



Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

---

# Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão

---

Wallace da Silva Castro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos

Belo Horizonte, 10 de outubro de 2016



---

---

# Dedicatória

---

*Dedico este trabalho aos meus pais Geraldo José de Castro (in memoriam) e Maria Helena de Castro.*



---

---

# Agradecimentos

---

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por iluminar o meu caminho e por me ajudar a vencer os obstáculos que a vida impõe.

A minha mãe Maria Helena, pelo grande amor, carinho e o imenso apoio em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos Wiliam e Wanderson, pelo companheirismo, força e os momentos de alegria.

A Luciene por todo o amor, carinho e compreensão.

Ao meu pai Geraldo e aos meus avós que, lá de cima, com certeza estão guiando o meu caminho.

Ao professor João Antônio de Vasconcelos, por todas as oportunidades que me tem dado, pela orientação e principalmente pela paciência.

Aos amigos do Laboratório de Computação Evolucionária, pelo companheirismo e amizade.

Aos professores e funcionários ligados ao PPGEE que sempre me ajudaram quando precisei.

Ao CNPq por ter financiado boa parte dos meus estudos.

A todos, o meu muito obrigado.



---

---

# Epígrafe

---

*“Buscai primeiro o reino de Deus, e a sua justiça, e todas estas coisas vos serão acrescentadas”*

Mateus 6,33



---

# Sumário

---

<b>Resumo</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xxii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xxiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 O Problema de Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Contribuições . . . . .	3
1.4 Organização do texto . . . . .	4
<b>2 O Problema de Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão</b>	<b>7</b>
2.1 Descrição do Problema . . . . .	7
2.2 Tópicos Complementares . . . . .	9
2.2.1 Linhas de Transmissão . . . . .	9
2.2.2 Descargas Atmosféricas . . . . .	12
2.2.3 Para-raios em Linhas de Transmissão . . . . .	14
2.3 Desligamentos em Linhas de Transmissão . . . . .	15
2.3.1 Definições e Principais Causas . . . . .	15
2.3.2 Índices que Mensuram os Desligamentos . . . . .	16
2.3.3 Parâmetros que Influenciam nos Desligamentos Causados por Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão . . . . .	19
2.4 Revisão Bibliográfica . . . . .	21
2.5 Conclusão . . . . .	23
<b>3 Metodologia: Otimização</b>	<b>25</b>
3.1 Descrição Geral da Metodologia . . . . .	25
3.2 Introdução aos Algoritmos Genéticos . . . . .	26
3.3 Algoritmo Genético Projetado para Solucionar o Problema de Posicionamento Ótimo de Para-raios em LTs . . . . .	27

3.3.1	Representação dos Indivíduos . . . . .	29
3.3.2	Criação da População Inicial . . . . .	30
3.3.3	Avaliação da População . . . . .	31
3.3.4	Correção dos Indivíduos . . . . .	32
3.3.5	Seleção, Cruzamento e Mutação . . . . .	32
3.4	Estratégias para Reduzir o Custo Computacional do Processo . . . . .	36
3.4.1	Avaliação dos Indivíduos de Forma Concorrente . . . . .	37
3.4.2	Avaliação dos Indivíduos com Auxílio de uma Memória . . . . .	38
3.5	Conclusão . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Metodologia: Cálculo de Transitórios via ATP</b>	<b>41</b>
4.1	Modelo Computacional . . . . .	41
4.1.1	Descarga Atmosférica . . . . .	41
4.1.2	Vãos de Linha . . . . .	43
4.1.3	Torres . . . . .	45
4.1.4	Para-raios de Óxido de Zinco . . . . .	46
4.1.5	Aterramento . . . . .	47
4.2	Resumo das Opções de Modelagem . . . . .	49
4.3	Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas	49
4.3.1	Número de Descargas Atmosféricas . . . . .	50
4.3.2	Suportabilidade dos Isoladores . . . . .	51
4.3.3	Cálculo da Taxa de Desligamentos . . . . .	52
4.4	Validação do Modelo Computacional . . . . .	53
4.5	Conclusão . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Resultados: Estudo de uma Linha de Transmissão de 69 kV</b>	<b>57</b>
5.1	Dados Utilizados . . . . .	57
5.2	Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas	59
5.2.1	Sobretensão na Cadeia de Isoladores . . . . .	59
5.2.2	Cálculo da Taxa de Desligamentos . . . . .	63
5.3	Alocação Ótima de Para-raios . . . . .	64
5.3.1	Alocação por Torre . . . . .	64
5.3.2	Alocação por Fase . . . . .	67
5.4	Impactos da Modelagem . . . . .	69
5.4.1	Quantidade de Vãos Adjacentes . . . . .	69
5.4.2	Surto Atmosférico . . . . .	70
5.4.3	Ionização do Solo . . . . .	72
5.4.4	Modelos de Linha . . . . .	74
5.5	Conclusão . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Resultados: Estudos Múltiplos</b>	<b>77</b>
6.1	Dados Utilizados . . . . .	77
6.1.1	Linha 2 . . . . .	77
6.1.2	Linha 3 . . . . .	78
6.1.3	Linha 4 . . . . .	81
6.1.4	Linha 5 . . . . .	81

6.1.5	Linha 6 . . . . .	82
6.1.6	Linha 7 . . . . .	83
6.2	Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas	85
6.3	Alocação Ótima de Para-raios . . . . .	86
6.4	Impactos da Modelagem . . . . .	90
6.4.1	Quantidade de Vãos Adjacentes . . . . .	90
6.4.2	Surto Atmosférico . . . . .	91
6.4.3	Ionização do Solo . . . . .	92
6.4.4	Modelos de Linha . . . . .	94
6.5	Tipos de Alocação . . . . .	96
6.5.1	Planejamento Experimental . . . . .	96
6.5.2	Análise Exploratória dos Dados . . . . .	97
6.5.3	Análise Estatística . . . . .	97
6.5.4	Verificação das Premissas . . . . .	98
6.5.5	Conclusão . . . . .	98
6.6	Conclusão . . . . .	99
<b>7</b>	<b>Conclusões e Propostas de Continuidade</b>	<b>101</b>
7.1	Considerações Iniciais . . . . .	101
7.2	Avaliações Conclusivas . . . . .	101
7.2.1	Conclusões Gerais . . . . .	101
7.2.2	Tipos de Alocação . . . . .	102
7.2.3	Estratégias de Avaliação . . . . .	103
7.2.4	Impactos da Modelagem . . . . .	104
7.3	Propostas de Continuidade . . . . .	104
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>110</b>



---

# Resumo

---

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão pode ocasionar um número excessivo de desligamentos, ainda que a linha em questão seja blindada por cabos guarda. Nessas condições, uma das soluções encontradas para melhorar o desempenho da linha é a utilização de dispositivos para-raios. Contudo, para que não haja um gasto excessivo de recursos financeiros, é necessário identificar os locais onde tais equipamentos deverão ser instalados. Assim, este trabalho apresenta uma aplicação computacional para o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. O *software* pode ser aplicado a qualquer LT com cabo para-raios, desde que se tenham à disposição todas as informações necessárias para o bom funcionamento da aplicação. Além disso, a metodologia permite que a alocação de para-raios seja feita por torre ou fase e ainda contempla várias formas de modelagem do problema. Em relação aos resultados, as simulações são feitas considerando diferentes linhas de transmissão com circuito simples ou duplo e que fazem uso de um ou dois cabos para-raios. Os testes indicam que a aplicação cumpre seu papel, uma vez que além de melhorar o desempenho das linhas, a mesma considera a alocação de recursos de forma ótima, isto é, só utiliza a quantidade de para-raios necessária para atingir a taxa de desligamentos previamente definida. Além disso, um estudo sobre as diferentes formas de modelagem do problema é apresentado. Nesta análise, é visto que dependendo da forma de representação adotada, os resultados podem divergir de forma significativa. Por fim, é importante dizer que este trabalho se baseia na metodologia desenvolvida no projeto ANEEL- P&D 0377 - 06/2005 e, portanto, trata-se de uma continuidade desse estudo.

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



---

---

# Abstract

---

The incidence of lightning on transmission lines can cause an excessive number of faults, even if the line in question is protected by guard wire. Under these conditions, one of the solutions found to improve line performance is the use of surge arresters. However, so that there is not an excessive expenditure of resources, it is necessary to identify the places where such equipment should be installed. Thus, this work proposes the development of a computer application that allows the determination of the optimal placement of the surge arrester in transmission lines. The software can be applied to any transmission line with guard wire, provided they have at their disposal all the necessary information for the correct operation of the application. Furthermore, the methodology allows the allocation of surge arresters is made by tower or phase and also includes various forms of modeling the problem. Regarding the results, simulations are performed considering different transmission lines with single or double circuit and using one or two guard wires. The tests indicate that the application meets its objective, because as well as improve the performance of transmission lines, it considers the resource allocation optimally. In other words, the application only uses the amount of surge arresters necessary to reach the faults rate previously established. In addition, a study of the different forms of modeling the problem is presented. In this analysis, it is seen that depending on the adopted representation, the results may differ significantly. Finally, it is important to say that this work is based on the methodology developed in the project ANEEL- P&D 0377 - 06/2005 and therefore it is a continuation of this study.

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



---

# Lista de Figuras

---

2.1	Situação característica de um <i>flashover</i> . Figura retirada e adaptada de (Cunha, 2010). . . . .	8
2.2	Situação característica de um <i>backflashover</i> . Figura retirada e adaptada de (Cunha, 2010). . . . .	8
2.3	Percentuais da produção de energia quanto à origem. Dados fornecidos pelo ONS referentes ao ano de 2014 (ONS, 2014). . . . .	10
2.4	Extensão das linhas de transmissão do SIN - km. Dados fornecidos pelo ONS referentes ao ano de 2016. Figura retirada de (ONS, 2016). . . . .	11
2.5	Composição percentual da extensão das linhas de transmissão do SIN - km. Dados fornecidos pelo ONS referentes ao ano de 2014 (ONS, 2014). . . . .	12
2.6	Processo de formação de uma descarga negativa nuvem-solo. a) Separação de cargas e início do canal precursor da descarga. b) Propagação do canal descendente. c) Propagação do canal ascendente. d) Formação do canal de descarga e surgimento da corrente de retorno. Figura retirada e adaptada de (INPE/ELAT, 2016). . . . .	13
2.7	Exemplos de arranjo na montagem de para-raios em linhas de transmissão. a) Instalação em braço auxiliar. b) Instalação suspensa. c) Instalação em mísula. Figura retirada e adaptada de (Balestro Ltda, 2016). . . . .	14
2.8	Características construtivas de um para-raios de ZnO sem espaçamento interno de ar. Figura retirada de (de Britto, 2006). . . . .	16

2.9	Principais causas dos desligamentos não programados das linhas de transmissão da Rede Básica do SIN. Ano de 2008 e primeiro semestre de 2009. Figura retirada de (de Souza Filho, 2013). . . . .	17
2.10	Frequência global e distribuição de descargas atmosféricas observadas a partir do espaço. Figura retirada de (GHRC, 2016). . . . .	20
3.1	Estrutura funcional da metodologia. . . . .	25
3.2	Estrutura clássica de um algoritmo genético. . . . .	27
3.3	Fluxograma do algoritmo de posicionamento ótimo de para-raios. . . . .	28
3.4	Representação de um indivíduo na alocação por torre. Linha hipotética formada por cinco torres e um circuito simples. . . . .	29
3.5	Representação de um indivíduo na alocação por fase. Linha hipotética formada por cinco torres e um circuito simples. . . . .	30
3.6	Curva de probabilidade utilizada para remover ou adicionar para-raios. . . . .	34
3.7	Procedimento criado para avaliação dos indivíduos de forma concorrente. . . . .	38
3.8	Exemplo de situação onde as configurações de dois indivíduos se diferem apenas no último caractere. . . . .	39
3.9	Diagrama da memória implementada nesta dissertação. . . . .	39
4.1	Trecho de linha modelado no ATPDraw. . . . .	42
4.2	Forma de onda representativa das correntes medianas de primeiras descargas de retorno registradas na Estação Morro do Cachimbo. Figura retirada de (Rodrigues et al., 2014b). . . . .	43
4.3	Forma de onda da corrente: dupla exponencial, triangular e CIGRE. . . . .	44
4.4	Impedâncias de surto para três tipos de estruturas. Figura retirada de (EPRI, 1982). . . . .	46

4.5	Representação das torres por dois trechos de linha de transmissão vertical ligados em série. . . . .	46
4.6	Curva $V \times I$ do para-raios. . . . .	47
4.7	Exemplo de uma curva $V \times t$ para uma cadeia de isoladores com comprimento igual a 0,87 metros. . . . .	51
4.8	Comparação entre os valores estimados de corrente crítica. O gráfico exibe os valores de $I_{cc}$ considerando as fases de cada torre na sequência $ABC$ . . . . .	54
5.1	Perfil da altura das torres. Primeira linha de transmissão analisada. . . .	58
5.2	Perfil da resistência de aterramento das torres. Primeira linha de transmissão analisada. . . . .	58
5.3	Perfil do comprimento dos vãos posteriores. Primeira linha de transmissão analisada. . . . .	58
5.4	Configuração inicial de para-raios da primeira linha de transmissão analisada. Utilização de 6 para-raios. . . . .	59
5.5	Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 45 kA. . . . .	61
5.6	Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 126,40 kA. . . . .	61
5.7	Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 126,40 kA e para-raios na fase A. . . . .	62
5.8	Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 126,40 kA e para-raios em todas as fases. . . .	62
5.9	Valores estimados de corrente crítica para a linha em análise. O gráfico exibe os valores de $I_{cc}$ considerando as fases de cada torre na sequência $ABC$ . . . . .	63

5.10	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização. Desempenho de 4,72 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 39 para-raios. . . . .	65
5.11	Valores estimados de corrente crítica para a solução encontrada. O gráfico exibe os valores de $I_{cc}$ considerando as fases de cada torre na sequência <i>ABC</i> . . . . .	65
5.12	Evolução da <i>fitness</i> e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração. . . . .	66
5.13	Distribuição da quantidade de para-raios e do desempenho da linha. Para cada tipo de alocação são realizadas trinta execuções. . . . .	67
5.14	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização. Desempenho de 4,94 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 35 para-raios. Alocação por fase. . . . .	68
5.15	Evolução da <i>fitness</i> e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração. Alocação por fase. . . . .	68
5.16	Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases <i>ABC</i> ) considerando as duas formas de representação do vãos adjacentes. A elipse destaca a região de maior diferença entre os valores obtidos. . . . .	70
5.17	Formas de onda da corrente: representativa, dupla exponencial, CIGRE e triangular. . . . .	71
5.18	Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases <i>ABC</i> ) considerando as quatro formas de representação do surto atmosférico. . . . .	72
5.19	Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases <i>ABC</i> ) considerando os dois tipos de representação do aterramento. . . . .	73
5.20	Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases <i>ABC</i> ) considerando os três tipos de representação dos vãos de linha. As elipses destacam as regiões de maior diferença entre os valores obtidos. . . . .	75
6.1	Perfil da altura das torres. Segunda linha de transmissão. . . . .	78

6.2	Perfil da resistência de aterramento das torres. Segunda linha de transmissão. . . . .	78
6.3	Perfil do comprimento dos vãos posteriores das torres. Segunda linha de transmissão. . . . .	79
6.4	Configuração inicial de para-raios da segunda LT. Utilização de 12 para-raios. . . . .	79
6.5	Perfil da resistência de aterramento das torres. Terceira linha de transmissão. . . . .	80
6.6	Perfil do comprimento dos vãos posteriores das torres. Terceira linha de transmissão. . . . .	80
6.7	Configuração inicial de para-raios da terceira LT. Utilização de 45 para-raios. . . . .	80
6.8	Perfil da resistência de aterramento das torres. Quarta linha de transmissão. . . . .	81
6.9	Perfil da resistência de aterramento das torres. Quinta linha de transmissão.	82
6.10	Perfil da densidade de descargas atmosféricas nas localidades das torres. Sexta linha de transmissão. . . . .	83
6.11	Perfil da resistência de aterramento das torres. Sexta linha de transmissão.	83
6.12	Geometria da torre do tipo convencional de linha trifásica de 500 kV. Figura retirada de (Rodrigues et al., 2014a). . . . .	84
6.13	Perfil da densidade de descargas atmosféricas nas localidades das torres. Sétima linha de transmissão. . . . .	84
6.14	Perfil da resistência de aterramento das torres. Sétima linha de transmissão.	85
6.15	Distribuição da quantidade de para-raios e do desempenho da linha de transmissão. . . . .	87

6.16	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a segunda LT. Desempenho de 4,68 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 24 para-raios. . . . .	88
6.17	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a terceira LT. Desempenho de 4,99 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 36 para-raios. . . . .	88
6.18	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a quarta LT. Desempenho de 0,99 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 66 para-raios. . . . .	88
6.19	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a quinta LT. Desempenho de 0,99 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 114 para-raios. . . . .	89
6.20	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a sexta LT. Desempenho de 0,97 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 60 para-raios. . . . .	89
6.21	Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a sétima LT. Desempenho de 0,97 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 45 para-raios. . . . .	89
6.22	Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Modelagem com 3 ou 4 vãos adjacentes ao local de incidência da descarga. . .	91
6.23	Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Efeito das diferentes formas de representação do surto atmosférico. . . . .	93
6.24	Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Modelagem considerando ou não o efeito da ionização do solo. . . . .	94
6.25	Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Efeito das diferentes formas de representação dos parâmetros elétricos da linha.	95
6.26	Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Alocação por fase ou torre. . . . .	98
6.27	Validação da premissa de normalidade dos resíduos. . . . .	99

---

---

## Lista de Tabelas

---

2.1	Número máximo de desligamentos por descargas atmosféricas da LT estabelecido pelo ONS. Adaptada de (ONS, 2011). . . . .	17
2.2	Limites de continuidade por unidade consumidora com faixa de tensão maior ou igual a 69 kV e inferior a 230 kV. Retirada de (ANEEL, 2012). .	19
4.1	Parâmetros utilizados para modelagem da fonte de corrente de Heidler.	43
4.2	Trechos de linha utilizados na simulação de uma LT com 50 torres. Por motivos de visualização, apenas alguns trechos são mostrados. . . . .	45
4.3	Resumo das opções de modelagem contempladas no <i>software</i> . . . . .	49
4.4	Configurações consideradas padrões nesta dissertação. . . . .	49
4.5	Características gerais da linha de transmissão utilizada na validação. . .	53
4.6	Modelagem do <i>software</i> utilizada na validação. . . . .	54
5.1	Características gerais da primeira linha de transmissão analisada. . . . .	59
5.2	Características da torre de número 5. Primeira linha de transmissão analisada. . . . .	60

5.3	Configurações utilizadas no processo de otimização. . . . .	64
5.4	Análise do desempenho do algoritmo. Média de dez execuções considerando a alocação por torre. . . . .	66
5.5	Análise do desempenho do algoritmo. Média de dez execuções considerando a alocação por fase. . . . .	69
6.1	Características gerais da segunda linha de transmissão. . . . .	78
6.2	Características gerais da terceira linha de transmissão. . . . .	79
6.3	Características gerais da quarta linha de transmissão. . . . .	81
6.4	Características gerais da quinta linha de transmissão. . . . .	82
6.5	Características gerais da sexta linha de transmissão. . . . .	82
6.6	Características gerais da sétima linha de transmissão. . . . .	84
6.7	Desempenhos especificados e estimados. . . . .	85
6.8	Configurações utilizadas no processo de otimização. . . . .	86
6.9	Configurações gerais do teste. Quantidade de vãos adjacentes. . . . .	91
6.10	Configurações gerais do teste. Surto atmosférico. . . . .	92
6.11	Configurações gerais do teste. Ionização do solo. . . . .	93
6.12	Características gerais do teste. Modelos de linha. . . . .	95

# Introdução

---

Este capítulo aborda as principais justificativas e motivações para o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, os objetivos, as contribuições e a organização do texto também são apresentados.

## 1.1 O Problema de Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2015 (EPE, 2015), elaborado e publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a geração de energia elétrica brasileira se dá em sua maioria por usinas hidrelétricas. Como é de conhecimento, muitas vezes elas estão localizadas a uma distância considerável dos centros consumidores e, por esse motivo, o transporte da energia é de fundamental importância para atender a demanda do país. Sabe-se que esse transporte é realizado por meio de uma série de equipamentos. Dentre eles, destacam-se as linhas de transmissão (LT).

Dependendo de sua posição, a linha de transmissão pode se destacar em relação ao ambiente local e se tornar um ponto preferencial para a incidência de descargas atmosféricas. Não por coincidência, a principal causa de desligamentos forçados de uma LT é exatamente a incidência de descargas atmosféricas (EPRI, 2005) (Araújo e Neves, 2005). Em contrapartida, os órgãos que regulamentam o setor elétrico impõem limites cada vez mais rígidos, no sentido de prezar pela qualidade da energia que é fornecida aos consumidores (ONS, 2011) (ANEEL, 2012).

Da literatura (EPRI, 2005), sabe-se que em determinados casos, ainda que a linha de transmissão seja blindada por cabos para-raios, pode haver um número excessivo de

desligamentos causados pelo *backflashover*<sup>1</sup>. Nessas condições, o uso adicional de para-raios de óxido de zinco (ZnO) tem sido uma das soluções encontradas para melhorar o desempenho da linha. Contudo, é necessário identificar os locais onde os para-raios deverão ser instalados para que não haja um gasto excessivo de recursos financeiros.

Em outras palavras, o problema de posicionamento ótimo de para-raios em LTs pode ser formulado de acordo com a seguinte questão: dada uma linha de transmissão, quais são os pontos onde os para-raios deverão ser instalados para permitir uma proteção da linha e, ao mesmo tempo, assegurar uma solução viável economicamente? A resposta a esta pergunta deve levar em consideração vários aspectos como: o comprimento e a altura das linhas de transmissão, a densidade local de descargas atmosféricas, a impedância de aterramento, entre outros parâmetros (EPRI, 2005) (Vasconcelos et al., 2012).

Por se tratar de um problema complexo, o uso de ferramentas de otimização pode ser uma alternativa viável para a resolução do mesmo. Da literatura (Vasconcelos et al., 2012), sabe-se que esse problema envolve o acoplamento de duas áreas de conhecimento: otimização e transitórios eletromagnéticos. A primeira permite buscar uma solução ótima<sup>2</sup> para o problema. Já a segunda é necessária devido à inclusão de descargas atmosféricas, as quais podem ser analisadas via programa para cálculo de transitórios (Araújo e Neves, 2005).

Diante disso, esta dissertação apresenta um *software* para o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. Para tal, a metodologia faz uso de um algoritmo genético (AG) (Holland, 1992) (Vasconcelos et al., 2001) e do ATP (do inglês, *Alternative Transient Program*) (Prikler e Høidalen, 2002). Vale ressaltar que, como a principal causa de desligamentos não programados da linha de transmissão é a incidência direta de descargas atmosféricas, a aplicação visa fornecer uma solução adequada para esse problema.

Além disso, com a utilização de para-raios, os efeitos danosos causados pelas descargas atmosféricas são amenizados, uma vez que a proteção contra as sobretensões é aumentada. Isto é de fundamental importância para garantir o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, dentro de níveis de segurança suportáveis pelos equipamentos elétricos.

