvem-solo**

As descargas elétricas são manifestações de processos que geram, separam e neutralizam cargas elétricas na natureza e geralmente ocorrem em tempestades. O processo de geração inclui mecanismos indutivos e não-indutivos (Yair, 2008; Saunders, 2008). O processo de separação de cargas, por sua vez, depende muito sensivelmente da temperatura (Saunders, 2008).

Em tempestades, correntes ascendentes de ar empurram para cima pequenos e leves fragmentos de gelo carregados positivamente, enquanto pedras de granizo pesadas carregadas negativamente se concentram na parte inferior da nuvem devido à ação da força gravitacional, o que pode resultar na separação de cargas (Siingh et al., 2015). Somado ao fenômeno mencionado, fortes correntes ascendentes de ar também aumentam a quantidade de colisões entre diferentes partículas, o que pode levar ao aumento da transferência de carga entre as partículas, levando a uma rápida eletrificação. Vale destacar que, a distribuição de cargas em uma tempestade é muito complexa e pode envolver várias camadas de cargas (Lyons, 2006; Krehbiel et al., 2008; Stolzenburg & Marshall, 2009).

Quando o forte campo elétrico formado pelas cargas negativas concentradas na parte inferior da nuvem e cargas positivas induzidas no solo excede a rigidez dielétrica do ar, uma descarga preliminar no interior da nuvem começa a formação de um canal precursor de descarga. A partir desse ponto, um canal descendente se aproxima do solo aumentando o campo elétrico na superfície, o que pode originar descargas elétricas ascendentes.

O canal de descarga, por seu lado, é formado quando o canal descendente e um dos canais ascendentes se aproximam tanto ao ponto de superarem um definido limite. No cenário descrito, os canais são interligados por meio de uma descarga, estabelecendo assim o canal entre a nuvem e o solo (Araújo & Neves, 2005) (INPE/ELAT, 2022c). Por fim, ocorre o surgimento da chamada corrente de retorno, a qual neutraliza as cargas acumuladas. Vale citar que, na grande maioria dos casos ocorre a formação de novas descargas no mesmo canal, as chamadas descargas subsequentes (Araújo & Neves, 2005).

### **Principais Parâmetros da Corrente de Retorno**

A corrente de retorno é considerada a principal etapa na formação de uma descarga atmosférica. Dada a importância da sua modelagem para a estimativa do desempenho de linhas de transmissão (EPRI, 2005), seus principais parâmetros são aqui destacados:



- Valor de pico: máximo valor alcançado pela corrente de descarga;
- Tempo de frente: intervalo de tempo entre o início da corrente de descarga e o instante em que ela atinge o seu valor máximo (valor de pico);
- Tempo de meia onda: intervalo de tempo entre o início da corrente de descarga e o instante em que ela, após ter ultrapassado o seu valor máximo, tem sua intensidade reduzida a metade.

### 2.2.3 Aplicação de Para-raios em Linhas de Transmissão

Os para-raios de óxido de zinco (ZnO) surgiram no início da década de 1970, sendo Matsouka precursor na aplicação de óxido de zinco em alta tensão (Matsuoka, 1971). O uso de para-raios compostos de ZnO, por sua vez, se tornou difundido na década de 1980. Vale mencionar que esses dispositivos possuem uma série de vantagens sobre os dispositivos de carboneto de silício que dominavam o mercado, pode-se citar como benefícios: maior capacidade de absorção de energia, maior vida útil (capacidade de operar mesmo após ser acometido pelos surtos de múltiplas descargas atmosféricas e chaveamentos), alta não-linearidade e tempo de resposta reduzido frente a fenômenos transistórios (Viana, 2009; Kobayashi et al., 1978). Em função dessas vantagens os para-raios de ZnO passaram a ser predominantemente adotados pelas concessionárias.

Como previamente citado, mesmo LTs protegidas por cabos para-raios podem apresentar um número elevado de desligamentos causados em decorrência do fenômeno de *backflashover* (EPRI, 2005). As consequências desse fenômeno podem ser ainda mais graves se a LT possuir valores de impedância de aterramento altos e/ou estiver inserida em uma região com densidade de descargas atmosféricas elevada. Em cenários como esse, o uso de para-raios vem sendo uma das principais soluções encontradas para reduzir a quantidade de desligamentos da LT.

Nos últimos anos, vários trabalhos surgiram com o intuito de examinar a eficiência do uso de para-raios em LTs. Em (Kastrup et al., 1996), uma equipe de engenheiros realizou um experimento levando em conta a instalação de diferentes arranjos de dispositivos para-raios. Pode-se citar, por exemplo, as seguintes configurações: i) sem para-raios; ii) para-raios instalados apenas na fase mais baixa; iii) para-raios instalados nas fases intermediária e baixa; iv) para-raios instalados em todas as fases de todas as torres da LT. No trabalho em pauta, os autores concluem que as alternativas ii e iii levam a melhores resultados levando em consideração a razão custo x benefício.

Em (Franco et al., 1999) é abordado o uso de para-raios em sistemas de 69 e 138 kV. Os resultados expõe que a utilização desses dispositivos pode reduzir, substancialmente, a

quantidade de desligamentos da linha de transmissão. Contudo, os autores enfatizam que a indicação da quantidade e da localização dos para-raios na LT deve ser feita por meio de um conjunto de análises técnicas e econômicas.

Com a finalidade de fazer uma estimativa do desempenho de uma LT de 400 kV, (Martinez & Castro-Aranda, 2009) fazem uso do método de Monte Carlo e consideram a capacidade de absorção de energia dos para-raios na investigação realizada. Os resultados mostram que é possível alcançar diferentes níveis de melhoria no desempenho da LT analisada, dependendo da quantidade e do local onde os para-raios são posicionados.

Em (Munukutla et al., 2010) é estudada a aplicação de para-raios em duas LTs de 115 kV. Tal estudo faz uso do ATP para estimativa de desempenho da LT e o posicionamento de para-raios é realizado seguindo alguns critérios. Entre os critérios, pode-se citar, por exemplo, a utilização de um número diferente de para-raios por estrutura, a distância entre as torres que recebem a instalação de dispositivos para-raios e a impedância de aterramento. Nesse trabalho também é realizada a proposta de uma representação visual dos resultados, chamada de tabela de *flashovers* (do inglês, *lightning flashover chart*). Essa tabela possibilita ao seu usuário visualizar informações como: o local atingido pela descarga atmosférica, quantidade de torres que possuem ou não para-raios e em quais delas ocorre o *flashover*. Os resultados obtidos mostram que, dependendo da configuração de para-raios escolhida, o desempenho da LT melhora consideravelmente.

#### 2.2.4 Alternativas à Aplicação de Para-raios em Linhas de Transmissão

Além do uso de dispositivos para-raios, outras soluções para aumentar a proteção de LTs em relação ao fenômeno de *backflashover* incluem: instalação de cabos “*underbuilt*”, melhoria da impedância de aterramento / instalação de cabos contrapeso nas bases das torres e aumento do nível básico de isolamento da linha. Alguns trabalhos recentes tem se dedicado a estudos comparativos dos diferentes SPDAs (Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas) (Banjanin, 2018, 2019; Asadpourahmadchali et al., 2020).

Os dispositivos para-raios tem se mostrado entre as melhores alternativas, especialmente em cenários com elevada densidade de descargas atmosféricas e solos com resistividade desfavorável (Shih et al., 1985). Vale destacar que, a escolha do sistema de proteção mais adequado para dado trecho de uma LT deve ser realizado com base em uma análise que englobe aspectos financeiros, características específicas da LT e aspectos ambientais.

Outra possibilidade que tem se popularizado em trabalhos recentes é a combinação de soluções. Em (Visacro et al., 2021) é sugerido o uso combinado da instalação de cabos *underbuilt* e dispositivos para-raios em uma LT de 230 kV com condições críticas de resistividade de solo. No trabalho de (Jesus, 2019) é proposto um modelo econômico de otimização para um SPDA que faz uso do custo incremental (também conhecido como custo marginal) para fornecer soluções que consideram a instalação em conjunto de eletrodos de aterramento suplementares e do aumento do nível de isolamento para a melhoria do desempenho de LTs.

## 2.3 Desligamentos em Linhas de Transmissão

Esta seção aborda os desligamentos de LTs. Apresentando um panorama com as principais causas de desligamentos e algumas definições importantes para a compreensão do problema.

### 2.3.1 Definições e Principais Causas de Desligamentos

As indisponibilidades que ocorrem nos elementos presentes no processo de transmissão podem ser classificadas em dois grupos quanto a sua origem: indisponibilidades de origem programada ou indisponibilidades de natureza intempestiva. Em ambos os casos, a interrupção no fornecimento de energia pode levar a perdas de receitas, visto que, usualmente as indisponibilidades são taxadas (Penna et al., 2002).

Uma indisponibilidade é uma consequência de um desligamento, o qual, por sua vez, pode ser definido como a abertura de um ou mais dispositivos que interligam circuitos de potência, produzindo-se uma interrupção no fornecimento de energia. Com base na causa do desligamento, o mesmo pode ser rotulado como programado ou forçado (ONS, 2022a). Desligamentos programados são previstos nos Procedimentos de Rede<sup>1</sup>. Nesse documento são incorporados, por exemplo, ações como a execução de serviços de manutenção e manobras operacionais nas LTs.

Os desligamentos forçados, por outro lado, são aqueles em que acontecem condições não programadas (ONS, 2022a). Segundo relatório da ANEEL, entre o dia 1º de julho de 2016 e 30 de junho de 2017, foram assinalados 3.768 desligamentos forçados, em equipamentos e LTs da Rede Básica (composta por equipamentos com nível de tensão

---

<sup>1</sup>Documento elaborado pelo ONS que contém os procedimentos e requisitos técnicos necessários ao planejamento, implantação, uso e operação do SIN.

igual ou superior a 230 kV) e da Rede Complementar (demais equipamentos) do SIN (ANEEL, 2018).

A Figura 2.6 exibe a classificação dos desligamentos forçados quanto à sua origem. É interessante observar que após os desligamentos de causa inderteminada, o segundo maior grupo é composto por desligamentos resultantes da ação de descargas atmosféricas. Outras causas de grande impacto na quantidade de desligamentos incluem as falhas humanas e as queimadas.

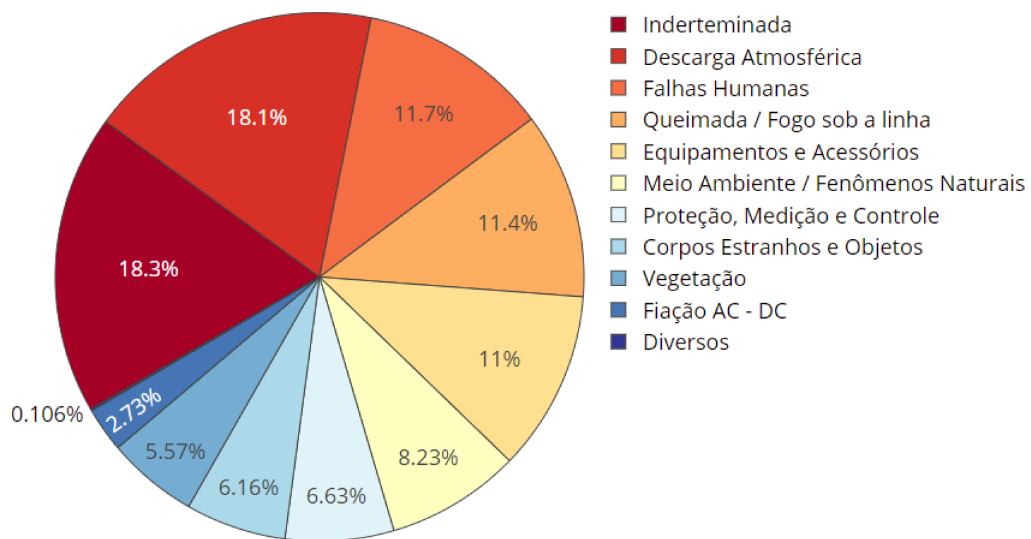


Figura 2.6: Classificação dos desligamentos forçados analisados quanto à sua origem. Figura adaptada do Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão da ANEEL - Edição 2018 (ANEEL, 2018).

Esse relatório também inclui a estratificação dos desligamentos forçados em relação ao tipo de rede (Rede Básica ou Rede Complementar) e se o desligamento ocorreu em uma LT ou em uma Subestação (Figura 2.7). Através da análise dos dados é possível perceber que cerca de 75% dos desligamentos se deram em LTs e cerca de 95% ocorreram na Rede Básica.

### 2.3.2 Medição do Número de Desligamentos

Tradicionalmente, o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas é estimado pela soma dos desligamentos decorrentes dos fenômenos de “falha de blindagem” e *backflashover*. Entretanto, em linhas de transmissão efetivamente blindadas por cabos guarda geralmente a taxa de desligamentos por *backflashover* (BFOR, do inglês *Backflashover Rate*) é predominante sobre a taxa de desligamentos por falha de blindagem (SFFOR, do inglês *Shielding Failure Flashover Rate*) (EPRI, 2005).

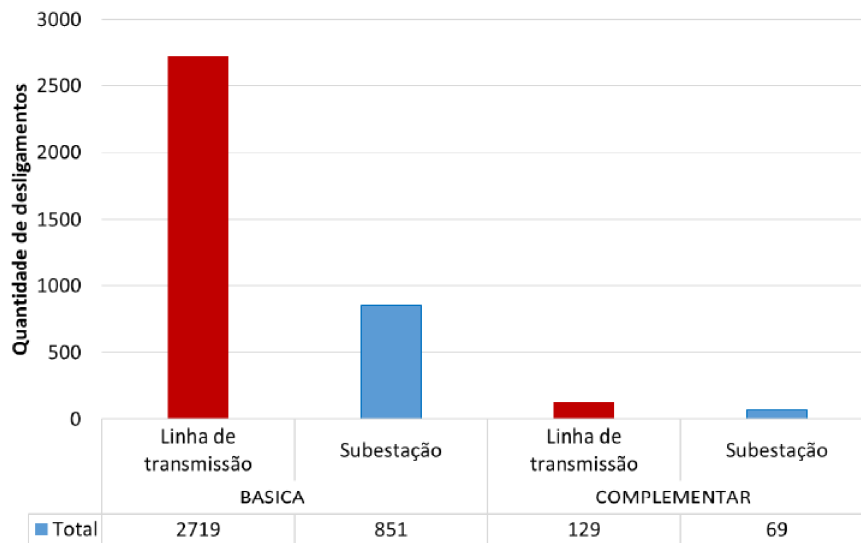


Figura 2.7: Estratificação dos desligamentos forçados analisados em relação ao tipo de rede (Básica ou Rede) e local (Linha de Transmissão ou Subestação). Figura retirada do Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão da ANEEL - Edição 2018 (ANEEL, 2018).

Vale ressaltar, que em LTs com uma blindagem ineficaz a quantidade de desligamentos provenientes de falhas de blindagem é significativa (Martinez & Castro-Aranda, 2009). Este trabalho assume que as LTs a empregarem a metodologia sugerida para o posicionamento ótimo de para-raios possuem um projeto de blindagem eficiente. Em função disso, aspectos ligados ao fenômeno de “falha de blindagem” não são considerados. Ou seja, o desempenho da LT é estimado somente por BFOR. Essa taxa é medida em um comprimento de 100 km no período de tempo de um ano (desligamentos/100 km/ano).

Com a finalidade de garantir qualidade na energia entregue pelas concessionárias de energia, os órgãos reguladores do setor elétrico precisam limites toleráveis para o número de desligamentos das LTs causados por descargas atmosféricas. No caso do Brasil, para linhas de transmissão aéreas com tensão igual ou superior a 230 kV os limites são estabelecidos pelo ONS, mais especificamente no Submódulo 2.7 (Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão) dos Procedimentos de Rede. Esses limites são exibidos na Tabela 2.1.

Para instalações com tensão inferior a 230 kV (Demais Instalações de Transmissão), a qualidade da energia entregue pelas concessionárias elétricas é apurada com base nos valores de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda da tensão. Para medir a qualidade do fornecimento, utilizam-se metodologias que apuram indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais (ANEEL, 2021).

Tabela 2.1: Número máximo de desligamentos por descargas atmosféricas para linhas de transmissão aéreas em corrente alternada de tensão igual ou superior a 230 kV de acordo com limites estabelecido pelo ONS. Tabela adaptada dos Procedimentos de Rede: Submódulo 2.7 (ONS, 2020).

Classe de Tensão (kV)	Desligamentos / 100 km / ano	
	Falha de blindagem	Total
$\geq 345$	$10^{-2}$	1
230	$10^{-2}$	2

Contudo, não existe uma relação direta entre os indicadores mencionados e o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas. Este trabalho utilizou como referência um critério de projeto da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais S.A.) de 10 a 12 desligamentos / 100 km / ano para linhas de transmissão com classe de tensão de 138 kV (Assis et al., 2012; Calenzani & Lopes, 2020). Com o objetivo de ser mais cauteloso considerando as diversas incertezas envolvidas nas simulações foi adotado um critério de 5 desligamentos / 100 km / ano.

### 2.3.3 Principais Fatores que Influenciam nos Desligamentos Causados por Descargas Atmosféricas em LTs

Diversos fatores podem influenciar no desempenho das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Em resumo, esses fatores podem ser divididos em três grupos: parâmetros ambientais, parâmetros da própria linha de transmissão e parâmetros relacionados a descarga atmosférica em si.

Entre os parâmetros ambientais que influenciam o desempenho de LTs, destaca-se a densidade de descargas atmosféricas ( $N_g$ ), índice que mensura o número de descargas que incidem no solo por  $km^2$  por ano (descargas /  $km^2$  / ano). Esse índice merece destaque por quantificar fatores que influenciam na exposição da linha em relação à incidência de descargas atmosféricas. Entre os fatores se destacam: a distribuição de chuvas da região e o relevo local. Por atravessar vários tipos de relevo e obstáculos no seu percurso como vales, montanhas e rios, o índice pluviométrico ao longo de uma LT pode variar consideravelmente. A variação do relevo no percurso de uma LT, por seu lado, pode afetar o desempenho da LT em função do aumento do nível de exposição à incidência de descargas (Cunha, 2010).

Outro fator ambiental de grande impacto no número de desligamentos causados por descargas atmosféricas em LTs é o solo. A influência do tipo de solo no desempenho

de LTs está diretamente ligada ao valor da sua resistividade. Algumas características que influenciam no valor de resistividade do solo incluem: umidade, concentração e tipo de sais dissolvidos na água, compactidade, granulometria, temperatura e estrutura geológica (Visacro, 2002).

Fatores ambientais relacionados ao clima como a umidade local, temperatura e vento também podem influenciar no desempenho da linha. O impacto desses fatores é indireto sobre outros parâmetros que podem aumentar a probabilidade de desligamentos por *flashover* ou *backflashover* (Cunha, 2010).

Entre os parâmetros associados à linha de transmissão, ressalta-se a impedância de aterramento das torres. Isso se deve ao fato desse parâmetro influenciar a reflexão da onda de tensão que se propaga em direção ao solo e, conseqüentemente, interferir na sobretensão resultante na cadeia de isoladores (EPRI, 2005). Em estudo realizado por (Rahman et al., 2011) é evidenciada a grande influência da impedância de aterramento na redução das conseqüências do fenômeno de *backflashover*. Nesse estudo é apresentada uma metodologia de otimização baseada em dados de medições de resistividade do solo.

O comprimento dos vãos é outro parâmetro de linha a ser analisado no planejamento de LTs, em (Rodrigues et al., 2014b) é citada a importância de se considerar o comprimento dos vãos em projetos de coordenação de isolamento para a avaliação do desempenho de LTs frente a surtos atmosféricos de forma a otimizar o comprimento da cadeia de isoladores e reduzir o número de desligamentos. Além do comprimento dos vãos, outros parâmetros importantes de LTs são:

- Comprimento da cadeia de isoladores;
- Altura e impedância de surto das torres;
- Geometria e impedância de surto dos condutores.

De acordo com (Visacro, 2005a), a intensidade da corrente da descarga e o tempo de frente são os principais influenciadores no desempenho de uma LT quando se considera a incidência de descargas atmosféricas diretamente nas torres ou nos cabos para-raios. A amplitude da corrente está ligada à amplitude das sobretensões resultantes e desta maneira nos níveis máximos de solicitação imposta pela corrente da descarga aos componentes do sistema. Esse parâmetro pode ser considerado o mais crítico na etapa de dimensionamento dos parâmetros de uma LT.

O tempo de frente de onda, no que lhe diz respeito, está relacionado à atuação dos isolamentos do sistema em relação à suportabilidade frente às sobretensões associadas a

descargas, como também sua relação com o tempo de trânsito da onda na torre. Outros parâmetros relevantes da descarga são: o tempo de meia onda, a taxa de crescimento da corrente e a carga total da descarga.

## 2.4 Revisão Bibliográfica

Diversas metodologias são apresentadas na literatura para a estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, e dentre essas, duas se destacam, sendo utilizadas como base norteadoras para diversos estudos, as metodologias IEEE (IEEE et al., 1985) e CIGRÉ (CIGRE et al., 1991). Em essência, ambas abordagens fazem uso de uma série de aproximações com o intuito de se simplificar e abstrair os principais aspectos do problema.

O método do IEEE (IEEE et al., 1985), por exemplo, propõe o uso do índice ceráunico<sup>2</sup> para calcular a quantidade de descargas incidentes na LT. A descarga atmosférica, por sua vez, é representada por uma função triangular. A torre, por seu lado, é retratada como uma linha de transmissão vertical, na qual a velocidade de propagação das ondas de tensão e corrente possuem 85% da velocidade da luz. Já a suportabilidade da cadeia de isoladores é avaliada por meio da curva  $V \times t^3$ .

Um ponto comum entre essas metodologias é o uso do valor de corrente crítica para calcular o número de desligamentos na linha. Em que, corrente crítica é o termo usado para designar o menor valor de corrente de retorno (corrente da descarga atmosférica) capaz de ocasionar uma ruptura de isolamento da linha.

Um ponto específico da metodologia CIGRÉ (CIGRE et al., 1991) é a estimativa do número de desligamentos considerando apenas a incidência de descargas atmosféricas na torre. Essa simplificação é interessante pelo fato da quantidade de rupturas na torre ser bem superior as que ocorrem no meio do vão. Outro ponto é a inclusão de formulações que levam em conta o efeito de ionização do solo na impedância de aterramento. Contudo, para a estimativa do número de descargas, essa metodologia sugere a utilização da densidade de descargas atmosféricas - índice que mede o número de descargas que atingem o solo por  $km^2$  por ano (descargas/  $km^2$ / ano).

É senso geral que as metodologias do IEEE e do CIGRÉ são ponto de partida para todas as pesquisas no que diz respeito ao desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. É importante ressaltar que diversos desenvolvimentos foram

---

<sup>2</sup>Número de dias de trovoadas numa dada região por ano.

<sup>3</sup>Curva usada para designar se haverá ou não ruptura do isolamento embasado nos valores de sobretensão em um dado instante de tempo.



realizados pelo IEEE em relação a metodologia proposta em (IEEE et al., 1985), o mesmo pode ser afirmado a respeito do trabalho do CIGRÉ publicado em (CIGRE et al., 1991).

Em (Nucci, 2010), por exemplo, é realizada uma análise comparativa entre alguns dos trabalhos mais relevantes produzidos pelas instituições técnico-científicas CIGRÉ e IEEE. Esse estudo conclui que apesar das significativas diferenças, ambas abordagens podem ser consideradas até certo grau equivalentes, ressaltando que os métodos propostos pelo CIGRÉ possuem caráter mais abrangente e levam em consideração uma maior quantidade de variáveis do problema. O IEEE, por sua vez, possui vantagens como a disponibilização de um *software* gratuito (*software* IEEE-Flash), o qual permite estimar a taxa de desligamentos de uma LT por meio dos modelos sugeridos pelo IEEE.

Em estudo mais recente realizado em (Font et al., 2016) é criada uma aplicação para ajudar no posicionamento de para-raios em uma LT de 380 kV. As conclusões obtidas nesse trabalho evidenciam a relação entre a resistência de aterramento e a quantidade de desligamentos da LT. Ainda que mencionem a alocação ótima de para-raios, os autores não fazem uso de nenhum algoritmo de otimização.

Como pôde ser visto nos trabalhos referenciados nesta Seção e na Subseção 2.2.3, a efetividade do uso de para-raios em uma LT está ligada a características da mesma e, é por esse motivo que a definição da quantidade e da localização dos para-raios deve ser feita por meio de análises que levem em consideração aspectos técnicos e econômicos. Devido à complexidade intrínseca ao problema de alocação de para-raios em LTs, o uso de técnicas de otimização se apresenta como um caminho interessante para solucioná-lo.

Os trabalhos até aqui citados não fazem uso de nenhuma ferramenta de otimização para instalação de para-raios. A maior parte deles utiliza como suporte à decisão critérios pré-definidos para a instalação de para-raios como, por exemplo, a impedância de aterramento da torre, a altura dos condutores e se a estrutura está localizada em extremidades da LT.

Em (Tarasiewicz et al., 2000) é estudada a instalação de para-raios em LTs parcialmente protegidas por cabos guarda. Nesse estudo, um algoritmo de otimização mono-objetivo é aplicado para minimizar a taxa de desligamentos. Alguns critérios pré-definidos são levados em conta como, por exemplo, a alocação de para-raios em 10% de todas as torres. Através dos resultados alcançados, os autores comparam alguns arranjos por meio de critérios como: o custo e o desempenho estimado da linha.

No trabalho publicado em (Orille-Fernández et al., 2004) é desenvolvido um *software* em MATLAB para a aplicação ótima de para-raios em linhas aéreas. O algoritmo desenvolvido faz uso do método do gradiente e almeja minimizar os riscos de falha da

linha. Contudo, ressalta-se a necessidade dessa aplicação de retratar as redes de forma monofásica.

No estudo (Vasconcelos et al., 2012) é apresentado um *software* denominado SIAPR, Sistema de Alocação Ótima de Para-raios (projeto ANEEL - P&D 0377 - 06/2005). A finalidade dessa aplicação é a melhoria do desempenho de linhas de transmissão e de distribuição por meio da alocação ótima de dispositivos para-raios. O *software* criado conta com um módulo interno específico para o cálculo de fenômenos transitórios eletromagnéticos. Essa aplicação se mostra genérica e adaptável, podendo ser aplicada a diferentes LTs considerando o posicionamento de para-raios por torre (instalação de para-raio em todas as fases da torre) ou fase.

Em estudo mais contemporâneo, outro *software* para o posicionamento ótimo de para-raios é exibido em (Castro & Vasconcelos, 2016). A metodologia é constituída pela interação entre um algoritmo genético e o ATP, no qual cada indivíduo do algoritmo corresponde a um arranjo de para-raios na LT. O ATP, por seu lado, simula o desempenho da LT com o arranjo de para-raios especificado e calcula as sobretensões impostas ao longo da cadeia de isoladores. O estudo apresentado em (Castro & Vasconcelos, 2016) é detalhado de forma mais ampla em (Castro, 2016). Neste caso, o *software* desenvolvido é aplicado em diferentes linhas de transmissão.

Em relação às diferenças entre esse trabalho e o desenvolvido em (Castro, 2016), podem-se citar: inclusão do efeito de transferência de surto devido à operação dos dispositivos para-raios, introdução de operadores que levam a uma melhor exploração do espaço de busca e que consideram aspectos específicos do problema como a consideração do efeito mencionado e o direcionamento da busca para a(s) fase(s) mais baixa(s).

Em (Utomo et al., 2018), por sua vez, é proposta uma metodologia para a instalação de para-raios em LTs com auxílio de lógica *Fuzzy*. Para a formulação do conjunto *Fuzzy* e suas regras são utilizadas a altitude, a densidade de descargas atmosféricas e a resistência de aterramento de cada torre. Ao final do estudo, a abordagem sugerida é simulada em uma LT real de 150 kV localizada na Indonésia. Os resultados da simulação indicam uma redução nos valores de sobretensão na LT analisada.

Em trabalho mais recente (Kezunovic & Dokic, 2018) apresenta um método para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs que minimiza um risco de falhas associado a distúrbios e descargas atmosféricas, considerando-se também restrições orçamentárias. A solução proposta é focada na predição do risco de falha do sistema de isolamento da LT com base na deterioração dos equipamentos ao longo do tempo e do impacto instantâneo de uma dada descarga atmosférica. Uma regressão linear é usada para

predição do risco de falha em cada torre com base em um histórico de eventos dos componentes da LT. Fundamentado no risco calculado para cada torre, estimam-se quais as torres com maior probabilidade de produzirem desligamentos se atingidas por descargas atmosféricas. Nesse ponto um algoritmo de otimização é aplicado para determinar a alocação dos para-raios levando em conta o risco de falha e o orçamento disponível.

## 2.5 Conclusão

Este capítulo apresentou uma descrição do problema de alocação ótima de para-raios em linhas de transmissão. Além da descrição do problema, este capítulo também abordou itens ligados ao problema com o objetivo de contextualizar o leitor. Em seguida, foram apresentadas as principais causas e fatores que podem impactar na quantidade de desligamentos em uma LT. Por último, foi exibida uma revisão bibliográfica com alguns dos principais trabalhos ligados ao assunto.

## Metodologia: Otimização

Este capítulo tem como objetivo descrever os principais aspectos do desenvolvimento do projeto. Inicialmente, uma descrição geral é realizada e, logo após, os algoritmos de otimização empregados para solucionar o problema de posicionamento ótimo de para-raios em LTs são apresentados. Três algoritmos são utilizados: um algoritmo inspirado na busca em vizinhança variável, um segundo algoritmo inspirado em um algoritmo evolucionário e um terceiro algoritmo híbrido que engloba características dos dois algoritmos anteriores. Ao final, são descritos os procedimentos utilizados para redução do custo computacional do *software* implementado.

### 3.1 Descrição Geral da Metodologia

A Figura 3.1 apresenta a estrutura funcional da metodologia desenvolvida. O *software* produzido é basicamente formado pela interação entre um algoritmo de otimização implementado na linguagem Java com o ATP. Três algoritmos de otimização foram implementados neste trabalho: um algoritmo híbrido (inspirado em meta-heurísticas de busca local e evolucionárias) e outros dois algoritmos implementados com fins comparativos - um algoritmo inspirado no método de busca GVNS (do inglês, *General Variable Neighbourhood Search*) e outro algoritmo inspirado no GA (do inglês, *Genetic Algorithm*). Vale destacar que, todos esses algoritmos possuem operadores voltados para o problema estudado.

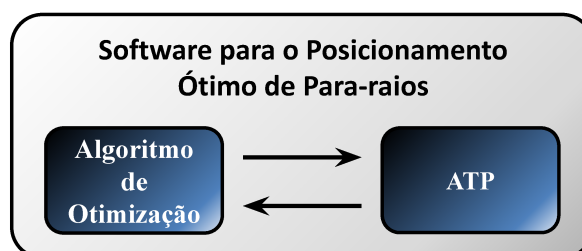


Figura 3.1: Estrutura funcional da metodologia.

O princípio por detrás dos algoritmos de otimização implementados é testar diferentes arranjos de para-raios buscando encontrar uma estimativa da melhor solução possível. Para isso, cada arranjo de para-raios, isto é, uma solução candidata do problema, é representado por uma cadeia de caracteres binários que designam os locais de posicionamento dos para-raios. Assim, cada solução candidata corresponde a um arranjo de para-raios na LT que será simulado no ATP.

O ATP, por seu lado, é o responsável por calcular as sobretensões impostas ao longo das cadeias de isoladores. O mesmo parte do preceito que a linha simulada possui a configuração de para-raios indicada pela solução candidata. De posse dos valores de sobretensão, o desempenho da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas é estimado. Vale destacar que, a comunicação entre os módulos se dá através dos arquivos de entrada e saída do ATP (arquivos de dados no formato *.dat*).

## 3.2 Formulação Matemática

O posicionamento ótimo de para-raios é enunciado neste trabalho como um problema de otimização mono-objetivo com restrições, buscando-se minimizar o número de para-raios necessários para que as LTs se adequem aos critérios de desempenho definidos pelos órgãos reguladores. O conjunto de equações exibido abaixo mostra, de forma sucinta, a formulação matemática usada:

$$\text{Minimizar: } f(\mathbf{x}) = P_R \quad (3.1)$$

$$\text{Sujeito a: } g_1(\mathbf{x}) = Des_{LT} \leq Des_{max} \quad (3.2)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = P_R \leq PR_{max} \quad (3.3)$$

onde, dado um arranjo de para-raios na linha,  $PR$  representa a quantidade de para-raios utilizada,  $Des_{LT}$  exprime o desempenho estimado da linha com esse arranjo.  $Des_{max}$ , por sua vez, descreve a quantidade máxima pré-estabelecida de desligamentos. Por último,  $PR_{max}$  caracteriza a quantidade máxima de para-raios disponíveis para uso.

A primeira restrição -  $g_1(\mathbf{x})$  - busca garantir que todas as soluções obtidas possuam valores de desempenho abaixo do limite pré-definido. Essa restrição visa manter o desempenho da linha abaixo do limite estabelecido pela respectiva agência reguladora. Enquanto a segunda restrição -  $g_2(\mathbf{x})$  - tem como propósito viabilizar cenários em que a concessionária dispõe de recursos financeiros reduzidos.

### 3.3 Representação do Arranjo de Para-raios

O modelo desenvolvido possibilita o posicionamento de para-raios por torre ou por fase. No posicionamento por torre, cada caractere retrata o posicionamento ou não de para-raios em todas as fases de uma torre. Na alocação por fase, cada caractere simboliza o posicionamento ou não de dispositivo para-raios em uma fase de uma torre.

A Figura 3.2 exhibe minuciosamente um arranjo para uma LT hipotética com 5 torres. A porção superior dessa Figura - parte a) - elucida a alocação por torre, a sequência de caracteres "1-0-1-0-0" assinala 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 3.2, por sua vez, é ilustrado o posicionamento por fase. O conjunto de caracteres "101-000-111-000-000" aponta que as fases A e C da primeira torre devem ganhar a instalação de para-raios, enquanto não se deve admitir a instalação de nenhum dispositivo nas torres 2, 4 e 5. Por fim, deve-se considerar a adoção de para-raios em todas as fases da torre 3.

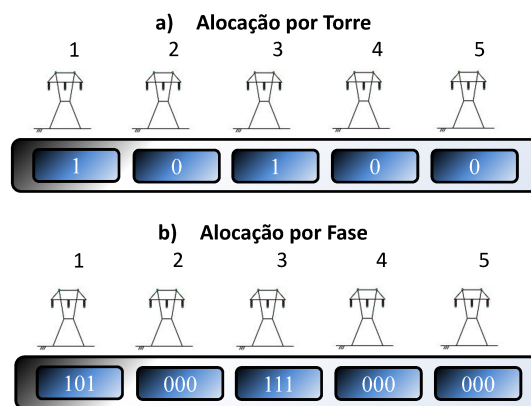


Figura 3.2: Representação binária da solução: a) alocação por torre, b) alocação por fase. Linha trifásica hipotética com cinco torres.

Quando o posicionamento por fase é selecionado, provoca-se um aumento do espaço de busca das soluções devido a maior quantidade de possibilidades para alocação dos dispositivos para-raios. Em função disso, essa forma de representação possui uma inclinação a uma quantidade menor ou no mínimo igual de para-raios, visto que também engloba todos os possíveis arranjos do posicionamento por torre. Entretanto, é importante ressaltar que a alocação por fase possui uma tendência a apresentar um maior custo computacional.

## 3.4 Introdução aos Algoritmos Evolucionários

Muitas das grandes invenções da humanidade são resultados da aplicação de princípios biológicos ou naturais no estudo e projeto de sistemas. Um exemplo são os sistemas de radar inspirados na capacidade biológica de ecolocalização dos morcegos. O processo natural de evolução das espécies pode ser visto como um processo de aprender a se adaptar, otimizando-se o nível de aptidão das espécies ao ambiente. Algoritmos evolucionários (EAs, do inglês *Evolutionary Algorithms*) podem ser descritos como meta-heurísticas genéricas que performam tarefas de otimização e/ou aprendizado com a habilidade de evoluir. De acordo com (Yu & Gen, 2010), esses algoritmos possuem três características principais:

- Baseados em população: algoritmos evolucionários mantêm um grupo de soluções, denominado *população*, para otimizar ou realizar aprendizado de um problema de forma paralela. A população é um princípio básico do processo evolucionário;
- Orientados pelo *fitness* (nível de aptidão): cada solução de uma população é denominada *indivíduo*. Cada indivíduo tem sua representação por genes, chamada *codificação*, e realiza avaliações de performance, chamadas de *fitness* que medem o nível de aptidão dos indivíduos ao ambiente. Algoritmos evolucionários privilegiam indivíduos mais bem adaptados, o que é fundamental no processo de otimização e convergência desses algoritmos ao longo de sucessivas iterações conhecidas como *gerações*;
- Dirigidos pela variação: os indivíduos passam por um número de operações de variação que imitam o processo genético de mudança dos genes, o que é fundamental para explorar o espaço de soluções.

Desde a década de 1960, diversos algoritmos baseados em população, orientados pelo nível de aptidão e com propriedades dirigidas pela variação foram propostos. Uma linha do tempo com alguns dos principais algoritmos evolucionários é exibida na Figura 3.3.

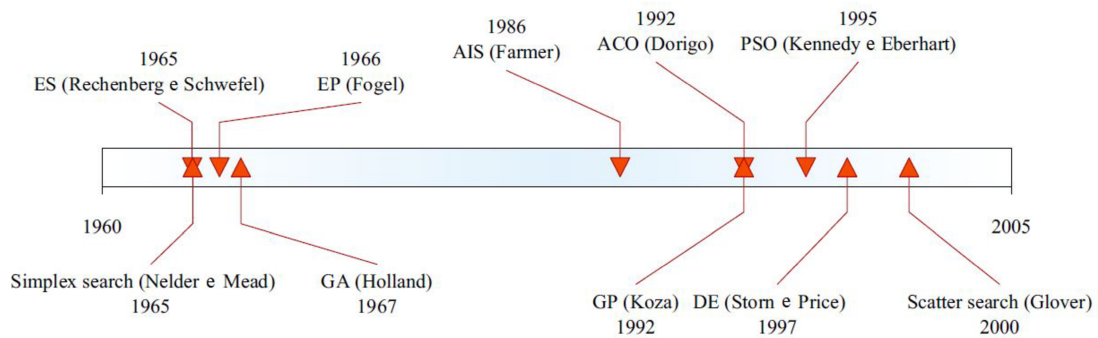


Figura 3.3: Linha do tempo com alguns dos principais EAs propostos. Figura adaptada de (Yu & Gen, 2010).

Dentre os diversos algoritmos evolucionários, um dos mais famosos e utilizados em diferentes aplicações é o algoritmo genético (GA, do inglês *Genetic Algorithm*) (Holland, 1992). Esse algoritmo é inspirado no processo de seleção natural. Algoritmos genéticos são comumente usados para produzir soluções de boa qualidade em problemas de otimização e possuem operadores baseados em processos biológicos como mutação, cruzamento e seleção. O pseudocódigo Algoritmo 1 apresenta, de forma sucinta, a estrutura de um GA genérico.

---

#### Algoritmo 1: Estrutura Genérica de um Algoritmo Genético

---

**Entrada:**  $nGen$ : número de gerações  
**Entrada:**  $popTam$ : tamanho da população  
**Entrada:**  $probCruzamento$ : probabilidade de cruzamento  
**Entrada:**  $probMutacao$ : probabilidade de mutação  
**Saída:**  $indv$ : indivíduo com melhor aptidão

```

1  $i \leftarrow 0$ ;
2  $\vec{P}_i \leftarrow criaPopulacaoInicial(popTam)$ ;
3  $avaliar(\vec{P}_i)$ ;
4 enquanto  $i < nGen$  faça
5    $\vec{P}'_i \leftarrow selecao(\vec{P}_i)$ ;
6    $\vec{P}''_i \leftarrow cruzamento(\vec{P}'_i)$ ;
7    $\vec{P}_{i+1} \leftarrow mutacao(\vec{P}''_i)$ ;
8    $avaliar(\vec{P}_{i+1})$ ;
9    $\vec{P}_{i+1} \leftarrow elitismo(\vec{P}_{i+1}, \vec{P}_i)$ ;
10   $i \leftarrow i + 1$ ;
11 fim
12  $indv \leftarrow individuoComMelhorAptidao(\vec{P}_i)$ ;
13 retorna  $indv$ 

```

---

Na inicialização do GA é realizada a avaliação da população por meio da função de mérito (*fitness*) que mensura a aptidão das soluções. A partir desse ponto, um processo



evolutivo é conduzido de forma contínua em consecutivas gerações. Os dois principais operadores geralmente utilizados são: **seleção** e **reprodução**.

Como o nome indica, a seleção é responsável pela escolha de alguns indivíduos da população através do uso da *fitness*. Os indivíduos eleitos nesse procedimento de triagem são sujeitos aos operadores genéticos de reprodução: **cruzamento** e **mutação**, os quais são incumbidos pela geração de novos indivíduos. Em resumo, o operador de cruzamento mistura características de dois indivíduos “pais”, levando a formação de dois novos indivíduos, os quais são conhecidos como “filhos”. O operador de mutação, por sua vez, age sobre os filhos, alterando suas características de forma aleatória ou não.

A nova população é avaliada e um outro operador, denominado **elitismo**, é executado. Possibilitando que o melhor indivíduo de uma geração  $i$  seja recuperado em uma população  $i+1$ , caso esse indivíduo seja melhor que todos os indivíduos da nova população. Para manter o tamanho da população constante, é prática comum a remoção do pior indivíduo. Esse processo iterativo é repetido até que o critério de parada seja atendido, neste caso, um número máximo pré-definido de gerações. Maiores informações podem ser encontradas em (Holland, 1992).

### 3.5 Introdução aos Algoritmos de Busca em Vizinhança Variável

A busca em vizinhança variável (VNS, do inglês *Variable Neighbourhood Search*) é uma meta-heurística, ou *framework* para construir heurísticas, baseada em mudanças sistemáticas de vizinhança em ambas as suas fases: descendente (descoberta de um mínimo local) e perturbação (emersão do vale correspondente). Essa troca sistemática de vizinhança é fortemente baseada nas seguintes observações:

- **Fato 1** - Um mínimo local com respeito a uma estrutura de vizinhança não é necessariamente o mínimo local para outra estrutura de vizinhança;
- **Fato 2** - Um mínimo global é um mínimo local com respeito a todas as possíveis estruturas de vizinhança;
- **Fato 3** - Para vários problemas, o mínimo local com respeito a uma ou várias estruturas de vizinhança são relativamente próximos uns aos outros.

A última dessas três observações é empírica. A implicação dela é que geralmente um ótimo local provê informação sobre um ótimo global (Hansen et al., 2010). O VNS foi inicialmente proposto em 1997 (Mladenović & Hansen, 1997), e desde então tem sido cada vez mais utilizado em novos métodos e variadas aplicações. Dentre os métodos surgidos da ideia de busca em vizinhança variável, uma das abordagens que mais se destaca é a GVNS (do inglês, *General Variable Neighbourhood Search*). O uso da abordagem GVNS tem alcançado sucesso em diferentes aplicações (Brimberg et al., 2000; Andreatta & Ribeiro, 2002; Ribeiro & Souza, 2002). O pseudocódigo Algoritmo 2 apresenta, de forma breve, a estrutura de um GVNS.

---

**Algoritmo 2:** Estrutura Genérica de um Algoritmo de Busca em Vizinhança Variável Geral

---

**Entrada:**  $kMax$ : quantidade de estruturas de vizinhança utilizadas  
**Entrada:**  $tMax$ : tempo máximo de CPU permitido  
**Saída:**  $sol$ : melhor solução encontrada no processo de busca

```

1  $t \leftarrow 0$ ;
2  $sol \leftarrow criaSolucaoInicial()$ ;
3  $avaliar(sol)$ ;
4 enquanto  $t < tMax$  faça
5    $k \leftarrow 1$ ;
6   enquanto  $k \leq kMax$  faça
7      $sol' \leftarrow shake(sol, k)$ ; // Etapa de perturbação
8      $avaliar(sol')$ ;
9      $sol'' \leftarrow VND(sol', k)$ ; // Etapa de busca local
10     $sol \leftarrow mudancaDeVizinhanca(sol, sol'', k)$ ;
11  fim
12   $t \leftarrow tempoCPU()$ ;
13 fim
14 retorna  $sol$ 

```

---

Na inicialização do GVNS é realizada a avaliação da solução inicial. A partir daí, um processo iterativo é conduzido de forma continuada. Os dois principais operadores geralmente utilizados são: **shake** (etapa de perturbação da solução) e **VND** (etapa de busca local).

A etapa de *shake* realiza uma perturbação aleatória na solução incumbente (melhor solução encontrada até então), produzindo-se uma nova solução presente na  $k$ -ésima estrutura de vizinhança da solução incumbente. Essa nova solução é então avaliada ( $avaliar(sol')$ ). A partir dessa nova solução, um processo de busca em vizinhança variável descendente (VND, do inglês *Variable Neighbourhood Descent*) é conduzido.

A etapa VND realiza uma busca local determinística na  $k$ -ésima estrutura de vizinhança, fornecendo-se ao final dessa etapa uma solução com garantia de otimalidade

local. Vale destacar que, todas as soluções pertencentes a  $k$ -ésima estrutura de vizinhança são avaliadas. Em outras palavras, a função *avaliar()* é executada múltiplas vezes na etapa VND, recebendo como parâmetro em cada chamada uma das soluções vizinhas.

Caso ao final da etapa VND seja gerada uma solução melhor do que a solução incumbente, a função Mudança de Vizinhança atribui o valor unitário ao contador responsável por assinalar a vizinhança atualmente em uso. Além disso, a solução gerada na etapa VND se torna a nova solução incumbente. Caso contrário, o contador responsável por indicar a vizinhança utilizada é incrementado.

Caso a estrutura de vizinhança *kMax* esteja em uso e não seja produzida melhora ao final da etapa VND, retorna-se o contador de vizinhança para o valor unitário. A condição de parada mais usual dessa abordagem é um limite de tempo (*tMax*) pré-definido. Ao final do processo, a melhor solução alcançada é retornada.

### 3.6 Geração das Soluções Iniciais - Heurística Construtiva

Uma heurística construtiva é utilizada para geração das soluções iniciais. Vale destacar que, algumas dessas soluções são criadas de modo aleatório e outras de forma determinística. Dentre as soluções geradas deterministicamente, inclui-se o posicionamento de para-raios: i) em nenhuma das torres; ii) em todas as torres; iii) em torres alternadas; iv) nas torres associadas aos maiores valores de impedância de aterramento; v) nas torres localizadas em regiões de maior densidade de descargas atmosféricas; vi) nas torres associadas aos vãos de maior comprimento; vii) nas torres localizadas em maiores altitudes e viii) nas torres com maior impacto na estimativa de desempenho da configuração original da LT.

O número de soluções produzidas pela heurística construtiva é idêntico ao número de torres da LT, caso a LT simulada possua uma quantidade inferior a 12 estruturas, utiliza-se um gerador com 12 soluções iniciais. Segue abaixo o número de estruturas geradas por critério:

- Critério i - Uma solução;
- Critério ii - Uma solução;
- Critério iii - Uma solução;
- Critério iv - 15% do total de soluções;

- Critério v - 15% do total de soluções;
- Critério vi - 15% do total de soluções;
- Critério vii - 15% do total de soluções;
- Critério viii - 15% do total de soluções;
- Soluções aleatórias - Percentual restante para atingir 100% da quantidade total de soluções.

Para a aplicação do critério iv, de início todas as torres são organizadas em ordem decrescente com base nos valores de impedância de aterramento. Em seguida, geram-se as soluções com quantidades linearmente espaçadas de para-raios. O limite mínimo é o posicionamento de para-raios em 5% das torres da LT com os maiores valores de impedância de aterramento, enquanto o limite máximo é o posicionamento de para-raios em 95% das torres. Para uma LT fictícia com 30 estruturas seriam geradas 4 soluções pelo critério iv. Essas soluções possuiriam o seguinte percentual de torres protegidas por para-raios: 5%, 35%, 65% e 95%. Um procedimento similar é executado para os critérios v a viii.

### 3.7 Algoritmo GA Adaptado para o Problema

A Figura 3.4 apresenta um fluxograma do algoritmo GA adaptado para o problema de posicionamento ótimo de para-raios. De início, uma população inicial é criada por meio do gerador de indivíduos citado, responsável por acelerar o processo de busca pela solução. Essa população inicial é então avaliada (equações (3.1), (3.2) e (3.3)) e caso o critério de parada não seja satisfeito, uma nova população é formada por meio dos operadores de seleção, cruzamento e mutação.

Essa nova população é avaliada e unificada com a população anterior. Em seguida, as melhores soluções dessa população unificada são selecionadas para compor a população da próxima geração. Esse processo se repete a cada geração, até que o critério de parada seja alcançado. Nesta dissertação, um único critério é utilizado, um intervalo de tempo ( $T_{max}$ ) definido a priori. A adoção desse critério visa facilitar a análise comparativa dos algoritmos de otimização empregados, tornando mais fácil o controle do custo computacional.

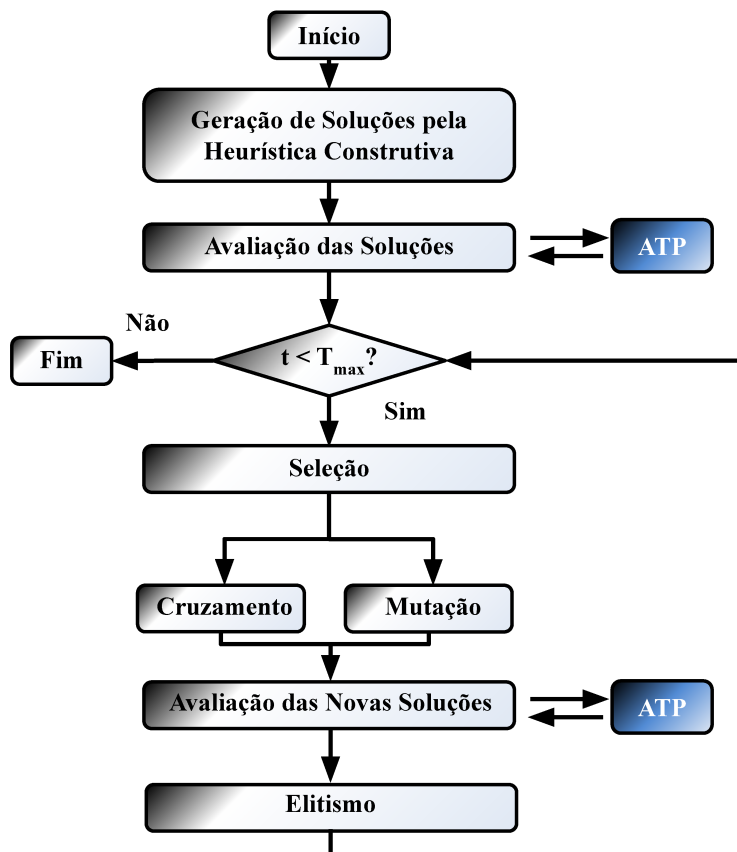


Figura 3.4: Fluxograma do algoritmo GA adaptado para o problema de alocação ótima de para-raios.

### 3.7.1 Seleção, Cruzamento e Mutaçao

No operador de seleçao, um torneio binário simples é empregado. Resumidamente, dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente e comparados (Deb et al., 2002). Três cenários podem se suceder: i) ambos os indivíduos violam as restrições especificadas, neste caso o indivíduo que viola menos é eleito; ii) apenas um dos indivíduos viola as restrições, neste cenário o indivíduo que não viola é escolhido; iii) nenhum dos indivíduos viola as restrições, nesta situação se compara o valor da função objetivo, escolhendo-se o indivíduo com a menor quantidade de para-raios, caso o número de para-raios também seja idêntico é selecionado o indivíduo com menor número de desligamentos. Esse procedimento se repete até que a população de pais seja integralmente preenchida.

As operações de cruzamento e mutaçao, por sua vez, são efetuadas em paralelo e implementadas com base em métodos clássicos da literatura para problemas combinatórios (Ramos-Figueroa et al., 2020). No cruzamento, definem-se dois pontos de corte de forma aleatória e em seguida, trocam-se informações de dois indivíduos selecionados da população de pais (Holland, 1992; 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 do indivíduo escolhida aleatoriamente, em outras palavras, um valor unitário se torna zero após a mutação e, vice-versa. O segundo mecanismo sorteia duas posições do indivíduo com caracteres diferentes e realiza uma inversão dos valores dos caracteres. Ou seja, a posição que continha o caractere unitário passa a possuir valor nulo e, vice-versa.

### 3.8 Algoritmo GVNS Adaptado para o Problema

A Figura 3.5 apresenta um fluxograma do algoritmo GVNS moldado para o problema de alocação ótima de para-raios. A princípio, um conjunto de soluções é criado pela mesma heurística construtiva utilizada no algoritmo GA adaptado para o problema.

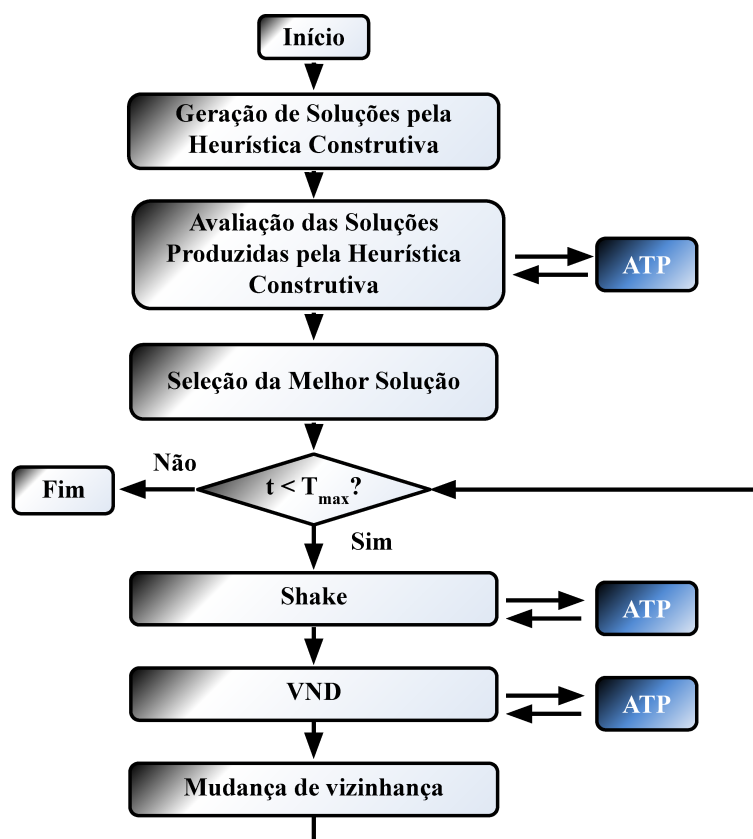


Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo GVNS adaptado para o problema de alocação ótima de para-raios.

As soluções iniciais são então avaliadas (equações (3.1), (3.2) e (3.3)) e a melhor delas (solução com o menor número de para-raios e que não violas as restrições) é escolhida

como ponto de começo no processo de busca inspirado no GVNS. A melhor solução inicial é perturbada algumas vezes (etapa *Shake*), produzindo-se um conjunto de novas soluções. Essas novas soluções são avaliadas utilizando o ATP e a melhor dentre essas soluções é utilizada na fase de busca local (etapa VND).

Como previamente mencionado, a etapa VND realiza uma busca local almejando descobrir a melhor solução dentre um conjunto de soluções próximas (pertencentes a mesma vizinhança) a solução retornada na etapa *Shake*. Vale ressaltar que, nessa fase todas as soluções vizinhas (arranjos possíveis contidos no conjunto de vizinhança) são avaliadas.

Realizada a etapa VND, compara-se a melhor configuração de para-raios encontrado nessa etapa com a melhor configuração produzida durante toda a execução do algoritmo. Caso haja superioridade da configuração proveniente da etapa VND, esse novo melhor arranjo se tornará o ponto de partida na próxima iteração do algoritmo. No entanto, se após  $i$  iterações não for efetuada uma melhoria, muda-se para uma 2ª estrutura de vizinhança de busca na etapa Mudança de Vizinhança, retornando-se para a 1ª estrutura de vizinhança quando uma solução superior for encontrada.

O procedimento detalhado é repetido a cada iteração, até que o critério de parada seja alcançado. Neste trabalho apenas um critério é usado, um intervalo de tempo ( $T_{max}$ ) pré-definido.

### 3.8.1 Perturbação e Busca Local

O operador de perturbação (*Shake*) implementado privilegia as torres consideradas mais críticas com relação ao desempenho da LT. Desse modo, as torres da solução incumbente (melhor solução encontrada até o momento pelo algoritmo) são inicialmente divididas em duas listas:

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

Ligados a ordenação dessas duas listas estão pesos abrangendo a probabilidade de escolha de cada uma das torres. Os valores dos pesos atribuídos acompanham uma distribuição geométrica. Quanto menor o índice de uma torre na lista (quanto mais próxima a torre está da primeira posição), maior a probabilidade dessa torre ser selecionada.

Realizada a divisão das torres em duas listas, produz-se um número aleatório que determina o percentual de estruturas modificadas (torres da solução incumbente 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 modo a não gerar soluções muito aleatórias ou muito parecidas à solução incumbente. Um segundo número aleatório determina dentre o percentual de torres modificadas 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. Estabelecidos esses percentuais, são sorteadas as estruturas que devem perder ou receber a instalação de para-raios.

O procedimento de geração de novas soluções perturbando a solução incumbente é repetido até se produzirem  $n$  soluções. A melhor dentre essas  $n$  soluções 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 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, isso leva a avaliação de todas as soluções presentes em uma estrutura de 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 significativo 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 uma única estrutura de vizinhança é utilizada. Nessa vizinhança é procurado o melhor arranjo de para-raios considerando todas as possibilidades em um trecho constituído por 3 torres adjacentes. Ou seja, procura-se a melhor dentre as 8 ( $2^3$ ) possibilidades de arranjos de para-raios nesse trecho no caso de uma LT trifásica.

Para a alocação por fase, no que lhe diz respeito, são utilizadas duas estruturas de vizinhança. A seguir são detalhadas as estruturas de vizinhança propostas para a alocação por fase:



- 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 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 são projetados 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 baixa(s) das LTs. Em um cenário em que todas as fases estão a mesma altura, as duas vizinhanças se tornam idênticas.

Em LTs protegidas por cabo guarda geralmente os condutores mais baixos possuem um pior fator de acoplamento com o cabo guarda resultando em maiores valores de sobretensão nesses condutores (Bakar et al., 2013). Em (Babuder et al., 1999) e (Tarchini & Gimenez, 2003) são utilizadas regras 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* sucedida pelo VND) não seja produzida uma solução melhor, muda-se para a vizinhança que realiza uma maior quantidade de avaliações (maior custo computacional) 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. Neste trabalho o procedimento de *Shake* não é modificado pela cardinalidade da vizinhança.

### 3.9 Algoritmo Híbrido (GA+GVNS) Adaptado para o Problema

Uma consideração geral a respeito da performance dos algoritmos evolucionários é a de que eles possuem grande capacidade de exploração do espaço de busca, mas possuem limitações no que diz respeito ao refinamento local das soluções (Yu & Gen, 2010). Partindo dessa observação, muitos trabalhos dedicaram esforço na concepção

de soluções que combinam os algoritmos evolucionários a métodos de busca local (Knowles & Corne, 2000; Lü & Hao, 2010). Esses algoritmos evolucionários híbridos são chamados na literatura de algoritmos meméticos (MAs, do inglês *Memetic Algorithms*).

Buscando um balanceamento entre a exploração e a exploração do espaço de soluções, isto é visando produzir uma metodologia genérica que equilibra a busca local e global das soluções, esta dissertação propõe uma abordagem híbrida entre os algoritmos GA e GVNS para o problema de posicionamento ótimo de para-raios em LTs. A Figura 3.6 apresenta um fluxograma da abordagem híbrida proposta para o problema.

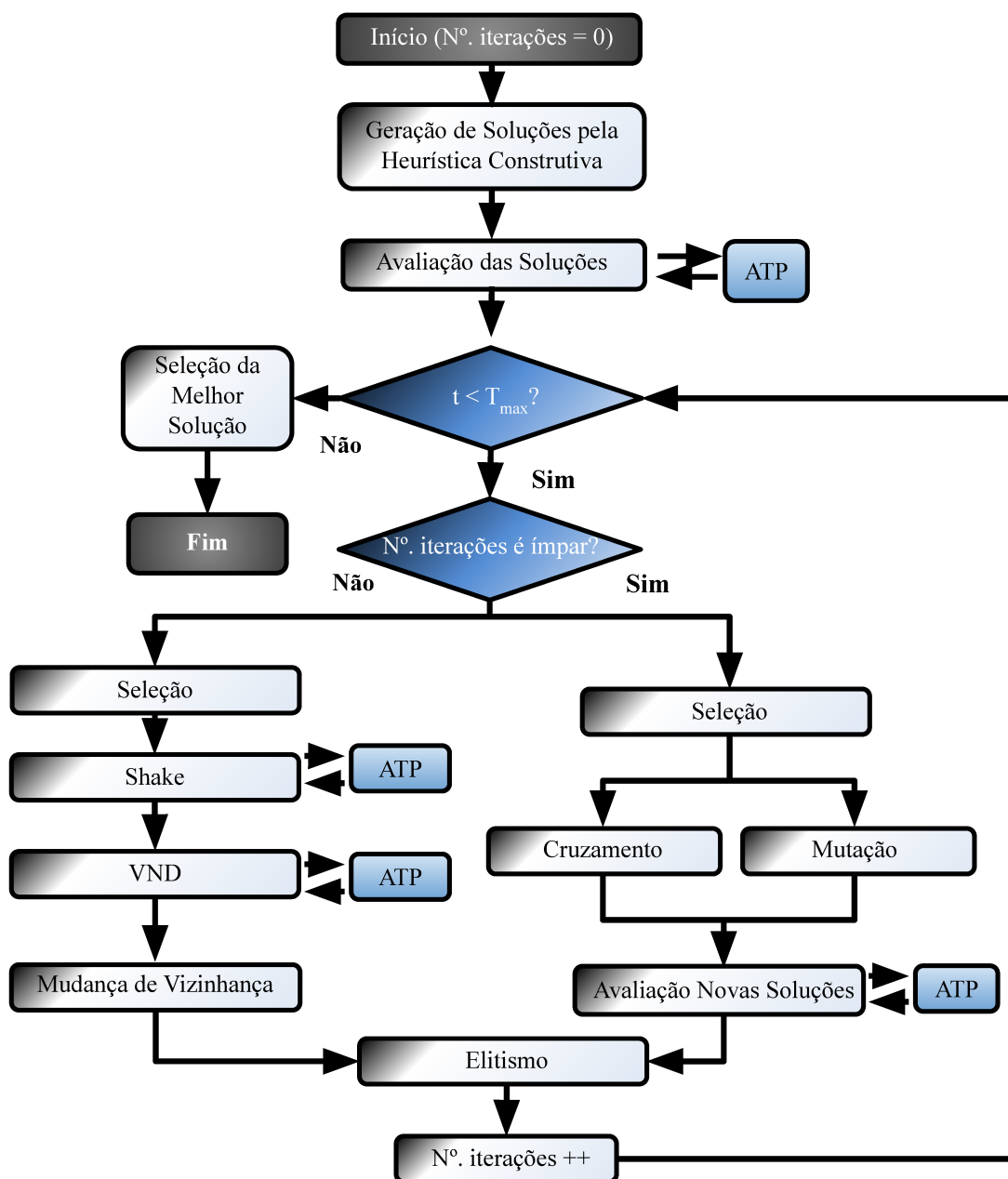


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo híbrido desenvolvido para o problema de alocação ótima de para-raios.