---

<sup>1</sup>O *backflashover* ocorre quando a descarga atinge diretamente a torre ou o próprio cabo-guarda. Nesta situação, caso o valor da impedância de aterramento não seja suficientemente baixo, a sobretensão resultante no isolamento pode alcançar valores elevados e resultar em uma descarga disruptiva.

<sup>2</sup>Neste trabalho, uma solução ótima é considerada como uma aproximação da melhor solução possível.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma metodologia que permite reduzir os desligamentos das linhas de transmissão, com a utilização de um *software* para o posicionamento ótimo de para-raios. Essa melhoria é fundamental para garantir o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, minimizando os efeitos danosos causados pelas descargas atmosféricas. Contudo, além de reduzir os desligamentos da linha, também é necessário identificar os locais onde os para-raios deverão ser instalados, para que não haja um gasto excessivo de recursos financeiros.

Vale ressaltar que este estudo parte do princípio de que as linhas de transmissão são blindadas por ao menos um cabo para-raios. Isso porque, o intuito é proteger a linha contra desligamentos causados por *backflashover*. Outro importante aspecto a ser destacado é a flexibilidade e o caráter genérico da metodologia. A mesma pode ser aplicada em qualquer LT que possua cabo para-raios, desde que se tenham à disposição todas as informações necessárias para o bom funcionamento do *software*.

Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Levantamento bibliográfico;
- Formulação do problema do ponto de vista da otimização;
- Desenvolvimento do módulo para estimar o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Essa etapa contará com o suporte do *software* ATP para a realização dos cálculos de transitórios eletromagnéticos;
- Desenvolvimento do módulo de otimização. Essa parte contará com a implementação de um algoritmo genético em linguagem de programação C++;
- Integração entre os módulos desenvolvidos e ajustes finais;
- Simulações e análises dos resultados.

## 1.3 Contribuições

Nesta dissertação, pode-se destacar como as principais contribuições: i) o desenvolvimento de uma metodologia formada pela interação entre um algoritmo genético

e o ATP para solucionar o problema de posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão; ii) um algoritmo genético especialmente modificado para solucionar o problema descrito; iii) o desenvolvimento de um módulo para estimar o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas com a utilização do *software* ATP.

Além disso, é importante ressaltar que este trabalho se baseia na metodologia desenvolvida no projeto ANEEL- P&D 0377 - 06/2005 e, portanto, é uma continuidade desse estudo. No entanto, existem certas diferenças que devem ser ressaltadas como, por exemplo, a utilização do ATP para o cálculo de transitórios eletromagnéticos. Além de agregar confiabilidade ao estudo, uma vez que o ATP é utilizado em diversas partes do mundo, este conta com uma série de recursos disponíveis que permitem uma maior flexibilidade à aplicação desenvolvida.

Quanto ao algoritmo genético, algumas operações são especialmente modificadas para solucionar o problema em questão. Pode-se citar, por exemplo, a forma de avaliação dos indivíduos (*fitness*) e os processos de seleção, cruzamento e mutação. Por fim, em relação às publicações, até o presente momento, o seguinte trabalho foi aceito e apresentado no Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2016:

- Castro, W.; Vasconcelos, J. A.. Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão via Algoritmo Genético e ATP. CBA 2016 - Congresso Brasileiro de Automática, Vitória (ES) de 05 a 07 de outubro de 2016.

## 1.4 Organização do texto

O presente texto está dividido em sete capítulos. O primeiro abordou uma breve introdução sobre o tema e apresentou as motivações e os objetivos deste trabalho. No Capítulo 2, uma descrição do problema é apresentada juntamente com um panorama das linhas de transmissão no Brasil. Por fim, aspectos relevantes sobre o desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas são abordados.

Os capítulos 3 e 4 descrevem a metodologia utilizada neste trabalho. O primeiro apresenta a parte de otimização descrevendo detalhes sobre o algoritmo genético implementado. Já o segundo aborda o módulo desenvolvido para o cálculo do desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas. Neste último caso, o modelo computacional construído no ATP é apresentado em detalhes.

Os capítulos 5 e 6 são os responsáveis por apresentar os resultados obtidos com o uso do *software* desenvolvido. O primeiro faz uma análise mais específica considerando o estudo de uma linha de transmissão de 69 kV. Enquanto que o segundo realiza um estudo mais abrangente envolvendo diferentes linhas de transmissão.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho, juntamente com a proposição de atividades futuras.



# O Problema de Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão

---

Este capítulo tem por objetivo apresentar e discutir o problema de posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. Além disso, para contextualizar o problema, é apresentado um panorama das linhas de transmissão no Brasil, bem como alguns aspectos relevantes sobre o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Por fim, uma revisão bibliográfica sobre o tema é abordada.

## 2.1 Descrição do Problema

Como mencionado, a incidência direta de descargas atmosféricas em LTs consiste na principal causa de desligamentos não programados da linha. Da literatura (EPRI, 2005), sabe-se que os principais fenômenos associados a esse tipo de desligamento são: o *flashover* e o *backflashover*.

O *flashover* ocorre quando uma descarga atmosférica atinge diretamente um cabo condutor. Além da onda de corrente associada, uma onda de tensão com elevada amplitude também se propaga. Em situações onde a sobretensão é maior que a suportabilidade do isolador, uma descarga disruptiva pode ocorrer estabelecendo um arco elétrico entre o cabo condutor e a torre. Através deste arco, a corrente da descarga flui para a estrutura aterrada e segue em direção ao solo. A partir daí, caso o arco elétrico permaneça, haverá um fluxo da corrente de frequência industrial do condutor para o solo, caracterizando o curto-circuito fase-terra. Essa situação é ilustrada na Figura 2.1.

Com o objetivo de proteger a linha de transmissão, normalmente são instalados cabos para-raios no topo da torre. Esse cabo é responsável por atrair para si descargas atmosféricas que, na sua ausência, atingiriam diretamente os condutores energizados.

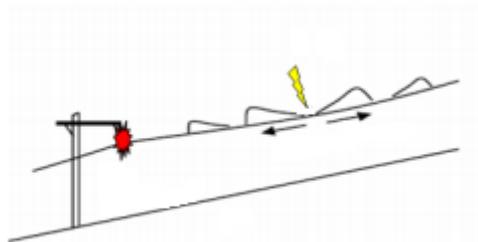


Figura 2.1: Situação característica de um *flashover*. Figura retirada e adaptada de (Cunha, 2010).

No entanto, mesmo as linhas blindadas por cabos para-raios podem sofrer desligamentos causados pelo *flashover*. Vale ressaltar que, dependendo da amplitude da corrente de retorno e do posicionamento dos cabos de blindagem, a incidência da descarga pode ocorrer nos condutores energizados mais expostos. Nesta situação, ocorre o fenômeno conhecido como “falha de blindagem” e pode resultar em um *flashover*, se a sobretensão resultante for maior que a suportabilidade do isolamento (EPRI, 2005).

Entretanto, em LTs protegidas por cabos para-raios, o *backflashover* é o mecanismo mais comum de desligamentos não programados da linha. Este fenômeno configura-se quando a descarga atinge diretamente a torre ou o próprio cabo-guarda (Figura 2.2). Nesta situação, caso o valor de impedância de aterramento não seja suficientemente baixo, a sobretensão resultante no isolamento pode alcançar valores elevados e resultar em uma descarga disruptiva. Mais especificamente, um arco elétrico é estabelecido da estrutura aterrada para o condutor energizado (EPRI, 2005).

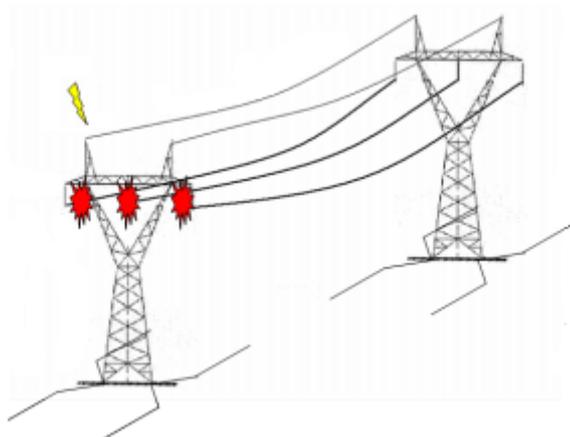


Figura 2.2: Situação característica de um *backflashover*. Figura retirada e adaptada de (Cunha, 2010).

Além da impedância de aterramento, a densidade de descargas atmosféricas é um dos fatores que mais afeta a quantidade de desligamentos da linha. Caso esses parâmetros sejam suficientemente elevados, pode haver um número excessivo de desligamentos causados por *backflashover* (EPRI, 2005) (Viana, 2009). Nestas condições, o uso de dispositivos para-raios é uma das soluções encontradas para reduzir o número de desligamentos da linha. Contudo, para que não haja um gasto excessivo de recursos, é necessário identificar os locais onde os para-raios deverão ser instalados.

Vale ressaltar que a efetividade na aplicação dos para-raios depende das características da linha de transmissão sob análise. Quanto pior for as condições topográficas e de resistividade do solo da região, por exemplo, maior será o efeito da aplicação dos para-raios.

## 2.2 Tópicos Complementares

Para contextualizar o problema descrito, é necessário apresentar algumas informações relevantes como, por exemplo, o panorama de linhas de transmissão no Brasil e alguns conceitos envolvidos no fenômeno das descargas atmosféricas. Sendo assim, a presente seção aborda os tópicos: Linhas de Transmissão, Descargas Atmosféricas e Para-raios em Linhas de Transmissão.

### 2.2.1 Linhas de Transmissão

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável por coordenar e controlar a operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN). O mesmo está sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANEEL (ONS, 2016). A ANEEL, por sua vez, foi criada com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal (ANEEL, 2016).

De acordo com dados fornecidos pelo ONS (ONS, 2014), a geração de energia elétrica brasileira se dá em sua maioria por usinas hidrelétricas. A Figura 2.3 mostra os percentuais da produção de energia quanto à origem da mesma. Os dados são referentes ao ano de 2014.

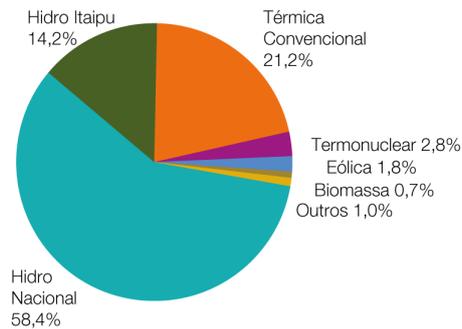


Figura 2.3: Percentuais da produção de energia quanto à origem. Dados fornecidos pelo ONS referentes ao ano de 2014 (ONS, 2014).

De forma mais precisa, 72,5% de toda a energia gerada é proveniente de usinas hidrelétricas (Hidro Nacional e Hidro Itaipu). O percentual restante, 27,5%, compreende outras formas de geração como a: térmica convencional (21,2%), termonuclear (2,8%), eólica (1,8%), biomassa (0,7%), entre outras (1,0%).

Como a maior parte das usinas hidrelétricas está localizada a uma distância considerável dos centros consumidores, o transporte de energia e, conseqüentemente, as linhas de transmissão são de extrema importância para garantir a qualidade da energia que é entregue aos consumidores. A Figura 2.4 apresenta o mapa do Brasil com as linhas de transmissão do SIN classificadas pelo nível de tensão. Vale ressaltar que a Rede Básica do SIN é formada por equipamentos com nível de tensão igual ou superior a 230 kV. Equipamentos com tensão inferior são classificados como Demais Instalações de Transmissão e não fazem parte da Rede Básica do SIN (ANEEL, 2004).

O Sistema Interligado conta com mais de 125.000 km de linhas de transmissão. Para se ter uma ideia desse tamanho, a distância em linha reta do Oiapoque (Amapá) ao Chuí (Rio Grande do Sul) é de aproximadamente 4.180 km. Em outras palavras, pode-se dizer que a extensão das linhas de transmissão do SIN corresponde a quase 30 vezes a distância entre os extremos norte e sul do país. Esses números mensuram o quão grande é o papel das linhas de transmissão no Brasil.

A Figura 2.5, por sua vez, exhibe a composição da extensão das LTs em termos dos níveis de tensão. Os dados mostram que, no ano de 2014, mais de 93.000 km eram referentes às linhas de transmissão com níveis de tensão iguais a 230 ou 500 kV. Esse número corresponde a mais de 74% da totalidade. As demais classes: 345, 440, 600 (CC) e 750 kV somam o percentual restante, 26%.

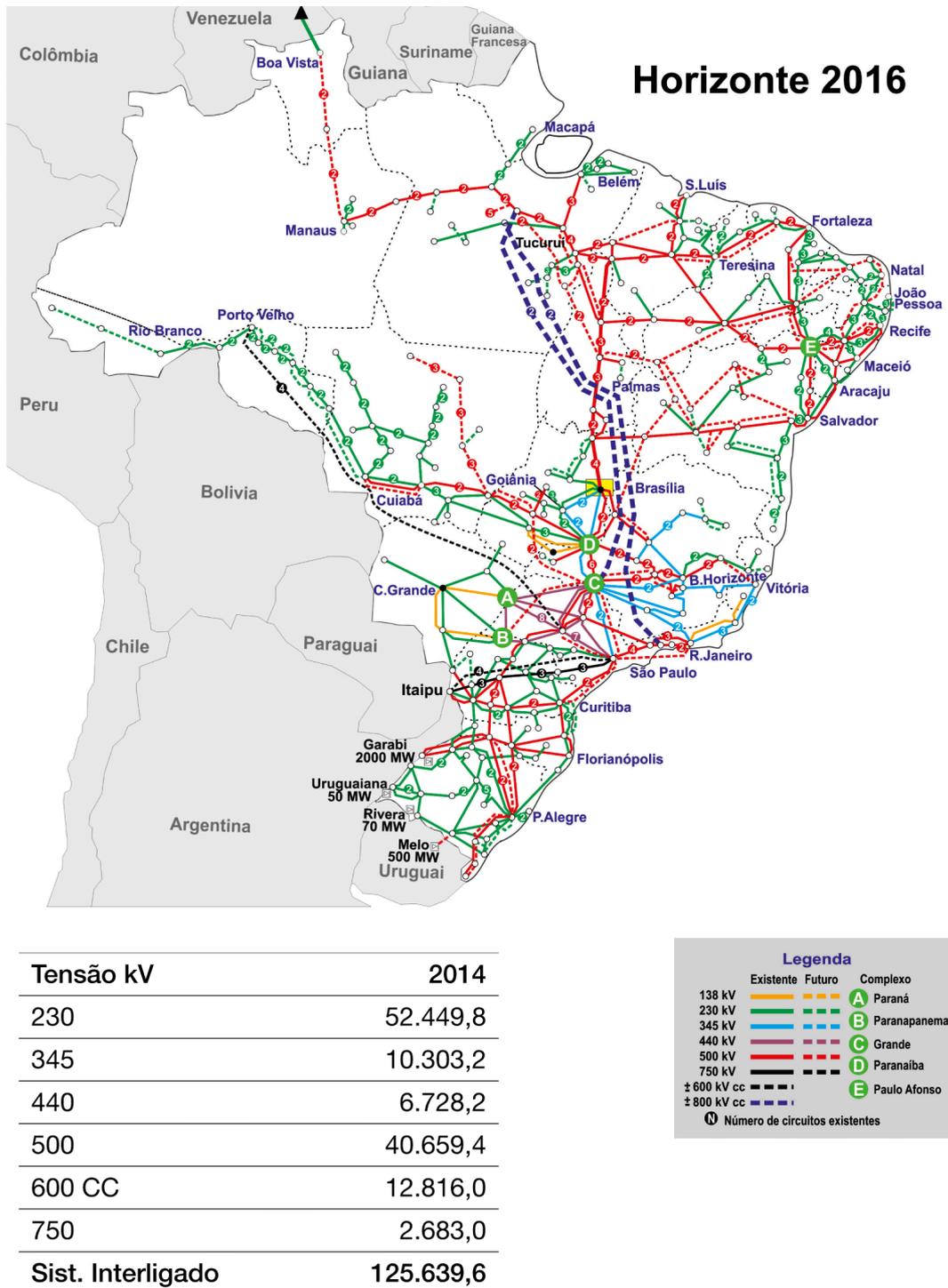


Figura 2.4: Extensão das linhas de transmissão do SIN - km. Dados fornecidos pelo ONS referentes ao ano de 2016. Figura retirada de (ONS, 2016).

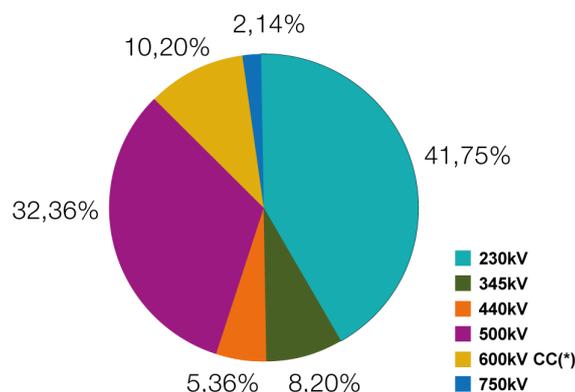


Figura 2.5: Composição percentual da extensão das linhas de transmissão do SIN - km. Dados fornecidos pelo ONS referentes ao ano de 2014 (ONS, 2014).

## 2.2.2 Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que ocorrem a partir do surgimento de campos elétricos provenientes da separação de cargas positiva e negativa. Existem vários tipos de descargas, classificadas em função dos locais onde se originam e de onde terminam. Contudo, em relação às linhas de transmissão, somente as descargas nuvem-solo podem provocar as sobretensões que, muitas vezes, causam os desligamentos da linha (INPE/ELAT, 2016).

A descarga nuvem-solo também pode ser classificada como, descarga negativa ou positiva, de acordo com o sinal da carga efetivamente transferida da nuvem para o solo. Segundo dados do INPE/ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica (INPE/ELAT, 2016), as mais comuns são as descargas negativas que representam cerca de 90% de todas as descargas no solo que ocorrem no planeta terra. Por esse motivo, apenas esse tipo de descarga é considerado nesta dissertação e seu processo de formação é apresentado a seguir.

### Formação de uma Descarga Negativa Nuvem-solo

Como mencionado em (INPE/ELAT, 2016), a nuvem é composta, em toda a sua extensão, por regiões ionizadas eletricamente. De forma prática, pode-se dizer que as cargas negativas estão localizadas na parte inferior da nuvem, onde também pode ser encontrada uma pequena parcela de cargas positivas. Esse cenário é capaz de induzir no solo uma distribuição de cargas positivas de mesma intensidade (Figura 2.6 a)), gerando um forte campo elétrico.

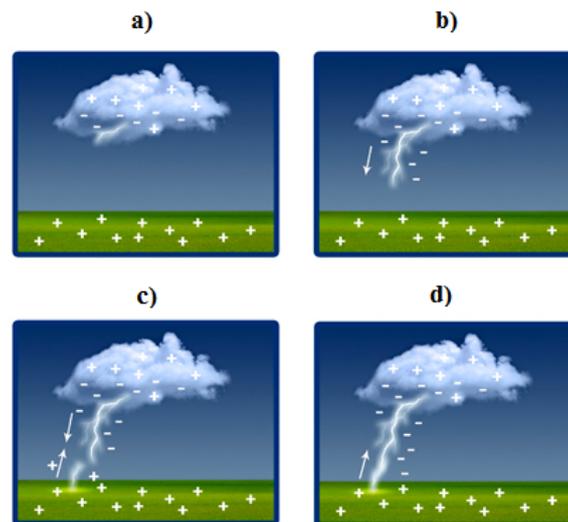


Figura 2.6: Processo de formação de uma descarga negativa nuvem-solo. a) Separação de cargas e início do canal precursor da descarga. b) Propagação do canal descendente. c) Propagação do canal ascendente. d) Formação do canal de descarga e surgimento da corrente de retorno. Figura retirada e adaptada de (INPE/ELAT, 2016).

No momento em que o campo elétrico formado excede a rigidez dielétrica do ar, uma descarga preliminar no interior da nuvem dá início ao canal precursor de descarga, também chamado de descarga piloto (Figura 2.6 a)). A partir daí, o canal descendente se aproxima do solo aumentando o campo elétrico na superfície (Figura 2.6 b)), o que pode dar origem a descargas elétricas ascendentes (Figura 2.6 c)). O canal de descarga, por sua vez, é formado quando o canal descendente e um dos canais ascendentes se aproximam, de tal forma, cuja distância entre esses atinge um valor inferior a um determinado limite. Nesta situação, os canais são interligados por meio de uma descarga, estabelecendo assim o canal entre a nuvem e o solo (Araújo e Neves, 2005) (INPE/ELAT, 2016).

A partir daí, ocorre então o surgimento da chamada corrente de retorno, a qual é responsável por neutralizar as cargas acumuladas (Figura 2.6 d)). É importante dizer que, normalmente, pode haver a formação de novas descargas através do mesmo canal, caracterizando assim, as descargas subsequentes (Araújo e Neves, 2005) (INPE/ELAT, 2016).

### Principais Parâmetros da Corrente de Retorno

Entre as etapas da descarga atmosférica, a corrente de retorno é considerada a mais importante no desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas.

Alguns parâmetros dela são definidos e apresentados como se segue (EPRI, 2005):

- Valor de pico: corresponde ao valor máximo alcançado pela corrente de descarga;
- Tempo de frente: intervalo de tempo decorrido entre o início da corrente de descarga e o instante em que ela atinge o seu valor de pico;
- Tempo de meia onda: intervalo de tempo decorrido entre o início da corrente de descarga e o instante em que ela, após ter ultrapassado o valor de pico, tem sua intensidade reduzida para 50% desse valor.

### 2.2.3 Para-raios em Linhas de Transmissão

Em linhas de transmissão, os para-raios são conectados eletricamente em paralelo com a cadeia de isoladores. O objetivo é reduzir as sobretensões oriundas de descargas atmosféricas, evitando que os níveis de isolamento sejam excedidos. A Figura 2.7 mostra alguns exemplos de arranjos na montagem de para-raios em LTs.

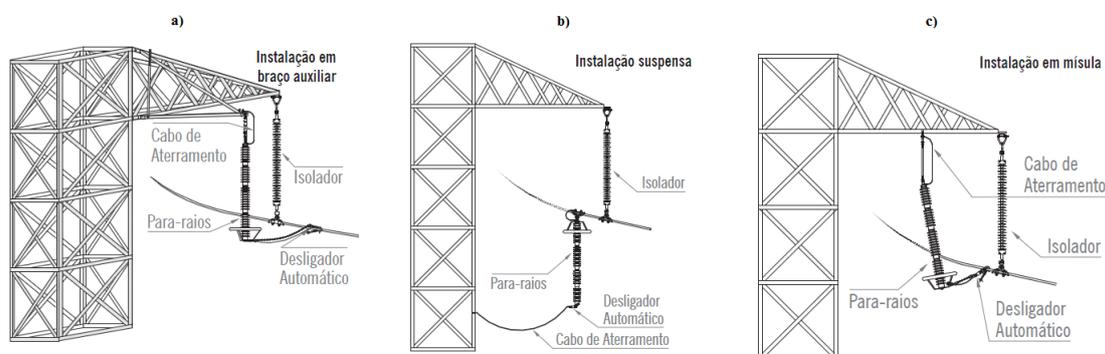


Figura 2.7: Exemplos de arranjo na montagem de para-raios em linhas de transmissão. a) Instalação em braço auxiliar. b) Instalação suspensa. c) Instalação em mísula. Figura retirada e adaptada de (Baestros Ltda, 2016).

Da literatura (EPRI, 2005), sabe-se que o uso de para-raios pode melhorar de forma significativa o desempenho de linhas de transmissão. Isso porque, quando ocorre uma descarga atmosférica, os para-raios são submetidos a uma tensão em seus terminais o que, por consequência, ameniza a tensão resultante na cadeia de isoladores. Ao final do surto, cuja duração máxima é da ordem de centenas de microssegundos, os para-raios retornam às condições anteriores à passagem do surto.

### Aspectos Construtivos dos Para-raios

A utilização de para-raios em linhas de transmissão tornou-se mais difundida a partir do final da década de 80 e tem ganhado, cada vez mais, destaque devido aos avanços tecnológicos da área. Na fabricação de para-raios, por exemplo, a utilização do composto óxido de zinco (ZnO) foi uma evolução bastante significativa, uma vez que o ZnO apresenta uma capacidade de absorção de energia superior ao carboneto de silício (SiC), material, até então, utilizado na fabricação de para-raios (Viana, 2009).

Além dessa vantagem, o emprego do óxido de zinco apresenta outras melhorias como, por exemplo, a alta não-linearidade e uma resposta mais rápida frente aos fenômenos transitórios (Viana, 2009). Graças a essas vantagens, hoje em dia, boa parte dos para-raios adquiridos pelas concessionárias de energia são desse tipo.

Outra evolução bastante significativa foi o desenvolvimento de materiais poliméricos para aplicação em para-raios de alta tensão. Como é de conhecimento, quando se utiliza o invólucro de porcelana, os para-raios podem sofrer danos ao longo do tempo como a perda de estanqueidade e fragmentação do invólucro com ou sem explosão. Em contrapartida, a experiência de campo tem verificado que o uso de para-raios com o invólucro polimérico consegue amenizar tais problemas (de Britto, 2006).

Em relação aos aspectos de construção, atualmente existem duas concepções de projeto: com ou sem espaçamentos internos de ar. O segundo tipo apresenta certas vantagens como: menor peso, maior facilidade e flexibilidade de montagem e não requer dispositivos para o alívio de sobrepressão (de Britto, 2006). A Figura 2.8 mostra as características construtivas de um para-raios de óxido de zinco sem espaçamento interno de ar. Neste tipo de construção, a maioria dos projetos envolvem os elementos de ZnO em um tubo de fibra de vidro impregnado em resina epóxi. A partir daí, o invólucro polimérico normalmente é aplicado sobre o tubo por meio de injeção de borracha ou de moldagem (de Britto, 2006).

## 2.3 Desligamentos em Linhas de Transmissão

### 2.3.1 Definições e Principais Causas

Um desligamento é o ato de abertura de um ou mais dispositivos que interligam circuitos de potência, interrompendo a continuidade elétrica por meio de um componente. Dependendo do tipo de desligamento, o mesmo pode ser classificado como

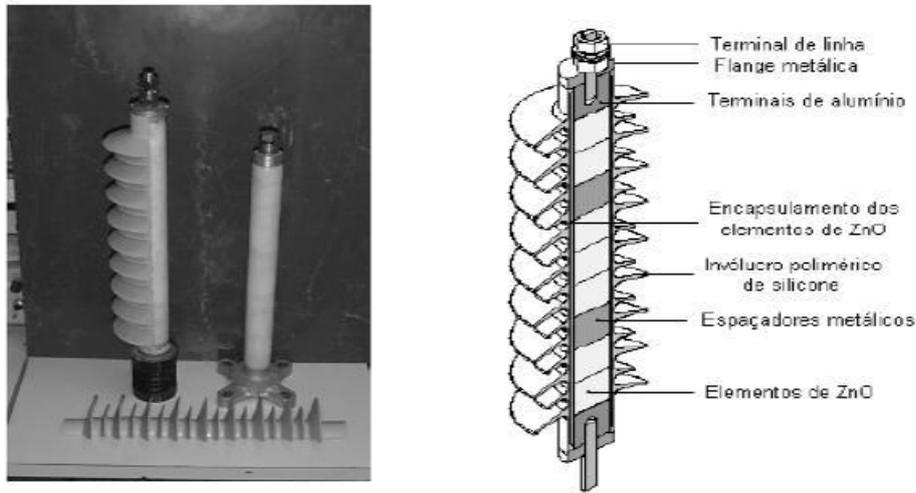


Figura 2.8: Características construtivas de um para-raios de ZnO sem espaçamento interno de ar. Figura retirada de (de Britto, 2006).

programado ou forçado (ONS, 2009). Um desligamento programado é aquele previsto e em conformidade com o estabelecido nos Procedimentos de Rede<sup>1</sup> e pode incluir manobras operacionais para serviços de manutenção e melhorias na rede elétrica (ONS, 2009).

Por outro lado, o desligamento forçado é aquele que ocorre em condições não programadas (ONS, 2009). Esse tipo de desligamento pode ocorrer por diversos motivos que vão desde queimadas, até a incidência de descargas atmosféricas. A Figura 2.9 apresenta uma distribuição percentual com as principais causas de desligamentos em linhas de transmissão da Rede Básica do SIN (de Souza Filho, 2013).

Os dados mostram que, no ano de 2008 por exemplo, a vegetação foi responsável por 3,4% dos desligamentos. Como é de conhecimento, vegetações próximas às linhas de transmissão podem entrar em contato com os condutores da LT e levar a ocorrência de curtos-circuitos. Além desse, fatores como: queimadas, falhas humanas e poluição também podem ocasionar o estabelecimento de faltas. No entanto, os dados mostram que o principal motivo dos desligamentos não programados em linhas de transmissão é a incidência de descargas atmosféricas.

### 2.3.2 Índices que Mensuram os Desligamentos

Historicamente, o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas é mensurado considerando os desligamentos causados por “falha de blindagem”

<sup>1</sup>Documento elaborado pelo ONS com os procedimentos e requisitos técnicos necessários ao planejamento, implantação, uso e operação do Sistema Interligado Nacional.

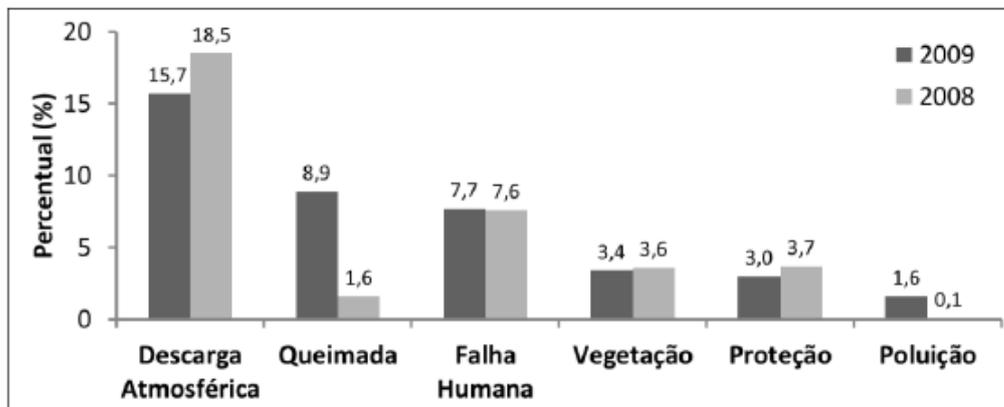


Figura 2.9: Principais causas dos desligamentos não programados das linhas de transmissão da Rede Básica do SIN. Ano de 2008 e primeiro semestre de 2009. Figura retirada de (de Souza Filho, 2013).

e por *backflashover*. Contudo, em linhas de transmissão protegidas por cabos para-raios, o *backflashover* é o mecanismo mais comum de desligamentos não programados (EPRI, 2005).

Vale ressaltar que, nesta dissertação, os aspectos relativos ao fenômeno de “falha de blindagem” não são considerados. Isto é, o desempenho da linha é estimado por meio da taxa de desligamentos causados por *backflashover* (BFR, do inglês *Backflashover Rate*). A mesma é medida em um comprimento de 100 km no período de um ano (desligamentos/ 100 km/ ano).

Além disso, para garantir a qualidade do fornecimento de energia, o ONS define os limites aceitáveis para o número de desligamentos das LTs causados por descargas atmosféricas. Esses limites são mostrados na Tabela 2.1, na qual é possível ver que linhas de transmissão de 230 KV, por exemplo, devem apresentar no máximo 2 desligamentos por 100 km de linha por ano.

Tabela 2.1: Número máximo de desligamentos por descargas atmosféricas da LT estabelecido pelo ONS. Adaptada de (ONS, 2011).

Classe de Tensão (kV)	desligamentos / 100 km/ ano
$\geq 345$	1
230	2

Em relação ao desempenho das instalações com tensão inferior (Demais Instalações de Transmissão), o mesmo é estimado por meio de indicadores que mensuram a

frequência e a duração das interrupções ocorridas nos consumidores. Tais indicadores podem ser apurados de forma individual ou para um conjunto de unidades consumidoras. Nesta dissertação, apenas os indicadores de continuidade individuais são considerados e apresentados como se segue (ANEEL, 2012):

- Duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão (*DIC*): Intervalo de tempo em que uma descontinuidade da distribuição de energia elétrica ocorreu em cada unidade consumidora ou ponto de conexão. Expressa em horas e centésimos de hora.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (2.1)$$

No qual:

$i$  = Índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 até  $n$ ;

$t(i)$  = Tempo de duração da interrupção  $i$  da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração.

- Frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão (*FIC*): Número de interrupções ocorridas em cada unidade consumidora ou ponto de conexão ( $n$ ), no período de apuração. Expressa em número de interrupções.

$$FIC = n \quad (2.2)$$

- Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão (*DMIC*): Tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão. Expressa em horas e centésimos de hora.

$$DMIC = t(i)_{max} \quad (2.3)$$

No qual:

$t(i)_{max}$  = Valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua  $i$ , no período de apuração, verificada na unidade consumidora considerada.

A Tabela 2.2 apresenta os indicadores individuais para unidades consumidoras atendidas na faixa de tensão inferior a 230 kV e maior ou igual a 69 kV. Tais indicadores são calculados para períodos mensais, trimestrais e anuais. De acordo com eles, as linhas de transmissão de 69 KV interligadas ao SIN, por exemplo, devem apresentar no máximo 5 interrupções por unidade consumidora (ou ponto de conexão) no período de um ano.

Tabela 2.2: Limites de continuidade por unidade consumidora com faixa de tensão maior ou igual a 69 kV e inferior a 230 kV. Retirada de (ANEEL, 2012).

Sistema	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora						
	Unidades Consumidoras com Faixa de Tensão Contratada: 69 kV ≤ Tensão < 230 kV						
	DIC (horas)			FIC (interrupções)			DMIC (horas)
	Anual	Trimestral	Mensal	Anual	Trimestral	Mensal	Mensal
Interligado	5	3	2	5	3	2	1,5
Isolado	6	4	3	6	4	3	2,5

### 2.3.3 Parâmetros que Influenciam nos Desligamentos Causados por Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

No desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, vários são os parâmetros que podem influenciar na quantidade de desligamentos. Pode-se citar, por exemplo, fatores que vão desde as características da LT analisada, até as condições climáticas da região onde a linha se encontra.

Por vezes, as LTs são longas e atravessam vários tipos de relevo e obstáculos como vales, rios e montanhas. Essa situação pode fazer com que a exposição da linha

em relação à incidência de descargas atmosféricas varie. Muitos são os fatores que influenciam nessa exposição, sobretudo a distribuição de chuvas da região e o relevo local. Dependendo de sua posição, a LT pode se destacar em relação ao ambiente local e se tornar em um ponto preferencial para a incidência de descargas atmosféricas.

Esse grau de exposição, por sua vez, pode ser quantificado pela densidade de descargas atmosféricas ( $N_g$ ), isto é, índice que mede o número de descargas que incidem no solo por  $km^2$  por ano (descargas/  $km^2$ / ano). Esse índice pode ser obtido, por exemplo, utilizando redes de detecção e localização de descargas ou por redes de contadores. Quando não é possível utilizar tais sistemas, pode-se estimar o valor de  $N_g$ , indiretamente, a partir do índice cerâmico da região ou por meio de medições realizadas em satélites.

Neste último caso, as medições são feitas considerando todos os tipos de descargas atmosféricas, incluindo as descargas nuvem-solo. A título de ilustração, a Figura 2.10 exibe a frequência global e a distribuição de descargas atmosféricas observadas a partir do espaço. De acordo com (EPRI, 2005), estabelecendo uma relação entre esses índices (Figura 2.10) e os valores de  $N_g$ , é possível estimar, de forma simplificada, a densidade de descargas atmosféricas ( $N_g$ ). Para tal, uma das possibilidades é assumir uma relação de 3 para 1 e dividir os valores mostrados na Figura 2.10.

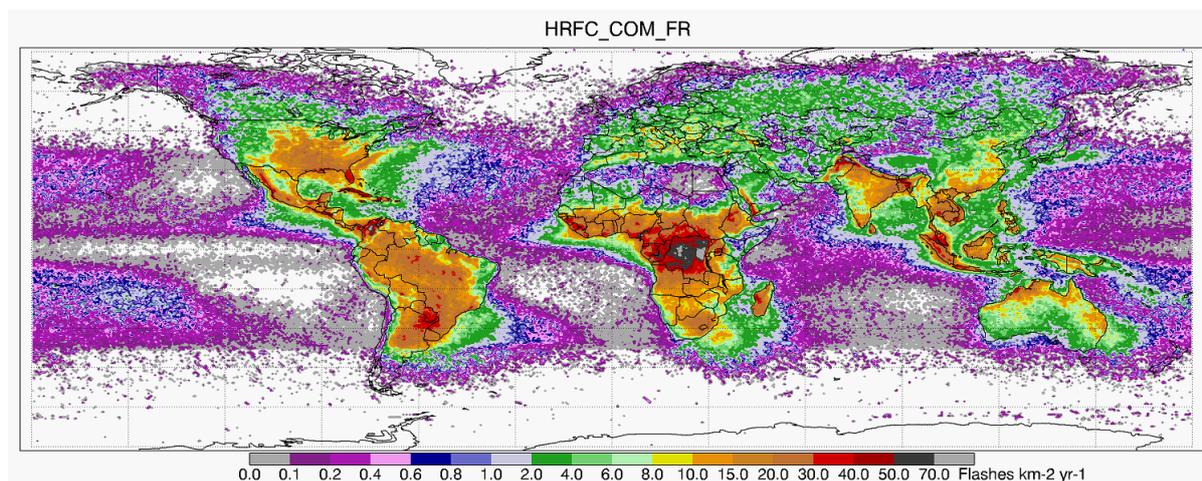


Figura 2.10: Frequência global e distribuição de descargas atmosféricas observadas a partir do espaço. Figura retirada de (GHRC, 2016).

Outro fator de grande influência é a impedância de aterramento das torres. Isso porque ela afeta diretamente o comportamento da reflexão da onda de tensão que se propaga em direção ao solo e, por consequência, influencia na sobretensão resultante na cadeia de isoladores (EPRI, 2005) (Rodrigues et al., 2014a). Alguns trabalhos na

literatura como (de Castro Assis et al., 2012), abordam soluções de posicionamento de para-raios envolvendo esse parâmetro. Nestes casos, os para-raios são adicionados em torres cujo valor da impedância de aterramento é alto.

Além dos fatores mencionados, pode-se citar outros como: a resistividade do solo, os parâmetros da descarga atmosférica e o acoplamento eletromagnético entre as fases e os cabos para-raios que, por sua vez, depende das características da LT. Quanto aos parâmetros da linha, os principais são:

- Comprimento da cadeia de isoladores;
- Comprimento dos vãos;
- Altura e impedância de surto da torre;
- Geometria e impedância de surto dos condutores.

## 2.4 Revisão Bibliográfica

A utilização de para-raios com o objetivo de melhorar o desempenho de linhas de transmissão está relacionada a estudos que devem definir a quantidade, o tipo e o correto posicionamento dos mesmos. Esses estudos vão depender, principalmente, das características da linha de transmissão sob análise e da estimativa de desempenho desejada.

A literatura aborda alguns métodos para estimar o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Em (de Souza Filho, 2013), o autor discorre a respeito das metodologias formuladas pelo CIGRÉ (CIGRÉ, 1991) e pelo IEEE (IEEE, 1985) apresentando as vantagens e limitações de cada uma. Além disso, a pesquisa envolve alguns tópicos, como o efeito de ionização do solo e métodos para identificar a ruptura na cadeia de isoladores. Em relação a este último, em (Rodrigues et al., 2014a) os autores utilizam um modelo computacional desenvolvido no *software* ATP/ATPDraw para avaliar a suportabilidade da cadeia de isoladores considerando uma LT de 500 kV.

Nas últimas décadas, pesquisas relacionadas ao uso de para-raios em LTs têm ganhado cada vez mais destaque na literatura. Em (Viana, 2009), o autor estuda a aplicação de para-raios de ZnO em linhas de transmissão localizadas em regiões com

alto índice cerâmico<sup>2</sup> e elevada resistência de aterramento. A linha é modelada no *software* PSCAD considerando a instalação de para-raios em paralelo com a cadeia de isoladores.

Em (Bedoui et al., 2010) o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas é avaliado considerando uma linha de 220 kV com circuito duplo. A LT em questão é modelada no *software* ATP e as simulações são realizadas para determinar as sobretensões oriundas de uma descarga atmosférica. Já em (de Castro Assis et al., 2012), um estudo é realizado considerando a utilização de para-raios de ZnO em uma silhueta típica de torre de 138 kV. Neste caso, a linha de transmissão é modelada no *software* ATP e os parâmetros das descargas atmosféricas são definidos por meio do método de Monte Carlo.

Vale ressaltar que, em todos os casos mencionados ( (Viana, 2009), (Bedoui et al., 2010) e (de Castro Assis et al., 2012)) as conclusões indicam que a utilização de para-raios pode melhorar, consideravelmente, o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Contudo, nenhum desses trabalhos faz uso de ferramentas de otimização para definir os locais de instalação de para-raios. Na maioria das vezes, os para-raios são adicionados em locais específicos, considerando alguns critérios, como a impedância de aterramento e as extremidades da linha.

Em relação ao posicionamento ótimo de para-raios, o mesmo é considerado em (Orille-Fernandez et al., 2004) e (Vasconcelos et al., 2012). No primeiro, os autores apresentam uma aplicação no ambiente MATLAB com o objetivo de minimizar os riscos de falha da linha. A aplicação faz uso de um algoritmo de otimização baseado no método do gradiente, mas possui certas limitações. Pode-se citar, por exemplo, o fato de que a aplicação só pode ser usada em redes representadas por uma única fase.

Em (Vasconcelos et al., 2012), os autores apresentam um *software* denominado SIAPR, Sistema de Alocação Ótima de Para-raios (projeto ANEEL- P&D 0377 - 06/2005). O objetivo do mesmo é prover melhorias no desempenho de linhas de transmissão e de distribuição por meio do posicionamento ótimo de para-raios. Para tal, o *software* conta com um módulo interno desenvolvido especificamente para o cálculo de transitórios eletromagnéticos.

De forma geral, pode-se dizer que a maioria dos trabalhos existentes sobre o tema desta dissertação, ou: i) abordam o problema, ou ii) fazem estudos específicos de uma determinada linha ou iii) utilizam uma metodologia diferente. Em relação ao projeto

---

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

ANEEL- P&D 0377 - 06/2005 ( (Vasconcelos et al., 2012)), é importante ressaltar as principais diferenças entre esse projeto e esta dissertação. A primeira delas é que no presente trabalho, o estudo realizado considera somente o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão, ou seja, linhas de distribuição não são incluídas nesta análise.

Além disso, o desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas é calculado com o auxílio do ATP. Além de agregar confiabilidade ao trabalho, o ATP conta com uma série de recursos disponíveis que permitem uma maior flexibilidade à aplicação. Em outras palavras, o ATP permite a utilização de diferentes formas de modelagem para representar os elementos envolvidos no problema descrito. Pode-se citar, por exemplo: i) a impedância de aterramento que pode ser representada considerando ou não o efeito da ionização do solo; ii) os parâmetros elétricos da linha que são calculados considerando ou não a variação na frequência, entre outros.

Por fim, em relação ao algoritmo genético, alguns pontos são especialmente modificados para solucionar o problema em questão. Os principais são: a *fitness* utilizada na etapa de avaliação dos indivíduos e os processos de seleção, cruzamento e mutação. A mutação implementada, por exemplo, algumas vezes é definida de forma determinística valendo-se de informações da LT para acelerar o processo de busca pela solução.

## 2.5 Conclusão

Esse capítulo apresentou o problema de alocação ótima de para-raios em linhas de transmissão. A descrição do mesmo e alguns tópicos necessários para a contextualização do problema foram abordados. Além disso, o capítulo também apresentou os principais fatores que influenciam no desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Por fim, uma revisão bibliográfica foi apresentada mostrando os principais trabalhos relacionados ao tema desta dissertação. Nessa revisão foi constatado que, boa parte das vezes, os autores realizam estudos específicos de uma determinada linha de transmissão.



## Metodologia: Otimização

Este capítulo tem como objetivo descrever os principais aspectos do módulo de otimização implementado neste trabalho. Inicialmente, uma descrição geral é realizada e, logo após, o algoritmo genético projetado para solucionar o problema de posicionamento ótimo de para-raios em LTs é apresentado. Por fim, algumas estratégias para reduzir o custo computacional do processo são abordadas.

### 3.1 Descrição Geral da Metodologia

A Figura 3.1 apresenta de forma geral a estrutura funcional da metodologia considerada neste trabalho. Como mencionado, o *software* desenvolvido é formado pela interação entre um algoritmo genético e o ATP.



Figura 3.1: Estrutura funcional da metodologia.

Do ponto de vista da otimização, pode-se formular o problema de alocação ótima de para-raios em LTs como um problema de otimização mono-objetivo. Isso porque, como dito anteriormente, os órgãos que regulamentam o setor elétrico estabelecem certos limites no sentido de prezar pela qualidade da energia fornecida (ONS, 2011) (ANEEL, 2012). Dessa forma, ao considerar essa quantidade máxima de desligamentos como uma restrição do problema, o objetivo passa a ser minimizar a quantidade de para-raios. As equações (3.1) e (3.2) apresentam a formulação matemática desse problema considerando essa situação.

$$\text{Minimizar: } f_1(PR) = PR \quad (3.1)$$

$$\text{sujeito a: } des \leq des_{alvo} \quad (3.2)$$

Em que, dada uma configuração de para-raios na linha de transmissão,  $PR$  é a quantidade de para-raios utilizados,  $des$  é o desempenho estimado da LT com essa configuração e  $des_{alvo}$  é a quantidade máxima de desligamentos estabelecida a priori.

Diante dessa formulação, um algoritmo genético mono-objetivo é implementado em linguagem C++. Cada indivíduo do algoritmo, isto é, a solução candidata do problema, fornece os locais onde os para-raios serão instalados. Assim, um indivíduo corresponde a uma configuração de para-raios na linha que será simulada no ATP. O ATP, por sua vez, é o responsável por calcular as sobretensões impostas ao longo das cadeias de isoladores. Essas sobretensões são utilizadas para calcular a taxa de desligamentos da LT. Maiores detalhes sobre a estimativa desse desempenho são apresentados no Capítulo 4.