De início, um conjunto de soluções é criado pela heurística construtiva usada nos algoritmos GA e GVNS. Essas soluções iniciais são avaliadas (equações (3.1), (3.2) e (3.3)) e passam a compor uma população arquivo ( $Pop_{Arq}$ ) responsável por armazenar as melhores soluções encontradas em todo processo de busca. 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 alcançado - um intervalo de tempo ( $T_{max}$ ) pré-definido.

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 *Seleção*, 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 são levadas em consideração as novas soluções geradas e as soluções presentes em  $Pop_{Arq}$ . As melhores soluções presentes nas duas populações são armazenadas em  $Pop_{Arq}$ , de forma a se manter o número de soluções presentes em  $Pop_{Arq}$  constante. Por fim, o número de iterações é incrementado ( $N^o. \text{ iterações} ++$ ). Quando o critério de parada é atendido, a melhor solução presente em  $Pop_{Arq}$  é selecionada e o algoritmo alcança o seu término (*Fim*).

### 3.9.1 Operadores Inspirados no GVNS - Caminho 1

De início, selecionam-se  $M$  soluções dentre as  $popTam$  soluções presentes em  $Pop_{Arq}$  por meio de um torneio binário. Esse procedimento visa reduzir o alto custo relacionado a realização de uma busca local para cada uma das soluções. A população auxiliar resultante da etapa de *Seleção* recebe o nome de  $Pop_{Aux}$ . Vale destacar que, a etapa de *Seleção* do Caminho 1 elege  $M$  soluções para a próxima etapa, enquanto o procedimento *Seleção* do Caminho 2 perpetua  $popTam$  soluções. Para cada uma das  $M$  soluções presentes em  $Pop_{Aux}$ , repete-se o procedimento adotado no algoritmo GVNS adaptado para o problema - Seção 3.8 - 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  $Pop_{Aux}$ ;

- 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.

Realizada a divisão das torres em duas listas, para cada uma das soluções presentes em  $Pop_{Aux}$  é gerado um número aleatório que determina o percentual de torres modificadas de forma idêntica ao algoritmo GVNS adaptado. Também de forma similar ao GVNS adaptado, um segundo número aleatório é usado para determinar dentre o percentual de torres modificadas, quantas devem receber a instalação de para-raios e quantas torres devem perder a instalação de para-raios.

O procedimento de geração de novas soluções perturbando as soluções vindas de  $Pop_{Aux}$  é repetido até se produzirem  $n$  soluções para cada uma das  $M$  soluções provenientes de  $Pop_{Aux}$ . 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, cada uma dessas produto de uma das  $M$  soluções de  $Pop_{Aux}$ .

Um procedimento de busca local similar ao do algoritmo GVNS adaptado é utilizado. Sendo 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  $popTam$  melhores soluções presentes no conjunto formado pela união das populações  $Pop_{VND}$  e  $Pop_{Arq}$ .

### 3.9.2 Operadores Inspirados no GA - Caminho 2

Com relação ao segundo caminho, todos os operadores utilizados - *Seleção*, *Cruzamento* e *Mutação* - possuem comportamento similar ao algoritmo GA adaptado para o problema (Seção 3.7). O tamanho da população utilizado nesse caminho é idêntico ao tamanho da população usado no algoritmo genético ( $popTam$ ).

## 3.10 Estratégias para Redução do Custo Computacional

Para estimar o desempenho da linha, primeiramente é necessário estimar a quantidade de desligamentos em cada uma das torres que compõe essa linha (uma explicação mais detalhada é fornecida no Capítulo 4). Dessa maneira, em uma LT hipotética com 30 torres, por exemplo, preliminarmente seriam necessárias 30 chamadas ao ATP para

a estimativa de desempenho de um único arranjo de para-raios. No cenário de escolha do algoritmo genético implementado, por exemplo, caso fossem necessárias 20 gerações com uma população de 50 indivíduos para convergência do algoritmo, seriam necessárias 30.000 execuções do ATP.

Dada essa adversidade, é importante fazer uso de alternativas para redução do custo computacional no processo de busca por uma solução que otimiza o posicionamento de para-raios na LT. Este trabalho faz uso de duas técnicas propostas em (Castro, 2022): a avaliação de chamadas ao ATP de forma concorrente e o uso de uma memória auxiliar que armazena o resultado de chamadas anteriores ao ATP.

Para explicar como essas técnicas funcionam é necessário esclarecer que as torres utilizadas em cada execução do ATP variam de acordo com a estrutura atingida pela descarga atmosférica. Em situações onde as torres nas extremidades da linha não estão incluídas, as simulações sempre consideram três vãos para cada lado, a partir da estrutura atingida pela descarga atmosférica. No cenário em que a torre atingida pela descarga atmosférica se encontra na parte inicial da LT são utilizadas as sete torres iniciais. Por outro lado, se a torre atingida se encontra na parte final, as últimas sete torres são usadas na simulação do ATP. Dessa forma, independentemente do local atingido pela descarga, as simulações sempre consideram um trecho de linha composto por sete torres, o que facilita o preenchimento do cartão utilizado no ATP.

A Figura 3.7-a ilustra um cenário em que a primeira estrutura de uma LT hipotética com 30 torres é atingida por uma descarga atmosférica, nesse caso um trecho com as sete torres iniciais é utilizado para simulação no ATP. Enquanto a Figura 3.7-b descreve uma situação em que uma torre distante das extremidades é atingida por uma descarga (estrutura de índice 15 é atingida), nessa circunstância as simulações consideram um trecho com três vãos para cada lado a partir da estrutura em que incide a descarga.

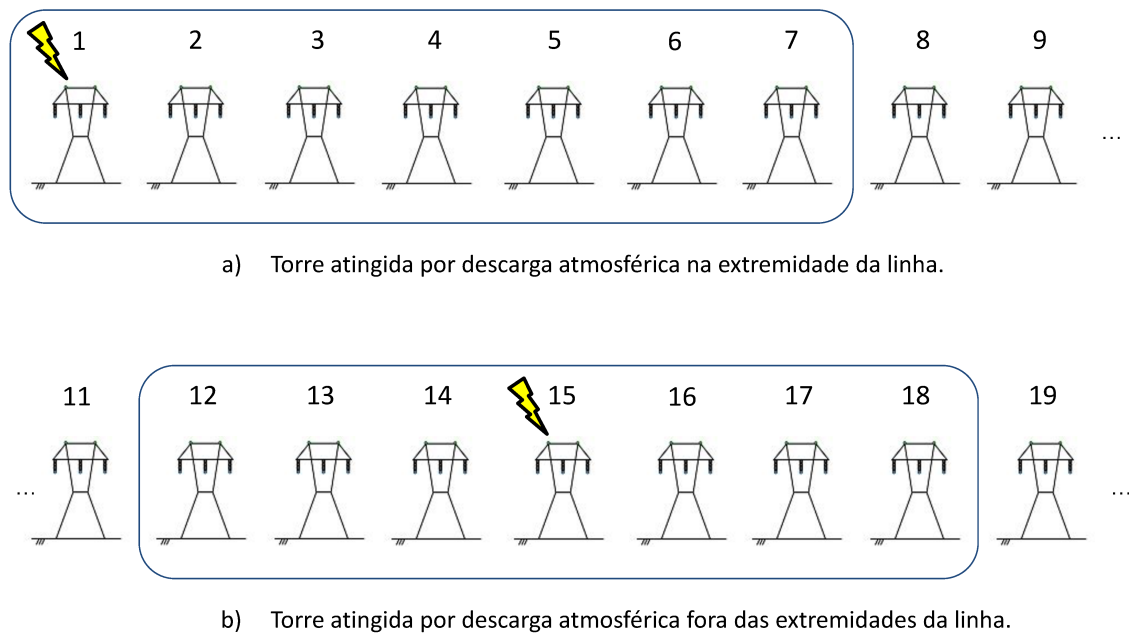


Figura 3.7: Ilustração das torres selecionadas para simulação no ATP em uma LT fictícia com 30 estruturas.

Em (Banjanin & Savić, 2016), conclui-se que dois vãos adjacentes (cinco torres no total) são suficientes para representar o problema de forma convincente quando a simulação leva em conta somente descargas atmosféricas que atingem diretamente a torre. Entretanto, por cautela, o modelo considerado nesta dissertação faz uso de 3 vãos adjacentes.

### 3.10.1 Chamadas ao ATP de Forma Concorrente

A metodologia utilizada neste trabalho divide cada torre da LT e seus vãos adjacentes em um trecho de linha diferente e, por meio das simulações feitas no ATP, calcula o número de desligamentos que ocorre em cada um. Posteriormente, o número de desligamentos em cada um desses trechos é somado, produzindo-se a quantidade total de desligamentos na LT (essa metodologia é apresentada em detalhes no Capítulo 4).

A avaliação de cada um dos trechos da LT é independente, logo esse processo pode ser executado de forma simultânea através de um esquema com múltiplas *threads*. Esse esquema com várias *threads* pode reduzir significativamente o tempo necessário para otimização de uma LT em comparação ao tempo necessário usando um esquema de avaliação sequencial (Castro, 2022).

Uma *thread* pode ser utilizada para avaliação de cada trecho de linha, contudo vale ressaltar que a criação de uma quantidade muito elevada de *threads* pode produzir

um efeito contrário, adicionando *overhead* ao processo. Entretanto, esse *overhead* pode ser impedido através do estabelecimento de um número máximo de trechos avaliados concorrentemente. Neste trabalho a quantidade de trechos avaliados simultaneamente é limitada com o uso de um semáforo contador.

### 3.10.2 Armazenamento das Avaliações do ATP em Memória Auxiliar

Como mencionado, as torres usadas em cada simulação do ATP dependem da estrutura atingida pela descarga atmosférica. Como consequência disso, sempre que uma descarga incide em uma mesma torre, as simulações realizadas consideram o mesmo trecho da LT. Logo, se duas soluções apresentam um arranjo de para-raios idêntico nesse trecho, ambas as simulações produzem o mesmo resultado, independentemente do posicionamento de para-raios nas outras torres.

Com o objetivo de ilustrar a situação mencionada, a Figura 3.8 exibe dois arranjos de para-raios que diferem apenas no último caractere (estrutura de índice 30). Neste exemplo, como a descarga atmosférica incide sobre a primeira estrutura, o número de desligamentos decorrentes do fenômeno de *backflashover* é estimado levando em conta o trecho formado pelas sete primeiras torres. Como ambos os arranjos são idênticos, os resultados das simulações nesse trecho são iguais. Generalizando esse resultado é possível afirmar que para avaliar o segundo arranjo, basta utilizar os resultados dos trechos idênticos ao primeiro arranjo, simulando-se no ATP somente os trechos que envolvem o último caractere.

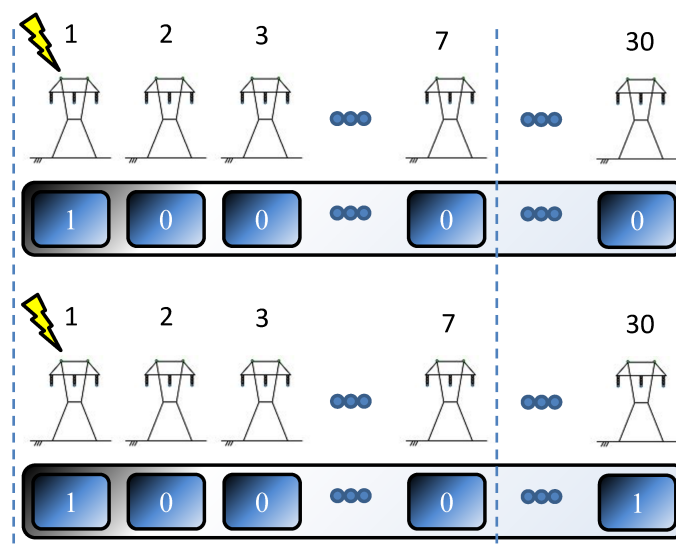


Figura 3.8: Exemplo de situação em que dois arranjos de para-raios diferem em apenas uma torre em uma LT hipotética com 30 estruturas. Figura adaptada de (Castro, 2022).

O esquema de memória auxiliar utilizado faz uso de um *Map*. Um *Map* é um contêiner que guarda elementos constituídos por um par: chave e valor. O campo chave é formado pela união do índice da estrutura atingida pela descarga atmosférica com o arranjo de para-raios desse trecho. O campo valor, por seu lado, armazena o número de desligamentos estimados para o trecho. O *Map* usado pode ser visualizado na Figura 3.9.


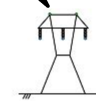

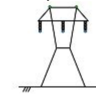
	Chave					Valor
	Índice torre + arranjo de para-raios					BFR
 1 	1	0	•••	1	1	4,90
	0	0	•••	1	0	3,70
	•••					
 2 	1	1	•••	0	0	6,30
	0	1	•••	1	0	2,10
	•••					

Figura 3.9: Esquema de mapeamento de trechos simulados em uma memória auxiliar. Figura adaptada de (Castro, 2022).

A estrutura utilizada garante que quando duas chaves são iguais, o trecho referenciado é igual. Em função disso, se um trecho avaliado aperecer novamente durante o processo de busca, a quantidade de desligamentos naquele trecho poderá ser buscada com o uso do *Map*. Essa busca é muito menos custosa do que uma nova simulação no ATP.

## 3.11 Conclusão

De início, uma descrição geral da metodologia foi realizada. Essa descrição geral foi seguida pela formulação matemática do problema e a representação utilizada para o arranjo de para-raios. Logo depois, foram apresentados os algoritmos de otimização implementados neste trabalho: um algoritmo genético, um algoritmo de busca geral em vizinhança variável e um algoritmo híbrido que incorpora operadores dos dois primeiros.



Vale destacar que, os algoritmos apresentados possuem operadores pensados para o problema em questão, o que aumenta a qualidade das soluções produzidas. Por fim, são exibidas as técnicas utilizadas para redução do custo computacional do *software* desenvolvido.

---

# Metodologia: Cálculo do Desempenho de LTs Frente às Descargas Atmosféricas

---

Este capítulo apresenta os principais aspectos no que diz respeito ao módulo de estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Inicialmente é apresentado o modelo computacional empregado no ATP. Por fim, exibi-se a metodologia utilizada para estimar a taxa de desligamentos causados pelo fenômeno de *backflashover*.

## 4.1 Modelo Computacional

Para estimar o desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas, utilizou-se o ATP. O ATP é responsável por simular um modelo computacional composto pelos seguintes elementos: descarga atmosférica, vãos de linha, torres, para-raios e sistema de aterramento. Vale destacar que, esse modelo foi implementado no contexto do P&D mencionado “*Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas através da Alocação Ótima de Para-Raios via Algoritmos de Otimização Acoplados com o ATP*” e dá continuidade ao trabalho desenvolvido em (Castro, 2016).

Os elementos citados são modelados no ATPDraw, pré-processador gráfico para a versão do ATP na plataforma MS-Windows, e geram uma espécie de arquivo *template* com a extensão “.atp”. Com fins ilustrativos, a Figura 4.1 apresenta um trecho modelado no ATPDraw. A linha representada é trifásica e utiliza um cabo guarda.

### 4.1.1 Descarga Atmosférica

É conhecido da literatura que as descargas atmosféricas apresentam um comportamento estatístico amplo e variável no que diz respeito a sua amplitude, forma de onda, polaridade, entre outros. Da perspectiva da modelagem para o cálculo do desempenho

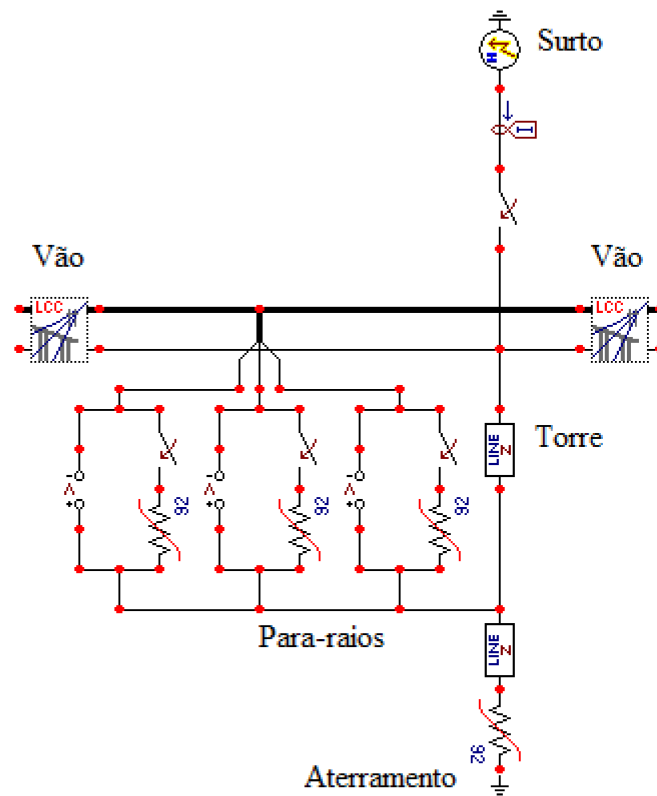


Figura 4.1: Trecho de uma LT trifásica com um cabo guarda modelado no ATPDraw.

de LTs, a partir da aplicação do Método de Monte Carlo, é possível reproduzir este comportamento estatístico concebendo, a partir de uma grande quantidade de descargas atmosféricas, as curvas de distribuição dos parâmetros considerando a proporção de descargas positivas e negativas, o valor de pico médio e a forma de onda representativa do fenômeno.

Cerca de 90% das descargas possuem polaridade negativa, exceto por variações sazonais e regionais (Chowdhuri et al., 2005; INPE/ELAT, 2022b). Devido a menor ocorrência de descargas positivas e ao seu comportamento extremamente variado, existe grande dificuldade em se produzir uma forma de onda aceitável para essa polaridade de descarga (Berger, 1975). Em função disso, somente descargas atmosféricas negativas são consideradas neste trabalho.

Diferentes formas de onda da corrente de retorno são tradicionalmente utilizadas em estudos computacionais, entre elas é possível destacar: triangular (IEEE et al., 1985), CIGRÉ (CIGRE et al., 1991) e função dupla exponencial (EPRI, 1982). Em (Silveira & Visacro, 2019), é analisada a influência da forma de onda e do tempo de frente de onda na estimativa do número de desligamentos consequentes ao fenômeno de *backflashover*. Nesse estudo três formas de onda são analisadas: triangular, CIGRÉ e função duplo pico. Os valores utilizados para o tempo de frente de onda consideram valores realísticos para o fenômeno (valores entre 1,5 e 10  $\mu$ s). Os autores chegam a conclusão que para

o critério de determinação de ruptura ou não do isolamento utilizado nesta dissertação (curva  $V \times t$ ), esses parâmetros podem impactar significativamente os resultados.

Mesmo que tentem emular o comportamento da corrente de retorno real, as formas de onda citadas diferem significativamente de um surto atmosférico autêntico. Essas diferenças, causam impactos significativos na estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Buscando ser mais fidedigno ao fenômeno real, este trabalho considera a representação da corrente de retorno pela soma de sete funções de Heidler detalhada em (De Conti & Visacro, 2007).

A representação desenvolvida em (De Conti & Visacro, 2007) tem como base medições realizadas na estação do Morro do Cachimbo localizada no estado de Minas Gerais. O uso dessa representação tem como intuito incluir no modelo uma descarga com características próximas às encontradas nas descargas das regiões de origem das LTs consideradas neste trabalho (LTs nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil). Neste trabalho, essa forma de onda é referida como representativa. Os parâmetros usados são retirados de (De Conti & Visacro, 2007) e exibidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: 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

O *software* desenvolvido no P&D mencionado disponibiliza quatro opções para representar a corrente de retorno: triangular, dupla exponencial, CIGRÉ e representativa (De Conti & Visacro, 2007). Para as três primeiras opções é considerado um tempo de frente de  $1,2 \mu s$  e tempo de meia onda de  $50 \mu s$ . Com base nos resultados obtidos em (Castro, 2016), esta dissertação opta pelo uso da forma de onda representativa.

#### 4.1.2 Vãos de Linha

Para a estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas com maior fidelidade ao fenômeno real, deve-se considerar a variação dos parâmetros elétricos da linha em relação a frequência. Contudo, por simplicidade

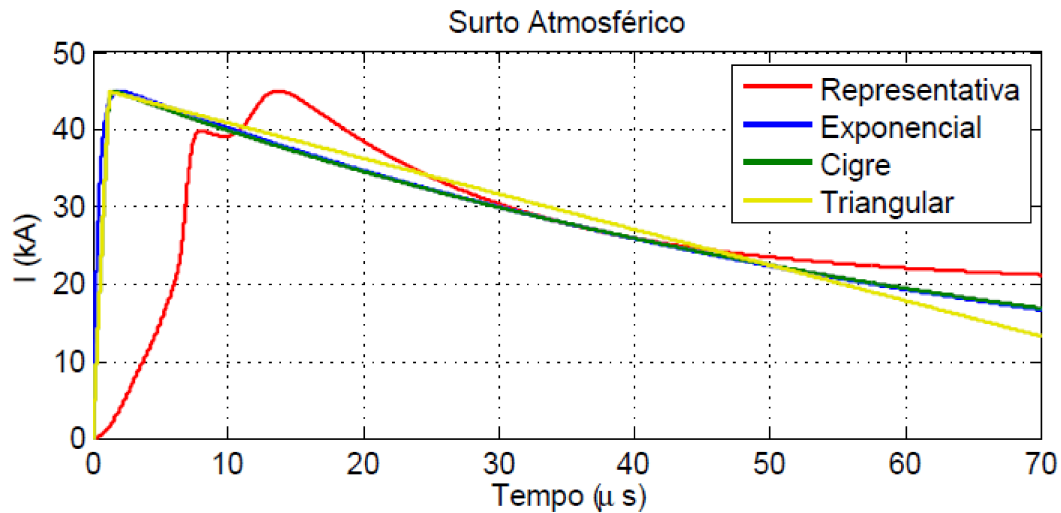


Figura 4.2: Forma de onda da corrente: representativa, dupla exponencial, CIGRÉ e triangular.

alguns trabalhos fazem uso de parâmetros constantes para um determinado valor de frequência (Assis et al., 2012).

O *software* desenvolvido no contexto do P&D mencionado baseado no trabalho de (Castro, 2016) apresenta duas opções: modelo JMarti que considera a variação na frequência e o método Bergeron que assume parâmetros elétricos da linha constantes. Nesta dissertação somente o modelo JMarti é utilizado. Ainda em relação ao cálculo dos parâmetros, entre os dados necessários para a realização dessas estimativas se destacam:

- Número de fases;
- Raio interno, externo e resistência dos condutores;
- Distância horizontal e altura dos condutores;
- Comprimento do vão;
- Resistividade do solo.

Em relação ao número de vãos, a literatura indica que dois vãos adjacentes à torre atingida pela descarga atmosférica - cinco torres no total - podem ser suficientes para representar o problema de forma convincente quando se consideram somente as descargas que incidem diretamente na torre (Banjanin & Savić, 2016). Contudo, por cautela, o modelo considerado nesta dissertação faz uso de 3 vãos adjacentes.

Vale destacar que, as simulações realizadas no ATP são sempre formadas por sete torres. Com exceção das extremidades, o trecho sempre considera três vãos em cada

lado, além da torre atingida pela descarga atmosférica. Com o objetivo de auxiliar a compreensão, a Tabela 4.2 apresenta as torres consideradas em cada trecho simulado no ATP para uma linha genérica com 30 torres.

Tabela 4.2: Trechos de linha utilizados na simulação de uma LT genérica com 30 estruturas. Por fins ilustrativos, apenas alguns trechos são exibidos.

Torre Atingida pela Descarga Atmosférica	Torres Consideradas no ATP
1	[1, 7]
3	[1, 7]
15	[12, 18]
18	[15, 21]
30	[24, 30]

### 4.1.3 Torres

Em relação às torres, dada à grande diversidade de estruturas e formas existentes, a modelagem delas é realizada de forma simplificada. O modelo utilizado representa a torre por dois trechos de linha de transmissão vertical ligados em série (Rodrigues et al., 2014a). Em que, o comprimento da parte inferior é dado pela distância entre o condutor mais baixo e o solo. O trecho superior, por sua vez, é determinado pela distância entre o condutor mais baixo e o cabo para-raios. Em cada um dos trechos é assumido: i) velocidade igual a 85% da velocidade da luz e ii) impedância de surto igual a  $200 \Omega$ . A Figura 4.3 exibe alguns exemplos dessa simplificação adotada.

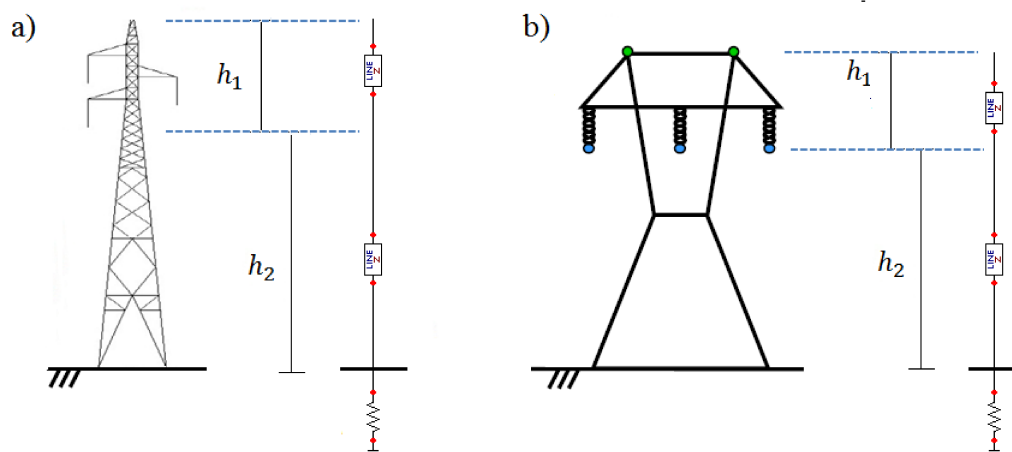


Figura 4.3: Representação das torres por dois trechos de linha de transmissão vertical ligados em série. Figura retirada de (Castro, 2016).

#### 4.1.4 Para-raios

Os para-raios são modelados por elementos não-lineares dada a sua curva  $V \times I$  (Figura 4.4). Esse modelo além de ser facilmente implementado possui bons resultados na literatura (Meister, 2005). Dada as simplificações assumidas no processo de modelagem das torres (Figura 4.3), o ponto de conexão dos para-raios nas torres é considerado igual à altura do condutor mais baixo (como representado na Figura 4.1).

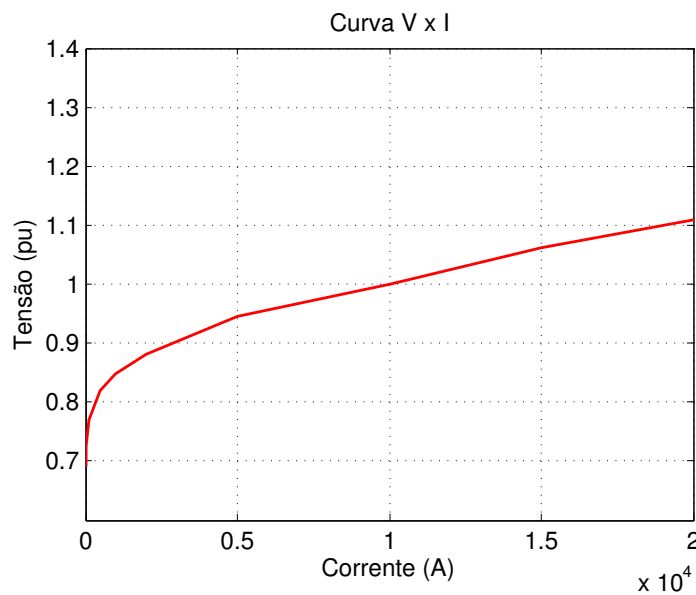


Figura 4.4: Curva  $V \times I$  do para-raios. Figura retirada de (Castro, 2016).

#### 4.1.5 Aterramento

O aterramento das estruturas influencia de forma significativa o desempenho das linhas de transmissão, estando a sua impedância diretamente relacionada aos coeficientes de reflexão das ondas que se propagam ao longo da torre. Em função disso, uma representação adequada da resposta do aterramento frente às sobretensões atmosféricas é de grande importância para uma boa estimativa do desempenho das LTs.

Diante dessa importância, diferentes formas de modelagem podem ser encontradas na literatura. Em algumas, o sistema de aterramento é considerado um elemento resistivo não linear que depende do efeito de ionização do solo (Weck, 1985; Martinez & Castro-Aranda, 2009; Gatta et al., 2012; Morales et al., 2014). O efeito de ionização do solo pode ocorrer quando correntes muito intensas fluem através do aterramento.

Basicamente, com o fluxo de correntes intensas pelo aterramento, a densidade de corrente na região próxima ao eletrodo produz um campo elétrico que pode exceder

um limiar crítico e, em consequência disso, ocorrer a formação de canais de descargas elétricas nas proximidades dos eletrodos. Esses canais, por sua vez, favorecem o escoamento da corrente para o solo. Mais detalhes sobre esse efeito podem ser encontrados em (Visacro, 2005b).

Uma estratégia usual para adicionar o efeito de ionização do solo em modelos computacionais é a modelagem da impedância de aterramento por uma resistência não linear. Entre os métodos para se estimar essa não linearidade é o uso das expressões sugeridas pelo CIGRÉ (CIGRE et al., 1991):

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_t}{I_i}}} \quad (4.1)$$

$$I_i = \frac{E_c \rho}{2\pi R_0^2} \quad (4.2)$$

Em que:

- $R_i$ : Resistência de aterramento da torre com a consideração do efeito de ionização do solo;
- $R_0$ : Resistência de aterramento da torre em baixa frequência;
- $I_t$ : Corrente da descarga atmosférica que flui pela resistência de aterramento;
- $I_i$ : Valor da corrente de início da ionização do solo;
- $E_c$ : Gradiente de ionização do solo. Considerado igual a 400 kV/m;
- $\rho$ : Resistividade do solo.

## 4.2 Resumo da Modelagem Empregada

A Tabela 4.3 exibe um resumo das configurações empregadas neste trabalho. Esse conjunto de configurações é utilizado no ATP para o cálculo do desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas.



Tabela 4.3: Configurações utilizadas nesta dissertação.

Configurações
<p><b>Forma de onda da corrente de retorno:</b> representativa</p> <p><b>Modelo de linha:</b> modelo JMarti</p> <p><b>Quantidade de vãos:</b> 3 vãos adjacentes à torre em que a descarga incide</p> <p><b>Torre:</b> representada por 2 trechos de linha de transmissão vertical</p> <p><b>Aterramento:</b> resistência não-linear com inclusão do efeito de ionização do solo</p>

### 4.3 Desempenho de Linhas de Transmissão

O desempenho das LTs é determinado neste trabalho por meio do número de descargas atmosféricas que incidem na linha e da probabilidade de ocorrer uma descarga capaz de provocar uma interrupção na cadeia de isoladores. Questões relacionadas à falha de blindagem não são consideradas, sendo o desempenho estimado através da soma dos desligamentos decorrentes do fenômeno de *backflashover* na torre atingida pela descarga atmosférica (BFOR, do inglês *Backflashover Outage Rate*) e *flashover* nas torres adjacentes à torre atingida (AFOR, do inglês *Adjacent Flashover Outage Rate*).