## 3.2 Introdução aos Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos possuem larga aplicação em muitas áreas científicas, como na engenharia. A ideia principal desse algoritmo é considerar as possíveis soluções do problema como **indivíduos** de uma **população**. Esta última irá evoluir ao longo de sucessivas iterações que são conhecidas como **gerações**. A Figura 3.2 apresenta, de forma resumida, a estrutura de um algoritmo genético clássico.

Inicialmente, uma população é criada e avaliada através de uma função de mérito conhecida como **fitness**. A partir daí, o processo evolutivo é conduzido, principalmente, por dois operadores: seleção e reprodução. O primeiro deles é encarregado de selecionar (de acordo com a **fitness**) alguns indivíduos da população para serem submetidos aos operadores genéticos. Já a etapa de reprodução é a responsável por gerar novos indivíduos utilizando as operações de  **cruzamento** e **mutação**. A primeira consiste em misturar as características de dois indivíduos levando à criação de dois outros, conhecidos como descendentes (“filhos”). A mutação, por sua vez, atua sobre os descendentes modificando aleatoriamente alguma característica do indivíduo.

**Algoritmo:** Estrutura Genérica de um Algoritmo Genético (GA)**Entrada:** informações referentes ao problema**Entrada:**  $NG$ : número de gerações**Entrada:**  $pSize$ : tamanho da população**Entrada:**  $Pc$ : Probabilidade de cruzamento**Entrada:**  $Pm$ : Probabilidade de mutação**Saida:**  $ind$ : indivíduo com melhor aptidão

```

1  $t \leftarrow 0$ 
2  $\vec{P}_t \leftarrow criaPopulacaoInicial(pSize)$ 
3  $avaliar(\vec{P}_t)$ 
4 repita
5    $\vec{P}'_t \leftarrow selecao(\vec{P}_t)$ 
6    $\vec{P}''_t \leftarrow cruzamento(\vec{P}'_t)$ 
7    $\vec{P}_{t+1} \leftarrow mutacao(\vec{P}''_t)$ 
8    $avaliar(\vec{P}_{t+1})$ 
9    $\vec{P}_{t+1} \leftarrow elitismo(\vec{P}_{t+1}, \vec{P}_t)$ 
10   $t \leftarrow t + 1$ 
11 até  $t = NG$ 
12  $ind \leftarrow individuoComMelhorAptidao(\vec{P}_t)$ 
13 retorna  $ind$ 

```

Figura 3.2: Estrutura clássica de um algoritmo genético.

Após as etapas de seleção e reprodução, a nova população formada é então avaliada e um procedimento, conhecido como elitismo, é aplicado. Neste caso, se um indivíduo da população de uma geração  $t$  é mais apto do que todos os indivíduos em uma geração  $t + 1$ , ele é recuperado e inserido na nova população. Como, normalmente, o tamanho da população é fixo, uma das possíveis formas de manter essa condição é eliminar um dos indivíduos, geralmente aquele de menor aptidão.

Esses passos são repetidos até que o critério de parada seja atendido. No caso da Figura 3.2, esse critério é baseado em um número máximo de gerações previamente definido. Vale ainda dizer que, maiores detalhes sobre os algoritmos genéticos podem ser vistos em (Holland, 1992) (Vasconcelos et al., 2001).

### 3.3 Algoritmo Genético Projetado para Solucionar o Problema de Posicionamento Ótimo de Para-raios em LTs

Para solucionar o problema, um algoritmo genético é projetado com o propósito de testar diferentes configurações de para-raios e encontrar uma estimativa da melhor

configuração possível. A Figura 3.3 mostra os principais módulos desse algoritmo implementado.

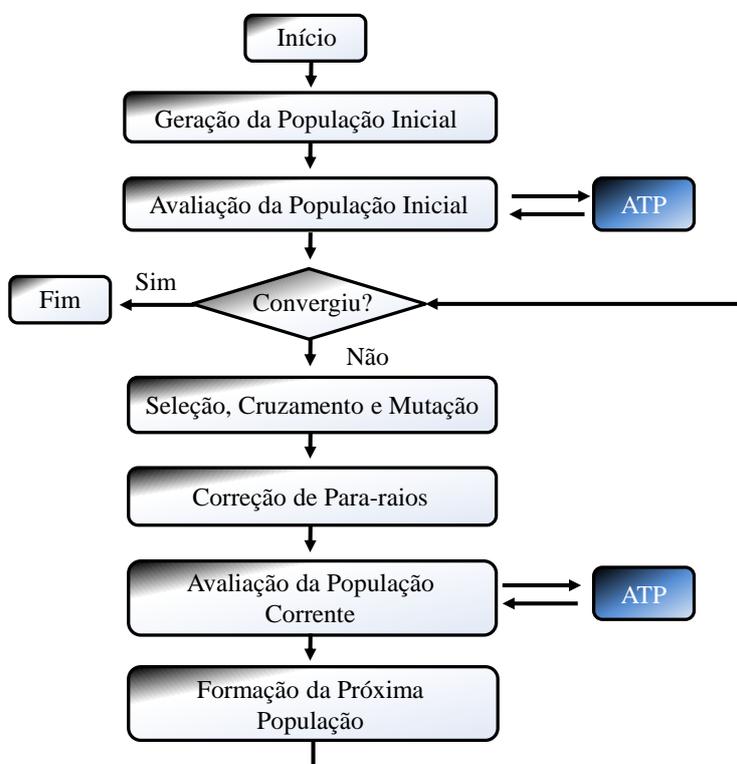


Figura 3.3: Fluxograma do algoritmo de posicionamento ótimo de para-raios.

Inicialmente, a população é criada por meio de um gerador de indivíduos, o qual é detalhado mais adiante (Subseção 3.3.2). Um indivíduo, por sua vez, é representado por uma cadeia de caracteres binários (*bits*) que fornece os locais de instalação de para-raios. Sendo assim, cada indivíduo corresponde a uma configuração de para-raios na linha que será simulada no ATP. O ATP, por sua vez, calcula as sobretensões impostas ao longo da cadeia de isoladores. Para tal, considera-se que a linha simulada possui a configuração de para-raios indicada pelo indivíduo.

De posse dos valores de sobretensão, o desempenho da linha frente às descargas atmosféricas é estimado (maiores detalhes desse cálculo são apresentados no Capítulo 4). A partir daí, de acordo com o número de desligamentos e a quantidade de para-raios, uma *fitness* é atribuída para cada indivíduo.

Caso o critério de parada não seja satisfeito, os processos de seleção, cruzamento e mutação são realizados formando uma nova população. Após essa etapa, os novos indivíduos são então avaliados e unificados com a população anterior. Em seguida, os

indivíduos são ordenados de acordo com o valor da *fitness* e somente a melhor metade dessa população é selecionada para a próxima geração.

Esse procedimento se repete a cada geração até que o critério de parada seja atendido. Neste trabalho, esse critério é baseado em um número máximo de gerações, ou quando não ocorre mudança do melhor indivíduo durante um conjunto de  $T$  gerações subsequentes. Por fim, alguns pontos do algoritmo merecem um destaque a mais e, por isso, são detalhados a seguir.

### 3.3.1 Representação dos Indivíduos

No âmbito deste trabalho, o processo de posicionamento ótimo de para-raios pode ser realizado considerando a alocação por torre ou fase. Dependendo do tipo de configuração escolhida, a representação do indivíduo sofre alterações.

No caso da alocação por torre, cada caractere do indivíduo representa uma estrutura da LT e, assim, o tamanho final da cadeia de caracteres é igual ao número total de torres da linha. Dessa forma, um caractere preenchido com o valor 1 na posição  $j$  indica a instalação de para-raios em todas as fases dessa torre (Vasconcelos et al., 2012). A título de ilustração, a Figura 3.4 mostra um exemplo de representação considerando uma LT formada por cinco torres e um circuito simples.

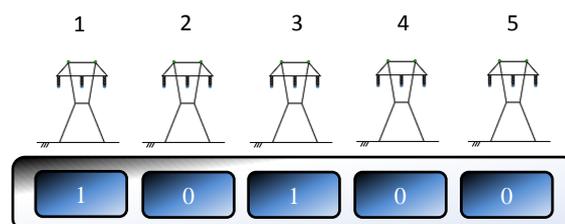


Figura 3.4: Representação de um indivíduo na alocação por torre. Linha hipotética formada por cinco torres e um circuito simples.

Neste caso, a configuração 10100 indica a instalação de para-raios em todas as fases das torres 1 e 3. Vale ressaltar que, neste tipo de alocação, não é possível instalar uma quantidade flexível de para-raios em relação ao número de fases. Isto é, ou se instala para-raios em todas as fases da torre, ou não se instala em nenhuma delas.

Em contrapartida, na alocação por fase cada *bit* representa um condutor. Dessa forma, o tamanho da cadeia de caracteres é igual ao número total de torres multiplicado pela quantidade de fases (Vasconcelos et al., 2012). No exemplo mencionado, o mesmo

indivíduo seria codificado por 15 caracteres binários, conforme mostrado na Figura 3.5. Diferentemente do caso anterior, o posicionamento por fase é mais flexível e proporciona uma gama maior de configurações. Considerando uma torre com circuito simples, por exemplo, é possível instalar de 0 até 3 para-raios considerando cada fase de forma isolada.

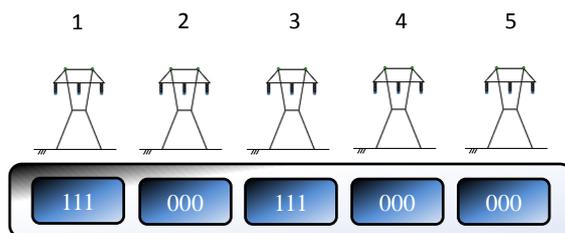


Figura 3.5: Representação de um indivíduo na alocação por fase. Linha hipotética formada por cinco torres e um circuito simples.

Se comparado ao posicionamento por torre, a alocação por fase tende a apresentar soluções com um número menor, ou no mínimo igual de para-raios. Isso porque, neste tipo de alocação, o espaço de busca é maior e ainda engloba as mesmas configurações do posicionamento por torre. Em contrapartida, devido ao aumento do espaço de busca, esse tipo de alocação tende a ser mais custoso computacionalmente.

### 3.3.2 Criação da População Inicial

A população inicial é criada por meio de um gerador de indivíduos que possui a finalidade de acelerar o processo de busca pela solução. Para tal feito, os principais parâmetros utilizados são (Vasconcelos et al., 2012):

- Tipo de alocação;
- Número total de torres e de fases;
- Altura das torres e das fases;
- Impedância de aterramento das torres;
- Densidade de descargas atmosféricas.

O gerador é responsável por criar parte dos indivíduos de forma determinística e outra parte aleatória. Essa prática permite ao algoritmo incorporar soluções clássicas de posicionamento, a partir da primeira geração. Dentre essas, pode-se citar, por exemplo, a alocação de para-raios em: i) todas as torres, ii) torres localizadas em regiões com maior densidade de descargas atmosféricas e iii) torres cujo valor de resistência de aterramento é alto.

### 3.3.3 Avaliação da População

Neste trabalho, a *fitness* é definida basicamente por dois fatores. São eles:

$$\begin{cases} h_1 = \frac{(1,2 PR_{max} - PR_{Ind})}{(1,2 PR_{max})} \\ h_2 = \frac{1}{(des_{alvo} - des_{ind})^2 + 1} \end{cases} \quad (3.3)$$

Em que:

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

Uma vez que os termos  $h_1$  e  $h_2$  são apresentados, a *fitness* ( $h$ ) é calculada como:

$$h = \begin{cases} 100 h_1 & \text{se } des_{ind} \leq des_{alvo} \\ 80 h_1 h_2 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Da Equação (3.4) é possível dizer que se um indivíduo não viola a restrição de desempenho (Equação (3.2)), a *fitness* atribuída ao mesmo não é ponderada pelo termo  $h_2$  e recebe peso 100. Isso significa dizer que, indivíduos viáveis com o mesmo número de para-raios terão o mesmo valor de *fitness*. No entanto, ressalta-se que quando isso acontece, o desempate na etapa de seleção é realizado considerando os valores de desempenho da linha.

Em contrapartida, quando um indivíduo viola a restrição, a *fitness* é penalizada em 20% e por  $h_2$ . Vale mencionar que, em determinadas situações, um indivíduo pode ter um número baixo de para-raios e violar pouco a restrição de desempenho. Do ponto de vista do problema, é interessante que esse indivíduo possa sobreviver ao processo evolutivo, uma vez que o mesmo está muito próximo de uma boa solução. O termo  $h_2$  é utilizado justamente com esse propósito e, nessas condições, o mesmo tende ao valor máximo (unitário).

### 3.3.4 Correção dos Indivíduos

O principal objetivo do bloco de correção é sempre garantir que existam para-raios nas extremidades da linha. Dessa forma, caso os operadores de cruzamento e mutação gerem indivíduos que não possuem essa característica, o bloco de correção é acionado para garantir esta condição. Além de melhorar o desempenho da LT, essa prática visa proteger os equipamentos que estão próximos às subestações.

### 3.3.5 Seleção, Cruzamento e Mutação

Um torneio simples é utilizado como operador de seleção, no qual pares aleatórios de indivíduos são comparados entre si. Neste caso, um número  $p \in [0, 1]$  é sorteado aleatoriamente considerando uma distribuição uniforme e se o mesmo for menor que 0,75, o melhor indivíduo é selecionado para fazer parte da população de pais. Caso contrário, aquele com menor aptidão é escolhido.

Já na etapa de cruzamento, pares de indivíduos da população de pais são selecionados aleatoriamente e o cruzamento é realizado com dois ou três pontos de corte. Esse número vai depender da quantidade de torres que a linha possui. Caso a mesma apresente uma grande quantidade de estruturas, utiliza-se três pontos de corte para garantir uma maior troca de informações. Caso contrário, utiliza-se o cruzamento com dois pontos de corte. Maiores detalhes sobre esse tipo de cruzamento podem ser vistos em (Holland, 1992) e (Parreiras, 2006).

A etapa de cruzamento gera novos indivíduos que irão compor a população de filhos. Cada um desses indivíduos, por sua vez, tem uma pequena probabilidade de sofrer alterações, através do operador de mutação. Neste trabalho, a mutação é especialmente modificada de acordo com o problema de posicionamento ótimo de para-raios em LTs. Algumas vezes, a mesma é definida de forma determinística valendo-se de informações da linha de transmissão como: a resistência de aterramento e a densidade de descargas atmosféricas. Essa prática visa direcionar e acelerar o processo de busca pela solução.

Em outras palavras, a mutação implementada faz uso de dois procedimentos distintos: mutação aleatória ( $bit_{aleat}$ ) e mutação determinística ( $bit_{det}$ ). A escolha de qual procedimento que será realizado é feita probabilisticamente conforme a Equação (3.5), em que  $p$  é um número aleatório gerado, para cada torre, considerando uma distribuição uniforme e o intervalo de 0 a 1.

$$bit_{mut} = \begin{cases} bit_{aleat} & \text{se } p \leq 0,2 \\ bit_{det} & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.5)$$

Em que:

- $bit_{mut}$  é o bit final da mutação;
- $bit_{aleat}$  é o bit definido de forma aleatória;
- $bit_{det}$  é o bit definido de forma determinística;
- $p$  é um número aleatório gerado no intervalo de 0 a 1 considerando uma distribuição uniforme.

Na mutação aleatória, duas operações básicas são implementadas e acontecem com a mesma frequência (50% para cada). A primeira consiste em uma simples inversão do caractere do indivíduo, ou seja, se esse valor é 0, ele se tornará 1 após a mutação e vice-versa. No restante das vezes, acontece uma permuta entre dois caracteres do indivíduo. Neste caso, além do índice em questão, outra posição é sorteada aleatoriamente e partir daí, ocorre a permuta.

Em relação à parte determinística, a resistência de aterramento e a densidade local de descargas atmosféricas são utilizadas em conjunto para definir o  $bit_{det}$ . Para tal, o presente trabalho faz uso de uma curva de probabilidade (Figura 3.6) que permite adicionar ou remover para-raios de acordo com o valor desses parâmetros. De forma resumida, essa curva é utilizada para determinar os valores de  $bit_{res}$  e  $bit_{Ng}$  que são utilizados na mutação determinística.

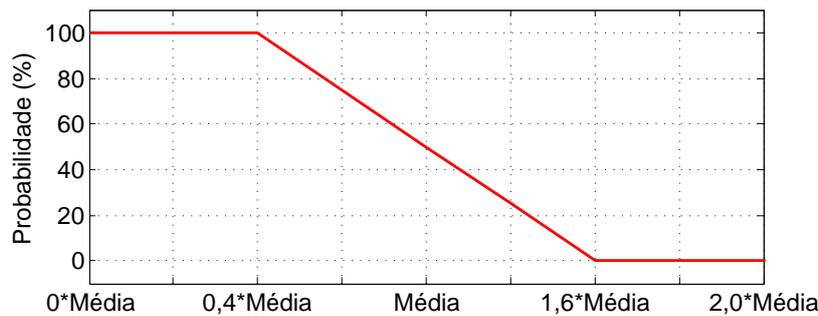


Figura 3.6: Curva de probabilidade utilizada para remover ou adicionar para-raios.

O  $bit_{res}$  é utilizado para indicar se uma torre precisa ( $bit_{res} = 1$ ) ou não ( $bit_{res} = 0$ ) de para-raios baseado nos valores de resistência de aterramento. Em termos práticos, é interessante alocar para-raios em torres que possuem um alto valor desse parâmetro. Isso porque, como mencionado no Capítulo 2, a resistência de aterramento afeta diretamente a sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Quanto maior é o valor desse parâmetro, maior tende a ser a quantidade de desligamentos da LT.

Dito isto, inicialmente, calcula-se a média dos valores de resistência de aterramento na linha ( $\overline{Res}$ ), e a partir daí, a curva da Figura 3.6 é utilizada para retornar a probabilidade do  $bit_{res}$  ser nulo. De certa forma, se a resistência de aterramento de uma torre é menor que a média (eixo das abscissas), a probabilidade de retirada de para-raios aumenta (maior probabilidade do  $bit_{res}$  ser nulo). Por outro lado, se esse valor é superior à média, a probabilidade de se colocar para raios aumenta (menor probabilidade do  $bit_{res}$  ser nulo).

Para ilustrar o emprego dessa curva, pode-se considerar como exemplo uma LT que possui uma média de resistência de aterramento igual a  $\overline{Res} = 10 \Omega$ . Neste caso,

quando a torre em questão possui o valor da resistência de aterramento menor ou igual a  $4\Omega$ , o  $bit_{res}$  possui 100% de probabilidade de ser igual a zero. Em contrapartida, quando a torre apresenta o valor da resistência maior ou igual a  $16\Omega$ , o  $bit_{res}$  tem 0% de probabilidade de ser nulo. Isto é, o mesmo assume valor unitário indicando que aquela torre necessita de proteção.

Uma vez que o valor dessa probabilidade é calculado, a Equação (3.6) é utilizada para determinar o valor de  $bit_{res}$ .

$$bit_{res} = \begin{cases} 0 & \text{se } p_{aleat} \leq p_{curva} \\ 1 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.6)$$

Em que:

- $p_{curva}$  é o valor retornado pela curva de probabilidade;
- $p_{aleat}$  é um número aleatório gerado no intervalo de 0 a 1 considerando uma distribuição uniforme.

Um procedimento análogo é realizado considerando a densidade de descargas atmosféricas ( $bit_{Ng}$ ). Neste caso, quando a torre está localizada em uma região com altos índices de descargas atmosféricas (em relação ao valor médio,  $\bar{N}_g$ ), o  $bit_{Ng}$  possui 100% de probabilidade de ser unitário, e vice-versa.

Após a atribuição desses valores ( $bit_{res}$  e  $bit_{Ng}$ ), o  $bit_{det}$  é definido como se segue:

$$bit_{det} = \begin{cases} bit_{Res} \text{ and } bit_{Ng} & \text{se } \sigma(\mathbf{Res}) > 0,1 \bar{Res} \text{ e } \sigma(\mathbf{N}_g) > 0,1 \bar{N}_g \\ bit_{Res} & \text{se } \sigma(\mathbf{Res}) > 0,1 \bar{Res} \text{ e } \sigma(\mathbf{N}_g) \leq 0,1 \bar{N}_g \\ bit_{Ng} & \text{se } \sigma(\mathbf{Res}) \leq 0,1 \bar{Res} \text{ e } \sigma(\mathbf{N}_g) > 0,1 \bar{N}_g \\ bit_{aleat} & \text{se } \sigma(\mathbf{Res}) \leq 0,1 \bar{Res} \text{ e } \sigma(\mathbf{N}_g) \leq 0,1 \bar{N}_g \end{cases} \quad (3.7)$$

Em que:

- And é a operação lógica “E”;
- $\sigma(\mathbf{Res})$  é o desvio padrão dos valores da resistência de aterramento;
- $\sigma(\mathbf{N}_g)$  é o desvio padrão dos valores de densidade de descargas atmosféricas;
- $\overline{Res}$  é a média dos valores da resistência de aterramento;
- $\overline{N}_g$  é a média dos valores de densidade de descargas atmosféricas.

Em todos os casos, a média e o desvio padrão são calculados desconsiderando os parâmetros localizados nas extremidades da linha. Isso porque, nestes locais, o bloco de correção de indivíduos sempre garante a existência de para-raios e, portanto, tais valores não são considerados como critério para a alocação. Além disso, vale ressaltar que, de acordo com a Equação (3.7), a mutação determinística pode ser definida de quatro formas distintas. Isso vai depender das características da linha de transmissão sob análise:

- (a) Quando a LT apresenta variações significativas nos dois parâmetros (resistência de aterramento e densidade de descargas atmosféricas), ambos são utilizados na mutação determinística. Neste caso, os para-raios são alocados na torre somente quando os valores de  $bit_{res}$  e  $bit_{N_g}$  são iguais a um;
- (b) Por outro lado, quando essa variação ocorre somente na resistência de aterramento, apenas esta é considerada. Neste caso, os para-raios são alocados na torre quando  $bit_{res} = 1$ ;
- (c) De forma análoga ao item anterior, quando a LT apresenta variação significativa somente na densidade de descargas atmosféricas, apenas ela é considerada. Neste caso, os para-raios são alocados na torre quando  $bit_{N_g} = 1$ ;
- (d) Por fim, quando a LT não apresenta desvios significativos em nenhum dos dois parâmetros, o processo de mutação é realizado puramente de forma aleatória.

### 3.4 Estratégias para Reduzir o Custo Computacional do Processo

Para calcular o desempenho da linha, primeiramente é preciso estimar o número de desligamentos em cada uma das torres (esse fato será abordado, em detalhes, no

Capítulo 4). Sendo assim, em uma linha com 50 torres, por exemplo, inicialmente seriam necessárias 50 execuções do ATP para avaliar um único indivíduo. Se cada indivíduo requer 50 execuções, em um algoritmo configurado com 20 indivíduos e 30 gerações, até o final da otimização seriam realizadas 30.000 chamadas ao ATP.

Diante dessa dificuldade, é necessário utilizar algumas estratégias com o objetivo de reduzir o custo computacional do processo. A primeira delas é considerar que se uma torre possui para-raios em todas as fases, a mesma está protegida contra o *backflashover* e, portanto, possui taxa de desligamentos igual a zero. Nesta situação, o valor da corrente crítica é considerado igual 400 kA e não se faz uso do ATP. No entanto, somente essa estratégia pode não ser suficiente para causar um ganho significativo de desempenho, principalmente, em casos onde a alocação é feita por fase. Sendo assim, outras duas estratégias são utilizadas e detalhadas a seguir.

### 3.4.1 Avaliação dos Indivíduos de Forma Concorrente

Uma forma comum de se pensar é avaliar os indivíduos de forma sequencial. Neste tipo de avaliação, apenas um único indivíduo é avaliado por vez, enquanto os demais são colocados em uma espécie de fila. Porém, como uma avaliação não depende de outra, esse processo pode ser feito de forma concorrente através de um esquema *MultiThread*.

A fim de implementar essa mudança, pode-se criar uma *thread* para cada indivíduo porém, sabe-se que um aumento exagerado do número de *threads* pode ocasionar um efeito contrário e introduzir um grande *overhead* ao processo. Esse *overhead*, por sua vez, pode ser evitado estabelecendo um limite máximo de execuções que podem ser realizadas ao mesmo tempo.

Neste trabalho, esse controle é feito por meio de um semáforo contador. Semáforos são objetos de sincronização formados por um contador e uma fila e podem ser classificados como: binários ou contadores. Quando o valor máximo do contador for 1, o semáforo é dito binário e quando não existe essa limitação é chamado de contador.

Quando esse limite é atingido, o contador do semáforo zera e interrompe o acesso ao bloco de avaliação. Neste caso, os indivíduos que ainda não foram avaliados são armazenados em uma fila e aguardam pela liberação do semáforo. À medida em que uma avaliação termina, a *thread* em questão deixa o bloco de avaliação e cede o lugar para que outro indivíduo seja avaliado. Esse procedimento é ilustrado, de forma geral, na Figura 3.7.

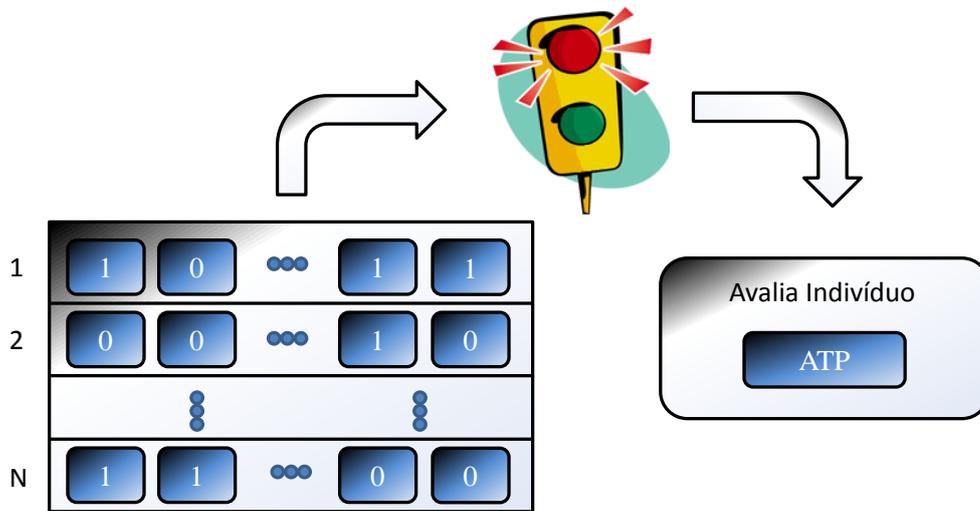


Figura 3.7: Procedimento criado para avaliação dos indivíduos de forma concorrente.

### 3.4.2 Avaliação dos Indivíduos com Auxílio de uma Memória

Em um primeiro momento, pode-se pensar em armazenar os indivíduos avaliados em uma espécie de memória. Se porventura, um indivíduo voltar a aparecer durante o processo evolutivo, sua avaliação pode ser feita acessando a memória (sem o uso do ATP). Entretanto, como o problema em questão possui um grande espaço de busca, um algoritmo bem ajustado dificilmente geraria muitos indivíduos iguais.

Vale ressaltar que, quando a descarga atinge uma mesma torre, as simulações realizadas sempre consideram o mesmo trecho de linha. Se dois indivíduos apresentarem a mesma configuração nesse trecho, ambas as simulações terão o mesmo resultado, independentemente dos demais *bits* de configuração. Para ilustrar essa situação, considere o exemplo mostrado na Figura 3.8. A mesma exibe dois indivíduos com configurações que se diferem apenas no último caractere (torre de número 60).

Neste caso, quando a descarga atmosférica atinge a primeira torre, o número de desligamentos dessa estrutura é estimado considerando o trecho formado pelas torres de 1 a 9 (considerando a simulação com 9 torres). Como nesse trecho, os dois indivíduos apresentam os mesmos caracteres, ambas as simulações terão o mesmo resultado. Dessa forma, para avaliar o segundo indivíduo, apenas os trechos da linha que compreendem o último caractere necessitariam de uma nova simulação por parte do ATP.

No âmbito deste trabalho, a memória é implementada computacionalmente através de um *Map*. Um *Map* pode ser definido como um contêiner que armazena elementos

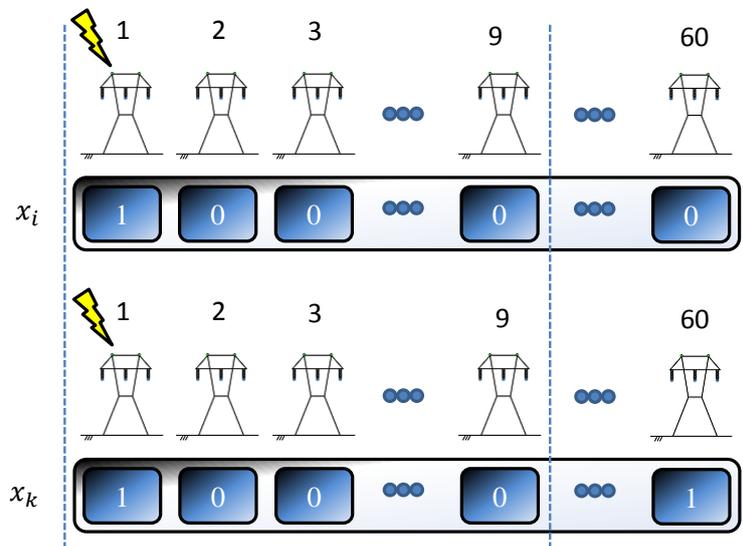


Figura 3.8: Exemplo de situação onde as configurações de dois indivíduos se diferem apenas no último caractere.

formados pela combinação de uma *key* e um valor especificado. Neste caso, o campo *key* é formado pela junção do número da torre onde a descarga atinge e da configuração de para-raios avaliada nesse trecho (Figura 3.9).

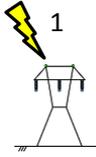
<i>Key</i>					<i>BFR</i>	
	1	0	...	1	1	4,90
	0	0	...	1	0	3,70
	⋮		⋮			
	1	1	...	0	0	6,30
	0	1	...	1	0	2,10
	⋮		⋮			

Figura 3.9: Diagrama da memória implementada nesta dissertação.

A partir dessa definição, é possível garantir que duas chaves iguais se referem ao mesmo trecho de linha e com a mesma configuração de para-raios. Dessa forma, caso um trecho avaliado volte a aparecer durante o processo evolutivo, o número de

desligamentos pode ser obtido através do *Map* (sem o uso do ATP).

### 3.5 Conclusão

Inicialmente, esse capítulo apresentou uma descrição geral do trabalho e, logo após, exibiu o algoritmo genético especialmente modificado para solucionar o problema de posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. Mais especificamente, alguns tópicos, como por exemplo, a forma de representação dos indivíduos e as operações de seleção, cruzamento e mutação implementadas foram apresentadas.

No caso da mutação, foi visto que a mesma nem sempre é determinada de forma aleatória. Na maior parte das vezes, ela é definida de forma determinística valendo-se de informações da linha de transmissão como, por exemplo, a resistência de aterramento. Por fim, algumas estratégias desenvolvidas para reduzir o custo computacional do processo foram abordadas.

# Metodologia: Cálculo de Transitórios via ATP

---

Este capítulo descreve os principais aspectos referentes ao módulo de cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. É neste capítulo que o modelo computacional implementado no ATP é apresentado e validado. Além disso, a Seção 4.3 exibe em detalhes a metodologia utilizada para estimar a taxa de desligamentos causados por *backflashover*.

## 4.1 Modelo Computacional

Para o cálculo de transitórios, alguns componentes são modelados no ATPDraw. O ATPDraw é um pré-processador gráfico para a versão do ATP na plataforma MS-Windows. Neste trabalho, ele é empregado para gerar um arquivo com a extensão “.atp” , o qual é utilizado como uma espécie de *template*.

Os componentes modelados no ATPDraw são: descarga atmosférica, vãos de linha, torres, para-raios e aterramento. Os detalhes de cada um são apresentados e discutidos nas subseções a seguir. A título de ilustração, a Figura 4.1 exibe a representação de um trecho de linha modelado no ATPDraw. A linha em questão possui três fases e faz uso de um cabo para-raios.

### 4.1.1 Descarga Atmosférica

Tradicionalmente, a descarga atmosférica é representada em estudos computacionais por uma função dupla exponencial. Esse tipo de função é composta pela soma de duas exponenciais com constantes de tempo diferentes e de sinais contrários (EPRI, 2005) (Rodrigues et al., 2014b). Além desta, também é comum encontrar trabalhos na

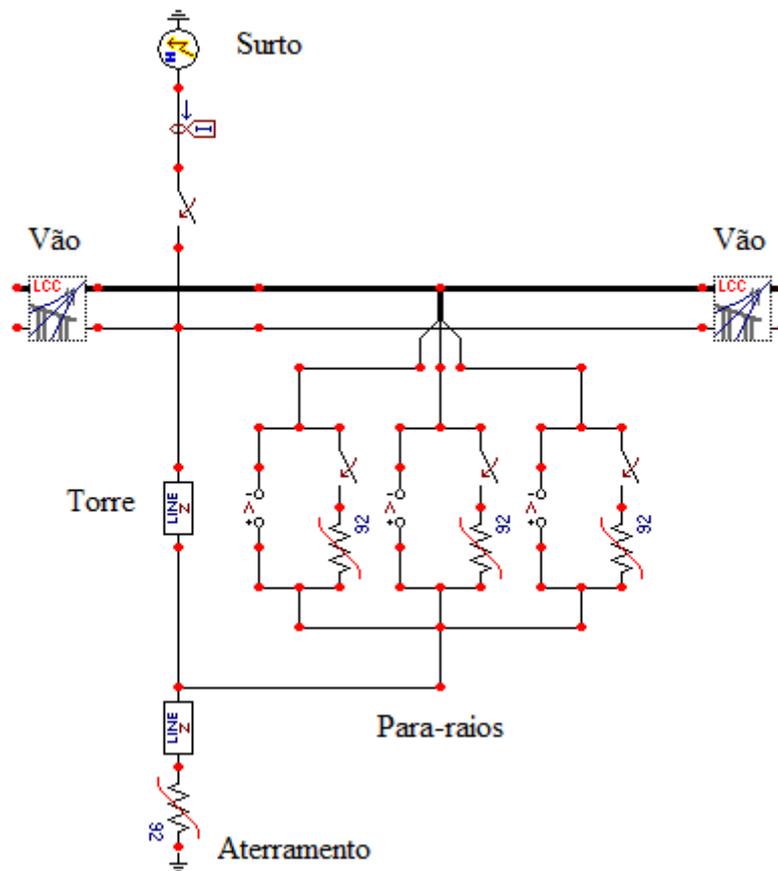


Figura 4.1: Trecho de linha modelado no ATPDraw.

literatura que representam o surto atmosférico por meio das funções CIGRE (Vasconcelos et al., 2012) e triangular (Mariano et al., 2012).

Por outro lado, como pode ser observado na Figura 4.2, essas formas de onda apresentam diferenças significativas em relação ao surto atmosférico real (Conti e Visacro, 2007). Essas diferenças são importantes e devem ser levadas em consideração para avaliar o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas.

Assim, baseado na literatura (Conti e Visacro, 2007), a corrente de retorno é representada, neste trabalho, pela soma de sete funções de Heidler. O intuito é retratar as primeiras descargas de retorno medianas que são obtidas a partir de medições feitas na estação do Morro do Cachimbo (Figura 4.2). Os parâmetros utilizados são extraídos de (Conti e Visacro, 2007) e apresentados na Tabela 4.1.

Vale ressaltar que, além da forma de onda representativa, o *software* desenvolvido também permite o uso das funções: dupla exponencial, CIGRE e triangular. Nestes

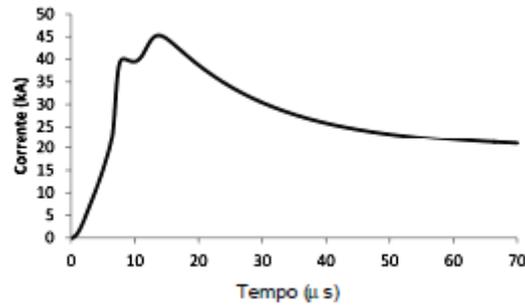


Figura 4.2: Forma de onda representativa das correntes medianas de primeiras descargas de retorno registradas na Estação Morro do Cachimbo. Figura retirada de (Rodrigues et al., 2014b).

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

casos, considera-se o tempo de frente igual a  $1,2 \mu s$  e tempo de meia onda igual a  $50 \mu s$  (Figura 4.3). Além disso, é importante dizer que os parâmetros considerados na função dupla exponencial são os mesmos utilizados em (Jia e Xiaoqing, 2006)<sup>1</sup>.

#### 4.1.2 Vãos de Linha

No desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, os parâmetros elétricos da linha devem ser calculados levando-se em consideração as suas variações com a frequência. Por outro lado, é comum encontrar trabalhos na literatura cuja metodologia considera os parâmetros constantes para um determinado valor de frequência (de Castro Assis et al., 2012).

Na presente dissertação, as duas formas de modelagem são implementadas<sup>2</sup>. O modelo JMarti é utilizado com o intuito de considerar a variação na frequência, enquanto

<sup>1</sup> $A = 1,037$ ,  $\alpha = 1,47 \times 10^4$  e  $\beta = 2,47 \times 10^6$

<sup>2</sup>Neste caso, utiliza-se o componente LCC (do inglês, *Line/Cable Constants*) do ATP, o qual disponibiliza diferentes métodos para representar os vãos de linha.

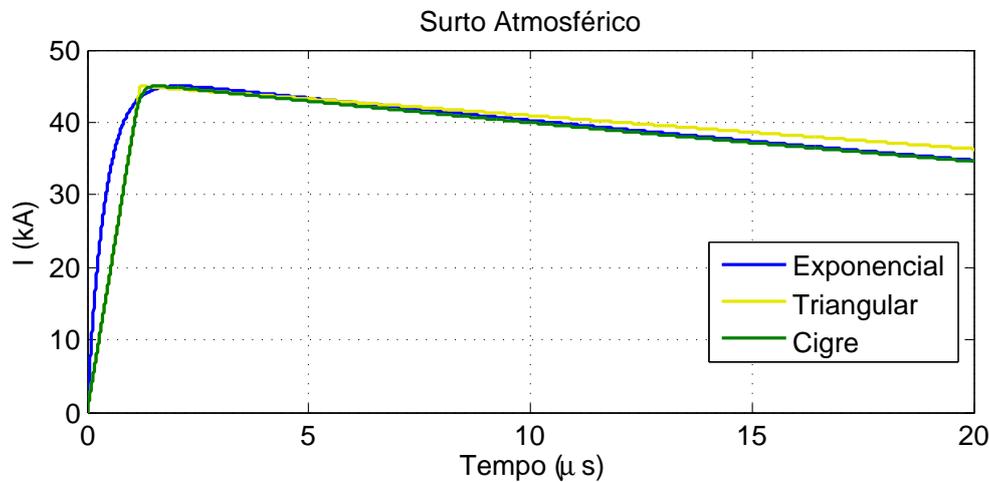


Figura 4.3: Forma de onda da corrente: dupla exponencial, triangular e CIGRE.

que o método Bergeron considera os parâmetros elétricos da linha constantes. Neste último caso, os valores de frequência adotado são: 400 Hz e 500 kHz (Mariano et al., 2012).

Em relação aos dados necessários para o cálculo de parâmetros, os mais relevantes são:

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

Além disso, é necessário definir a quantidade de vãos utilizada em cada simulação. Isso porque as sobretensões causadas pelas descargas atmosféricas correspondem a um fenômeno rápido cuja amplitude é influenciada pelos vãos adjacentes. Por esse motivo, boa parte das metodologias sugere a representação de três ou quatro vãos de linha para cada lado, a partir do local atingido pela descarga atmosférica (Mariano et al., 2012).

Neste trabalho, considera-se as duas formas de modelagem, isto é, o usuário pode escolher entre utilizar três ou quatro vãos de linha adjacentes. Caso o usuário escolha a segunda opção, por exemplo, as simulações realizadas no ATP sempre serão formadas

por um trecho de linha constituído por nove torres (excetuando as extremidades da LT, o trecho considera quatro vãos em cada lado, mais a torre na qual incide a descarga). Para ilustrar essa situação, a Tabela 4.2 apresenta alguns trechos considerados em uma linha de transmissão com 50 torres.

Tabela 4.2: Trechos de linha utilizados na simulação de uma LT com 50 torres. Por motivos de visualização, apenas alguns trechos são mostrados.

<b>Torre Atingida Pelo Surto Atmosférico</b>	<b>Torres Consideradas no ATP</b>
1	[1, 9]
3	[1, 9]
30	[26, 34]
48	[42, 50]
50	[42, 50]

### 4.1.3 Torres

Da literatura (Araújo e Neves, 2005), sabe-se que, quando a torre é percorrida por um surto atmosférico, a mesma pode ser modelada como uma linha de transmissão vertical, com: i) velocidade de propagação próxima à velocidade da luz e ii) impedância de surto definida .

A estimativa da impedância pode ser feita por meio de equações matemáticas que consideram a forma geométrica das torres. No entanto, como existe uma grande variedade de estruturas e formas, torna-se complexo a criação de um método geral para esse cálculo (EPRI, 2005) (Mota et al., 2011). Isso significa dizer que, cada estrutura possui um equacionamento específico e somente formatos simplificados, como cilíndricos e cônicos são considerados. A título de ilustração, a Figura 4.4 exibe a formulação de três tipos diferentes de estrutura.

Diante dessa dificuldade, a modelagem da torre, neste trabalho, é feita de forma simplificada. O modelo considera que a torre é representada por dois trechos de linha de transmissão vertical ligados em série (Rodrigues et al., 2014a). O comprimento da parte superior é dado pela distância entre o condutor mais baixo e o cabo para-raios ( $h_1$ ). Já no trecho inferior, esse valor é determinado pela distância entre esse condutor e o solo ( $h_2$ ). A Figura 4.5 exibe alguns exemplos dessa simplificação adotada.

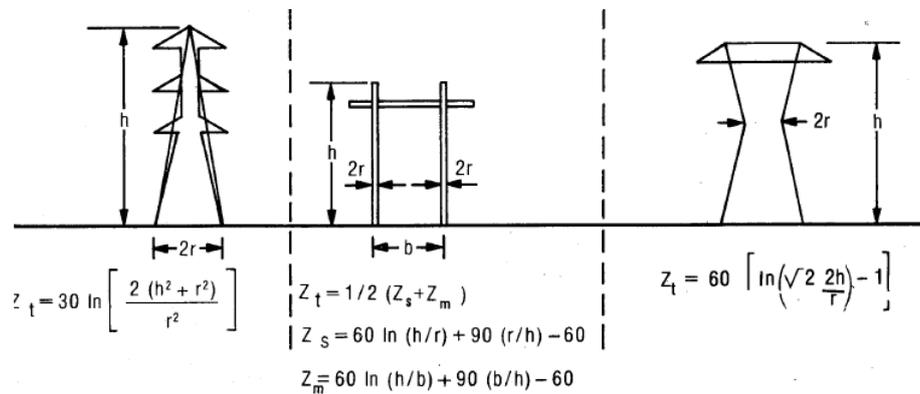


Figura 4.4: Impedâncias de surto para três tipos de estruturas. Figura retirada de (EPRI, 1982).

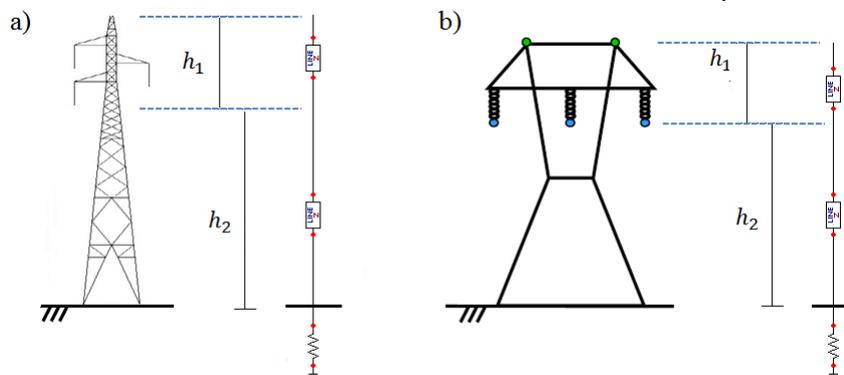


Figura 4.5: Representação das torres por dois trechos de linha de transmissão vertical ligados em série.

Por fim, cada trecho assume: i) velocidade igual a 85% da velocidade da luz e ii) impedância de surto definida igual a  $200 \Omega$ . Vale ressaltar que essa simplificação é o caminho adotado para que a metodologia possa ser aplicada em qualquer linha de transmissão, independente do perfil da torre em estudo. Além disso, de acordo com (Sargent e Darveniza, 1969), a impedância de surto da torre varia normalmente entre  $100$  e  $300 \Omega$  para uma grande variedade de estruturas. É por esse motivo que, neste trabalho, assume-se o valor intermediário de  $200 \Omega$ .

#### 4.1.4 Para-raios de Óxido de Zinco

Os para-raios são representados por elementos não lineares dada a sua curva  $V \times I$  (Figura 4.6). Essa escolha é baseada na simplicidade de implementação e nos bons resultados que esse modelo possui (Meister, 2005).

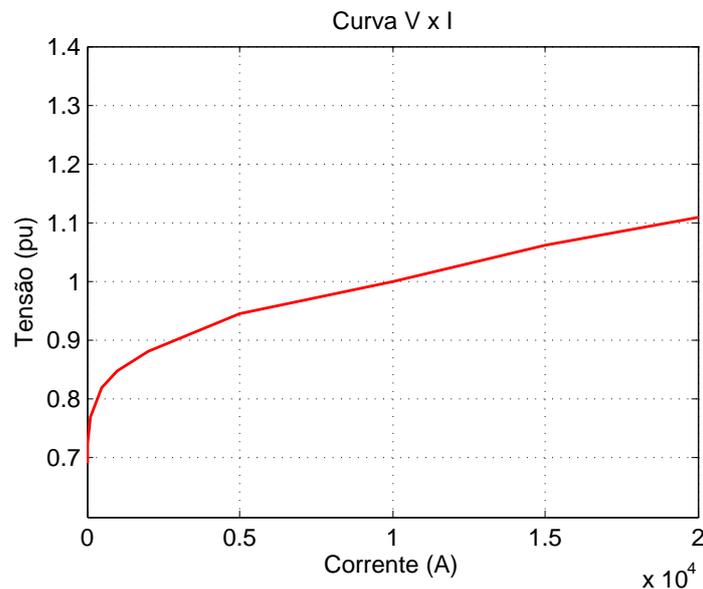


Figura 4.6: Curva  $V \times I$  do para-raios.