#### 4.3.1 Número de Descargas Atmosféricas

Em relação ao local de incidência, cerca de 60% das descargas atingem as torres, enquanto as demais, incidem ao longo dos vãos (CIGRE et al., 1991). Este trabalho adota a proposição de levar em consideração apenas o número de desligamentos consequentes da incidência de descargas nas torres. Isso porque, o número de rupturas que ocorrem a meio de vão é muito menor do que aquelas que acontecem na torre. Como consequência da simplificação mencionada, aplica-se um fator de correção no resultado para considerar o efeito das descargas que incidem ao longo do vão. O valor sugerido para esse fator é 0,6 (CIGRE et al., 1991).

O número de descargas atmosféricas que incidem sobre a linha por 100 km por ano,  $N_L$ , é estimado com base em (CIGRE et al., 1991). Esse número é calculado de acordo com a Equação 4.3. Na qual,  $N_g$  representa a densidade de descargas atmosféricas (raios/ $km^2$ /ano),  $H_t$  a altura da linha de transmissão ( $m$ ) e  $d_{pr}$  a distância entre os cabos para-raios ( $m$ ). Caso a LT possua apenas um cabo para-raios o valor de  $d_{pr}$  é nulo.

$$N_L = \frac{N_g}{10} \left[ 2 \left( 14 H_t^{0,6} \right) + d_{pr} \right] \quad (4.3)$$

### 4.3.2 Probabilidade Acumulada

A suportabilidade da cadeia de isoladores, por sua vez, é avaliada por meio da curva tensão x tempo dada pela Equação 4.4 (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 ruptura ( $\mu s$ ).

$$V_d = 400L + \frac{710L}{t^{0,75}} \quad (4.4)$$

Com base nessa expressão, defini-se se haverá ou não ruptura do isolamento baseado nos valores de tensão em um determinado instante de tempo. Neste trabalho, considera-se que ocorrerá ruptura do isolamento caso o nível de tensão ultrapasse o limiar especificado pela curva  $V \times t$  (Equação 4.4).

Através da curva  $V \times t$  e da sobretensão resultante na cadeia de isoladores ( $V_{sn}$ , calculada pelo ATP), a corrente crítica ( $I_{cc}$ ) capaz de produzir uma ruptura na cadeia pode ser calculada por:

$$I_{cc} = \frac{V_d}{V_{sn}} \quad (4.5)$$

Em seguida, utiliza-se a Equação 4.6 para ponderar a probabilidade de se ter uma corrente de descarga cuja amplitude ultrapasse  $I_{cc}$  (kA).

$$P(I_{cc}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{cc}}{45}\right)^{3,9}} \quad (4.6)$$

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 (CIGRE et al., 1991). Por esse motivo, usa-se a Equação (4.6) (Alipio et al., 2017), uma vez que tanto a Estação do Morro do Cachimbo, quanto as linhas consideradas neste trabalho estão localizadas no Brasil e possuem latitudes próximas.

### 4.3.3 Cálculo da Taxa de Desligamentos

De posse da estimativa 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:

$$BFOR = 0,6 N_L P(I_{cc}) \quad (4.7)$$

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

O uso da Equação (4.7) assume que alguns parâmetros da linha, como a altura e a impedância de aterramento de cada estrutura são constantes. Contudo, em LTs reais essa premissa nem sempre é verdadeira. Em razão disso, 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.

Além disso, a modelagem também considera o efeito de transferência de sobretensão devido à operação dos para-raios. Por esse motivo, o desempenho da linha de transmissão é calculado pela Equação 4.8, proposta em (Castro et al., 2022) da seguinte forma:

$$LFOR = \frac{\sum_{i=1}^n [(1 - \alpha_i) BFOR_i + \alpha_i AFOR_{ij}] L_i}{L} \quad (4.8)$$

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 de sobretensão para a torre  $j$ , a qual é adjacente a  $i$ ;

- $\alpha_i$  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,  $\alpha_i$  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.

## 4.4 Conclusão

Este capítulo exibiu os principais aspectos do módulo que realiza a estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Esse módulo utiliza o ATP para simular um modelo computacional composto pelos seguintes elementos: descarga atmosférica, vãos de linha, torres, para-raios e sistema de aterramento. Cada um dos elementos que compõe o modelo computacional foi detalhado. Por fim, apresentaram-se os cálculos empregados na estimativa da taxa de desligamentos causados pelo fenômeno de *backflashover*.



## Resultados: Estudo de uma Linha de Transmissão Real de 230 kV

Este capítulo realiza um estudo da aplicação da metodologia descrita para o posicionamento ótimo de para-raios em uma linha de transmissão de 230 kV. A linha de transmissão utilizada nesse estudo está sob concessão da Alupar Investimento S.A. e está localizada na região Centro-Oeste do Brasil.

Nesse estudo, inicialmente são descritas as principais características dessa LT. Em seguida, simula-se o efeito da instalação de para-raios em uma das torres. Posteriormente, realiza-se uma comparação do desempenho calculado para a LT pela abordagem apresentada com um histórico de operação da concessionária e uma estimativa fornecida pelo *software* IEEE Flash. Por fim, aplica-se a metodologia para o posicionamento ótimo de para-raios na LT em análise.

### 5.1 Dados Utilizados

Como mencionado a LT estudada neste capítulo se encontra localizada na região Centro-Oeste do Brasil e tem uma extensão de cerca de 100 km. Essa LT possui classe de tensão igual a 230 kV e é formada por um circuito trifásico e protegida por dois cabos para-raios. Além disso, vale ressaltar que a LT em questão possui 231 torres e tem dispositivos para-raios instalados nas torres localizadas em suas extremidades - torres de índices 1 e 231 - como método de proteção contra descargas atmosféricas. A Tabela 5.1 exibe as características gerais da LT em análise.

A Figura 5.1 apresenta o número de estruturas por faixa de altura da LT. Analisando essa imagem é possível notar que 16 estruturas possuem altura acima de 40 metros, isso é um indicativo que essas estruturas podem ser pontos preferenciais para a incidência de descargas atmosféricas.

A Figura 5.2, no que lhe diz respeito, apresenta o número de estruturas por faixa de comprimento dos vãos. Dentre as estruturas, cinco apresentam o comprimento do vão

Tabela 5.1: Características gerais da linha de transmissão 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)	2,19

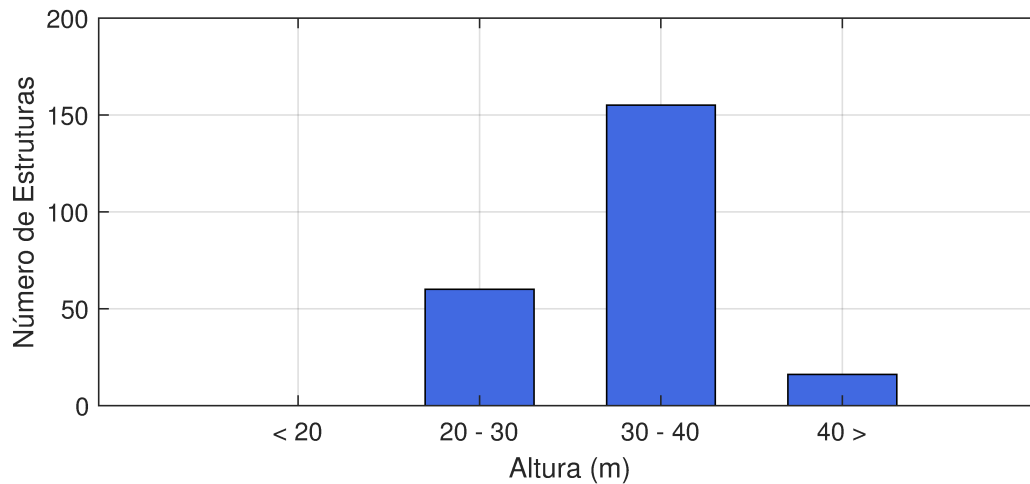


Figura 5.1: Número de estruturas por faixa de altura da LT de 230 kV em estudo.

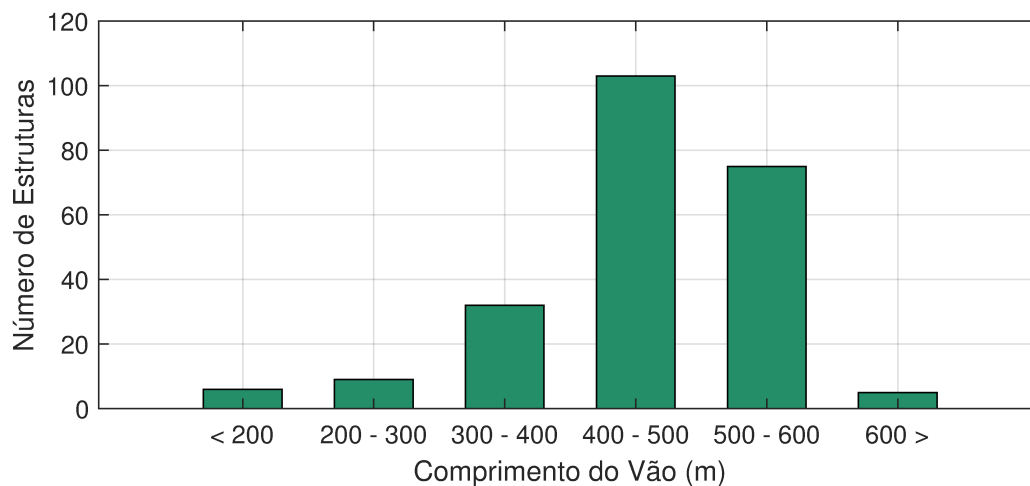


Figura 5.2: Número de estruturas por faixa de comprimento do vão da LT de 230 kV em análise.

superior a 600 metros. Assim como no perfil de altura, ressalta-se que tais estruturas necessitam de uma atenção especial, uma vez que quanto maior é o comprimento do vão, maior é a probabilidade de que descargas incidam nesse ponto da linha.

A Figura 5.3, por sua vez, exibe o número de estruturas por faixa de resistência de aterramento. É possível observar que uma grande quantidade de torres - cerca de

140 - apresentam resistência superior a 20  $\Omega$ . Dentre essas torres, quase 60 apresentam uma resistência de aterramento superior a 40  $\Omega$ . Como evidenciado em (Rahman et al., 2011) a resistência de aterramento é um dos parâmetros de maior influência no número de desligamentos consequentes ao fenômeno de *backflashover*.

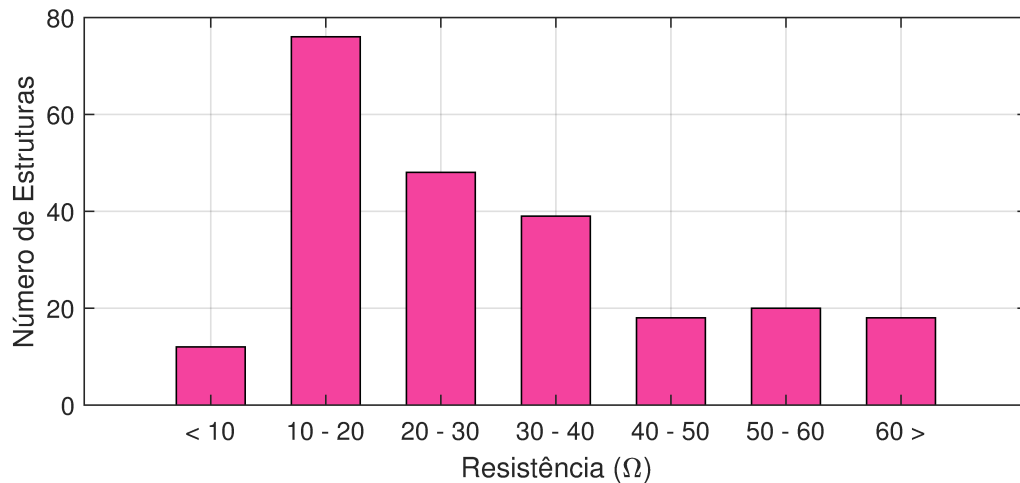


Figura 5.3: Número de estruturas por faixa de resistência de aterramento da LT de 230 kV estudada.

Na Figura 5.4, mostra-se o número de estruturas por faixa de resistividade do solo. É possível observar um valor elevado de resistividade para um número significativo de estruturas. Cerca de 35 estruturas estão localizadas em solos com resistividade acima de 5000  $\Omega \cdot m$ .

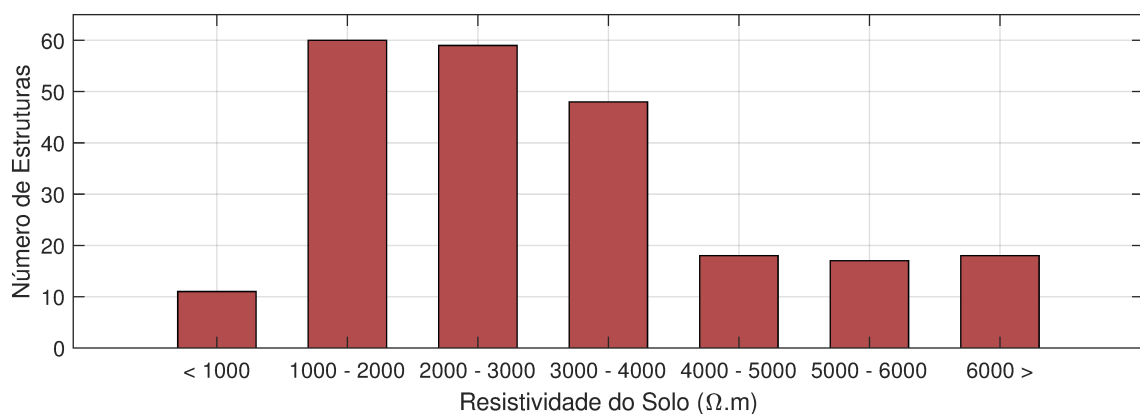


Figura 5.4: Número de estruturas por faixa de resistividade do solo da LT de 230 kV analisada.

Em relação à densidade de descargas atmosféricas na LT, é possível observar que a maioria das estruturas estão localizadas em regiões com densidade superior a 8 descargas /  $km^2$  / ano (vide Figura 5.5). Quanto maior a densidade de descargas atmosféricas, maior o número de descargas que incidem na LT.



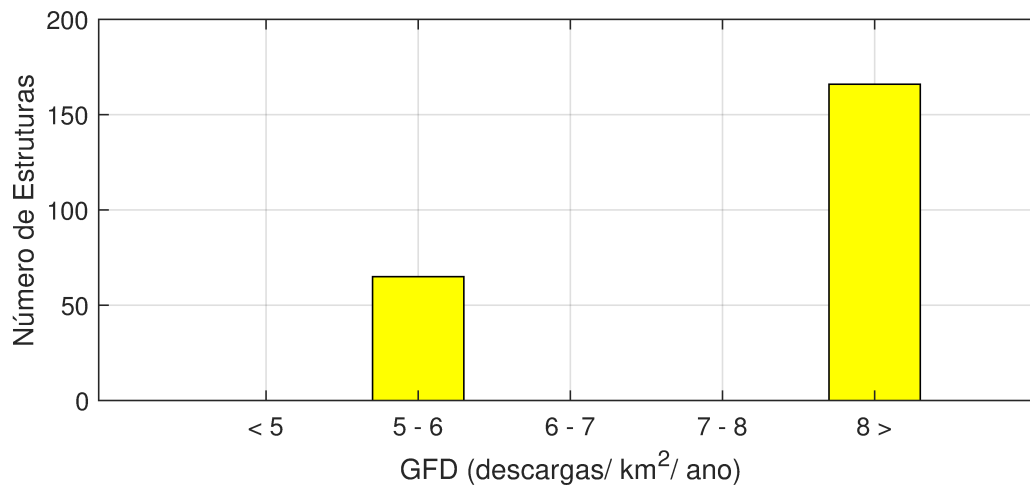


Figura 5.5: Número de estruturas por faixa de densidade de descargas da LT de 230 kV em questão.

O limite adotado para o número de desligamentos em LTs com classe de tensão de 230 kV é de 2,0 desligamentos / 100 km / ano (conforme especificado na Tabela 2.1). Esse limite é utilizado como restrição no módulo de otimização (vide Equação 3.2).

## 5.2 Sobretensão na Cadeia de Isoladores

As sobretensões resultantes da incidência de descarga atmosférica são de grande importância na estimativa do desempenho de LTs em estudos computacionais. Como mencionado, a instalação de dispositivos para-raios é uma das principais alternativas para melhorar o desempenho de LTs mitigando os efeitos das descargas atmosféricas. Em função disso, detalham-se as sobretensões consequentes à incidência de uma descarga em uma das torres da LT em estudo. O estudo realizado visa explicitar o impacto da instalação de para-raios, bem como ilustrar a importância da consideração do fenômeno de transferência de sobretensão para as torres adjacentes devido à operação de para-raios na modelagem.

Para analisar o impacto da instalação de para-raios é usado como exemplo a incidência de descarga atmosférica na estrutura de índice 151 da LT em análise. A Tabela 5.2 exhibe algumas das principais características dessa estrutura. Enquanto a Tabela 5.3 mostra as principais características de uma estrutura adjacente à torre de índice 151 (torre de índices 152). A Figura 5.6, por seu lado, expõe a silhueta do tipo mais comum de torre da LT em análise. Vale salientar que, as torres 151 e 152 apresentam essa silhueta.

Tabela 5.2: Principais características da torre de índice 151 da LT de 230 kV em análise.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	68,93
$N_g$ (raios/ $km^2$ /ano)	8,38
Comprimento do vão posterior ( $m$ )	492,00
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	2,19
Altura da torre ( $m$ )	39,80
Altura do cabo para-raios ( $m$ )	39,80
Altura da fase A ( $m$ )	33,20
Altura da fase B ( $m$ )	33,20
Altura da fase C ( $m$ )	37,00

Tabela 5.3: Principais características da torre de índice 152 da LT de 230 kV em estudo.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	11,16
$N_g$ (raios/ $km^2$ /ano)	8,38
Comprimento do vão posterior ( $m$ )	516,00
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	2,19
Altura da torre ( $m$ )	44,30
Altura do cabo para-raios ( $m$ )	44,30
Altura da fase A ( $m$ )	34,70
Altura da fase B ( $m$ )	34,70
Altura da fase C ( $m$ )	40,15

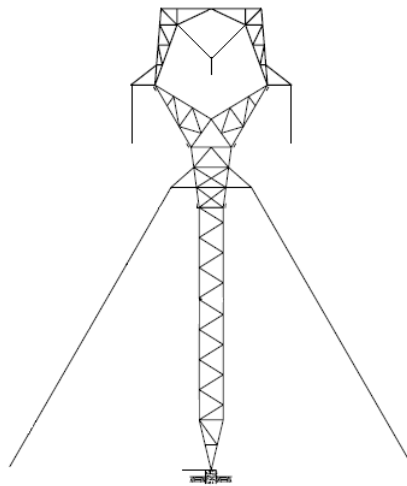


Figura 5.6: Silhueta do tipo mais comum de torre da linha de transmissão examinada.

O efeito de transferência de sobretensão para as torres adjacentes à torre atingida por descarga atmosférica devido a atuação de para-raios é minuciosamente estudado em (Visacro et al., 2020). Os resultados desse estudo indicam que o risco de um *flashover* em uma torre adjacente desprotegida devido à operação de para-raios na torre atingida é significativo quando todas as fases da torre atingida estão protegidas, sobretudo quando a impedância de aterramento da torre protegida é alta e a da torre adjacente é baixa.

A seleção das torres estudadas se dá em função da inserção dessas torres no contexto mais crítico do efeito mencionado, com a torre atingida por descarga atmosférica (estrutura de número 151) possuindo um valor elevado de resistência de aterramento ( $68,93 \Omega$ ) e a torre adjacente (estrutura de número 152) possuindo um valor de resistência de aterramento baixo ( $11,16 \Omega$ ). Esse cenário se repete algumas vezes na LT estudada.

De início é realizada uma simulação com uma abordagem que desconsidera o efeito de transferência de sobretensão em função da operação de dispositivos para-raios. Em seguida, efetua-se uma simulação com uma abordagem que leva em conta o efeito de transferência de sobretensão. Vale destacar que esses experimentos computacionais fazem uso da modelagem resumida na Tabela 4.3.

### 5.2.1 Desconsideração do Efeito de Transferência de Sobretensão

A primeira simulação realizada não considera o efeito de transferência de sobretensão devido à atuação de dispositivos para-raios. De início, utiliza-se uma configuração de para-raios semelhante à configuração original da LT para o trecho formado pela torre atingida por descarga atmosférica (estrutura de índice 151) e três vãos adjacentes

(estruturas de índices 148 - 150 e 152 - 154). Vale destacar que a configuração original da LT nesse trecho não apresenta para-raios em nenhuma dessas estruturas.

Essa configuração sem para-raios é simulada no ATP com uma amplitude de corrente de retorno igual a 45 kA. A Figura 5.7 exibe as sobretensões impostas sobre a cadeia de isoladores da estrutura de índice 151. Analisando a Figura 5.7 é possível observar que em nenhum instante de tempo as sobretensões decorrentes do surto atmosférico tocam a curva  $V \times t$  (em vermelho).

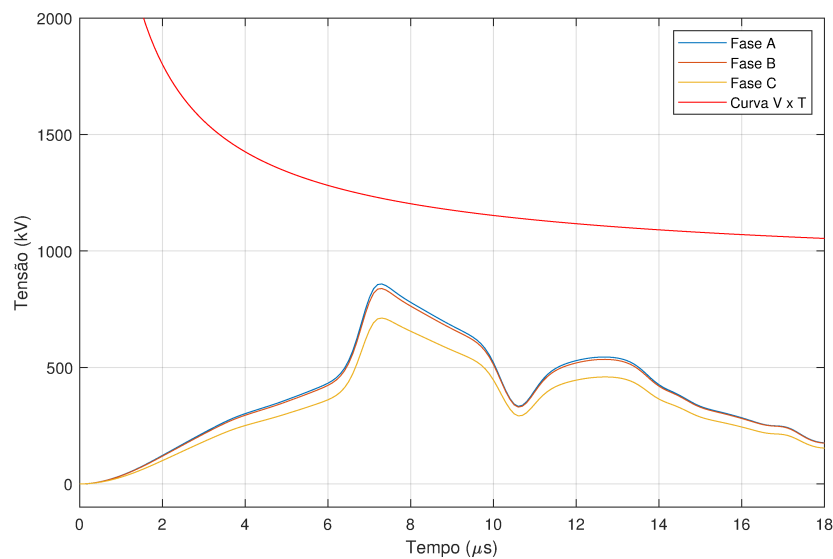


Figura 5.7: Sobretensões impelidas na cadeia de isoladores da torre de índice 151. Amplitude da corrente de retorno igual a 45 kA.

Este trabalho assume que caso as sobretensões interceptem a curva  $V \times t$  ocorrerá uma disrupção na cadeia de isoladores. Dessa maneira é possível concluir que uma corrente de retorno igual a 45 kA não é suficiente para provocar uma disrupção do isolamento dessa torre. Contudo, com base nos valores de sobretensão calculados pelo ATP e as equações (4.4) e (4.5), é possível obter uma estimativa do valor de corrente que irá provocar uma disrupção, valor esse denominado de corrente crítica.

Para a torre em análise, os valores de corrente crítica são respectivamente: 64,34, 65,83 e 77,55 kA para as fases A, B e C. Todavia, pode-se considerar o menor dentre esses valores como o valor de corrente crítica, tendo em vista que a partir dele, qualquer descarga pode provocar a disrupção da cadeia de isoladores em consequência ao fenômeno de *backflashover*. Vale destacar que, com base na Equação 4.6, a probabilidade de uma descarga atmosférica possuir um valor de pico superior a 64,34 kA é de cerca de 20%.

Como mencionado, uma das principais alternativas para aumentar o nível de proteção de LTs contra os efeitos da incidência de descargas atmosféricas é a instalação de

dispositivos para-raios. Com fins ilustrativos, a Figura 5.8 mostra as sobretensões para uma descarga atmosférica com amplitude de 70,00 kA antes (curvas tracejadas) e após a instalação de para-raios nas 3 fases da torre de índice 151.

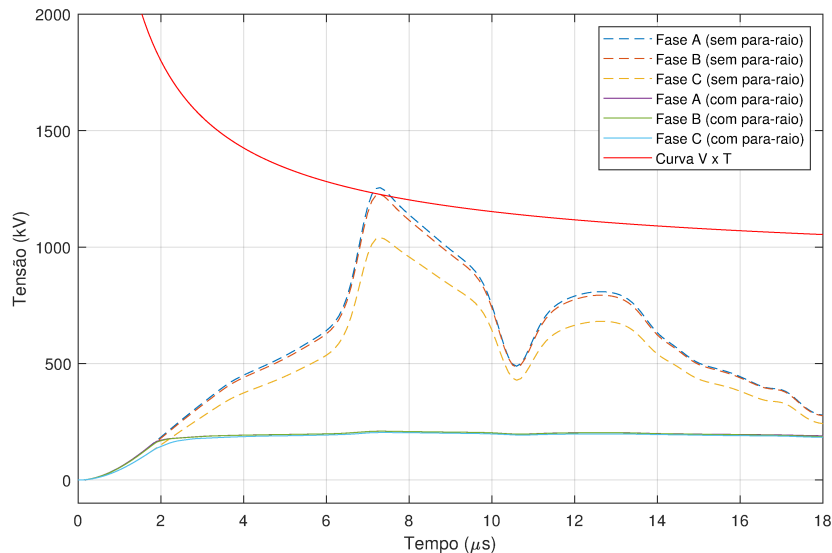


Figura 5.8: Sobretensões na cadeia de isoladores da torre de índice 151 antes (curvas tracejadas) e após a instalação de para-raios nas 3 fases dessa torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 70 kA.

Observando a Figura 5.8, é possível notar que sem a instalação de para-raios as fases A e B interceptam a curva  $V \times t$ . É interessante atentar que as fases A e B estão posicionadas a uma altura de 33,20 m em relação ao solo, enquanto a fase C está posicionada a uma altura de 37,00 m. Em LTs que dispõe de cabo guarda, geralmente os condutores mais baixos apresentam um pior fator de acoplamento com o cabo guarda, o que usualmente resulta em um maior estresse sobre esses condutores. Um maior detalhamento sobre o fator de acoplamento pode ser encontrado em (Bakar et al., 2013).

As curvas contínuas da Figura 5.8 evidenciam que a instalação de para-raios pode reduzir de forma significativa a sobretensão nos isoladores. Nesse novo cenário, o valor da corrente crítica se torna consideravelmente maior após a instalação de para-raios nas 3 fases da estrutura de índice 151. O novo valor de corrente crítica estimado para a torre de número 151 é de aproximadamente 369,20 kA. Pela equação 4.6 a probabilidade de uma descarga possuir um valor de pico com amplitude superior a 369,20 kA é inferior a 0,1%. Esses resultados indicam um aumento expressivo do nível de proteção da torre atingida pela descarga atmosférica após a instalação de para-raios nas 3 fases.

### 5.2.2 Inclusão do Efeito de Transferência de Sobretensão

Os valores estimados para a corrente crítica podem divergir significativamente quando se considera o efeito de transferência de sobretensão para as torres adjacentes. Como detalhado em (Visacro et al., 2020), apesar da instalação de para-raios melhorar o desempenho da estrutura atingida pela descarga atmosférica, a sua operação pode piorar o desempenho das torres adjacentes quando todas as fases da torre atingida possuem para-raios.

O efeito de transferência de surto é notável quando a torre atingida apresenta um valor elevado de resistência de aterramento e ao menos uma das estruturas adjacentes apresenta um valor baixo de resistência de aterramento. Esse cenário é analisado em um segundo experimento computacional que busca esclarecer a importância da consideração do efeito de transferência de sobretensão em função da operação de dispositivos para-raios.

De início, considera-se o mesmo trecho avaliado na Subseção 5.2.1 com uma configuração sem dispositivos para-raios. Em seguida, simula-se essa configuração no ATP com uma amplitude de corrente de retorno igual a 70 kA. As sobretensões impostas sobre os isoladores da estrutura atingida pela descarga atmosférica (torre de índice 151) e da estrutura adjacente à torre atingida (torre de índice 152) são mostradas na Figura 5.9.

Analisando a Figura 5.9, é possível constatar que apenas uma pequena parcela da sobretensão decorrente da descarga atmosférica é transferida para a torre adjacente. De uma forma geral, a probabilidade de ruptura do isolamento na estrutura atingida é consideravelmente maior do que nas torres adjacentes quando a estrutura atingida não possui para-raios (Visacro et al., 2020). Essa constatação se repete quando a torre atingida está parcialmente protegida por para-raios (nem todas as fases possuem para-raios). Em outras palavras, o efeito de transferência de surto influi significativamente no problema apenas quando todas as fases da torre atingida estão protegidas.

Buscando exemplificar o impacto do efeito de transferência de surto no problema de posicionamento de para-raios em LTs, a Figura 5.10 expõe o aumento significativo dos valores de sobretensão na torre adjacente após a adição de para-raios para uma corrente de retorno com amplitude de 120 kA. Nessa simulação, adicionaram-se para-raios nas 3 fases da estrutura atingida (torre de índice 151).

Os dispositivos para-raios “grampeiam” os valores de sobretensão nos isoladores da torre atingida. Contudo, mesmo com a operação dos para-raios, valores elevados de tensão são desenvolvidos no topo da torre atingida em função do aumento significativo

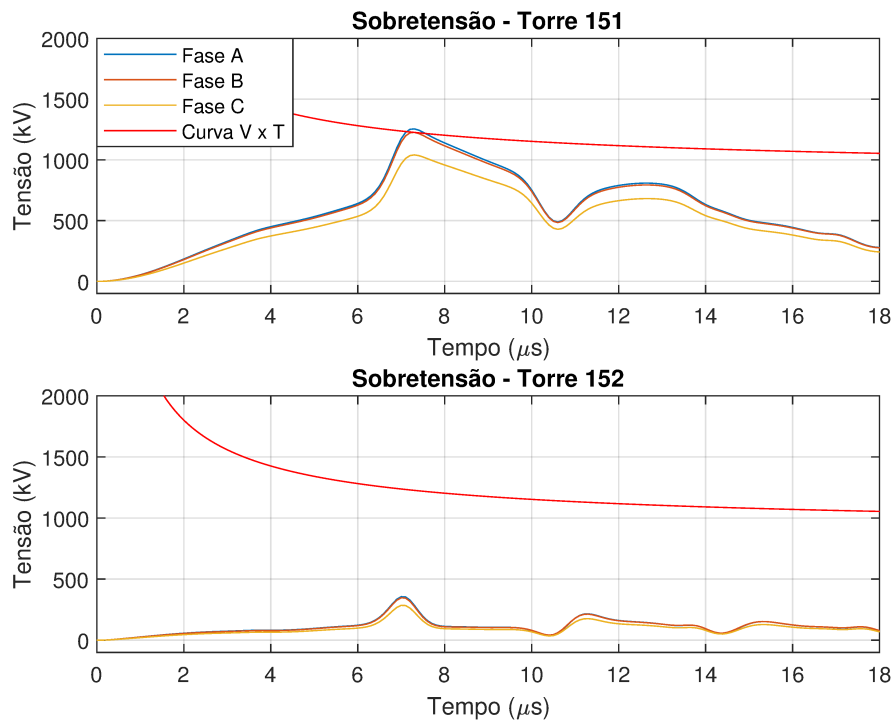


Figura 5.9: Sobretensões nos isoladores das torres de índices 151 e 152 sem a adição de para-raios. Amplitude da corrente de retorno igual a 70 kA.

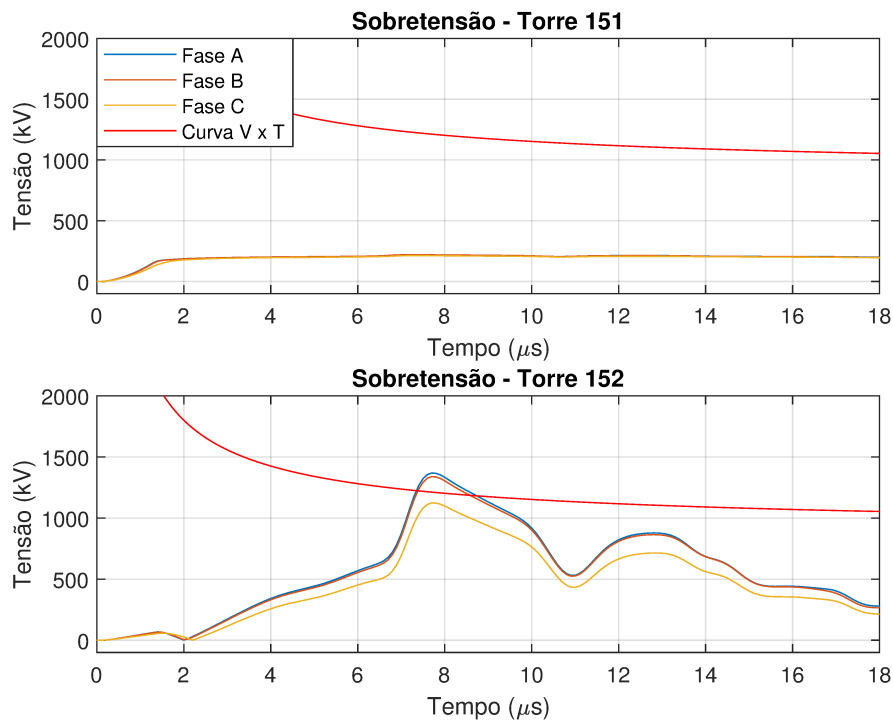


Figura 5.10: Sobretensões nos isoladores das torres de índices 151 e 152 após adição de para-raios nas 3 fases da estrutura de número 151. Amplitude da corrente de retorno igual a 120 kA.

do potencial no pé da torre, como também do aumento do potencial ao longo da torre causado pelo fluxo de corrente da descarga em direção ao solo (Visacro et al., 2020).

Em função da operação dos para-raios, uma tensão elevada consequente ao surto é transferida pelos cabos condutores ao lado energizado dos isoladores das torres adjacentes. Além disso, uma pequena parcela da corrente de retorno é transferida às torres adjacentes pelo(s) cabo(s) guarda(s). Como resultado da operação dos para-raios, há o estabelecimento de uma sobretensão nas fases desprotegidas das torres adjacentes.

Um cenário crítico para esse efeito se dá quando a impedância de pé de torre da estrutura atingida é alta e a da estrutura adjacente é baixa, nesse caso a sobretensão sobre o isolador pode ser tão alta a ponto de ocorrer um *flashover* na torre adjacente. Em virtude do efeito de transferência de surto, o valor de corrente crítica para a torre atingida (estrutura de índice 151) foi calculado considerando os valores de sobretensão das estruturas adjacentes estimados pelo ATP e as equações (4.4) e (4.5). O novo valor de corrente crítica estimado para a torre de número 151 é de aproximadamente 106,28 kA.

O valor de corrente crítica calculado considerando o efeito de transferência é notavelmente inferior ao valor obtido na abordagem que desconsidera tal efeito. Com base na Equação (4.6), cerca de 3,38% das descargas atmosféricas possuem um valor de pico superior a 106,28 kA. Esse resultado mostra a importância da consideração dos valores de sobretensão das torres adjacentes quando a torre atingida possui impedância de pé de torre alta e as torres adjacentes possuem valores baixos.

Uma solução para mitigar o efeito de transferência de surto é a instalação de para-raios na torre atingida e nas torres adjacentes. A Figura 5.11 comprova a redução dos valores de sobretensão nos isoladores com a instalação de para-raios adicionais nas torres adjacentes. O novo valor de corrente crítica estimado para a torre de número 151 é de aproximadamente 541,06 kA. A probabilidade de uma descarga possuir um valor de pico com amplitude superior a 541,06 kA é inferior a 0,1%.

De uma forma geral, os resultados apresentados mostram que a instalação de para-raios pode melhorar significativamente o desempenho de linhas de transmissão. Entretanto, é importante identificar quais estruturas carecem mais desses dispositivos de proteção para que a solução seja economicamente exequível.

### 5.3 Cálculo da Taxa de Desligamentos

Um procedimento similar ao detalhado na Seção 5.2 é utilizado para estimar os valores de corrente crítica para cada uma das torres presentes na linha de transmissão



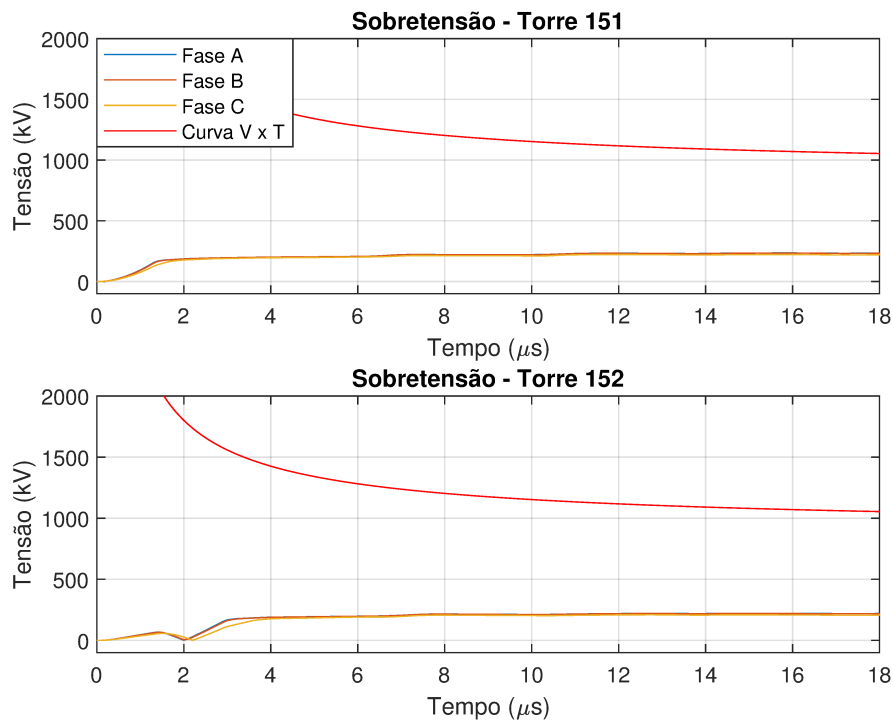


Figura 5.11: Sobretensões nos isoladores das torres de índices 151 e 152 após adição de para-raios nas 3 fases das estruturas de número 150, 151 e 152. Amplitude da corrente de retorno igual a 120 kA.

em estudo. A Figura 5.12 exibe os valores estimados de corrente crítica para cada uma das fases da LT em análise. Vale enfatizar que as fases 1, 2 e 3 correspondem respectivamente as fases A, B e C da primeira estrutura; as fases 4, 5 e 6 representam as fases A, B e C da segunda estrutura e assim de forma sucessiva para todas as 231 estruturas que compõem a LT examinada.

Vale ressaltar que, em um cenário em que todas as fases da estrutura atingida pela descarga estão protegidas por dispositivos para-raios, utilizam-se os valores de sobretensão das torres adjacentes para estimativa do valor de corrente crítica ( $I_{cc}$ ) da torre atingida. Esse esquema é utilizado para inclusão do efeito de transferência de surto na modelagem.

Observando a Figura 5.12, é possível visualizar uma maior proteção nas extremidades da LT em função da presença de dispositivos para-raios em todas as fases da primeira e da última estrutura. Além disso, é possível notar que no trecho entre as fases 463 e 569 ocorre uma diminuição acentuada nos valores de corrente crítica (região contornada pelo retângulo vermelho). Vale destacar que, esse trecho está associado a um aumento significativo nos valores de resistência de aterramento em relação as demais torres da LT.

Com base nos valores de corrente crítica estimados, calcula-se o desempenho da LT por meio das Equações 4.7 e 4.8. Neste caso, para a modelagem utilizada - Tabela 4.3

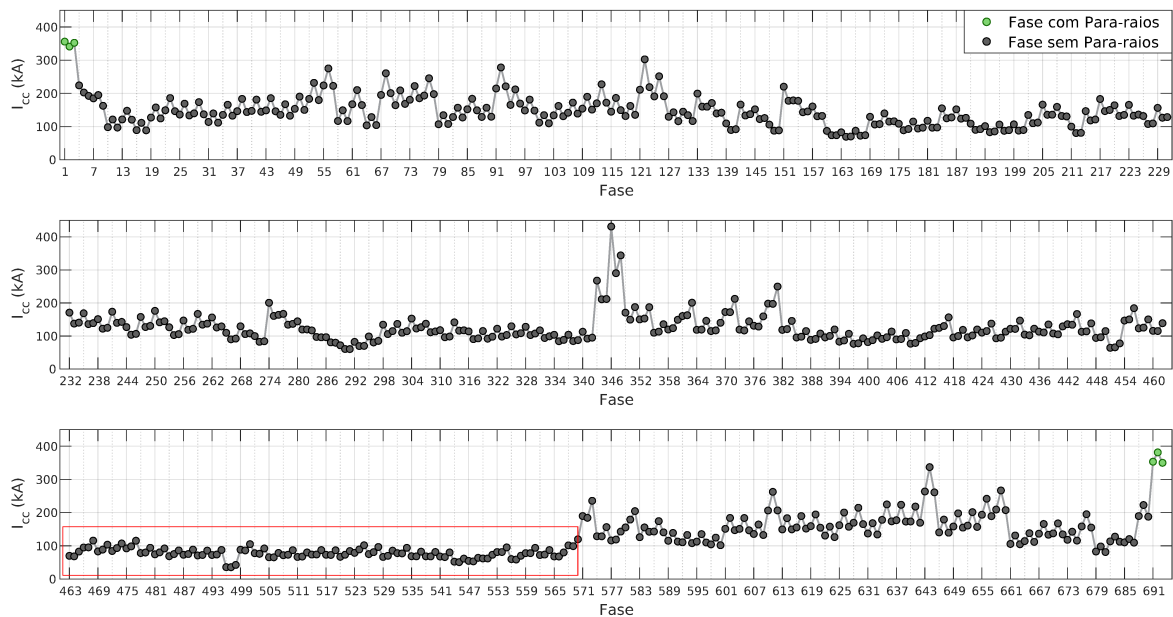


Figura 5.12: Valores estimados de corrente crítica para a configuração original da LT em estudo. O gráfico mostra os valores de corrente crítica levando em consideração as fases de cada torre na sequência ABC.

- o valor obtido é de 5,26 desligamentos / 100 km de linha / ano. Isso mostra que, a configuração original dessa LT excede o limite de 2,00 desligamentos / 100 km de linha / ano (Tabela 2.1).

Vale apontar que, a estimativa do desempenho da linha é cercada de incertezas. Entre tais incertezas, pode-se incluir, por exemplo, os valores de: i) densidade local de descargas atmosféricas; ii) resistência de aterramento e iii) resistividade do solo. Vale a pena realçar que a metodologia empregada apresenta algumas limitações. Dentre essas, talvez a principal seja a não consideração da aleatoriedade dos parâmetros da descarga atmosférica. A metodologia considerada não faz uso do método de Monte Carlo para determinar os parâmetros da descarga (como por exemplo, tempo de frente e de cauda) e a localização do ponto atingido por ela. Essa simplificação é justificada pelo elevado custo computacional envolvido.

## 5.4 Estimativa da Taxa de Desligamentos

Dados operacionais da LT de 230 kV em estudo, registrados pelo Grupo Alupar, mostram que entre os anos de 2012 e 2017, essa LT teve em média 6,20 desligamentos / 100 km / ano. Um desempenho consideravelmente acima do limite de 2,00 desligamentos / 100 km / ano (Tabela 2.1). O número de desligamentos / 100 km / ano em

cada ano do período registrado é exibido na Tabela 5.4. Devido à natureza estocástica da incidência de descargas atmosféricas em LTs, a utilização do valor médio para fins comparativos é mais adequada do que o uso de uma amostra pontual.

Tabela 5.4: Registro histórico dos desligamentos causados por descargas atmosféricas - dados provenientes das medições do Grupo Alupar.

Ano	LFOR Desligamentos/100 km/ano
2012	8,59
2013	3,82
2014	5,72
2015	7,63
2016	8,59
2017	2,86
<b>Média</b>	<b>6,20</b>

#### 5.4.1 Estimativa Utilizando o IEEE Flash

Como mencionado, duas abordagens se destacam e direcionam os estudos para a estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas: IEEE (IEEE et al., 1985) e CIGRÉ (CIGRE et al., 1991). Em essência, ambas realizam aproximações com o intuito de simplificar o problema, mas abstraindo os principais pontos. A partir daí, as formulações necessárias para estimar o desempenho da linha são desenvolvidas.

Ambas as abordagens possuem pontos em comum como o uso do valor de corrente crítica para estimar o número de desligamentos da linha. Entre as diferenças, por sua vez, pode-se destacar a disponibilização de um *software* gratuito pelo IEEE denominado *Flash*, o qual permite estimar a taxa de desligamentos de uma LT por meio dos modelos sugeridos pelo IEEE.

A primeira versão do IEEE-Flash foi disponibilizada na década de 1980 e, como já mencionado, estima o número de desligamentos da LT com base no valor da corrente crítica. Para isso, alguns parâmetros são necessários e dentre eles se destacam: i) a densidade média de descargas atmosféricas ao longo da linha; ii) o comprimento médio dos vãos; iii) a altura média das torres; iv) a geometria considerando as posições médias dos cabos ao longo da linha e v) a distribuição dos valores de resistência de aterramento das estruturas.

Para estimar o desempenho da LT em questão, a densidade média considerada foi igual a 7,43 descargas/km<sup>2</sup>/ano e o comprimento médio dos vãos igual a 455,80 m.

A altura média das torres utilizada, por sua vez, foi igual a 33,06 m. A geometria das estruturas, por seu lado, é apresentada na Tabela 5.5, enquanto a distribuição dos valores de resistência de aterramento é exibida na Tabela 5.6.

Tabela 5.5: Geometria das estruturas utilizada no programa IEEE-Flash.

<b>Cabos</b>	<b>Distância Horizontal em Relação ao Centro da Estrutura (m)</b>	<b>Distância Vertical em Relação ao Solo (m)</b>	<b>Comprimento da Cadeia de Isoladores (m)</b>
Condutor 1	+3,89	25,26	2,19
Condutor 2	-0,85	29,35	2,19
Condutor 3	-4,14	24,95	2,19
Cabo Guarda 1	+3,20	33,06	-
Cabo Guarda 2	-3,20	33,06	-

Tabela 5.6: Distribuição dos valores de resistência de aterramento utilizados no *software* IEEE-Flash.

<b>Percentual de Estruturas (%)</b>	<b>Resistência de Aterramento (<math>\Omega</math>)</b>
5,20	6,68
32,90	14,72
20,80	24,43
16,90	35,12
7,80	43,68
8,70	55,02
3,00	66,33
2,60	71,99
0,90	82,96
1,30	177,63

Definidos os parâmetros de entrada, executou-se o programa IEEE-Flash versão 2.05 para estimar o desempenho da LT analisada. O desempenho calculado foi de 8,54 desligamentos / 100 km de linha / ano. Valor este acima do desempenho estimado por meio das medições fornecida pelo Grupo Alupar (6,20 desligamentos / 100 km / ano). Para fins comparativos, a Tabela 5.7 apresenta os dados de desligamentos observados e aqueles estimados considerando a metodologia proposta e o programa IEEE Flash.

Examinando a Tabela 5.7 é possível perceber que a metodologia proposta presume um número menor de desligamentos para a LT em estudo (cerca de 84,84 % do valor obtido por meio das medições), enquanto o IEEE-Flash contabiliza um número maior de desligamentos (cerca de 37,74% superior ao valor obtido por meio das medições). Levando em consideração as incertezas envolvidas nesse processo de estimativa, pode-se afirmar que esses resultados se encontram dentro de uma margem de erro aceitável.

Tabela 5.7: Comparação de desempenho estimado considerando: i) as medições de campo; ii) a metodologia proposta e iii) o programa IEEE Flash.

<b>Metodologia</b>	<b>LFOR Desligamentos / 100 km / ano</b>
Desempenho Medido em Campo	6,20
Metodologia Proposta	5,26
Programa IEEE Flash	8,54

Ainda sobre os resultados da Tabela 5.7, nota-se uma maior concordância entre os resultados da metodologia proposta e as medições efetuadas pelo Grupo Alupar. Um fator que pode auxiliar a explicar esses resultados é o nível de detalhamento das abordagens em relação aos parâmetros utilizados para estimar o desempenho da LT. Entre esses parâmetros, inclui-se: i) a densidade local de descargas atmosféricas, ii) a resistência de aterramento, iii) a geometria das estruturas e iv) o comprimento dos vãos.

Vale destacar que, apesar de ser uma ferramenta consolidada e amplamente utilizada, o *software* IEEE-Flash não apresenta o nível de detalhamento existente na abordagem proposta. Enquanto a abordagem proposta utiliza os valores específicos de cada estrutura para estimativa do desempenho, o IEEE-Flash considera uma linha homogênea formada a partir dos valores médios dos parâmetros.

Como exemplo de limitação do IEEE-Flash, pode-se citar a representação dos valores de resistência de aterramento, reduzidos a um máximo de 10 unidades diferentes (vide Tabela 5.6). Essa simplificação cria situações em que estruturas com valores significativamente diferentes são agrupadas sob um valor médio distante dos valores individuais. Vale lembrar aqui, o impacto significativo do sistema de aterramento no desempenho de uma LT. Em função desse impacto é de grande importância uma representação mais acurada desse sistema.

Outra limitação encontrada no IEEE-Flash é a avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores em apenas dois instantes de tempo. Na abordagem usada nesta dissertação, essa avaliação é realizada por meio de uma comparação ponto a ponto da sobretensão estimada via ATP. Apesar das simplificações mencionadas, o IEEE-Flash é um bom ponto de partida para a estimativa do desempenho de LTs por possuir uma metodologia bem consolidada, outro ponto positivo desse programa é a sua simplicidade de uso.

## 5.5 Posicionamento Ótimo de Para-raios

Com a finalidade de melhorar o desempenho e, simultaneamente, buscando evitar um gasto desnecessário de recursos financeiros, aplica-se a abordagem descrita para o posicionamento ótimo de para-raios na LT de 230 kV analisada. Nesse processo de posicionamento, utilizam-se os três algoritmos descritos: GA, GVNS e híbrido. Duas possibilidades de alocação de para-raios são levadas em conta: i) por torre e ii) por fase.

Nos experimentos computacionais realizados cada um dos algoritmos é executado 30 vezes para cada uma das possibilidades de alocação (torre e fase). O tamanho da população nos algoritmos GA e híbrido é de 115 soluções (indivíduos) - parâmetro *popTam* descrito no Capítulo 3. Esse valor foi definido após uma série de testes para o ajuste do tamanho ideal da população e corresponde a 50% da quantidade de estruturas presentes na LT. Com relação ao tamanho da população do caminho 1 do algoritmo híbrido (parâmetro *M*), após a realização de ensaios foi definido que o uso de uma população com 10% da quantidade de estruturas presentes na LT (23 soluções) consegue equilibrar bem a qualidade das soluções fornecidas com o custo computacional.

Como detalhado no Capítulo 3, as operações de cruzamento e mutação são realizadas em paralelo. Em 90% dos casos é realizada a operação de cruzamento, enquanto nos 10% restantes é executada a operação de mutação. No cruzamento são definidos dois pontos de corte de forma aleatória. Em relação à mutação, utilizam-se os mecanismos de *Bit Flip* e *Swap* - vide Subseção 3.7.1 - com a mesma frequência de ocorrência e uma taxa de mutação de 5%.

A modelagem utilizada no ATP, por seu lado, é similar a detalhada na Tabela 4.3. Já a restrição do número máximo de desligamentos é considerada igual ao limite especificado na Tabela 2.1 (2,00 desligamentos / 100 km / ano). A restrição da quantidade máxima de para-raios, por sua vez, não é usada. 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.

Em relação ao critério de parada, utiliza-se um intervalo de tempo estabelecido em função do tamanho da entrada da instância avaliada (quantidade de *bits* utilizada para representar o arranjo de para-raios na LT). Vale lembrar que, uma LT trifásica circuito simples é retratada por um número três vezes maior de *bits* do que a alocação por torre. A regra adotada neste trabalho determina que o tempo em minutos deve ser 0,4 vezes a quantidade de *bits*. Seguindo essa regra é estipulado um tempo de aproximadamente 92 min para a representação por torre da LT e cerca de 277 min para a representação por fase dessa LT.

### 5.5.1 Posicionamento Ótimo por Torre

A Figura 5.13 exibe o arranjo de para-raios e os valores de corrente crítica obtidos ao final de uma das execuções do algoritmo híbrido. Esse arranjo considera o posicionamento de para-raios em 55 das 231 estruturas que compõem a LT examinada. Como a LT investigada é trifásica, é necessária a instalação de 165 para-raios para um desempenho de 1,98 desligamentos / 100 km / ano.

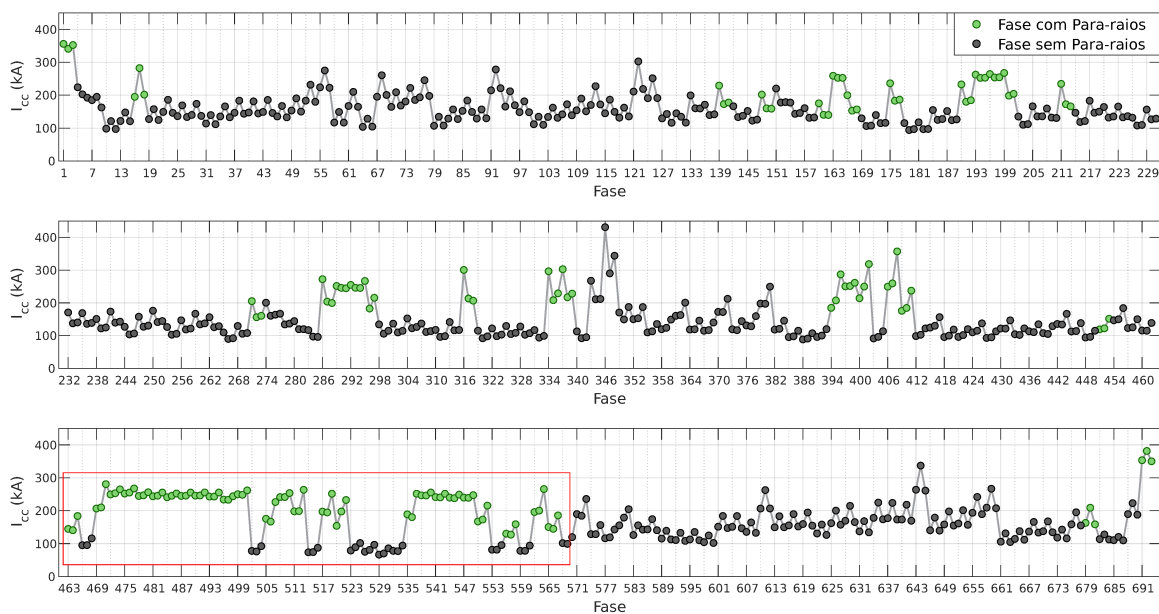


Figura 5.13: Valores estimados de corrente crítica para a solução alcançada no processo de otimização. O arranjo obtido possui um desempenho 1,98 desligamentos / 100 km / ano e faz uso de 165 para-raios.

Analisando a Figura 5.13 é possível notar que quase metade dos para-raios - 78 dispositivos - presentes nesse arranjo se encontra no trecho destacado pelo retângulo vermelho. Esse resultado pode ser justificado em função dos valores elevados de resistência de aterramento encontrados nesse trecho.

Outro ponto a ser destacado é o aumento significativo dos valores de corrente crítica ao longo da LT. Como exemplo, pode-se citar o menor valor de corrente crítica encontrado na configuração original de para-raios, o qual ocorre na estrutura de índice 166 com o valor 35,71 kA (Figura 5.12). Pela Equação 4.6, aproximadamente 71,13% das descargas atmosféricas possuem um valor de pico superior a esse valor.

Com a aplicação da otimização, o menor valor de corrente crítica obtido passa a ser 66,54 kA (torre 177). Salienta-se que, somente cerca de 17,87% das descargas atmosféricas apresentam um valor de pico maior do que esse valor. Esse resultado corrobora

com a premissa de que a instalação de para-raios pode aumentar significativamente a proteção de LTs contra descargas atmosféricas.

No que diz respeito ao custo computacional, realizou-se um experimento com o objetivo de validar os benefícios das estratégias desenvolvidas em (Castro, 2016). O experimento consistiu na comparação do desempenho do algoritmo híbrido utilizando ou não as estratégias para redução do custo computacional (uso de múltiplas *threads* e memória auxiliar). Na estratégia *MultiThread* foram utilizadas 6 *threads*, um valor que se mostrou adequado nos experimentos computacionais realizados, evitando efeitos contrários do uso de um número elevado de *threads* como o *overhead*.

O mesmo intervalo de tempo - 92 min - foi usado como critério de parada. Vale destacar que, a verificação do atendimento a condição de parada só é realizada ao final de cada iteração. A Tabela 5.8 exibe algumas das medições realizadas considerando a média de dez execuções.

Tabela 5.8: Análise das estratégias para redução do custo computacional. Média de dez execuções levando em consideração a alocação por torre. Um estudo mais detalhado é realizado em (Castro, 2016).

Estratégia	Tempo	ATP	Memória	Para-raios	Iterações
Sequencial com Memória	113 min	$2,1 \times 10^4$	$9,8 \times 10^4$	168,0	1,0
<i>MultiThread</i> sem Memória	254 min	$1,2 \times 10^5$	0,0	168,0	1,0
<i>MultiThread</i> com Memória	92 min	$2,5 \times 10^4$	$4,2 \times 10^7$	165,0	$1,6 \times 10^3$

Examinando as medições da Tabela 5.8, conclui-se que sem o uso simultâneo da memória auxiliar e de múltiplas *threads* não foi possível finalizar uma única iteração do algoritmo implementado no tempo pré-estabelecido. Contudo, nesse mesmo período de tempo em um cenário em que ambos os esquemas estavam ativos, realizaram-se em média aproximadamente 1600 iterações. Associado ao melhor uso dos recursos computacionais no tempo pré-definido, está o resultado encontrado ao final do processo de otimização. Vale destacar que, para o tempo fixado, sem o uso concomitante de ambos os esquemas auxiliares não foi produzida solução melhor do que a proposta pela heurística construtiva (168 para-raios - Figura 5.14).

A Figura 5.14, no que lhe diz respeito, mostra a evolução da qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo. Um ponto importante a ser destacado nessa imagem é o papel da heurística construtiva na geração dos arranjos iniciais, uma vez que o melhor arranjo da primeira iteração já pode ser considerado uma boa solução.

Ao analisar a Figura 5.14 é possível perceber um desempenho levemente superior para o algoritmo GVNS. Uma justificativa para esse resultado é a constatação de que o



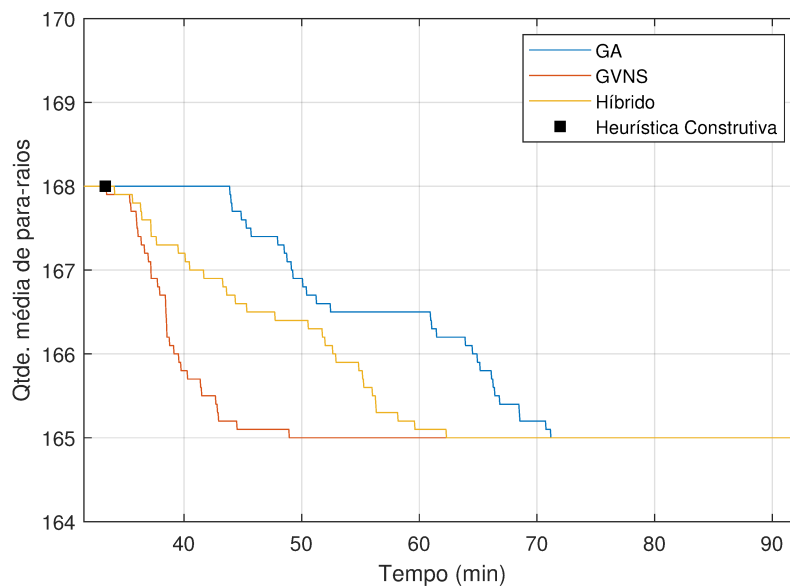


Figura 5.14: Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo considerando a alocação por torre para os algoritmos implementados.

arranjo encontrado ao final do processo de otimização em cada uma das execuções se difere pouco do arranjo produzido pela heurística construtiva. Isso é um indício de que a instância em análise - posicionamento ótimo por torre da LT de 230 kV - pode ser mais favorável a métodos que privilegiam a busca local (como o GVNS). O algoritmo híbrido, que mistura características do GA e do GVNS, obteve um desempenho intermediário.

## 5.5.2 Posicionamento Ótimo por Fase

Considerando o posicionamento por fase, repetiu-se o procedimento exibido na Subseção 5.5.1. A Figura 5.15 mostra o arranjo de para-raios e os valores de corrente crítica alcançados ao fim de uma das execuções do algoritmo híbrido. Esse arranjo indica o posicionamento de 128 para-raios na LT estudada para um desempenho de 2,00 desligamentos / 100 km / ano. Vale destacar que, caso deseje uma margem de segurança, o usuário do *software* desenvolvido pode definir um limite menor do que o estabelecido pela norma (Tabela 2.1).

Examinando a Figura 5.15, constata-se que de forma análoga ao arranjo exibido para o posicionamento por torre (Figura 5.13), grande parte dos dispositivos para-raios se localiza no trecho delimitado pelo retângulo vermelho. Vale lembrar que, várias das estruturas presentes nesse trecho se encontram entre as estruturas com maior valor de resistência de aterramento dessa LT.