Em relação à conexão, esse equipamento é instalado entre a torre e a fase correspondente. Contudo, o ponto de conexão do para-raios na estrutura é considerado igual à altura do condutor mais próximo ao solo (Figura 4.1), uma vez que a torre é modelada de forma simplificada (Figura 4.5).

#### 4.1.5 Aterramento

O aterramento elétrico possui um importante papel no desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, uma vez que o mesmo influencia diretamente na sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Sendo assim, uma adequada representação desse elemento é de fundamental importância para uma correta avaliação do desempenho da linha.

De (Visacro Filho, 2005), sabe-se que o solo pode sofrer um processo de ionização quando correntes muito intensas fluem através do aterramento. Nesta situação, a densidade de corrente nas proximidades do eletrodo resulta em um campo elétrico capaz de exceder um limite crítico e, como consequência, são formados canais de descargas elétricas nas proximidades dos eletrodos. Com a formação desses canais, o escoamento da corrente para o solo é facilitado.

Em estudos computacionais, para considerar o efeito de ionização do solo, a impedância de aterramento pode ser modelada por uma resistência não linear. Umas

das formas de se calcular essa não linearidade é a partir das expressões formuladas e propostas pelo CIGRE (CIGRÉ, 1991):

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

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

Em que:

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

Além dessa forma de representação, é comum encontrar trabalhos na literatura que desconsideram o efeito de ionização e retratam o aterramento elétrico por uma resistência linear (de Castro Assis et al., 2012). De toda via, vale ressaltar que a presente dissertação permite as duas formas de modelagem, isto é, o aterramento pode ser retratado considerando ou não o efeito de ionização do solo.

Por fim, vale ressaltar que de acordo com (de Castro Assis et al., 2012), em sistemas de aterramento compostos por cabos contrapesos, a possibilidade da ionização do solo reduzir o valor do aterramento é remota. Isso porque, caso ocorra a ionização, a mesma se dará apenas nas extremidades dos rabichos e assim, terá pouca influência no valor da impedância de aterramento.

## 4.2 Resumo das Opções de Modelagem

A Tabela 4.3 exibe, de forma resumida, os tipos de modelagem considerando os componentes descritos na Seção 4.1. Neste caso, apenas os elementos que são representados por mais de uma forma são mostrados. Além disso, boa parte das vezes nesta dissertação, é utilizada a modelagem padrão apresentada na Tabela 4.4. Quando outra for considerada, o leitor será informado.

Tabela 4.3: Resumo das opções de modelagem contempladas no *software*.

Componentes	Tipos de Representação
Descarga atmosférica	Forma de onda representativa Exponencial 1,2 / 50 $\mu$ s Triangular 1,2 / 50 $\mu$ s CIGRE 1,2 / 50 $\mu$ s
Quantidade de vãos	3 vãos adjacentes 4 vãos adjacentes
Parâmetros elétricos	JMarti Bergeron com frequência constante de 500 kHz Bergeron com frequência constante de 400 Hz
Aterramento elétrico	Resistência não-linear (efeito de ionização do solo) Resistência linear (sem o efeito de ionização do solo)

Tabela 4.4: Configurações consideradas padrões nesta dissertação.

Configurações
Modelo de linha JMarti 4 vãos adjacentes Forma de onda representativa da corrente Ionização do solo

## 4.3 Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas

Para calcular o desempenho das LTs frente às descargas atmosféricas, é necessário estimar, inicialmente, o número de descargas atmosféricas que atingem a linha e o valor

da corrente crítica associado à disrupção da cadeia de isoladores. Vale dizer, que se entende como corrente crítica, o menor valor de corrente de descarga que resultaria em uma sobretensão capaz de romper o isolamento. As subseções a seguir detalham as estimativas desses valores.

Quanto ao local de incidência, pode-se adotar um critério considerando que 60% das descargas na linha atingem a torre, enquanto que o restante, 40%, incidem ao longo do vão. De acordo com (CIGRÉ, 1991), sabe-se que rupturas a meio de vão são possíveis, mas ocorrem em número muito menor do que a quantidade de rupturas na torre. Ainda de (CIGRÉ, 1991), em situações onde a distância entre o cabo para-raios e os condutores é consideravelmente maior que o comprimento da cadeia de isoladores, rupturas no meio do vão podem ser ignoradas.

Sendo assim, o cálculo do número de desligamentos pode ser aproximado considerando apenas a incidência de descargas na torre. Para tal, é necessário aplicar 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 (CIGRÉ, 1991). Além disso, vale lembrar que aspectos relativos ao fenômeno de “falha de blindagem” não são incluídos nesta análise. O intuito é proteger a linha contra desligamentos causados por *backflashover*.

### 4.3.1 Número de Descargas Atmosféricas

De acordo com (CIGRÉ, 1991), o número de descargas atmosféricas,  $N_L$ , que atingem a linha de transmissão por 100 km de linha por ano pode ser expresso como:

$$N_L = \frac{N_g}{10}(2R_a + d_{pr}) \quad (4.3)$$

em que,  $N_g$  é a densidade local de descargas atmosféricas (raios/  $km^2$ / ano),  $R_a$  é o raio de atração ( $m$ ) e  $d_{pr}$  é a distância entre os cabos para-raios ( $m$ ). Caso a linha apresente apenas um condutor de blindagem,  $d_{pr}$  será igual a zero. Ainda de acordo com (CIGRÉ, 1991), a expressão sugerida para o cálculo do raio de atração é:

$$R_a = 14H_t^{0,6} \quad (4.4)$$

em que,  $H_t$  é a altura da linha de transmissão ( $m$ ).

Por meio da Equação (4.3), percebe-se que o valor da densidade local de descargas atmosféricas,  $N_{gr}$ , é de fundamental importância para estimar o desempenho da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas. Por isso, sempre que possível, é recomendável que esse parâmetro seja obtido por medições realizadas em aparelhos ou sistemas projetados para tal finalidade.

### 4.3.2 Suportabilidade dos Isoladores

Dada uma configuração de para-raios, o ATP simula a incidência de descargas atmosféricas e calcula a sobretensão resultante na cadeia de isoladores. A partir daí a curva  $V \times t$  (Tensão x Tempo) é utilizada como critério para determinar se haverá ou não ruptura do isolamento (IEEE, 1985). A título de ilustração, a Figura 4.7 mostra essa curva para um determinado comprimento de isolador.

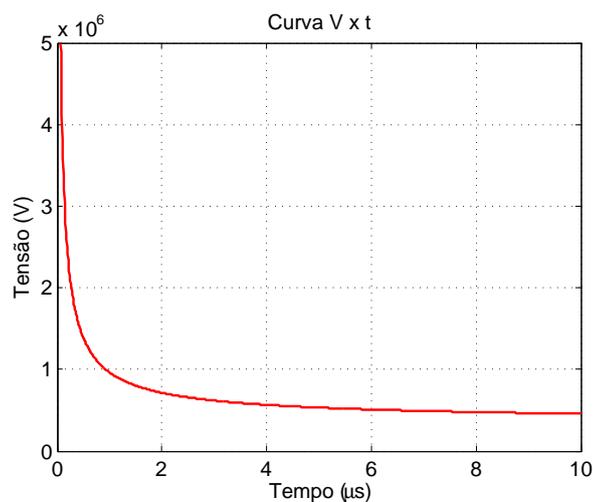


Figura 4.7: Exemplo de uma curva  $V \times t$  para uma cadeia de isoladores com comprimento igual a 0,87 metros.

Em termos de definição, a curva  $V \times t$  é dada pela equação (IEEE, 1985):

$$V_d = 400L + \frac{710L}{t^{0,75}} \quad (4.5)$$

em que,  $V_d$  é a tensão crítica disruptiva em kV,  $L$  é o comprimento da cadeia de isoladores em metros e  $t$  é o tempo em  $\mu s$ .

De acordo com essa formulação, é possível estabelecer se haverá ou não ruptura do isolamento baseado nos valores de amplitude da tensão em um determinado instante de tempo. Neste trabalho, é considerado que, caso o nível de tensão supere o limiar estabelecido pela curva  $V \times t$ , ocorrerá uma ruptura no isolamento. Em relação à corrente crítica,  $I_{cc}$ , a mesma pode ser estimada (em pu) com base nos valores da tensão crítica disruptiva ( $V_d$ ) e da tensão resultante na cadeia de isoladores ( $V_{sn}$ ). A Equação (4.6) exhibe essa relação (IEEE, 1985).

$$I_{cc} = \frac{V_d}{V_{sn}} \quad (4.6)$$

### 4.3.3 Cálculo da Taxa de Desligamentos

Para calcular a taxa de desligamentos é necessário estimar a probabilidade de uma corrente de retorno possuir uma amplitude maior ou no mínimo igual ao valor da corrente crítica. Isso porque nestas condições, a incidência de uma descarga atmosférica causaria uma disrupção na cadeia de isoladores. Assim, a Equação (4.7) é utilizada com este propósito (IEEE, 1985).

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (4.7)$$

Na qual,  $P(I)$  é a probabilidade da corrente de descarga atmosférica  $I$  (kA) ser excedida. A partir da Equação (4.7) e da estimativa do número de descargas,  $N_L$ , a taxa de desligamentos causados por *backflashover* pode ser calculada como:

$$BFR = 0,6 N_L P(I_{cc}) \quad (4.8)$$

em que, o valor 0,6 corresponde ao fator de correção necessário quando se considera a incidência de descargas atmosféricas somente na torre.

O uso da Equação (4.8) assume que algumas variáveis da LT, como: i) altura, ii) resistência de aterramento e iii) densidade de descargas atmosféricas são constantes durante todo o percurso da mesma. Como essa condição nem sempre é verdadeira, uma das formas de se contornar essa limitação é dividir a linha em vários trechos de comprimento  $L_n$  e avaliar cada seção separadamente. Sendo assim, a Equação (4.8) pode ser utilizada para estimar o número de desligamentos em cada torre e a Equação (4.9) permite combiná-los por meio de uma média ponderada.

$$BFR = \frac{BFR_1 L_1 + BFR_2 L_2 + \dots + BFR_n L_n}{L} \quad (4.9)$$

## 4.4 Validação do Modelo Computacional

A fim de validar o modelo implementado no ATP, o módulo de cálculo de transitórios desenvolvido em (Vasconcelos et al., 2012) é utilizado para fins de comparação. Para tal, utiliza-se uma linha de transmissão que possui circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A altura das torres, a resistência de aterramento e o comprimento dos vãos assumem valores diferentes ao longo do percurso da linha. Vale ressaltar que essa LT é apresentada de forma mais detalhada no Capítulo 6, por ora, a Tabela 4.5 exhibe as características gerais da mesma.

Tabela 4.5: Características gerais da linha de transmissão utilizada na validação.

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

Dito isto, uma configuração aleatória de para-raios é definida e os valores de corrente crítica são estimados considerando o modelo implementado no ATP e o módulo de cálculo de transitórios apresentado em (Vasconcelos et al., 2012). Neste caso, utiliza-se as opções de modelagem apresentadas na Tabela 4.6, para que o modelo desta dissertação se aproxime o máximo possível daquele utilizado na referência.

Tabela 4.6: Modelagem do *software* utilizada na validação.

Configurações
Bergeron 400 Hz
4 vãos adjacentes
CIGRE 1,2 / 50 $\mu$ s
Sem ionização do solo

Finalmente, a Figura 4.8 exibe os resultados de corrente crítica obtidos. Na mesma é possível ver que, apesar das diferenças na etapa de implementação, ambos os modelos estimam valores bem semelhantes.

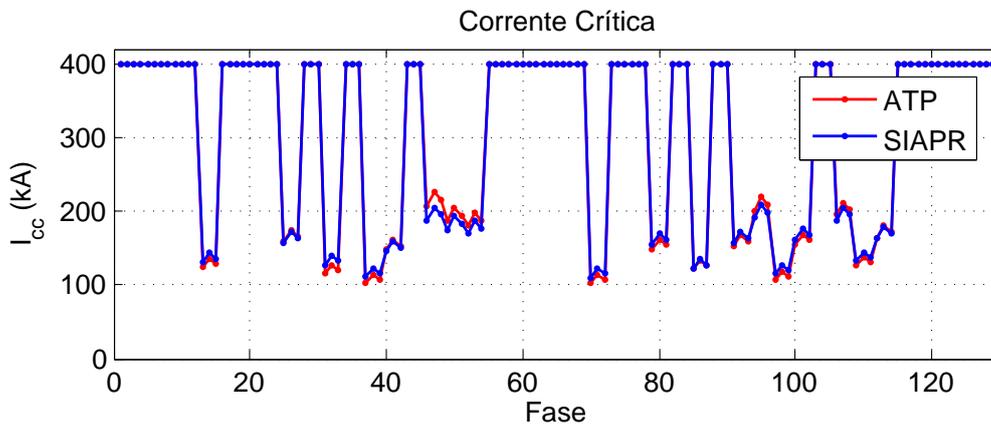


Figura 4.8: Comparação entre os valores estimados de corrente crítica. O gráfico exibe os valores de  $I_{cc}$  considerando as fases de cada torre na sequência ABC.

## 4.5 Conclusão

Esse capítulo apresentou o módulo de cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Em relação ao modelo computacional, foi visto que diferentes formas de representação dos elementos foram implementadas. Pode-se citar, por exemplo, os parâmetros elétricos da linha que são calculados considerando ou não as suas variações na frequência.

Finalmente, a Seção 4.3 exibiu os detalhes da metodologia para estimar a taxa de desligamentos causados por *backflashover*. Tópicos como: Número de Descargas

---

Atmosféricas, Suportabilidade dos Isoladores e Cálculo da Taxa de Desligamentos foram abordados.



# Resultados: Estudo de uma Linha de Transmissão de 69 kV

---

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação considerando uma linha de transmissão de 69 kV. Para tal, são descritas as principais características dessa linha, como por exemplo, o perfil da resistência de aterramento das torres. É importante ressaltar que essas informações pertencem à base de dados do Laboratório de Computação Evolucionária da UFMG (LCE). Essa base é composta por diferentes linhas de transmissão, sendo que alguns dados são reais e outros hipotéticos.

Uma vez que os dados são apresentados, o *software* desenvolvido é utilizado para calcular as sobretensões oriundas de descargas atmosféricas. Neste caso, dois cenários são considerados: i) torre sem para-raios e ii) torre com para-raios. Em seguida, o desempenho da linha é estimado e o posicionamento ótimo de para-raios é empregado. Por fim, uma análise sobre as diferentes formas de se modelar o problema é apresentada.

## 5.1 Dados Utilizados

A linha de transmissão em estudo possui circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A altura das torres, a resistência de aterramento e o comprimento dos vãos assumem valores diferentes durante o percurso da linha e são mostrados nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3. As demais características da LT são apresentadas na Tabela 5.1.

A partir do perfil da altura das torres, Figura 5.1, pode-se dizer que boa parte das estruturas dessa linha apresenta altura entre 20 e 30 metros. Em relação à resistência de aterramento, Figura 5.2, percebe-se que na região final da linha de transmissão (a partir da torre de número 40), há um acréscimo considerável nesses valores. Pode-se citar, por exemplo, o valor máximo de  $123 \Omega$  que ocorre na torre de número 48.

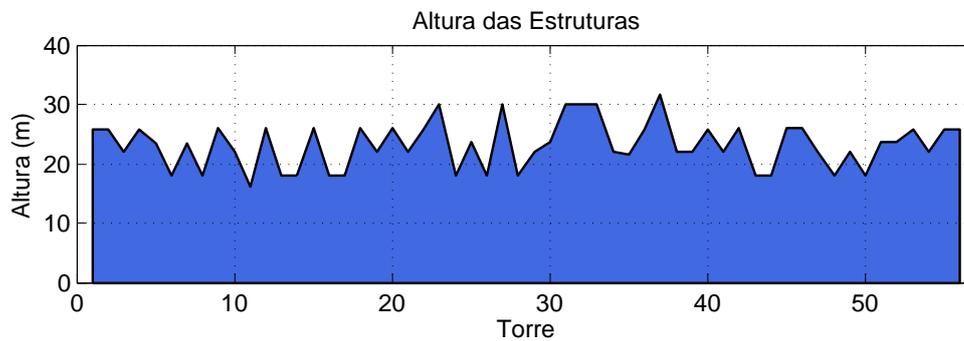


Figura 5.1: Perfil da altura das torres. Primeira linha de transmissão analisada.

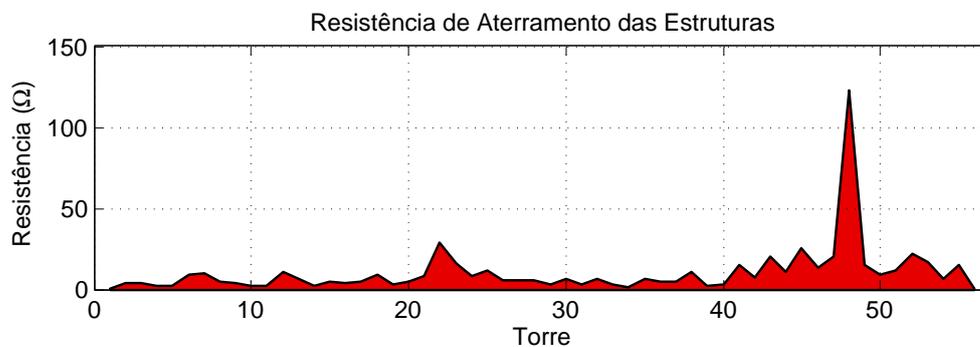


Figura 5.2: Perfil da resistência de aterramento das torres. Primeira linha de transmissão analisada.

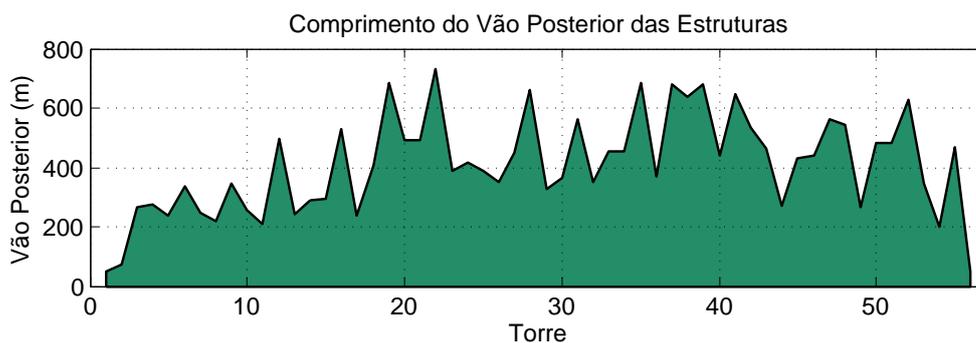


Figura 5.3: Perfil do comprimento dos vãos posteriores. Primeira linha de transmissão analisada.

Já na Figura 5.3, nota-se que nas 10 primeiras torres nenhum vão supera a extensão de 400 metros. Além disso, vale ressaltar que a linha apresenta alguns para-raios instalados em suas extremidades. A Figura 5.4 exibe essa configuração.

Tabela 5.1: Características gerais da primeira linha de transmissão analisada.

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

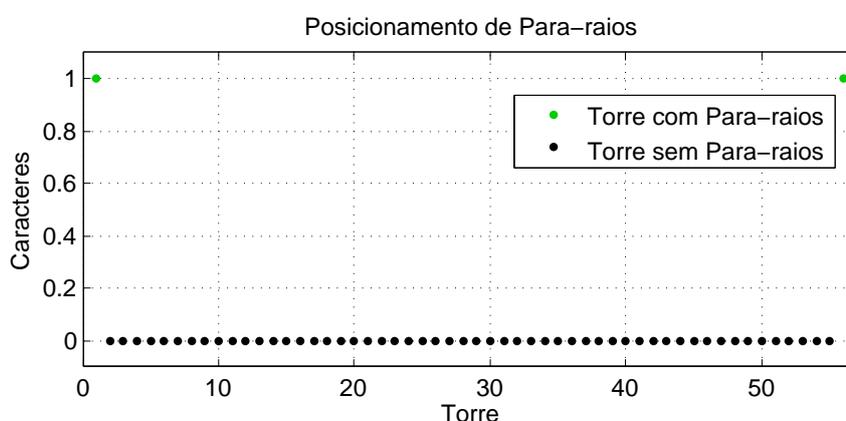


Figura 5.4: Configuração inicial de para-raios da primeira linha de transmissão analisada. Utilização de 6 para-raios.

Por fim, neste trabalho, adota-se um valor máximo de 5 desligamentos / 100 km de linha/ ano como o limite estabelecido para linhas de transmissão com classe de tensão inferior a 230 kV. Esse limite é utilizado na etapa de alocação ótima de para-raios como a restrição de desempenho estabelecida.

## 5.2 Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas

### 5.2.1 Sobretensão na Cadeia de Isoladores

Antes de estimar o desempenho da linha de transmissão, é interessante analisar as sobretensões que surgem quando a torre é atingida por uma descarga atmosférica. Isso porque, dependendo do valor da amplitude, são essas sobretensões que podem

provocar a ocorrência de disrupções devido ao fenômeno de *backflashover*. Para tal, pode-se utilizar, como exemplo, a quinta torre da LT analisada. A Tabela 5.2 apresenta algumas características dessa estrutura.

Tabela 5.2: Características da torre de número 5. Primeira linha de transmissão analisada.

Característica	Valor
Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	2,21
$N_g$ (raios/km <sup>2</sup> /ano)	6,00
Comprimento do vão posterior ( $m$ )	239,00
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	0,875
Altura da torre ( $m$ )	23,30
Altura do cabo para-raios ( $m$ )	23,30
Altura da fase A ( $m$ )	12,50
Altura da fase B ( $m$ )	17,14
Altura da fase C ( $m$ )	14,82

Diante do exposto, dois cenários são utilizados para simular a incidência de descargas atmosféricas na estrutura mencionada: i) torre sem para-raios e ii) torre com para-raios. Para tal, considera-se a modelagem padrão apresentada na Tabela 4.4. As subseções a seguir apresentam, de forma detalhada, os resultados obtidos.

### Torre Sem Para-raios

Considerando a torre sem para-raios, a incidência de descargas atmosféricas é simulada no ATP e a Figura 5.5 mostra as sobretensões impostas à cadeia de isoladores. Por meio dela, nota-se que as sobretensões oriundas do surto atmosférico, em nenhum momento, interceptam a curva  $V \times t$ . Em outras palavras, a amplitude da descarga atmosférica considerada não é suficientemente elevada para provocar uma disrupção na cadeia de isoladores dessa torre. Por outro lado, utilizando os valores de sobretensão (calculados pelo ATP) e as equações (4.5) e (4.6) é possível identificar esse valor, ou seja, a corrente crítica.