Outro detalhe que pode ser percebido na Figura 5.15 é que poucas estruturas receberam para-raios nas 3 fases. Esse resultado mostra que é possível alcançar um nível

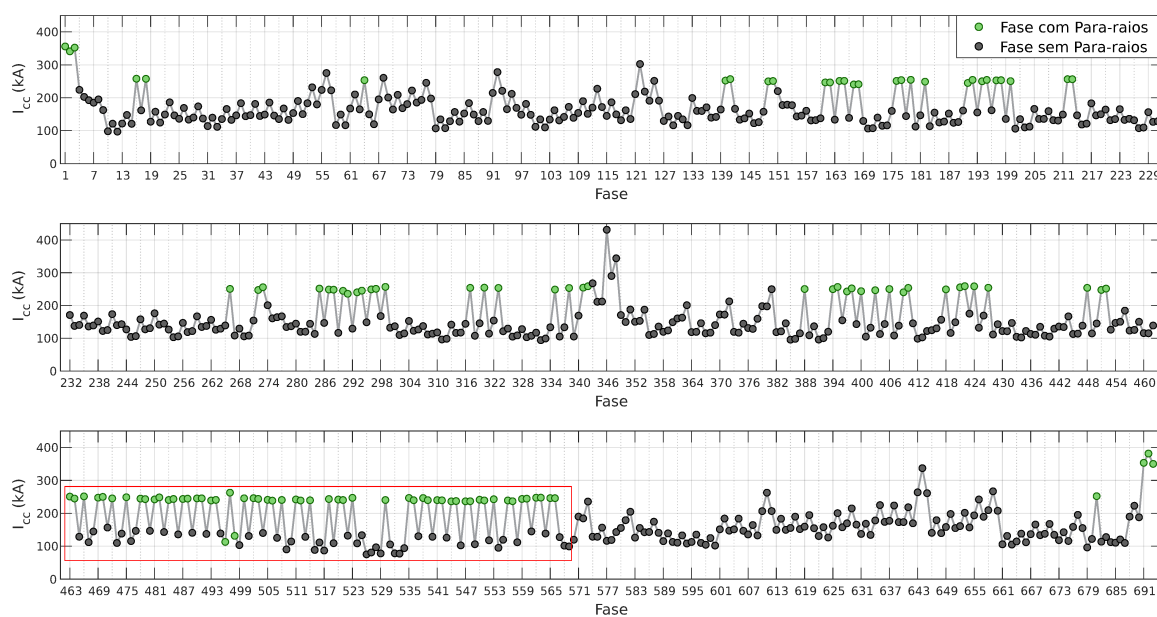


Figura 5.15: Valores estimados de corrente crítica para a solução alcançada na otimização. O arranjo obtido possui um desempenho 2,00 desligamentos / 100 km / ano e faz uso de 128 para-raios.

de proteção satisfatório em uma estrutura mesmo sem instalar para-raios em todas as fases.

Em grande parte do arranjo obtido ao final do processo de otimização os para-raios estão posicionados na(s) fase(s) mais baixa(s) das torres. Essa disposição está diretamente ligada ao pior fator de acoplamento entre a(s) fase(s) mais baixa(s) com os cabos guardas. Ressalta-se que na maioria das torres dessa LT duas fases estão posicionadas a uma altura mais baixa (como exposto na Figura 5.6).

Quanto ao custo computacional, repetiu-se o experimento realizado para a alocação por torre. Vale lembrar que, o intervalo de tempo usado como critério de parada é definido em função do tamanho da entrada da instância avaliada (quantidade de *bits* utilizada para representar o arranjo de para-raios na LT). Logo, o intervalo de tempo empregado na alocação por fase é três vezes superior ao aplicado na alocação por torre. Em relação ao número de *threads*, utilizou-se um valor similar ao adotado no posicionamento por torre (6 *threads*).

As medições da Tabela 5.9 confirmam a significativa redução do custo computacional com o uso das estratégias desenvolvidas em (Castro, 2016). Essas estratégias proporcionam ao algoritmo a realização de uma quantidade expressivamente maior de iterações, possibilitando uma maior exploração do espaço de busca. Essa maior exploração do espaço de busca se reflete na qualidade da solução obtida ao final do processo de otimização (produção de um arranjo com uma quantidade menor de para-raios).

Tabela 5.9: Análise das estratégias para redução do custo computacional. Média de dez execuções levando em consideração a alocação por fase. Um estudo mais detalhado é efetuado em (Castro, 2016).

Estratégia	Tempo	ATP	Memória	Para-raios	Iterações
Sequencial c/ Memória	285 min	$5,5 \times 10^4$	$5,5 \times 10^5$	134,5	7,8
<i>MultiThread</i> s/ Memória	470 min	$2,5 \times 10^5$	0,0	139,2	2,0
<i>MultiThread</i> c/ Memória	277 min	$1,3 \times 10^5$	$7,1 \times 10^6$	128,6	$1,2 \times 10^2$

Por fim, a Figura 5.16 apresenta a evolução da qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo para a alocação por fase. Analisando essa imagem, reforça-se o papel da heurística construtiva na geração dos arranjos iniciais, uma vez que o melhor arranjo dessa heurística já pode ser considerado uma boa solução, possuindo inclusive uma menor quantidade de para-raios do que a solução obtida ao final do processo de otimização para a alocação por torre.

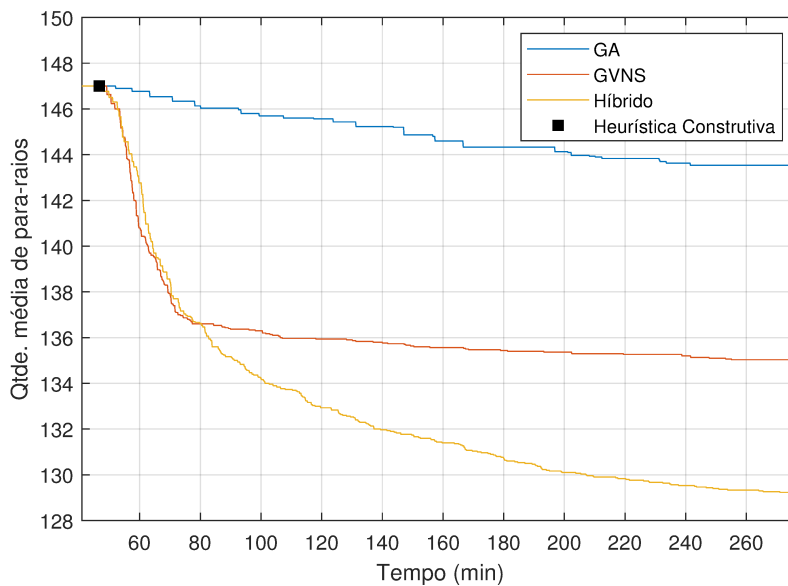


Figura 5.16: Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo considerando a alocação por fase.

Observando a Figura 5.16, infere-se um desempenho superior para o algoritmo híbrido na instância em questão. O algoritmo GVNS, por sua vez, apresenta um desempenho intermediário entre o GA e o algoritmo híbrido. Uma possível razão para esse resultado é a maior capacidade de escapar de mínimos locais do algoritmo híbrido em relação ao GVNS devido a presença dos operadores do GA nesse algoritmo. Apesar da consideração geral de que os algoritmos evolucionários, incluindo os GAs, possuem uma grande capacidade de exploração do espaço de busca, com frequência esses algoritmos pecam no refinamento das soluções. Em função das limitações mencionadas, o algoritmo híbrido aparece como uma boa alternativa por combinar aspectos positivos

do GA e do GVNS.

### 5.5.3 Comparação Estratégias de Alocação

A Figura 5.17 exibe a distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos executados para a LT examinada considerando os algoritmos GA, GVNS e híbrido. Para a alocação por torre todas as execuções dos três algoritmos forneceram um número idêntico de para-raios. No que diz respeito a alocação por fase, observa-se uma quantidade maior de para-raios para o GA, intermediária para o GVNS e menor para o algoritmo híbrido. Quando comparado ao posicionamento por torre, a alocação por fase sugere a instalação de um número menor de para-raios para a LT em questão.

Por ser mais flexível, o posicionamento por fase tende a apresentar soluções com um número menor ou no mínimo igual de para-raios. Contudo, o tempo de execução necessário para convergência na alocação por fase é cerca de três vezes maior. Vale ressaltar que, para a finalidade de uso do *software* desenvolvido essa diferença é pouco expressiva. Outro fator que deve ser levado em conta na alocação por fase são os deslocamentos necessários para instalação e manutenção dos dispositivos para-raios, pois geralmente nesse tipo de alocação esses dispositivos se encontram distribuídos entre uma maior quantidade de estruturas.

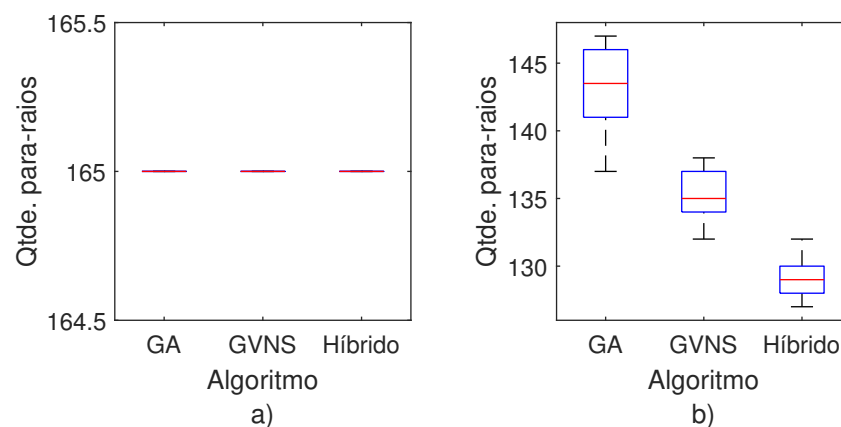


Figura 5.17: Distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos realizados para a LT em estudo: a) alocação por torre e b) alocação por fase.

Com a finalidade de examinar a metodologia proposta, realizou-se um estudo comparativo que leva em consideração três soluções clássicas para o posicionamento de para-raios baseadas nos valores de impedância de aterramento e altura das fases. A primeira solução considera a instalação de para-raios em todas as torres com impedância de aterramento superior a  $20 \Omega$ , enquanto a segunda utiliza a mesma estratégia,

mas tendo em conta o valor de  $30 \Omega$ . Por fim, a terceira solução faz uso da estratégia proposta em (Tarchini & Gimenez, 2003).

A estratégia proposta em (Tarchini & Gimenez, 2003) considera a instalação de para-raios somente nas fases mais baixas das estruturas. Além dessa consideração, essa estratégia leva em conta os valores de resistência de aterramento ( $R_t$ ). A adoção ou não de para-raios na(s) fase(s) mais baixa(s) de uma estrutura segue a Tabela 5.10. O processo para determinar a instalação de para-raios é iniciado na torre de índice 1, seguindo-se para a torre de índice 2, e, de forma sucessiva para as demais.

Tabela 5.10: Estratégia proposta em (Tarchini & Gimenez, 2003) para o posicionamento de para-raios em LTs.

Resistência de Aterramento da Torre	Caso de Posicionamento dos Para-raios
$R_t \leq 15 \Omega$	1
$15 \Omega < R_t \leq 30 \Omega$	2
$R_t > 30 \Omega$	3

Com base nos valores de resistência de aterramento três casos de posicionamento podem ocorrer. O caso de posicionamento 1 indica que a estrutura não deve receber a instalação de para-raios. O caso 2, por seu lado, indica que a estrutura deve instalar para-raio(s) se a estrutura adjacente anterior não possuir. Por último, o caso 3 indica a instalação de para-raio(s) na(s) fase(s) mais baixa(s).

A Tabela 5.11 mostra que os métodos clássico fornecem soluções que atendem ao limite estabelecido pelo ONS (Tabela 2.1). Entretanto, ambas as soluções encontradas pela abordagem proposta - alocação por torre e por fase - não só atendem ao critério de desempenho, como também utilizam uma quantidade expressivamente menor de para-raios. Assim sendo, apesar de serem frequentemente utilizados, os métodos clássicos não são capazes de alocar os recursos de forma ótima.

Tabela 5.11: 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
$20 \Omega$	435	0,48
$30 \Omega$	291	1,06
Tarchini (Tarchini & Gimenez, 2003)	280	1,05
Híbrido (Torre)	165	1,98
Híbrido (Fase)	128	2,00

## 5.6 Conclusão

Neste capítulo foi realizado um estudo detalhando a aplicação da metodologia desenvolvida em uma linha de transmissão de 230 kV localizada no Brasil sob concessão do Grupo Alupar. De início, examinou-se o efeito da instalação de para-raios em uma das torres, detalhando-se o impacto na modelagem da inclusão ou não do fenômeno de transferência de surto para as torres adjacentes devido à operação dos para-raios. Os resultados obtidos mostram que foi possível aumentar significativamente o nível de proteção da LT explorada frente às descargas atmosféricas após a instalação dos para-raios.

Em seguida, estimou-se o desempenho da LT utilizando a metodologia implementada. O valor estimado foi comparado com um histórico de registros fornecido pelo Grupo Alupar e com um desempenho calculado por meio do *software* IEEE-Flash. Os valores encontrados por meio de cada um dos três métodos citados se encontram acima do limite pré-definido.

Por fim, com o objetivo de melhorar o desempenho da linha de transmissão examinada, empregou-se a abordagem para o posicionamento ótimo de para-raios. Em relação aos resultados, pode-se afirmar que a aplicação do posicionamento ótimo de para-raios possibilitou o atendimento do limite de desligamentos sem um gasto desnecessário de recursos financeiros. Vale ressaltar que, o número de para-raios indicado pela metodologia proposta foi significativamente menor do que o número apontado por métodos clássicos usados como base de comparação. Também foi mostrado que a alocação por fase recomenda a instalação de uma quantidade menor de para-raios em relação à alocação por torre.



## Resultados: Estudo de Múltiplos Casos

Com o objetivo de avaliar a consistência da metodologia desenvolvida, este capítulo realiza um estudo envolvendo múltiplas linhas de transmissão. Além de levar em consideração a LT detalhada na Subseção 5.1, outras quatro são usadas. As principais características dessas LTs são apresentadas. Vale destacar que as linhas de índices 2, 3 e 4 são compostas por dados reais obtidos por meio de medições e estimativas. A LT de número 5, no que lhe diz respeito, utiliza como referência dados encontrados em estudos computacionais.

Exibidos os dados utilizados, estima-se o desempenho de cada uma das LTs. Em seguida, aplica-se a metodologia elaborada para a alocação ótima de para-raios. Por último, um experimento é realizado com a finalidade de comparar estatisticamente os algoritmos de otimização apresentados no trabalho.

### 6.1 Dados Utilizados

#### 6.1.1 Linha 2

A segunda linha de transmissão examinada nesta dissertação apresenta circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A Tabela 6.1 exhibe as características gerais dessa linha, como, por exemplo, a quantidade de torres e o comprimento da cadeia de isoladores. Vale destacar que, a resistividade do solo e a densidade de descargas atmosféricas ( $N_g$ ) são consideradas constantes em todo o percurso dessa LT.

A partir de uma análise do perfil de altura das estruturas (Figura 6.1-a) é possível concluir que a maioria das torres apresenta altura entre 20 e 30 m. O perfil de comprimento dos vãos (Figura 6.1-b), por sua vez, mostra que os maiores vãos estão mais concentrados na segunda metade da LT, tomando como exemplo, as torres de índices 37, 38 e 39. Por fim, observa-se que a região final da linha - trecho entre as torres 41 e 55 - apresenta um acréscimo nos valores de resistência de aterramento (Figura 6.1-c), com um destaque especial para a estrutura de índice 48.

Além do mencionado, vale destacar que essa linha apresenta 12 para-raios instalados nas torres de índices 1, 2, 55 e 56. A disposição dos para-raios existentes na LT é exibida na Figura 6.2.



Tabela 6.1: Características gerais da segunda linha de transmissão analisada.

Característica	Valor
Classe de tensão ( $kV$ )	69
Quantidade de torres	56
Quantidade de para-raios na linha	12
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	0,875
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000
$N_g$ (raios/ $km^2$ /ano)	6,00

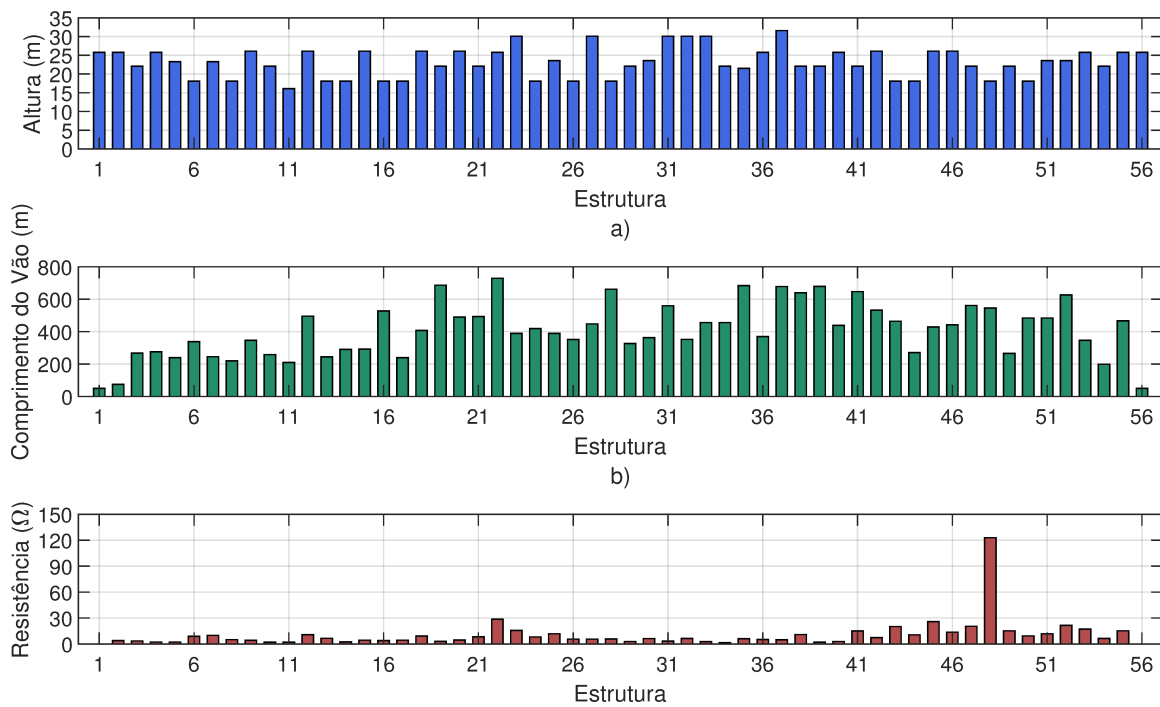


Figura 6.1: Perfil das estruturas da segunda LT analisada: a) altura, b) comprimento do vão posterior e c) resistência de aterramento.

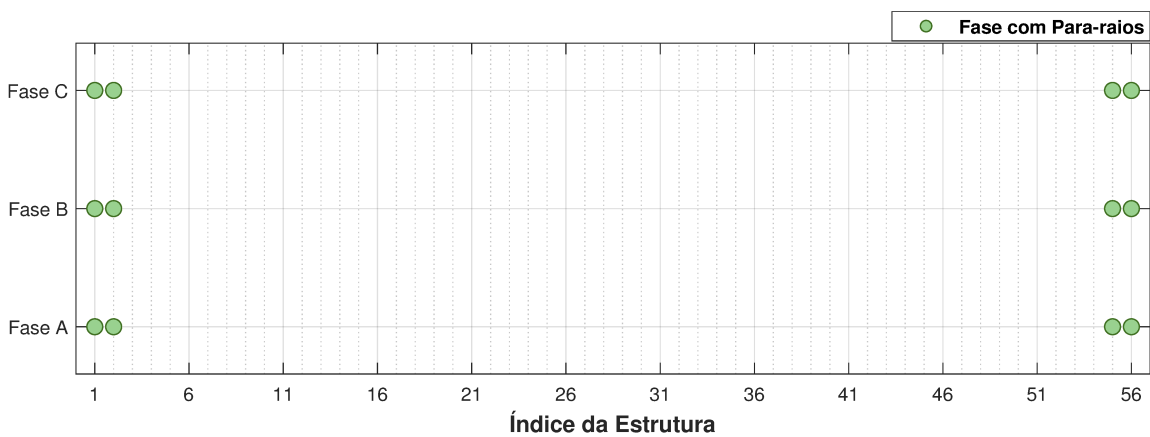


Figura 6.2: Configuração inicial de para-raios da segunda LT. Utilização de 12 para-raios situados nas estruturas de índices: 1, 2, 55 e 56.

### 6.1.2 Linha 3

A terceira linha de transmissão estudada apresenta circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A Tabela 6.2 mostra as características gerais dessa LT. Os valores considerados para a resistividade do solo e a densidade de descargas atmosféricas também são constantes em toda a extensão da LT.

Tabela 6.2: Características gerais da terceira linha de transmissão.

Característica	Valor
Classe de tensão ( $kV$ )	69
Quantidade de torres	43
Quantidade de para-raios na linha	12
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	0,875
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000
$N_g$ (raios/ $km^2$ /ano)	6,00

Em relação à altura, Figura 6.3-a), constata-se que a maioria das torres apresenta altura entre 17 e 25 m. Em relação ao comprimento do vão, Figura 6.3-b), nota-se que nenhuma das 6 primeiras e 6 últimas torres possui uma extensão superior a 600 m. Por último, analisando o perfil de resistência de aterramento das estruturas, Figura 6.3-c), é possível notar um acréscimo considerável nesse valor para a torre de número 28. Essa observação é um indício que essa torre pode ter necessidade de uma proteção adicional.

Vale ainda mencionar que, a terceira LT possui 12 para-raios instalados em suas extremidades - 3 para-raios instalados em cada uma das seguintes torres: 1, 2, 42 e 43. A disposição dos para-raios existentes na LT é mostrada na Figura 6.4.

### 6.1.3 Linha 4

A quarta linha explorada possui circuito simples e possui um cabo para-raios. Nessa LT todas as torres apresentam a mesma altura e resistência de aterramento (vide Tabela 6.3). Os valores considerados para a resistividade do solo e a densidade de descargas atmosféricas também são constantes em todo o percurso da LT.

O perfil de comprimento dos vãos posteriores da quarta LT é detalhado na Figura 6.5. Em relação ao posicionamento de para-raios, a quarta LT possui 6 para-raios instalados em suas extremidades (torres de índices 1 e 61). A disposição dos para-raios na LT é exibida na Figura 6.6.

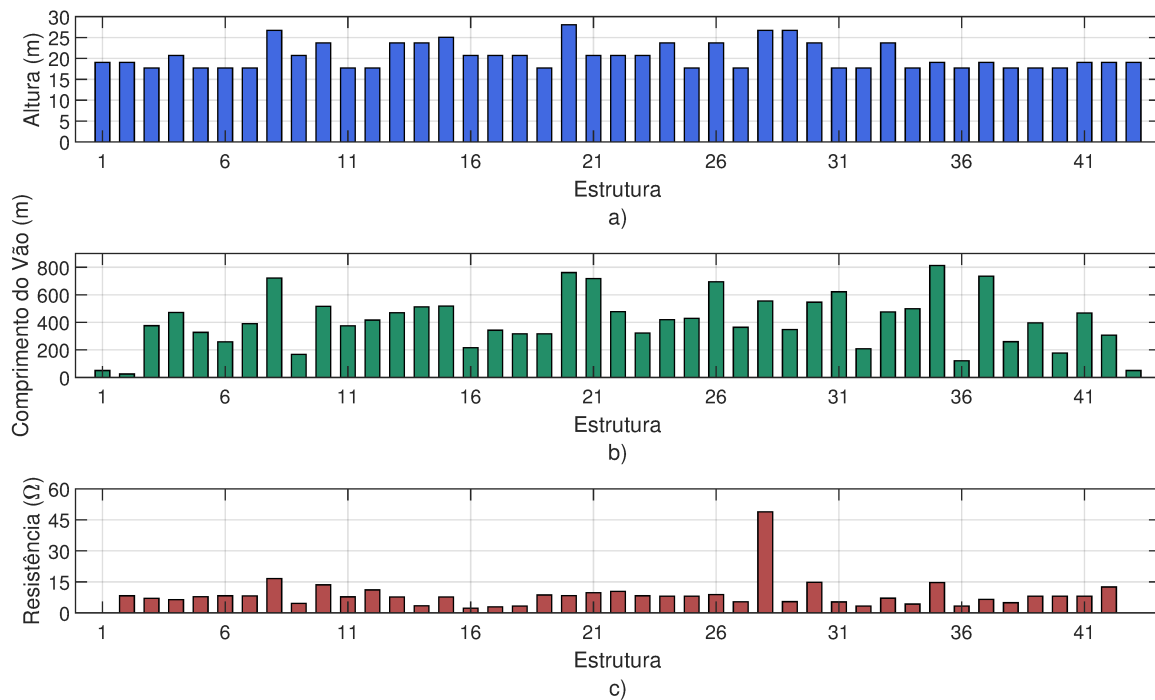


Figura 6.3: Perfil das estruturas da terceira LT analisada: a) altura, b) comprimento do vão posterior e c) resistência de aterramento.

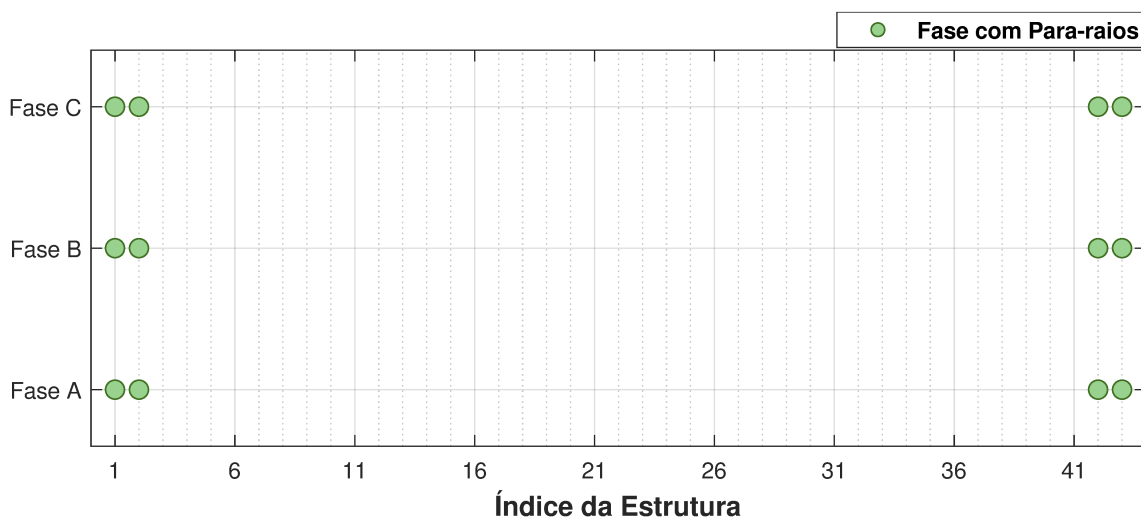


Figura 6.4: Configuração inicial de para-raios da terceira LT. Utilização de 12 para-raios instalados nas estruturas de índices: 1, 2, 42 e 43.

### 6.1.4 Linha 5

A quinta linha de transmissão se baseia em dados de estudos computacionais sobre o desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas (Rodrigues et al., 2014a). Essa LT possui circuito simples e utiliza dois cabos para-raios. A geometria das torres é mostrada na Figura 6.7. Maiores informações sobre os parâmetros elétricos e mecânicos dessa LT podem ser encontrados em (Rodrigues et al., 2014a).

Tabela 6.3: Características gerais da quarta linha de transmissão.

Característica	Valor
Classe de tensão ( $kV$ )	138
Quantidade de torres	61
Quantidade de para-raios na linha	6
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	1,625
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000
$N_g$ (raios/ $km^2$ /ano)	6,00
Altura das torres ( $m$ )	16,50
Resistência de Aterramento ( $\Omega$ )	40

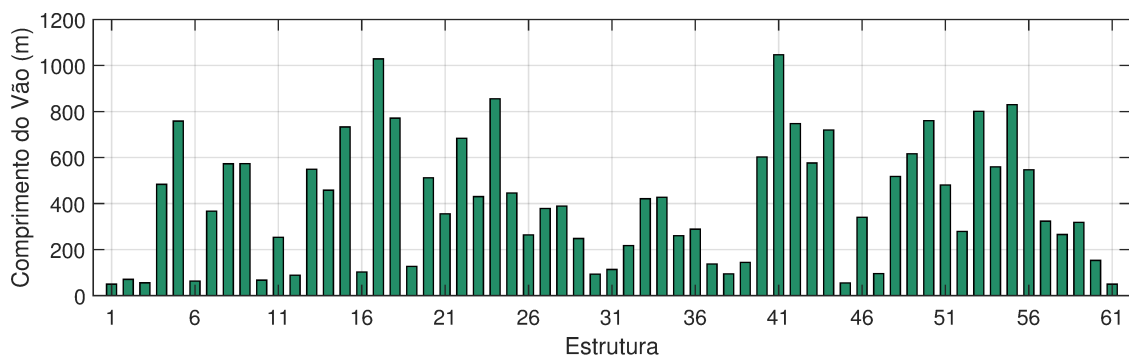


Figura 6.5: Perfil do comprimento dos vãos posteriores das estruturas. Quarta linha de transmissão.

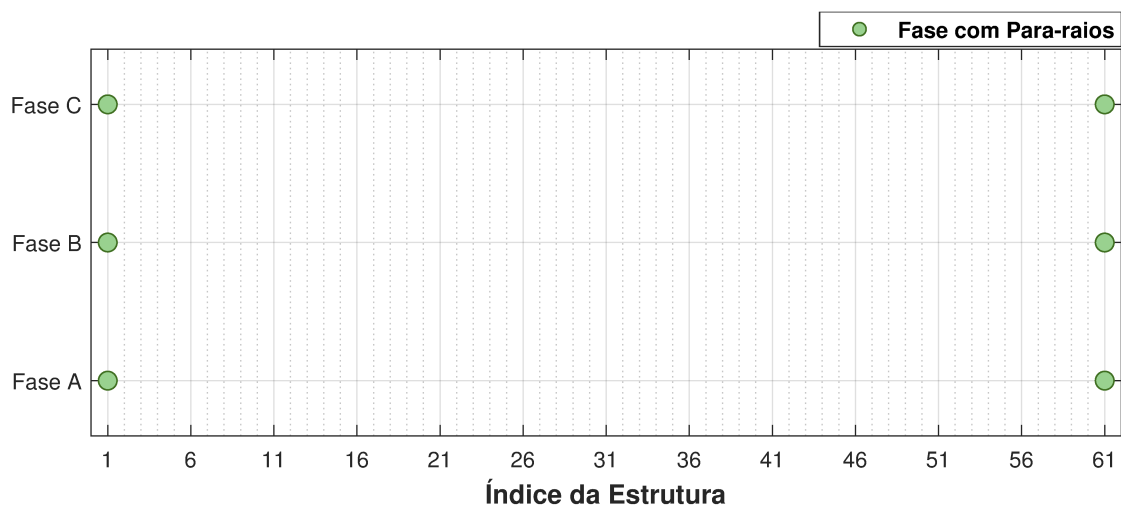


Figura 6.6: Configuração inicial de para-raios da quarta LT. Utilização de 6 para-raios instalados nas estruturas de índices: 1 e 61.

Os valores considerados para a altura das torres e o comprimento dos vãos são constantes (vide Tabela 6.4). A densidade de descargas atmosféricas, por outro lado, varia ao longo do percurso da LT (Figura 6.8-a). Os valores de resistência de aterramento, por sua vez, são produzidos por meio de uma distribuição uniforme com média

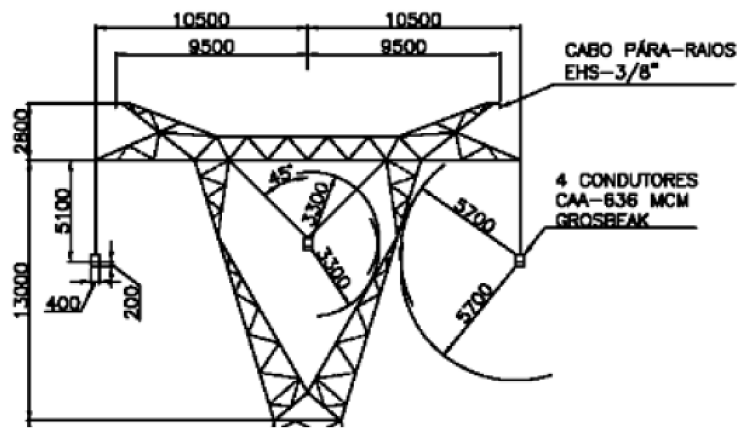


Figura 6.7: Geometria das torres da quinta LT examinada. Figura retirada de (Rodrigues et al., 2014a).

e desvio padrão respectivamente de  $50 \Omega$  e  $15 \Omega$  (Figura 6.8-b). Por último, acentua-se que essa LT não apresenta para-raios instalados.

Tabela 6.4: Características gerais da quinta linha de transmissão.

Característica	Valor
Classe de tensão (kV)	500
Quantidade de torres	61
Quantidade de para-raios na linha	0
Comprimento da cadeia de isoladores (m)	3,797
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000
Altura das torres (m)	44,70
Comprimento dos vãos (m)	600,00

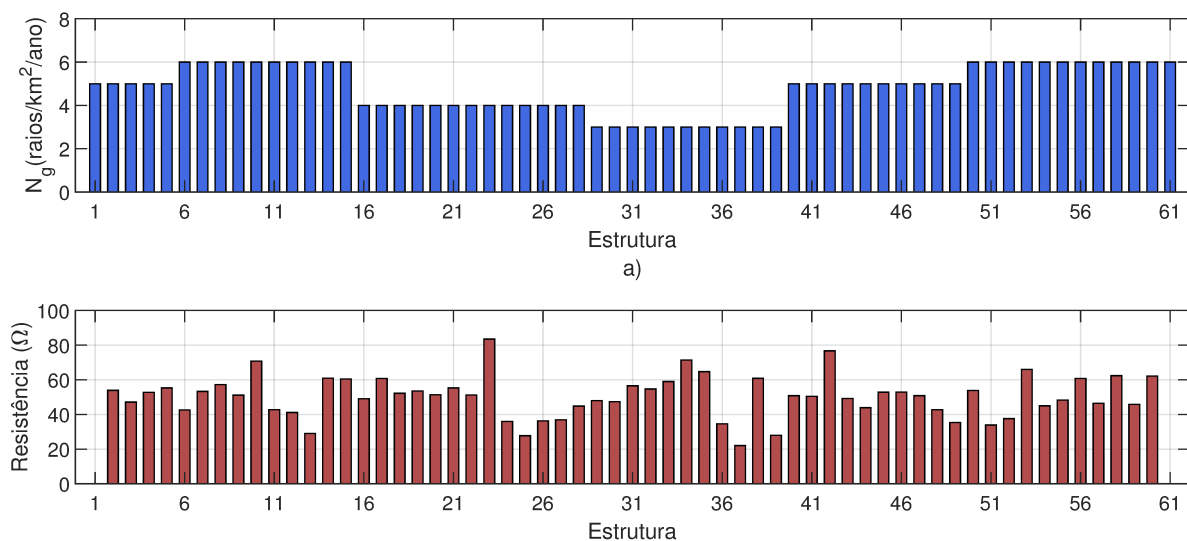


Figura 6.8: a) Perfil da densidade de descargas atmosféricas ao longo da extensão da LT. b) Perfil da resistência de aterramento das estruturas. Quinta linha de transmissão.

## 6.2 Estimativa de Desempenho das Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas

Um procedimento análogo ao descrito na Seção 5.3 foi aplicado a cada uma das LTs apresentadas com o objetivo de estimar o desempenho inicial. Esses desempenhos são mostrados na Tabela 6.5. Exibe-se também o limite de desligamentos adotado para cada uma das LTs. Um maior detalhamento a respeito desses limites é fornecido na Subseção 2.3.2.

Tabela 6.5: Desempenhos especificados e estimados.

Linha	Classe de Tensão (kV)	Desempenho Especificado (desligamentos / 100 km/ ano)	Desempenho Inicial (desligamentos / 100 km/ ano)
2	69	5	14,66
3	69	5	10,61
4	138	5	9,91
5	500	1	1,41

Com base nos dados da Tabela 6.5, observa-se que todas as LTs excedem os limites de desempenho especificados. Como demonstrado, uma possível ação para adequar o desempenho dessas LTs aos limites definidos pelos órgãos reguladores é a instalação de dispositivos para-raios.

## 6.3 Posicionamento Ótimo de Para-raios

Buscando atender os limites especificados pelos órgãos reguladores e, concomitantemente, procurando fazer uso da menor quantidade possível de recursos financeiros, aplica-se a abordagem detalhada na Seção 6.3 para a alocação ótima de para-raios em LTs. Para fins comparativos os três algoritmos detalhados neste trabalho foram empregados: GA, GVNS e híbrido (GA + GVNS). Foram consideradas as possibilidades de alocação por torre e por fase.

Nos experimentos efetuados cada um dos algoritmos foi executado 30 vezes para cada uma das LTs detalhadas considerando as duas possibilidades de alocação descritas. Em relação ao tamanho da população dos algoritmos GA e híbrido, adotou-se uma regra similar a descrita na Seção 6.3, em que o tamanho da população corresponde a 50% da quantidade de torres presentes na LT. A modelagem utilizada no ATP, por sua vez, é idêntica a mostrada na Tabela 4.3. A restrição da quantidade máxima de para-raios não foi utilizada. Os operadores foram ajustados de forma similar ao descrito na Seção 6.3.

Os experimentos foram realizados em um computador Intel i7-4771, 3,50 GHz, 8,00 GB RAM, sistema operacional Windows 7 Professional. Os algoritmos foram implementados na linguagem Java versão 11.0.2. Por último, em relação ao critério de parada, utiliza-se o mesmo critério descrito na Seção 6.3 (intervalo de tempo estabelecido em função do tamanho da entrada da instância).

Os resultados alcançados em termos da quantidade média de para-raios considerando a alocação por torre para cada uma das LTs apresentadas são exibidos na Tabela 6.6. Em relação ao posicionamento por torre não é possível identificar uma diferença de desempenho entre os algoritmos. Todas as execuções indicam o posicionamento de uma quantidade similar de para-raios (com exceção de um *outlier* em uma das execuções do algoritmo GVNS para a segunda LT), em função disso o desvio padrão é nulo (vide Tabela 6.6).

Tabela 6.6: Quantidade média de para-raios obtida nos experimentos computacionais realizados considerando o posicionamento por torre para as LTs avaliadas.

Linha	Quantidade de para-raios		
	GA	GVNS	Híbrido
1	165,0 ± 0,0	165,0 ± 0,0	165,0 ± 0,0
2	60,0 ± 0,0	60,7 ± 1,3	60,0 ± 0,0
3	45,0 ± 0,0	45,0 ± 0,0	45,0 ± 0,0
4	57,0 ± 0,0	57,0 ± 0,0	57,0 ± 0,0
5	42,0 ± 0,0	42,0 ± 0,0	42,0 ± 0,0

A Tabela 6.7 exibe a média e o desvio padrão para o número de desligamentos para as soluções logradas ao final do processo de otimização para o posicionamento por torre. Vale destacar que todas as soluções alcançadas atendem ao limite estabelecido de desligamentos.

Tabela 6.7: Quantidade média estimada de desligamentos / 100 km / ano para as LTs analisadas considerando o posicionamento por torre.

Linha	Desligamentos / 100 km / ano		
	GA	GVNS	Híbrido
1	1,981 ± 0,003	1,997 ± 0,005	1,983 ± 0,006
2	4,860 ± 0,001	4,949 ± 0,041	4,923 ± 0,043
3	4,696 ± 0,031	4,942 ± 0,051	4,814 ± 0,098
4	4,800 ± 0,000	4,850 ± 0,001	4,906 ± 0,066
5	0,980 ± 0,001	0,980 ± 0,001	0,995 ± 0,006

A Figura 6.9 mostra os resultados obtidos considerando o posicionamento por fase, comparando esses resultados com os alcançados na alocação por torre (Tabela 6.6) é possível constatar que a alocação por fase indica o posicionamento de uma quantidade menor de para-raios. Vale destacar que, a alocação por fase é mais flexível em consequência ao seu maior espaço de busca das soluções. A quantidade de arranjos possíveis é cubicamente maior para o posicionamento por fase quando se consideram LTs trifásicas com circuito simples. Além disso, vale mencionar que o espaço de busca do posicionamento por torre está contido no espaço de busca do posicionamento por fase.

A Tabela 6.8 exibe a média e o desvio padrão para o número de desligamentos para as soluções obtidas ao final do processo de otimização para o posicionamento por fase. De forma similar a alocação por torre, todas as soluções obtidas atendem ao limite estabelecido de desligamentos.

Tabela 6.8: Quantidade média estimada de desligamentos / 100 km / ano para as LTs analisadas considerando o posicionamento por fase.

Linha	Desligamentos / 100 km / ano		
	GA	GVNS	Híbrido
1	1,951 ± 0,031	2,000 ± 0,000	1,999 ± 0,003
2	4,877 ± 0,097	4,976 ± 0,025	4,969 ± 0,039
3	4,919 ± 0,009	4,951 ± 0,047	4,889 ± 0,062
4	4,933 ± 0,048	4,999 ± 0,002	4,991 ± 0,009
5	0,990 ± 0,001	0,990 ± 0,001	0,998 ± 0,004

Ainda em relação ao posicionamento por fase, nota-se um desempenho superior ou no mínimo igual para o algoritmo híbrido em todas as LTs avaliadas. Observa-se também um desempenho intermediário para o algoritmo GVNS em relação aos algoritmos GA e híbrido.

Três fatores ajudam a explicar o desempenho dos métodos GVNS e híbrido em relação ao GA: o direcionamento da busca para torres consideradas críticas em relação ao desempenho da LT; a inclusão de uma ferramenta de busca local que leva em conta o efeito de transferência do surto atmosférico e o favorecimento do posicionamento de para-raios na(s) fase(s) mais baixa(s) das torres críticas. A principal vantagem do algoritmo híbrido em relação ao GVNS, por sua vez, é o melhor balanceamento entre a exploração e a exploração do espaço de soluções.

Devido a presença dos operadores do GA no algoritmo híbrido, esse algoritmo apresenta uma maior capacidade de escapar de mínimos locais do que o GVNS. Pode-se observar na Figura 6.10 que para as LTs 1, 2 e 3 os algoritmos GVNS e híbrido



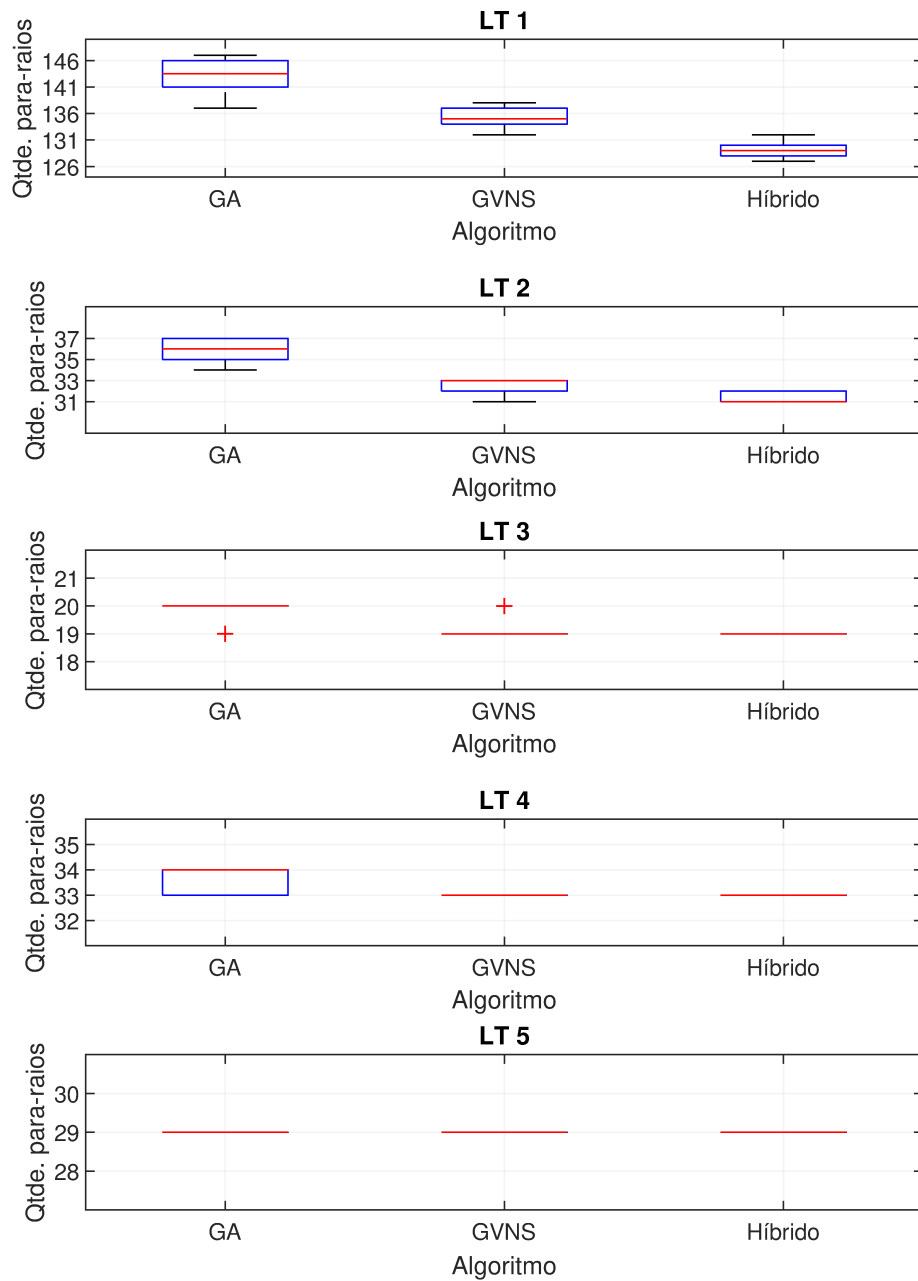


Figura 6.9: Distribuição da quantidade de para-raios nos experimentos realizados considerando o posicionamento por fase para as LTs avaliadas: LT 1, LT 2, LT 3, LT 4 e LT 5.

apresentam uma qualidade média próxima para a melhor solução encontrada nas primeiras iterações. Contudo, devido a maior capacidade de exploração do algoritmo híbrido, as soluções finais alcançadas por esse algoritmo são levemente superiores.

Um ponto a ser destacado é o papel da heurística construtiva na aceleração do processo de busca. Como explicado, essa heurística produz soluções iniciais que sugerem o posicionamento de para-raios nas torres com base em critérios como: a densidade de descargas atmosféricas da região onde a torre está localizada, o valor de impedância de aterramento da torre, o impacto da torre na estimativa de desempenho da configuração original da LT, entre outros.

Vale sublinhar aqui a LT 5, para a qual nenhum dos algoritmos implementados - GA, GVNS e híbrido - conseguiu encontrar uma solução superior a solução fornecida pela heurística construtiva. Uma possível justificativa para esse resultado são os parâmetros de entrada dessa LT, vale lembrar que apenas os valores de resistência de aterramento das estruturas e a densidade de descargas atmosféricas ao longo da extensão dessa LT não são constantes, o que simplifica o processo de busca pelo melhor arranjo de para-raios.

Para fins ilustrativos alguns dos arranjos de para-raios obtidos após a aplicação da metodologia para o posicionamento ótimo de para-raios em LTs são exibidas nas Figuras 6.11 a 6.14. Com o objetivo de aumentar a segurança nas subestações das sobretensões originadas de descargas atmosféricas, curto-circuitos e/ou operações de manobra na rede, foi pré-definido que as extremidades das LTs devem obrigatoriamente receber a instalação de para-raios em todas as fases.

Em relação aos arranjos obtidos para a alocação de para-raios nas LT analisadas, observa-se que grande parte dos para-raios está localizada na(s) fase(s) mais baixa(s). Nas LTs 2 e 3 a fase A se encontra a uma altura mais baixa, a fase B em um nível intermediário de altura e a fase C está localizada em um ponto mais alto em relação ao solo. Já em relação a LT 4, a fase A se encontra a uma altura mais baixa, a fase C em uma altura intermediária e a fase B está localizada em um ponto mais alto. Por último, em relação a LT 5, as fases A e C se encontram a uma altura menor e a fase B está mais elevada.

Observando a Figura 6.11 é possível notar também uma correlação entre a disposição dos para-raios e o perfil da resistência de aterramento das estruturas (Figura 6.1-c). Grande parte dos para-raios se encontra posicionado na parte final dessa LT, região na qual pode-se detectar um aumento nos valores de resistência de aterramento.

Conclusão semelhante pode ser alcançada a partir da análise das Figuras 6.12 e 6.3-c, dissecando essas imagens é possível captar que estruturas que possuem valores mais

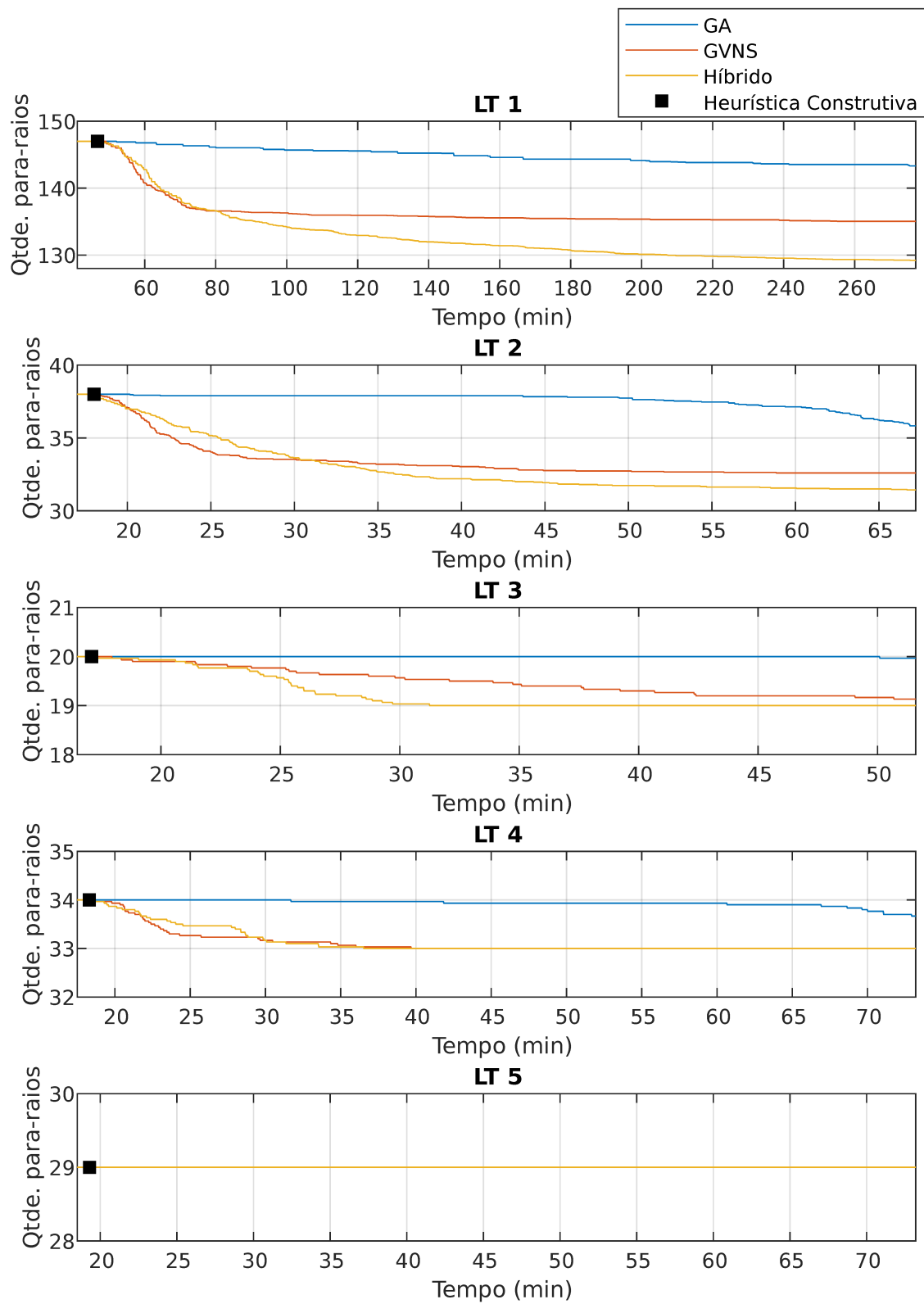


Figura 6.10: Qualidade média da melhor solução encontrada em função do tempo para as LTs testadas considerando o posicionamento por fase: LT 1, LT 2, LT 3, LT 4 e LT 5.

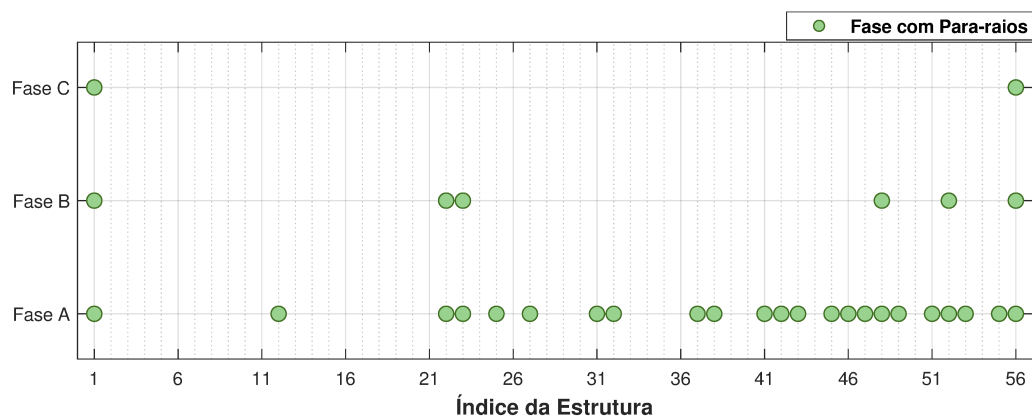


Figura 6.11: Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a segunda LT. Desempenho de 4,99 desligamentos / 100 km / ano com a utilização de 31 para-raios.

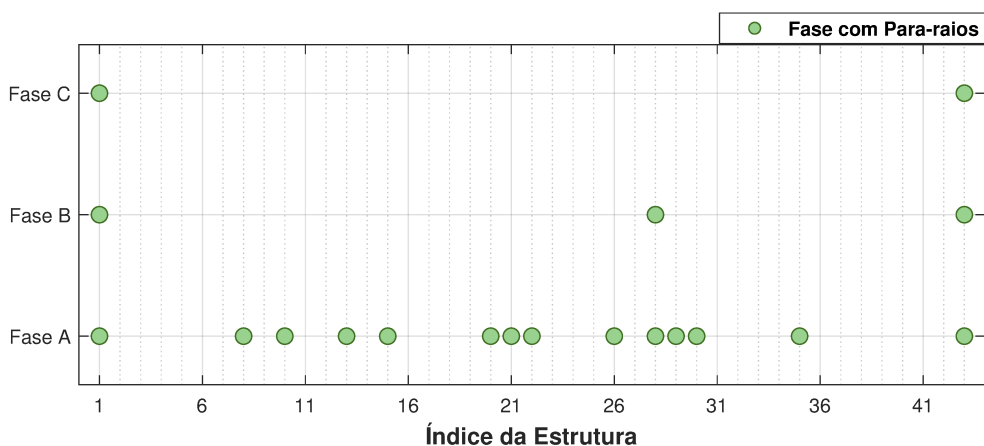


Figura 6.12: Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a terceira LT. Desempenho de 4,79 desligamentos / 100 km / ano com a utilização de 19 para-raios.

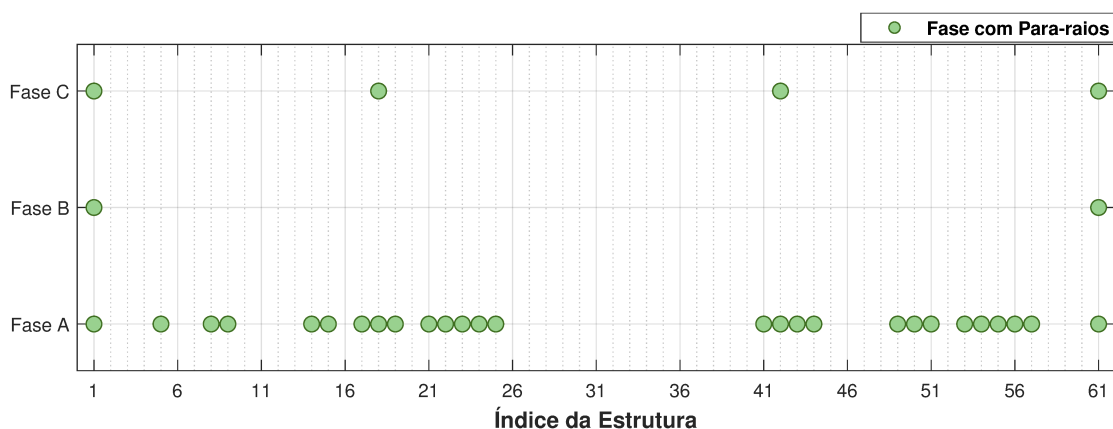


Figura 6.13: Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a quarta LT. Desempenho de 4,98 desligamentos / 100 km / ano com a utilização de 33 para-raios.

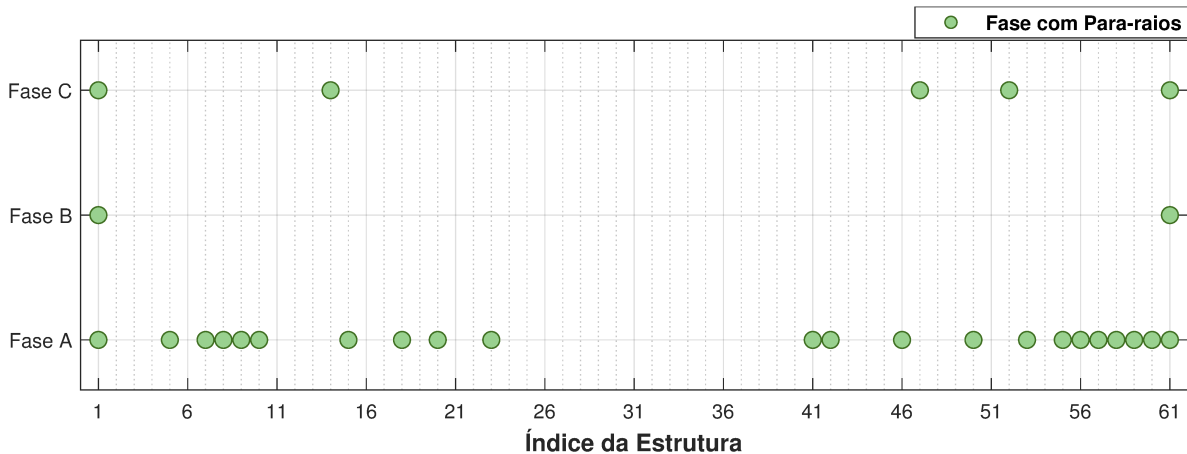


Figura 6.14: Configuração de para-raios obtida com uso do algoritmo híbrido para a quinta LT. Desempenho de 1,00 desligamento / 100 km / ano com a utilização de 29 para-raios.

altos de resistência de aterramento, torres 8, 10, 28, 30 e 35, por exemplo, geralmente causam maior impacto na estimativa de desempenho da LT e, em função disso estão mais propensas a receberem a instalação de para-raios. Contudo, vale ressaltar que uma série de fatores pode impactar no desempenho de uma LT, assim, o posicionamento de para-raios não deve se orientar apenas pelos valores de resistência de aterramento.

## 6.4 Comparação Estatística dos Algoritmos

Como visto nas Figuras 6.9 e 6.10, o algoritmo híbrido parece apresentar um desempenho levemente superior aos demais quando se considera o posicionamento por fase. No posicionamento por torre (Tabela 6.6), por seu lado, o desempenho dos algoritmos parece ser similar. Com o objetivo de realizar um estudo mais aprofundado, esta seção conduz um teste estatístico para comparação dos algoritmos.

### 6.4.1 Planejamento Experimental

Buscando verificar se, na prática, o algoritmo híbrido produz melhores resultados, um experimento planejado foi realizado. Para tal, a solução de cada uma das 30 execuções realizadas para cada uma das LTs considerando o posicionamento por torre e por fase foi armazenada. O objetivo do experimento realizado é verificar se na média o algoritmo híbrido produz soluções com uma quantidade menor de para-raios em relação aos algoritmos GA e GVNS.

Em função do experimento envolver a comparação de múltiplos algoritmos, no caso três, empregou-se o procedimento ANOVA (Análise de Variância). O ANOVA pode ser definido como um conjunto de modelos estatísticos com um conjunto de procedimentos de estimação associados usados para analisar as diferenças de médias entre grupos. Mais informações e detalhes sobre o ANOVA podem ser obtidos em (Montgomery & Runger, 2010).

Analisando o problema é possível perceber que a solução encontrada por qualquer um dos algoritmos dependerá das características da linha de transmissão. Entretanto, na realização desse experimento, busca-se remover essa influência. Sendo assim, um procedimento de blocagem foi empregado. Esse procedimento é uma generalização do teste pareado, cuja finalidade é demover da análise algum fator de ruído conhecido e controlável. Neste caso, o fator de ruído é a influência da instância - características das LTs - na quantidade de para-raios da solução.

Por simplicidade, foi utilizado um modelo estatístico linear para descrever os dados utilizados. Esse modelo é mostrado abaixo:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, \dots, A \\ j = 1, \dots, N \end{cases} \quad (6.1)$$

em que,  $\mu$  é a média geral,  $\tau_i$  representa o efeito do  $i$ -ésimo algoritmo, nesse caso  $A = 3$  (GA, GVNS e híbrido). Já  $\beta_j$  traduz o impacto da instância nos pontos amostrais. O experimento foi realizado considerando o posicionamento por torre e por fase das cinco LTs descritas a priori (seções 5.1 e 6.1), logo  $N = 10$ . Por fim,  $\epsilon_{ij}$  representa o erro residual (erro aleatório ou variabilidade não modelada).

Neste caso, o teste de hipóteses é formulado baseado na questão de interesse. Define-se a hipótese nula,  $H_0$ , como sendo a ausência de impacto de qualquer um dos algoritmos na média geral. Em contrapartida, a hipótese alternativa,  $H_1$ , afirma que algum dos algoritmos impacta na média geral.

$$\begin{cases} H_0 : \tau_i = 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, A\} \\ H_1 : \exists \tau_i \neq 0 \end{cases}$$

Além disso, o nível de significância foi definido como  $\alpha = 0,05$ , a probabilidade de ocorrência de falso negativo  $\beta = 0,2$  e o desvio mínimo de interesse prático  $\delta^* = 1,0$ . Além disso, vale ressaltar que em cada execução a mesma heurística construtiva é usada para produzir as soluções iniciais utilizadas nos algoritmos de otimização.

### 6.4.2 Análise Exploratória dos Dados

Como mencionado, o algoritmo híbrido parece apresentar um desempenho levemente superior aos demais quando se considera o posicionamento por fase (Figuras 6.9 e 6.10). A diferença na quantidade média de para-raios das soluções é maior entre o GA e o algoritmo híbrido, com pouca diferença entre o GVNS e algoritmo híbrido.

Outro ponto a ser observado é a maior divergência entre os resultados para a LT 1. Duas possíveis justificativas para esse resultados são: o maior detalhamento nos parâmetros dessa LT e o aumento do espaço de busca em função da maior quantidade de torres, o que representa um maior desafio para os algoritmos de otimização. As LTs 4 e 5, por sua vez, apresentam grande parte dos parâmetros constantes, o que simplifica o processo de busca pela solução ótima. O desempenho dos algoritmos na alocação por torre aparenta ser bem similar.