Para o caso analisado, os valores de corrente crítica são respectivamente: 126,40, 146,05 e 134,98 kA para as fases A, B e C. Contudo, pode-se considerar a menor amplitude encontrada como o valor crítico, uma vez que a partir dela, qualquer descarga que atinja a torre pode causar disrupções devido ao fenômeno de *backflashover*. Para ilustrar essa afirmação, a Figura 5.6 exhibe as sobretensões quando se considera a descarga atmosférica com essa amplitude (126,40 kA).

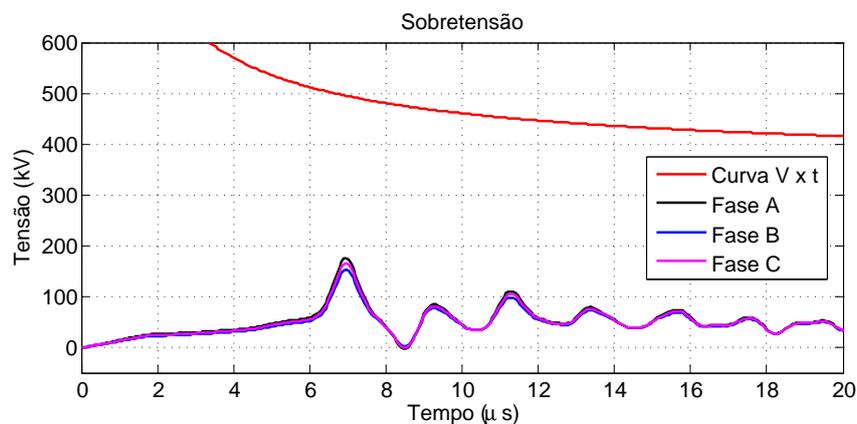


Figura 5.5: Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 45 kA.

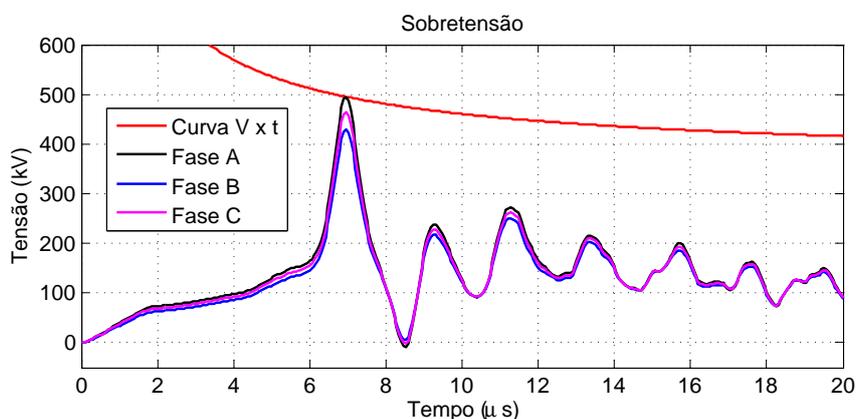


Figura 5.6: Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 126,40 kA.

Pode-se notar que, desta vez, a sobretensão na fase A alcança o limiar estabelecido pela curva  $V \times t$ . Em outras palavras, pelo critério adotado neste trabalho, a sobretensão resultante atinge o valor necessário para provocar uma ruptura na cadeia de isoladores. Contudo, de acordo com a Equação (4.7), a probabilidade de se ter uma descarga atmosférica com valor de pico maior do que 126,40 kA é de apenas 2%. Como se sabe, quanto maior é o pico da corrente de retorno, menor é a probabilidade de sua ocorrência.

Além desses resultados, é interessante perceber que a sobretensão na fase A geralmente é maior que as demais. Vale lembrar que, de acordo com a Tabela 5.2, essa é a fase mais próxima do solo, sendo que a mesma é quase 5 metros mais baixa que a fase B, por exemplo. Além disso, em relação à estimativa da corrente crítica, a Figura 5.6 mostra que o uso do ATP em comum acordo com as equações (4.5) e (4.6) permite obter uma boa aproximação desse valor.

### Torre Com Para-raios

Nesta situação, a análise é realizada considerando a alocação de um para-raios na fase A. Para tal, o ATP é utilizado novamente e a Figura 5.7 mostra os resultados obtidos.

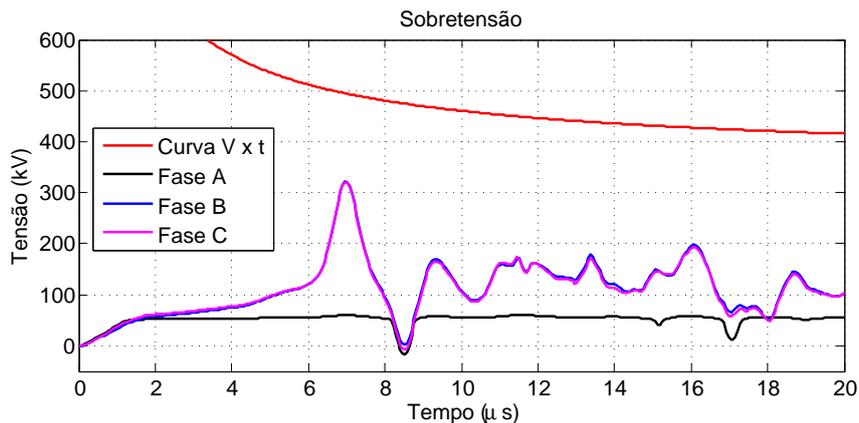


Figura 5.7: Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 126,40 kA e para-raios na fase A.

A Figura 5.7 mostra que o uso do para-raios contribui de forma significativa para diminuir a sobretensão resultante na fase A. Isso significa dizer, que a situação de outrora (Figura 5.6) já não é mais suficiente para provocar um desligamento da linha de transmissão. Esse cenário é ainda melhor, ao considerar a adição de para-raios em todas as fases (Figura 5.8). Neste caso, todos os valores de sobretensão diminuem de forma considerável. O valor máximo que, anteriormente era cerca de 500 kV (Figura 5.6), agora é de aproximadamente 60 kV.

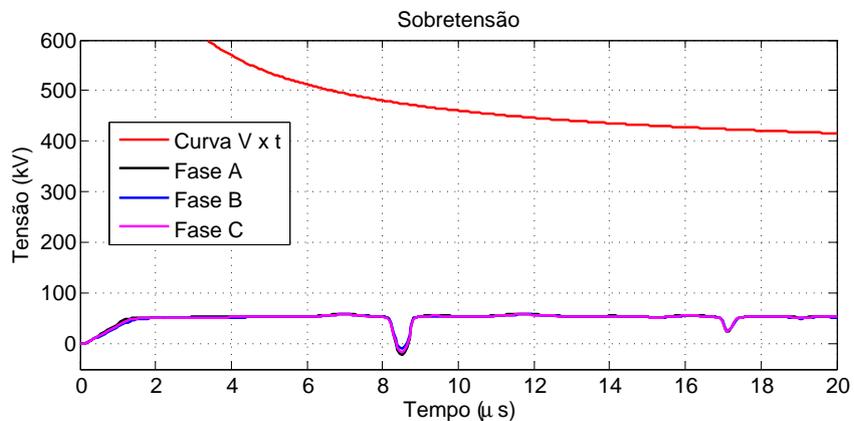


Figura 5.8: Sobretensões na cadeia de isoladores da quinta torre. Amplitude da corrente de retorno igual a 126,40 kA e para-raios em todas as fases.

Por fim, os resultados das figuras 5.7 e 5.8 só reforçam o fato de que o uso de para-raios pode melhorar o desempenho de linhas de transmissão. Contudo, é preciso identificar quais torres necessitam mais dessa proteção para que a solução seja viável do ponto de vista econômico.

### 5.2.2 Cálculo da Taxa de Desligamentos

Para estimar o desempenho da LT é necessário calcular os valores de corrente crítica para cada uma das torres envolvidas no estudo. Sendo assim, um procedimento análogo ao mostrado na Subseção 5.2.1 é conduzido e os resultados obtidos são mostrados na Figura 5.9.

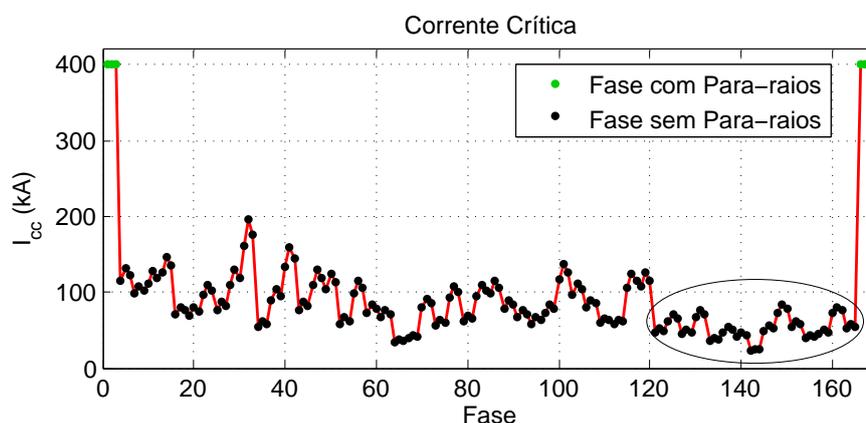


Figura 5.9: Valores estimados de corrente crítica para a linha em análise. O gráfico exibe os valores de  $I_{cc}$  considerando as fases de cada torre na sequência ABC.

Os dados mostram que, nas extremidades da linha, os valores de corrente crítica são iguais a 400 kA. Vale lembrar que, quando a torre possui para-raios em todas as fases (Figura 5.4), o ATP não é utilizado e tal valor é atribuído para a corrente (Seção 3.4). Além disso, é possível notar que na parte final da linha de transmissão, há uma redução significativa nos valores de  $I_{cc}$  (região destacada pela elipse). Não por coincidência, nessa mesma região existe um acréscimo na resistência de aterramento das estruturas da LT (Figura 5.2).

Em relação ao desempenho, é possível calcular o valor da taxa de desligamentos por meio das equações (4.8) e (4.9). Neste caso, mesmo com os para-raios adicionados nas extremidades da LT, o valor obtido é de 10,22 desligamentos/ 100 km de linha/ ano. Isso significa dizer, que a linha em questão não atende ao limite preestabelecido de 5 desligamentos/ 100 km de linha/ ano.

## 5.3 Alocação Ótima de Para-raios

Nesta Seção, a alocação ótima de para-raios é utilizada com o intuito de melhorar o desempenho da LT em estudo. Neste processo, os experimentos são feitos considerando os dois tipos de posicionamento: i) torre e ii) fase. Em cada simulação, o algoritmo genético é configurado com 36 gerações e um tamanho de população igual a 20 indivíduos. A modelagem utilizada é a mesma mostrada na Tabela 4.4, a qual é reproduzida a seguir.

Tabela 5.3: Configurações utilizadas no processo de otimização.

Configurações
Modelo de linha JMarti
4 vãos adjacentes
Forma de onda representativa da corrente
Ionização do solo

### 5.3.1 Alocação por Torre

A Figura 5.10 mostra a configuração de para-raios obtida ao final da otimização. Conforme esse posicionamento, os para-raios são distribuídos em 13 das 56 torres disponíveis. Como neste caso, cada torre possui três fases é necessário instalar um total de 39 para-raios para um desempenho de 4,72 desligamentos/ 100 km de linha/ ano. Além disso, vale ressaltar que 27 dos 39 para-raios estão localizados na parte final da linha de transmissão. De certa forma, essa situação já era esperada, uma vez que nessa região os valores da resistência de aterramento são maiores do que no restante da linha.

A Figura 5.11 mostra os valores de corrente crítica estimados considerando a configuração de para-raios da solução. Na mesma é possível ver que o menor valor é de aproximadamente 50 kA. A partir da Equação (4.7), é possível concluir que a probabilidade de que uma descarga atmosférica possua um valor de pico maior do que esse é de aproximadamente 22%. Na prática, essa porcentagem indica que a LT está protegida contra boa parte das descargas atmosféricas.

A Figura 5.12, por sua vez, apresenta a evolução da *fitness* e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração. É possível notar que, a partir

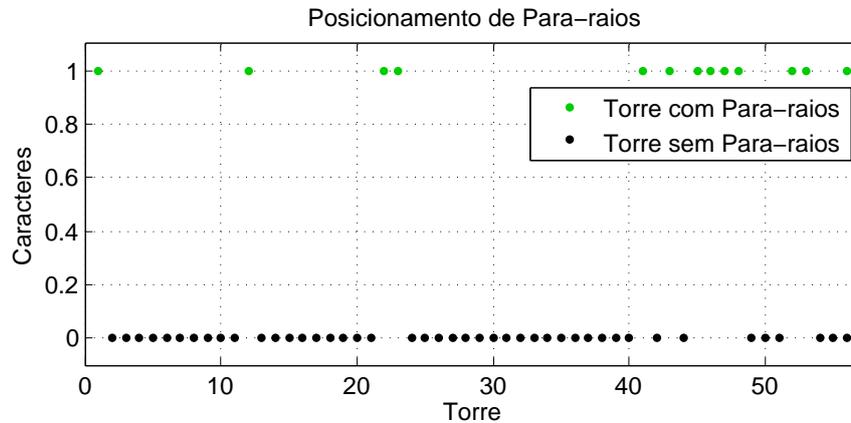


Figura 5.10: Configuração de para-raios obtida ao final da otimização. Desempenho de 4,72 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 39 para-raios.

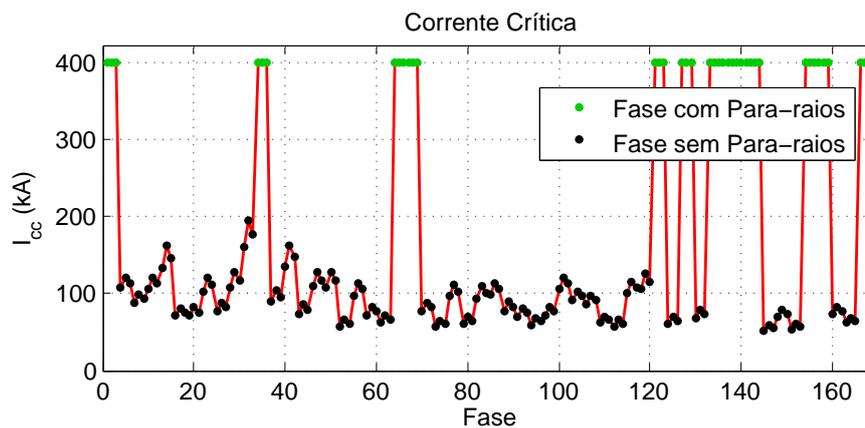


Figura 5.11: Valores estimados de corrente crítica para a solução encontrada. O gráfico exibe os valores de  $I_{cc}$  considerando as fases de cada torre na sequência ABC.

da vigésima geração, tais valores não se alteram mais e, por isso, o critério de parada é atendido antes do algoritmo executar as 36 gerações.

Outro importante ponto a ser destacado é a utilização do gerador de indivíduos. Como mencionado na Seção 3.3, essa prática permite que o algoritmo conte com boas soluções desde o começo do processo de otimização. O gráfico 1 da Figura 5.12 ilustra bem essa situação, no qual nota-se que o valor da *fitness* já é alto desde o início. Além disso, é possível observar que, já na segunda geração, o algoritmo consegue encontrar uma configuração ainda melhor. Apesar de utilizar a mesma quantidade de para-raios (neste caso, mesmo valor de *fitness*), essa configuração resulta em um desempenho bem menor daquele estimado na primeira geração ( $2,46 \times 4,47$  desligamentos/ 100 km de linha/ ano).

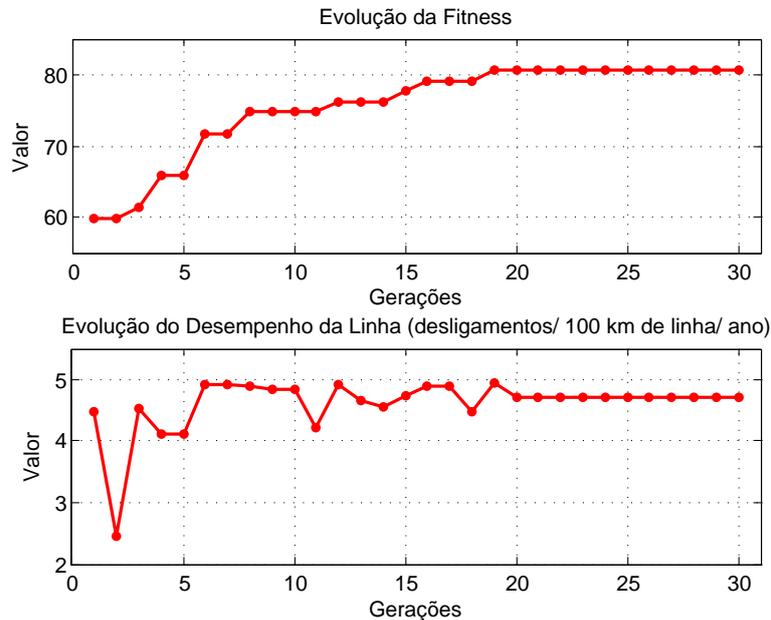


Figura 5.12: Evolução da *fitness* e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração.

Em relação ao custo computacional, a Tabela 5.4 mostra algumas medições<sup>1</sup> considerando a média de dez execuções. São elas: tempo de simulação, número de chamadas ao ATP e a quantidade de acessos à memória.

Tabela 5.4: Análise do desempenho do algoritmo. Média de dez execuções considerando a alocação por torre.

Estratégia	Tempo	ATP	Memória
Sequencial	176 min e 10 s	28417,80	0
Sequencial com Memória	14 min e 28 s	2245,80	25324,40
<i>MultiThread</i> com Memória	7 min e 38 s	2350,10	24224,59

Para o caso analisado, a utilização da memória, por si só, (descrita na Seção 3.4) diminui o tempo de simulação de 176 para 14 minutos. Uma redução de aproximadamente 92%. Essa situação acontece porque, neste caso, o uso da memória evita em média mais de 25000 chamadas ao ATP. Além disso, ao considerar a junção dessa estratégia com esquema *MultiThread*, essa redução chega a 96%.

<sup>1</sup>Características do computador utilizado: Intel(R) Core(TM) i7 – 2600 CPU @ 3,40 GHz 3,70 GHz, 16,0 GB de RAM, Sistema Operacional de 64 Bits.

### 5.3.2 Alocação por Fase

O mesmo procedimento é realizado para o caso de alocação por fase. Porém, como alguns resultados são análogos ao da alocação por torre, apenas alguns pontos importantes são destacados. Em teoria, se comparado ao posicionamento por torre, o processo de alocação por fase tende a apresentar soluções com um número menor, ou no mínimo igual de para-raios. Na prática, uma comparação é realizada para verificar a validade dessa informação. A Figura 5.13 mostra os resultados da quantidade de para-raios e do desempenho da linha em 30 simulações.

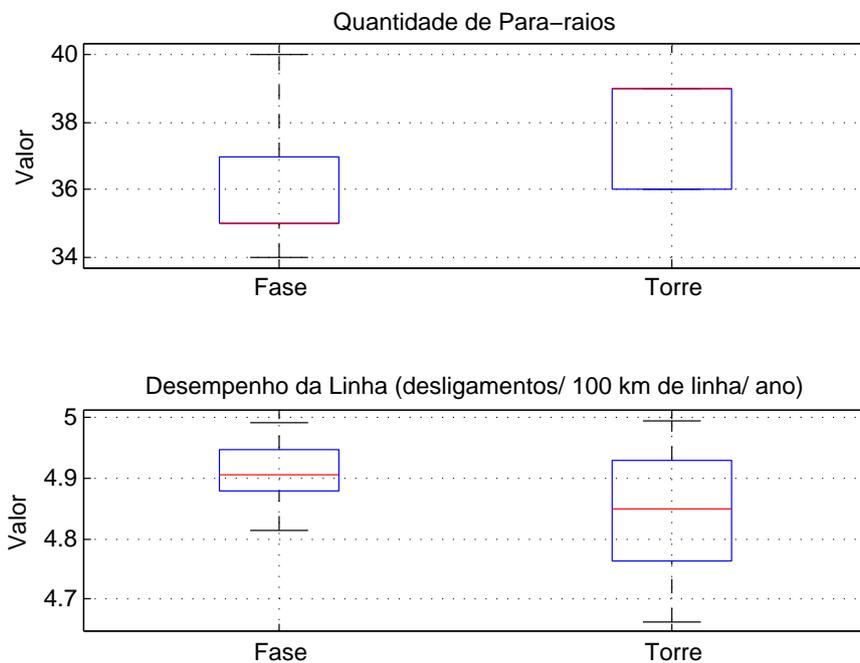


Figura 5.13: Distribuição da quantidade de para-raios e do desempenho da linha. Para cada tipo de alocação são realizadas trinta execuções.

Primeiramente, os dados indicam que nenhuma configuração obtida viola a restrição de desempenho (Figura 5.13). O valor máximo em questão é de 4,99 desligamentos/ 100 km de linha/ ano, o qual é inferior ao limite preestabelecido (5,00 desligamentos/ 100 km de linha/ ano). Vale ressaltar que, caso queira uma margem de segurança, o usuário pode definir um limite mais baixo do que o estipulado pela norma.

Além disso, ao considerar os valores mais próximos das medianas, a alocação por fase requer quatro para-raios a menos para proteger a mesma linha de transmissão ( $35 \times 39$ ). Apesar de, a princípio, não ser uma diferença tão significativa, esse resultado mostra que é possível obter soluções com uma quantidade menor de para-raios quando

se usa a alocação por fase. A título de ilustração, a Figura 5.14 mostra a configuração encontrada que faz uso de 35 para-raios.

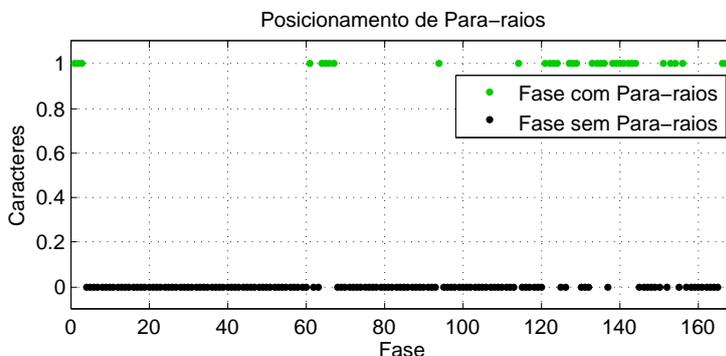


Figura 5.14: Configuração de para-raios obtida ao final da otimização. Desempenho de 4,94 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 35 para-raios. Alocação por fase.

A Figura 5.15, por sua vez, apresenta a evolução da *fitness* e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração. Diferentemente do caso anterior, desta vez, o algoritmo executa as 36 gerações estabelecidas a priori.