### 6.4.3 Análise Estatística

De início, os dados foram carregados e a média considerando o posicionamento por torre e por fase em cada LT foi calculada. Dessa forma 10 valores foram obtidos para cada um dos três algoritmos. Em seguida, realizou-se um pequeno processo de transformação dos dados. A transformação consistiu na aplicação da função logarítmica nos dados -  $\hat{y}_{ij} = \log(y_{ij})$  - com o objetivo de minimizar efeitos decorrentes de diferenças de grandeza entre as instâncias e tornar os dados mais fáceis de serem trabalhados (Montgomery & Runger, 2010).

Efetuada a transformação, o ANOVA foi empregado e a hipótese nula foi rejeitada com um nível de confiança de 95%. O valor-p obtido foi de 0,043. Vale enfatizar que, rejeitar a hipótese nula no ANOVA apenas indica que existe uma variabilidade entre os algoritmos. Apenas com a execução do ANOVA não é possível afirmar que um dos algoritmos é superior aos demais.

#### 6.4.4 Verificação das Premissas

O teste estatístico utilizado assume três premissas: independência, homocedasticidade e normalidade dos resíduos. Em relação a independência, o próprio planejamento e a natureza do experimento garantem a validade dessa premissa. Por ser um experimento computacional e realizado sob condições homogêneas (mesmo computador e condições operacionais), o mesmo não está suscetível a fatores como erros de medição e a ordem de execução.

No que diz respeito a homocedasticidade (homogeneidade de variância entre os algoritmos), utilizou-se o teste de Fligner-Killeen (Fligner & Killeen, 1976) para verificar o atendimento a essa premissa. A hipótese nula desse teste é a de que não há diferença na variância entre os grupos (no caso deste trabalho os algoritmos), já a hipótese alternativa é a de que a variância entre os grupos é heterogênea. O valor-p obtido foi de 0,992 o que indica que a variância entre os grupos é bem homogênea.

Por fim, para verificar a normalidade dos resíduos foi utilizado um gráfico quantil-quantil (Figura 6.15) em conjunto com o teste estatístico de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965). A hipótese nula do teste de Shapiro-Wilk é a de que os dados são normais, o valor-p obtido foi de 0,077 o que não rejeita a hipótese nula com um nível de confiança de 95%. Vale destacar que, o ANOVA é relativamente robusto a violações da normalidade, desde que as outras premissas sejam verificadas (ou o tamanho amostral seja grande o suficiente). O gráfico quantil-quantil confirma o atendimento a premissa de normalidade.

#### 6.4.5 Estimativa da Potência do Teste

Além de validar as premissas necessárias ao ANOVA, também foi executada uma verificação para determinar o valor da potência do teste realizado. Esse valor foi obtido por meio da função de cálculo de potência para o ANOVA balanceado de fator único (Champely et al., 2017). Foram utilizados como parâmetros de entrada o nível de significância ( $\alpha = 0,05$ ), o número de grupos de interesse (quantidade de algoritmos,  $A = 3$ ), o número de instâncias avaliadas ( $N = 10$ ) e as variâncias intragrupos e entre grupos.

O valor estimado para a potência foi 72,7%. Vale lembrar que, a probabilidade de ocorrência de um falso negativo (não rejeição da hipótese nula quando ela é falsa) é estimada pelo parâmetro  $\beta$ . A potência, por seu lado, é igual a  $1 - \beta$ . Logo, o valor estimado é inferior a potência definida a priori de 80,0%. Utilizando a mesma função



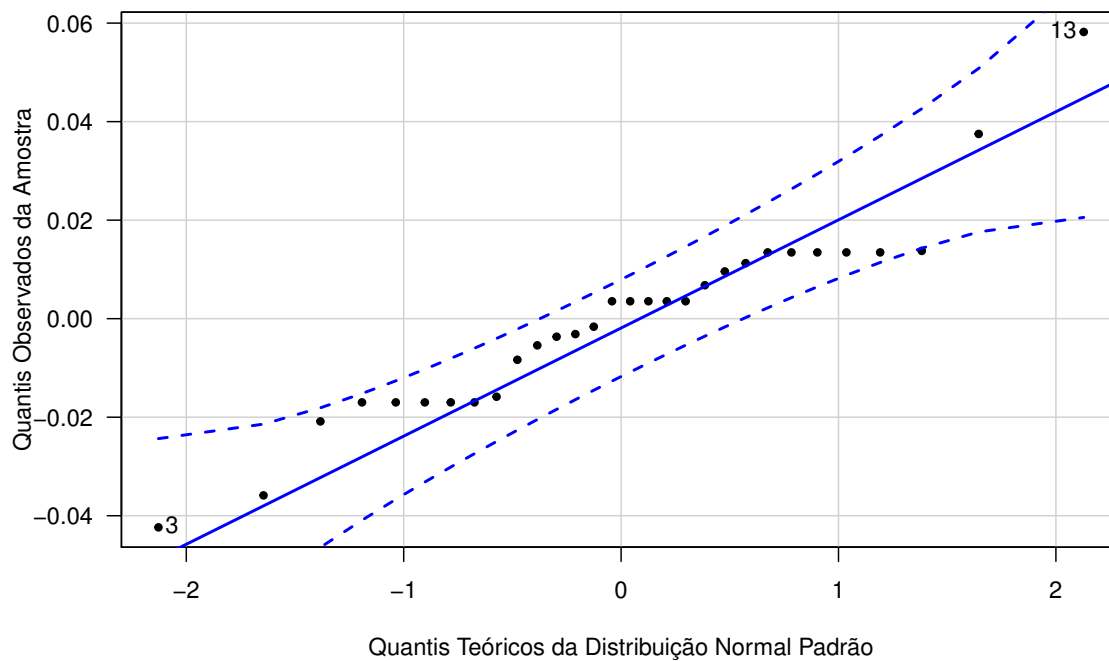


Figura 6.15: Validação da premissa de normalidade dos resíduos.

foi apurado que para se obter uma potência igual ou superior a 80,0% seria necessário executar o teste com ao menos doze instâncias ( $N = 12$ ). Vale ressaltar que, a perda de potência aumenta a probabilidade de um falso negativo, contudo isso não invalida o resultado do teste.

### 6.4.6 Comparações Múltiplas

Com a rejeição da hipótese nula e o atendimento as premissas do ANOVA, partiu-se para a etapa de comparações múltiplas. Essa etapa busca determinar quais grupos, neste caso os algoritmos, são significativamente diferentes.

Procedimentos para comparações múltiplas geralmente envolvem a comparação de um grupo contra outros, ou a comparação de todos os grupos entre si. Sempre que possível, deve-se buscar realizar a menor quantidade de comparações necessárias para se responder adequadamente a questão de interesse. A realização de um número inferior de comparações requer um tamanho amostral menor ou resulta em maior potência para um dado experimento. Vale destacar que, o uso de um procedimento para comparações múltiplas garante maior potência nos testes do que a aplicação de procedimentos de correção de significância (Montgomery, 2017).

Como detalhado no Planejamento Experimental (Subseção 6.4.1), o experimento realizado busca verificar se na média o algoritmo híbrido produz soluções com uma

quantidade menor de para-raios em relação aos algoritmos GA e GVNS. Em função disso, aplicou-se o teste de Dunnett (Dunnett, 1955) que realizou as seguintes comparações: GA x híbrido e GVNS x híbrido.

As premissas necessárias ao teste de Dunnett são satisfeitas com a validação das premissas do ANOVA. O resultado desse teste é apresentado na Figura 6.16, analisando-o é possível concluir com um nível de confiança de 95% que o algoritmo híbrido apresenta desempenho superior ao GA, pois todo o intervalo se encontra na região cuja diferença é positiva. Na comparação entre os algoritmos híbrido e GVNS, por seu lado, o resultado é inconclusivo, pois o intervalo da diferença contém o valor nulo, não sendo possível afirmar que o desempenho de um dos algoritmos é superior ou inferior.

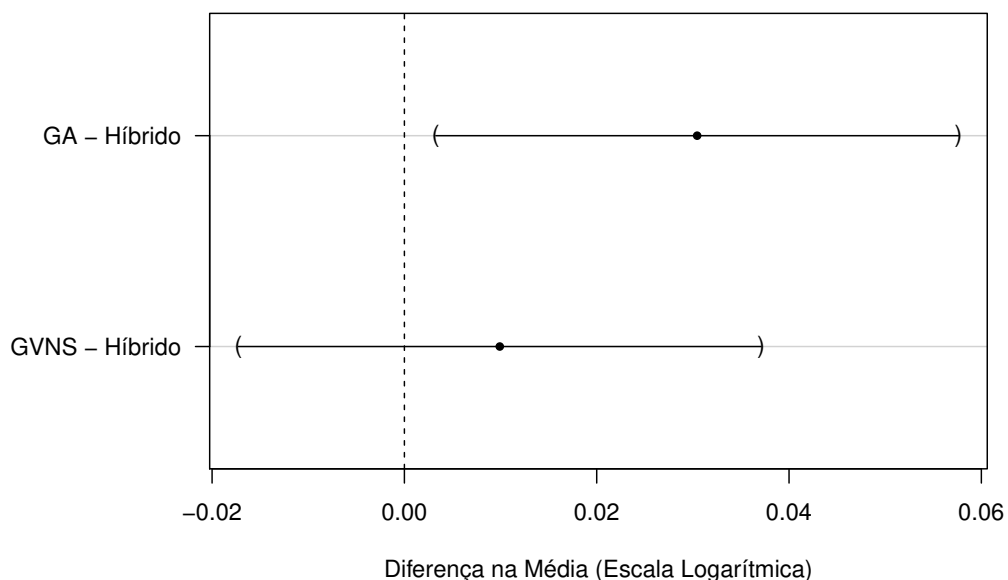


Figura 6.16: Comparação múltipla das médias: teste de Dunnett para contrastes com nível de confiança de 95%.

Os resultados alcançados pelo algoritmo híbrido são satisfatórios. Contudo seria importante realizar um estudo mais amplo que incluísse uma quantidade maior de LTs. A inclusão de outras LTs, aumentaria a potência do teste e conseqüentemente diminuiria a probabilidade de erros do tipo II (falso negativo).

## 6.5 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados da aplicação da metodologia para o posicionamento ótimo de para-raios em múltiplas linhas de transmissão. Os resultados mostram que a instalação de para-raios permite reduzir significativamente o número

de desligamentos. Vale ressaltar que todas as soluções fornecidas atendem aos limites de desligamentos pré-definidos.

Ao final do capítulo, foi realizado um teste estatístico buscando verificar se, na média, o algoritmo híbrido produz soluções com uma quantidade menor de para-raios do que os algoritmos usados como base de comparação (GA e GVNS). A conclusão é a de que o algoritmo híbrido possui desempenho superior ao GA, em relação ao GVNS não existem evidências estatísticas que possibilitem a afirmação de superioridade para o algoritmo híbrido.

---

# Conclusões e Propostas de Continuidade

---

## 7.1 Considerações Iniciais

Dentre os diversos equipamentos e recursos empregados no transporte de energia, um dos principais são as linhas de transmissão. Como mencionado, dependendo da localização, aspectos ambientais e características de projeto, as linhas de transmissão podem se tornar pontos preferencias para a incidência de descargas atmosféricas. E diretamente relacionado a exposição das LTs está o fato da incidência direta de descargas atmosféricas ser a sua principal causa de desligamentos forçados.

Nesse contexto, uma medida comum para aumentar a proteção da linha é a instalação de cabos para-raios no topo das estruturas. Contudo, mesmo linhas protegidas por cabos para-raios podem apresentar um número alto de desligamentos decorrentes do fenômeno de *backflashover*. Neste caso, uma das possíveis alternativas para minimizar esse problema é o uso adicional de para-raios.

Diante disso, este trabalho apresentou 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 pode ser utilizada em diferentes LTs.

## 7.2 Avaliações Conclusivas

### 7.2.1 Conclusões Gerais

Os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida em cinco LTs mostram que o uso de para-raios permite diminuir de forma considerável o número de desligamentos das linhas. Vale destacar, que todas as LTs consideradas possuem um número de

desligamentos acima dos limites estabelecidos e que com a utilização da metodologia para alocação ótima foram encontradas soluções que atendem a esses limites.

Conclui-se também que a metodologia desenvolvida permite reduzir o número de desligamentos das linhas utilizando uma quantidade de para-raios significativamente menor do que abordagens clássicas. A metodologia desenvolvida foi superior a abordagens que utilizam os valores de resistência de aterramento e altura das fases para orientar o posicionamento dos para-raios sem o uso de ferramentas de otimização.

Outro ponto positivo da metodologia desenvolvida é a sua flexibilidade, sendo disponibilizadas várias formas de modelagem ao usuário do *software* desenvolvido. Como opções de modelagem, pode-se mencionar, por exemplo: i) inclusão ou não do efeito de ionização do solo no modelo da impedância de aterramento, ii) diferentes tipos de surtos atmosféricos, iii) cálculo dos parâmetros elétricos da linha considerando ou não a variação da frequência, entre outros.

A principal contribuição deste trabalho é a melhora do 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 na orientação, 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 ainda pouco explorado efeito de transferência do surto para as torres adjacentes devido à operação de para-raios.

Por último, vale ressaltar que a abordagem desenvolvida se torna menos efetiva se os dados da linha de transmissão não condizem com a realidade. Desse modo, é recomendado que as concessionárias, sempre que possível, realizem medições e atualizem a base de dados.

## 7.2.2 Estimativa de Desempenho da Linha de Transmissão

Em relação ao cálculo de desempenho da linha, o procedimento utilizado nesta dissertação faz uso de uma abordagem mais detalhada, na qual o ATP simula a incidência de descargas atmosféricas em cada uma das estruturas da LT. Ou seja, ao invés de utilizar valores médios, o desempenho é estimado considerando os dados de cada estrutura.

Um estudo foi realizado comparando a estimativa de desempenho do modelo empregado, com a estimativa fornecida pelo *software* IEEE-Flash e um histórico de medições a uma das LTs. O valor estimado pelo modelo utilizado neste trabalho é bem mais próximo ao valor calculado pelo histórico. Contudo, ressalta-se que somente uma das LTs apresentava um histórico de medições e que para validar esse resultado seria necessário aplicar o modelo a outras LTs que apresentem um histórico de desligamentos.

### 7.2.3 Tipos de Alocação

A metodologia utilizada neste trabalho também permite o posicionamento dos para-raios por torre ou fase. Comparando os resultados alcançados por cada uma das possibilidades de alocação para cada uma das LTs, constata-se que a alocação por fase indica a instalação de uma quantidade menor de para-raios. Contudo, o tempo de execução necessário para convergência na alocação por fase é superior.

Vale destacar que, a alocação por fase é mais flexível em consequência ao seu maior espaço de busca das soluções. Quando se consideram LTs trifásicas com circuito simples, por exemplo, a quantidade de arranjos possíveis é cubicamente maior para o posicionamento por fase. Enfatiza-se que todo o espaço de busca do posicionamento por torre está contido no espaço de busca do posicionamento por fase. Em função disso, espera-se que a alocação por fase sempre apresente uma quantidade menor ou no mínimo igual de dispositivos para-raios.

Contudo, outros aspectos devem ser levados em consideração para a adoção de uma solução, como por exemplos os custos relacionados a instalação e manutenção dos dispositivos para-raios. A alocação por fase tende a distribuir os para-raios em um número maior de estruturas o que está ligado a um aumento nos custos ligados a deslocamentos.

### 7.2.4 Algoritmos de Otimização Implementados

Uma consideração geral a respeito da performance dos algoritmos evolucionários, dentre eles o algoritmo genético (GA), é a de que eles possuem grande capacidade de exploração do espaço de busca, mas possuem limitações no que diz respeito ao refinamento local das soluções. Algoritmos mais voltados a busca local como os métodos de busca em vizinhança variável, por outro lado, apresentam uma grande capacidade de refinamento da solução, mas pecam na exploração global do espaço de soluções, sobretudo com o aumento do espaço de busca.

Buscando produzir uma solução genérica que equilibre a busca local e global das soluções, esta dissertação propôs uma abordagem híbrida entre o GA e a busca em vizinhança variável geral (GVNS) para o problema de posicionamento ótimo de para-raios em LTs. O algoritmo proposto foi aplicado em múltiplas linhas de transmissão e os seus resultados foram comparados aos obtidos através de dois algoritmos usados como base (GA e GVNS).

Um experimento planejado foi conduzido considerando o uso dos três algoritmos mencionados. Nesse experimento foi levado em conta a possibilidade de alocação por torre e por fase. Os resultados indicam que na média o algoritmo híbrido produz soluções com uma quantidade menor de para-raios do que o algoritmo GA, entretanto não existem evidências estatísticas que possibilitem a afirmação de superioridade do algoritmo híbrido em relação ao GVNS.

Por enquanto, sem a realização de um teste mais abrangente, recomenda-se o uso do algoritmo híbrido. Um fator não considerado no experimento realizado é o impacto da modelagem. Fatores como a consideração ou não do efeito de ionização do solo e a forma de onda do surto atmosférico podem provocar impactos nas soluções encontradas.

### 7.3 Propostas de Continuidade

Os desenvolvimentos deste trabalho sugerem algumas propostas de continuidade ligadas ao tema estudado. Dentre elas, pode-se citar a incorporação de uma abordagem probabilística por meio do método de Monte Carlo. Dessa maneira, os parâmetros da corrente de retorno e a sua localização poderiam ser gerados de forma aleatória a partir desse método. Vale destacar que, o uso desse método permitiria a inclusão do fenômeno de rupturas a meio do vão no modelo. Um valor entre 0 e 1 poderia ser produzido de forma aleatória, por exemplo, para indicar o local de incidência da descarga atmosférica (na torre ou no meio do vão).

Em relação aos resultados, poderiam ser realizados experimentos considerando uma maior quantidade de linhas de transmissão e com linhas que possuam características diferentes. Em outras palavras, seria interessante validar o comportamento da metodologia desenvolvida considerando LTs com diferentes: classes de tensão e quantidade de circuitos. Também seria interessante a comparação do posicionamento proposto pela metodologia desenvolvida com um caso de LT existente que possua para-raios bem instalados e apresente estatística satisfatória de funcionamento e manutenção.

Em trabalhos futuros, pode-se considerar também o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização que combine soluções para o aumento da proteção de uma LT em relação ao fenômeno de *backflashover*. Ou seja, uma solução que além do posicionamento de para-raios também considere a instalação de cabos “*underbuilt*”, melhoria da impedância de aterramento / instalação de cabos contrapeso nas bases das torres e aumento do nível básico de isolamento da linha.

---

## Referências Bibliográficas

---

- Alipio, R., Duarte, M. H., Dias, J. C., & 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)* (pp. 365–369).: IEEE.
- Andreatta, A. A. & Ribeiro, C. C. (2002). Heuristics for the phylogeny problem. *Journal of Heuristics*, 8(4), 429–447.
- 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](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>.
- Araújo, A. E. A. & Neves, W. L. A. (2005). *Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. Ed. da UFMG.
- Asadpourahmadchali, M., Niasati, M., & Alinejad-Beromi, Y. (2020). Improving tower grounding vs. insulation level to obtain the desired back-flashover rate for hv transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 123, 106171.
- Assis, S. d. C., Giudice Filho, E. B., Coutinho, R. M., Almeida, J. H. M., Teixeira, A. M. N., & 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., & 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 (pp. 250–253).: IET.



- Bakar, A. H. A., Talib, D. N. A., Mokhlis, H., & 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. (2019). Line arresters and underbuilt wire application in lightning protection of 110 kv and 220 kv overhead transmission lines. In *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)* (pp. 1–5): IEEE.
- Banjanin, M. S. (2018). Application possibilities of special lightning protection systems of overhead distribution and transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 100, 482–488.
- Banjanin, M. S. & 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.
- Berger, K. (1975). Parameters of lightning flashes. *Electra*, 41, 23–37.
- Brimberg, J., Hansen, P., Mladenović, N., & Taillard, E. D. (2000). Improvements and comparison of heuristics for solving the uncapacitated multisource weber problem. *Operations research*, 48(3), 444–460.
- Calenzani, H. T. & 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. & Vasconcelos, J. (2016). Posicionamento Ótimo de para-raios em linhas de transmissão via algoritmo genético e atp. In *CBA 2016 - Congresso Brasileiro de Automática*.
- Castro, W. S. (2016). Posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- Castro, W. S. (2022). *Alocação Ótima de Para-raios em Linhas de Transmissão via Algoritmos de Otimização Multiobjetivo Acoplados com o ATP*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- Castro, W. S., Lopes, I. J., Missé, S. L., & Vasconcelos, J. A. (2022). Optimal placement of surge arresters for transmission lines lightning performance improvement. *Electric Power Systems Research*, 202, 107583.
- Champely, S., Ekstrom, C., Dalgaard, P., Gill, J., Weibelzahl, S., Anandkumar, A., Ford, C., Volcic, R., & De Rosario, H. (2017). pwr: Basic functions for power analysis.

- Chowdhuri, P., Anderson, J., Chisholm, W., Field, T., Ishii, M., Martinez, J., Marz, M., McDaniel, J., McDermott, T., Mousa, A., et al. (2005). Parameters of lightning strokes: a review. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 346–358.
- CIGRE et al. (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *CIGRE SC33*. 10.
- Cunha, L. V. (2010). Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura a meio de vão. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- De Conti, A. & Visacro, S. (2007). Analytical representation of single-and double-peaked lightning current waveforms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(2), 448–451.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182–197.
- Dias, T., Lopes, I., Lima, A., Paulino, J., & Cardoso, E. (2010). Melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas—uma proposta de critério para aterramento de linhas de 230kv. *Transmission & Distribution Latin America, São Paulo*.
- Dunnett, C. W. (1955). A multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control. *Journal of the American Statistical Association*, 50(272), 1096–1121.
- EPE (2020). Balanço energético nacional 2020. *Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Disponível em:* < [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf).
- EPRI, A. (1982). *Transmission line reference book: 345 kV and above*. Electric Power Research Institute.
- EPRI, A. (2005). *Transmission Line Reference Book—200 kV and Above*. Electric Power Research Institute.
- Fligner, M. A. & Killeen, T. J. (1976). Distribution-free two-sample tests for scale. *Journal of the American Statistical Association*, 71(353), 210–213.
- Font, A., İlhan, S., & Özdemir, A. (2016). Line surge arrester application for a 380 kv power transmission line. In *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 1–4).: IEEE.

- Franco, J. L. d., Wendler, M. V., & Lira, E. A. (1999). Melhoria do desempenho de linhas de transmissão através da aplicação de para-raios.
- Gatta, F., Geri, A., Lauria, S., Maccioni, M., & Santarpia, A. (2012). An atp-empt monte carlo procedure for backflashover rate evaluation. In *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)* (pp. 1–6): IEEE.
- Gatta, F. M., Geri, A., Lauria, S., Maccioni, M., & 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., Mladenović, N., & Moreno Perez, J. A. (2010). Variable neighbourhood search: methods and applications. *Annals of Operations Research*, 175(1), 367–407.
- Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms.
- IEEE et al. (1985). A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines. *IEEE Trans. Power App. Syst*, 104(4), 919–932.
- INPE (2022). *INPE - Conceitos relacionados à Descargas Atmosféricas*. Disponível Em: <<http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/>>.
- INPE/ELAT (2022a). *INPE/ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica*. Disponível Em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/ocorrencia.na.terra.php>>.
- INPE/ELAT (2022b). *INPE/ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica*. Disponível Em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>>.
- INPE/ELAT (2022c). *INPE/ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica*. Disponível Em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/origem.php>>.
- Jesus, P. M. d. O. d. (2019). A new method to determine incremental costs of transmission lightning protection systems. *Electric Power Components and Systems*, 47(19-20), 1759–1774.
- Kaplan, J. O. & Lau, K. H.-K. (2021). The wglc global gridded lightning climatology and timeseries. *Earth System Science Data Discussions*, (pp. 1–25).
- Kastrup, O., Zanetta, L., Nigri, A., Brasil, D., Maldonado, P., & Moreira, F. (1996). Lightning performance assessment with line arresters. In *Transmission and Distribution Conference, 1996. Proceedings* (pp. 288–293): IEEE.
- Kezunovic, M. & 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*.

- Kindermann, G. (1992). *Descargas Atmosféricas*. Sagra-DC Luzzatto.
- Knowles, J. D. & Corne, D. W. (2000). M-paes: A memetic algorithm for multiobjective optimization. In *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*. CEC00 (Cat. No. 00TH8512), volume 1 (pp. 325–332): IEEE.
- Kobayashi, M., MiZuno, M., Aizawa, T., Hayashi, M., & Mitani, K. (1978). Development of zinc-oxide non-linear resistors and their applications to gapless surge arresters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (4), 1149–1158.
- Krehbiel, P. R., Rioussset, J. A., Pasko, V. P., Thomas, R. J., Rison, W., Stanley, M. A., & Edens, H. E. (2008). Upward electrical discharges from thunderstorms. *Nature Geoscience*, 1(4), 233–237.
- Lü, Z. & Hao, J.-K. (2010). A memetic algorithm for graph coloring. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 241–250.
- Lyons, W. A. (2006). The meteorology of transient luminous events-an introduction and overview. *Sprites, elves and intense lightning discharges*, (pp. 19–56).
- Martinez, J. & Castro-Aranda, F. (2009). Lightning performance analysis of an overhead transmission line protected by surge arresters. *IEEE Latin America Transactions*, 7(1).
- Matsuoka, M. (1971). Nonohmic properties of zinc oxide ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 10(6), 736.
- Meister, A. (2005). Modelagem de varistores de óxido de zinco para estudos de coordenação de isolamento. Master's thesis, Universidade de Brasília, Brasília - DF, Brasil.
- Mladenović, N. & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11), 1097–1100.
- Mobarakei, S., Sami, T., & Porkar, B. (2012). Back flashover phenomenon analysis in power transmission substation for insulation coordination. In *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on* (pp. 170–174): IEEE.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.
- Montgomery, D. C. & Runger, G. C. (2010). *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Ch. 10. John Wiley & Sons.
- Morales, J. A., Orduna, E. A., Cabral, R. J., & Bretas, A. S. (2014). Combined tacs-models for footing tower resistance considering ground ionization. In *2014 North American Power Symposium (NAPS)* (pp. 1–5): IEEE.

- Munukutla, K., Vittal, V., Heydt, G. T., Chipman, D., & Keel, B. (2010). A practical evaluation of surge arrester placement for transmission line lightning protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3), 1742–1748.
- Nucci, C. A. (2010). A survey on cigré and ieee procedures for the estimation of the lightning performance of overhead transmission and distribution lines. In *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (pp. 1124–1133).: IEEE.
- 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](http://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.7-RQ_2020.12.pdf).
- ONS (2021). ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais>.
- ONS (2022a). GLOSSÁRIO ONS. *Glossário do Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>.
- ONS (2022b). ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/>.
- Orille-Fernández, A., Rodríguez, S., & Gotes, M. (2004). Optimization of surge arrester's location. *IEEE transactions on power delivery*, 19(1), 145–150.
- Penna, E. et al. (2002). Metodologia para avaliação do risco de desligamento de linhas de transmissão.
- Rahman, N. A., Marican, A., Davies, A., Kadir, M., & Abdullah, N. (2011). A practical method for optimised earth electrode designs at transmission towers exposed to lightning. In *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning* (pp. 131–134).: IEEE.
- Ramos-Figueroa, O., Quiroz-Castellanos, M., Mezura-Montes, E., & Kharel, R. (2020). Variation operators for grouping genetic algorithms: A review. *Swarm and Evolutionary Computation*, (pp. 100796).
- Ribeiro, C. C. & Souza, M. C. (2002). Variable neighborhood search for the degree-constrained minimum spanning tree problem. *Discrete Applied Mathematics*, 118(1-2), 43–54.
- Rodrigues, A., Guimarães, G., Chaves, M., & Boaventura, W. (2014a). Análise de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas aplicada à coordenação de isolamento. *SBSE, Foz do Iguaçu - PR*.

- Rodrigues, A., Tamashiro, M., Piccini, A., Rezende, J., Guimarães, G., & Chaves, M. (2014b). Modelagem computacional da corrente de retorno em descargas atmosféricas para análise de desempenho de linhas de transmissão. *XII CEEL, Uberlândia-MG, Brasil*.
- Sadovic, S., Joulie, R., Tartier, S., & 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.
- Saunders, C. (2008). Charge separation mechanisms in clouds. *Planetary Atmospheric Electricity*, (pp. 335–353).
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611.
- Shariatinasab, R. & 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.
- Shariatinasab, R., Vahidi, B., Hosseinian, S., & Ametani, A. (2009). 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.
- Shih, C., Hayes, R., Nichols, D., Koch, R., Timoshenko, J., & Anderson, J. (1985). Application of special arresters on 138 kv lines of application power company. *IEEE Transactions on power Apparatus and Systems*, (10), 2857–2863.
- SIGA/ANEEL (2021). SIGA. *Sistema de Informações de Geração da ANEEL*. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/siga/>.
- Siingh, D., Singh, R., Kumar, S., Dharmaraj, T., Singh, A. K., Singh, A. K., Patil, M., & Singh, S. (2015). Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 134, 78–101.
- Silveira, F. H. & Visacro, S. (2019). Lightning performance of transmission lines: impact of current waveform and front-time on backflashover occurrence. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(6), 2145–2151.
- SIN/ANEEL (2019). SIN. *Ferramenta de mapas do SIN*. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>.
- SIN/ANEEL (2021). SIN. *Sistema Interligado Nacional*. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>.

- Stolzenburg, M. & Marshall, T. C. (2009). Electric field and charge structure in lightning-producing clouds. In *Lightning: Principles, instruments and applications* (pp. 57–82). Springer.
- Tarasiewicz, E., Rimmer, F., & Morched, A. (2000). Transmission line arrester energy, cost, and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(3), 919–924.
- Tarchini, J. & Gimenez, W. (2003). Line surge arrester selection to improve lightning performance of transmission lines. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, volume 2 (pp. 6–pp): IEEE.
- Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., & Milardić, V. (2009). Modeling of transmission line and substation for insulation coordination studies. In *3 days training: "Simulation & Analysis of Power System Transients with EMTP-RV"*, in cooperation with Graz University of Technology, University of Zagreb and University of Sarajevo, Dubrovnik, Hrvatska, 27.-29.04. 2009.
- Utomo, B. T., Nappu, M. B., Said, S. M., & Arief, A. (2018). The placement of the transmission lightning arrester (tla) at 150 kv network using fuzzy logic. In *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* (pp. 347–352): IEEE.
- Vahidi, B., Tavakoli, M. B., & Hosseinian, S. (2010). 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.
- Vasconcelos, J., Araújo, A., Braga, M., Lima, F., Lavarini, G., Alves, L., Martins, M., Teixeira, F., Senna, S., Tavares, I., et al. (2012). Software para posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão e de distribuição.
- Vasconcelos, J. A., Ramirez, J. A., Takahashi, R. H. C., & Saldanha, R. R. (2001). Improvements in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(5), 3414–3417.
- Viana, J. (2009). Estudo de aplicação de para-raios zno em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Visacro, S. (2002). *Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento*. ArtLiber Editora.
- Visacro, S. (2005a). *Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. Artliber.
- Visacro, S. (2005b). *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. Artliber Editora.

- Visacro, S., Mesquita, C. R., De Conti, A., & 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., & 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.
- Visacro, S., Silveira, F. H., Vale, M. H. M., & Pomar, G. D. (2021). Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures. *Electric Power Systems Research*, 195, 107134.
- Weck, K. (1985). Remarks to the current dependence of tower footing resistance. In *CIGRE Session* (pp. 33–85).
- Yair, Y. (2008). Charge generation and separation processes. *Space science reviews*, 137(1), 119–131.
- Yu, X. & Gen, M. (2010). *Introduction to evolutionary algorithms*. Springer Science & Business Media.