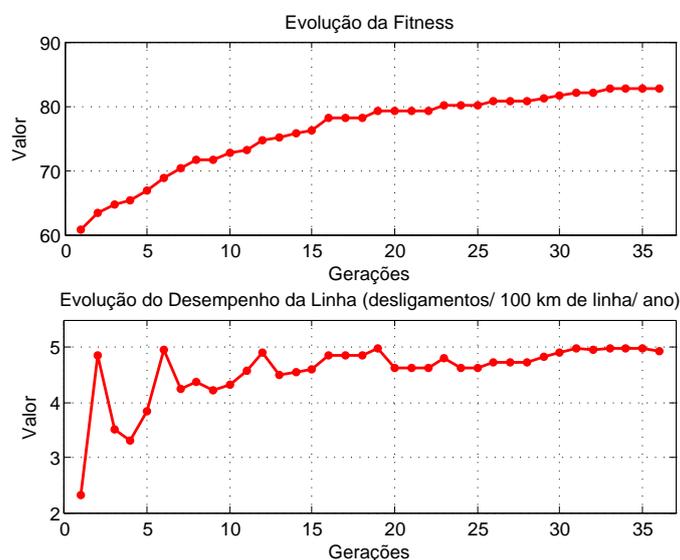


Figura 5.15: Evolução da *fitness* e do desempenho da linha considerando o melhor indivíduo de cada geração. Alocação por fase.

Quanto ao custo computacional, o posicionamento por fase é mais caro e, por isso, demanda um tempo maior de execução (Tabela 5.5). Já em relação às estratégias de avaliação, novamente é possível verificar que o uso delas permite reduzir consideravelmente o tempo de simulação. Isso porque, ao considerar o uso da memória juntamente

com o esquema *MultiThread*, o tempo de simulação diminui de 202 para 13 minutos. Uma redução de quase 93%.

Tabela 5.5: Análise do desempenho do algoritmo. Média de dez execuções considerando a alocação por fase.

Estratégia	Tempo	ATP	Memória
Sequencial	202 min e 21 s	32205,20	0
Sequencial com Memória	38 min e 53 s	6307,60	25595,80
<i>MultiThread</i> com Memória	13 min e 52 s	6232,00	26062,30

## 5.4 Impactos da Modelagem

Como mencionado no Capítulo 4, no cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas é comum encontrar na literatura certa diferença em relação à modelagem do problema. Pode-se citar, por exemplo: i) a impedância de aterramento que pode ser retratada com ou sem o efeito da ionização do solo, ii) os parâmetros elétricos da linha que são calculados considerando ou não a variação na frequência, entre outros.

Diante desse contexto, a presente seção tem por objetivo avaliar as diferentes formas de modelagem do problema. Para tal, são analisados os tópicos: Quantidade de Vãos Adjacentes, Surto Atmosférico, Ionização do Solo e Modelos de Linha.

### 5.4.1 Quantidade de Vãos Adjacentes

Em relação ao número de vãos, este trabalho considera duas formas de modelagem: 3 ou 4 vãos adjacentes a partir do local atingido pela descarga atmosférica. Em termos práticos, quanto mais vãos de linha representados na simulação, maior é a garantia de que o problema será retratado de forma satisfatória. Porém, é sabido que as torres mais afastadas tendem a influenciar menos em relação aos resultados.

Do ponto de vista computacional, a utilização de 3 vãos adjacentes é mais interessante, uma vez que o tempo envolvido na simulação é menor. No entanto, ao fazer uso dessa modelagem deve-se assegurar de que a representação do problema com menos vãos não acarrete prejuízos ao desempenho estimado da linha. A fim de verificar essa

condição, um teste é realizado com a configuração inicial de para-raios da LT analisada (Figura 5.4). A partir daí, os valores de corrente crítica são obtidos para as duas formas de modelagem e são mostrados na Figura 5.16. De acordo com os resultados, é possível notar que as duas curvas obtidas são praticamente iguais.

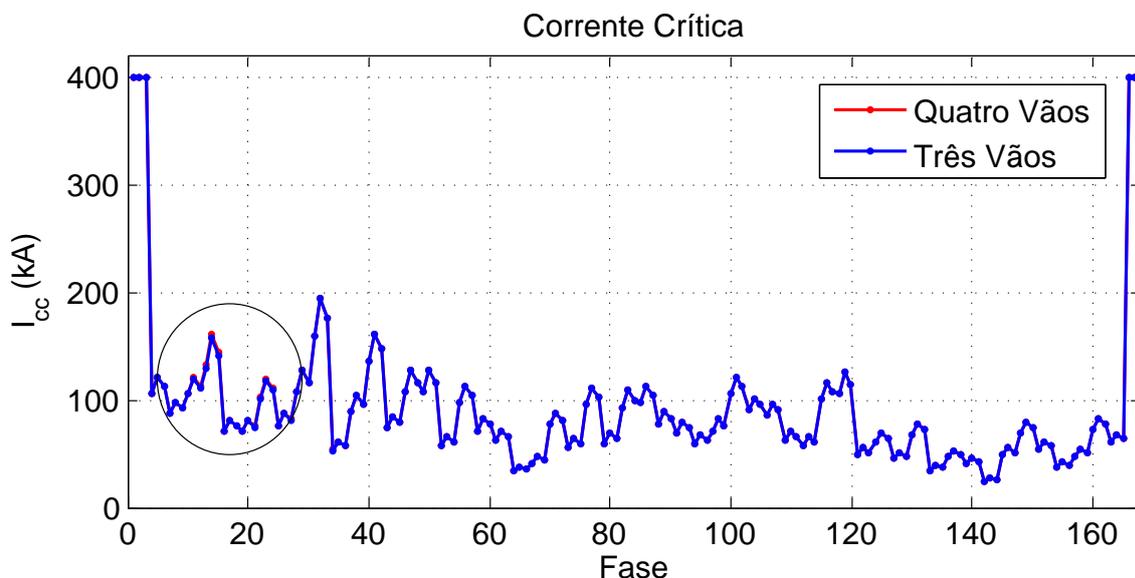


Figura 5.16: Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases *ABC*) considerando as duas formas de representação do vãos adjacentes. A elipse destaca a região de maior diferença entre os valores obtidos.

Com o objetivo de entender essa aproximação, deve-se considerar a Figura 5.3, a qual exibe o perfil do comprimento dos vãos da linha analisada. A partir dela, percebe-se que boa parte dos vãos apresenta um comprimento superior a 400 metros. Além disso, vale ressaltar que, quanto mais afastada a torre está do local de incidência, menor será sua influência na estimativa da corrente crítica.

Os valores estimados de desempenho com a utilização de 3 e 4 vãos adjacentes são respectivamente 10,22 e 10,23 desligamentos/ 100 km de linha/ ano. Em outras palavras, para a linha em questão, a modelagem pode ser realizada considerando 3 vãos adjacentes sem causar prejuízos ao desempenho estimado da linha. Contudo, é importante dizer que, sem a realização de um teste mais amplo, esse resultado não pode ser generalizado para outras linhas de transmissão.

#### 5.4.2 Surto Atmosférico

O surto atmosférico real apresenta diferenças significativas em relação às formas usuais de se representar a descarga atmosférica (dupla exponencial, CIGRE e triangu-

lar). Por esse motivo, é de se esperar que a utilização da forma de onda representativa consiga uma modelagem mais adequada do problema. Por outro lado, é interessante saber se as demais funções fornecem resultados, pelo menos, com uma boa aproximação. Assim, um teste é realizado considerando a configuração inicial de para-raios da LT em estudo. As formas de representação analisadas são listadas a seguir e a Figura 5.17 exibe o formato de onda de cada uma.

1. Forma de Onda Representativa;
2. Exponencial 1,2 / 50  $\mu\text{s}$ ;
3. CIGRE 1,2 / 50  $\mu\text{s}$ ;
4. Triangular 1,2 / 50  $\mu\text{s}$ .

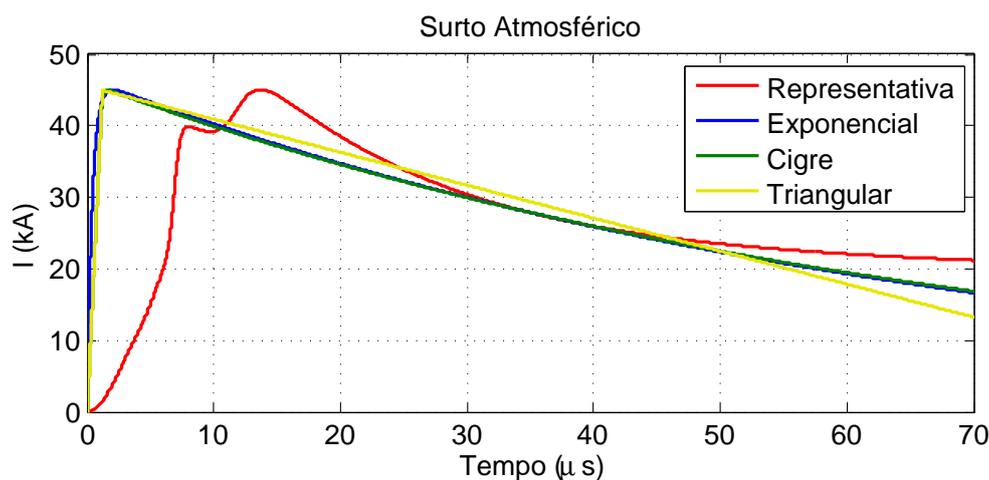


Figura 5.17: Formas de onda da corrente: representativa, dupla exponencial, CIGRE e triangular.

A Figura 5.18 mostra os valores de corrente crítica estimados considerando as quatro formas de representação do surto atmosférico. A partir da mesma, é possível ver que nem sempre as curvas obtidas se aproximam de forma satisfatória. Esta situação é acentuada principalmente na região da figura destacada pela elipse. Além disso, na maior parte das vezes, a utilização da função dupla exponencial fornece os valores mais baixos de corrente crítica. Isso significa dizer que, neste caso, tal modelagem tende a estimar uma taxa maior de desligamentos causados por *backflashover*.

Em relação aos valores de desempenho, o uso da forma de onda representativa e das funções dupla exponencial, CIGRE e triangular fornecem respectivamente: 10,22, 13,01,

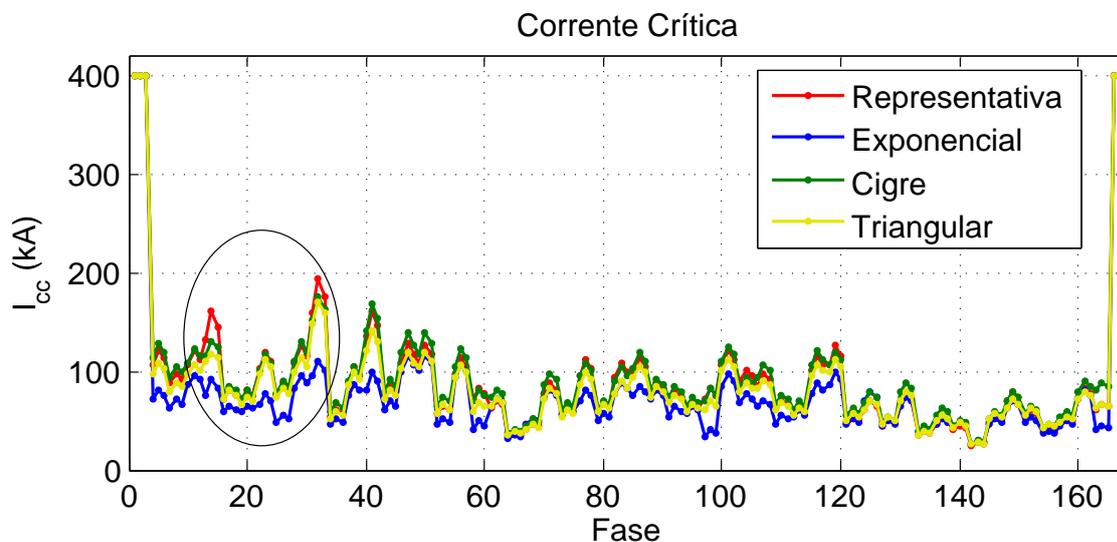


Figura 5.18: Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases *ABC*) considerando as quatro formas de representação do surto atmosférico.

8,73 e 10,34 desligamentos/ 100 km de linha/ ano. A partir destes resultados, percebe-se que existe uma diferença bem acentuada dependendo do tipo de representação adotada. Pode-se citar, por exemplo, o fato de que o uso da função dupla exponencial resulta em um valor de desempenho bem maior ao que é obtido através da forma de onda representativa ( $13,01 \times 10,22$ ).

A utilização da função triangular, por sua vez, resulta na melhor aproximação obtida, enquanto que o uso da função CIGRE fornece uma estimativa de desempenho mais baixa. Porém, novamente é importante ressaltar que, sem a realização de um teste mais amplo, essas afirmações não podem ser generalizadas para outras LTs.

Diante desses resultados, percebe-se que as características do surto atmosférico real influenciam, de forma considerável, no cálculo de desempenho de linhas de transmissão. Pode-se citar, por exemplo, i) o valor do tempo de frente da onda, ii) a natureza côncava no início da frente da onda, iii) a ocorrência da derivada máxima próxima ao pico e iv) a declividade após a ocorrência do pico. Essa constatação só reforça a necessidade de se representar o surto atmosférico pela forma de onda representativa, uma vez que a mesma é capaz de retratar o problema de maneira mais adequada.

### 5.4.3 Ionização do Solo

Neste trabalho, a impedância de aterramento é retratada de duas formas: com ou sem o efeito da ionização do solo. Da literatura (Visacro Filho, 2005), sabe-se que

quando ocorre a ionização, o escoamento da corrente para o solo é facilitado e, assim, o valor da impedância de aterramento sofre uma redução momentânea. Em termos práticos, essa redução contribui para amenizar a sobretensão resultante na cadeia de isoladores.

Diante disso, para que ocorra um eventual desligamento, é necessário que o surto atmosférico possua uma corrente de retorno com maior amplitude. Em outras palavras, pode-se dizer que o efeito da ionização contribui para aumentar o valor da corrente crítica e, por consequência, diminuir a taxa de desligamentos causados por *backflashover*.

A fim de verificar esta afirmação, um teste é realizado com a configuração inicial de para-raios da LT analisada. A partir daí, os valores de corrente crítica são obtidos considerando as duas formas de representação do aterramento elétrico. A Figura 5.19 mostra esses valores.

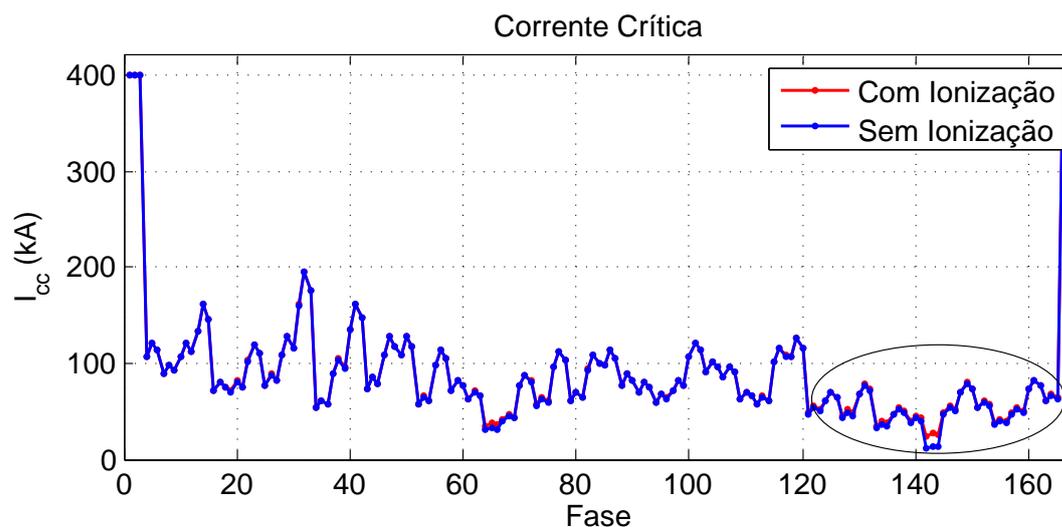


Figura 5.19: Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases ABC) considerando os dois tipos de representação do aterramento.

A partir da Figura 5.19, percebe-se que, neste caso, os resultados obtidos são bem similares. No entanto, vale lembrar que, de acordo com a formulação proposta pelo CIGRE, quanto menor é o valor da resistência de aterramento da torre, menor será a redução provocada pela ionização do solo. Essa relação justifica o resultado encontrado, uma vez que em boa parte das estruturas da linha analisada, o valor da resistência de aterramento é inferior a  $10 \Omega$  (Figura 5.2).

Por outro lado, na parte final da linha de transmissão, há um acréscimo nos valores da resistência de aterramento. Na Figura 5.19, essa região é destacada por uma

elipse, a qual mostra que o efeito da ionização provoca uma diferença nos resultados. Mais especificamente, os valores de desempenho com e sem o efeito da ionização são respectivamente: 10,22 e 11,18 desligamentos/ 100 km de linha/ ano.

Apesar das diferenças encontradas, pode-se dizer que para a linha analisada, o efeito da ionização do solo não é tão significativo. Contudo, deve-se deixar claro que à medida em que os valores da resistência de aterramento aumentam, a diferença entre os resultados também tende a aumentar.

#### 5.4.4 Modelos de Linha

No desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas, os parâmetros elétricos da linha devem ser calculados levando-se em consideração as suas variações com a frequência. No entanto, é comum encontrar trabalhos na literatura cuja metodologia considera os parâmetros constantes para um determinado valor de frequência. Diante desse contexto, é interessante verificar o efeito que esse tipo de modelagem tem sobre a taxa de desligamentos causados por *backflashover*. Assim, um teste é realizado considerando a configuração inicial de para-raios da LT. As formas de representação analisadas são:

1. JMarti;
2. Bergeron com frequência constante de 500 kHz;
3. Bergeron com frequência constante de 400 Hz.

Como o problema em questão depende da frequência, é de se esperar que o modelo JMarti consiga uma representação mais realista da situação. Por outro lado, é importante verificar se o modelo Bergeron consegue fornecer resultados com uma boa aproximação. Dito isto, os valores de corrente crítica são estimados considerando os três tipos de representação e são mostrados na Figura 5.20.

Os resultados mostram que, em algumas partes da LT, as três curvas obtidas são bem diferentes. O modelo Bergeron com frequência de 500 kHz, na maior parte das vezes, estima os mais altos valores de corrente crítica. Isso significa dizer que, neste caso, tal modelagem tende a subestimar o problema e, por consequência, fornece uma taxa menor de desligamentos.

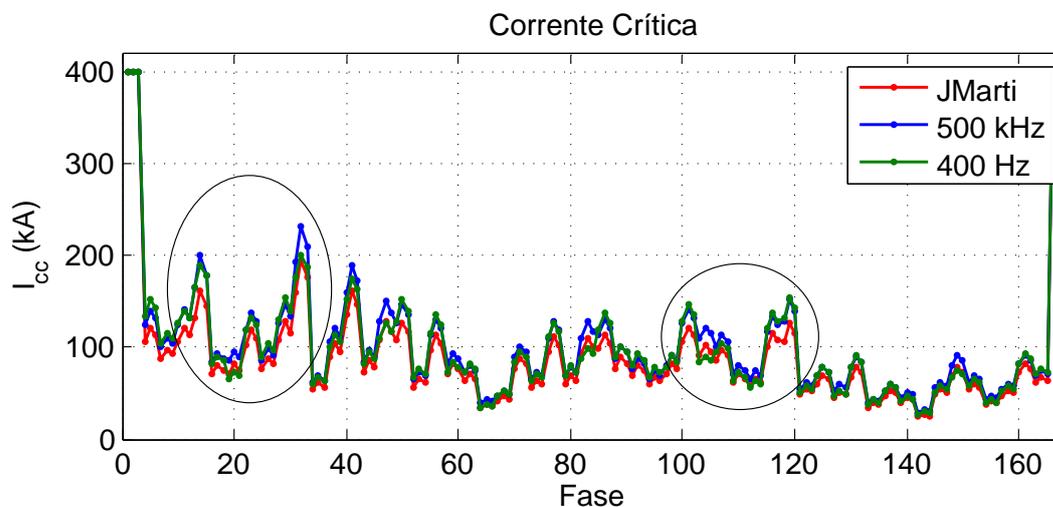


Figura 5.20: Valores de corrente crítica (mostrados na sequência de fases *ABC*) considerando os três tipos de representação dos vãos de linha. As elipses destacam as regiões de maior diferença entre os valores obtidos.

Em relação aos valores de desempenho, os modelos JMarti e Bergeron com 500 kHz e 400 Hz fornecem respectivamente: 10,22, 7,82 e 8,74 desligamentos/ 100 km de linha/ ano. A partir dessas estimativas, percebe-se que dependendo do tipo de representação adotada, existe uma diferença bem acentuada nos resultados. Pode-se citar, por exemplo, o fato do modelo Bergeron com 500 kHz fornecer um valor bem menor ao desempenho que é obtido através do modelo JMarti ( $7,82 \times 10,22$ ).

Esse resultado reforça a necessidade de se considerar a variação dos parâmetros da linha com a frequência. Isso porque a utilização do modelo com parâmetros constantes pode fornecer resultados bem diferentes. Contudo, deve-se deixar claro que sem a realização de um teste mais amplo, esse resultado não pode ser generalizado.

## 5.5 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados do *software* desenvolvido considerando uma LT de 69 kV. Inicialmente, o programa foi utilizado para simular a incidência de descargas atmosféricas em uma de suas torres. Para tal, foram considerados dois cenários: i) torre sem para-raios e ii) torre com para-raios. Os resultados desse estudo demonstram que o uso de para-raios pode reduzir consideravelmente a sobretensão resultante na cadeia de isoladores.

Após essa etapa, o desempenho inicial da LT foi estimado, sendo que o mesmo estava acima do limite preestabelecido. Assim, o processo de alocação ótima de para-raios pode ser empregado para melhorar o desempenho da linha em estudo. Em relação ao custo computacional, foi visto que o uso das estratégias descritas na Seção 3.4 reduz consideravelmente o tempo de execução do algoritmo. Em alguns casos, essa redução chegou a cerca de 96%.

Por fim, um estudo sobre as diferentes formas de modelagem foi apresentado. Nesta análise, foi visto que dependendo da forma de representação, os resultados podem divergir de forma significativa.

## Resultados: Estudos Múltiplos

---

Diferentemente do Capítulo 5, este tem o objetivo de apresentar os resultados do *software* considerando o estudo de diferentes linhas de transmissão. Para tal, além de considerar a LT descrita na Seção 5.1, outras seis são utilizadas e suas principais características são apresentadas. É importante ressaltar que, excetuando a linha de número sete, todas as demais pertencem à base de dados do LCE, a qual é formada por dados reais e hipotéticos.

Uma vez que os dados são apresentados, estima-se o desempenho de cada LT e o processo de alocação ótima de para-raios é aplicado. Além disso, outra análise sobre as diferentes formas de modelagem é apresentada. O intuito desta vez é verificar o impacto desta em diferentes linhas de transmissão. Por fim, ao final do capítulo um teste estatístico é conduzido com o objetivo de verificar se, na prática, a alocação por fase realmente fornece soluções com uma quantidade menor de para-raios.

### 6.1 Dados Utilizados

#### 6.1.1 Linha 2

A segunda linha de transmissão considerada neste estudo possui circuito simples e faz uso de um cabo para-raios. A Tabela 6.1 mostra algumas características da mesma, como a classe de tensão e a densidade de descargas atmosféricas, a qual é constante durante todo o percurso da linha.

Por outro lado, a altura das torres, a resistência de aterramento e o comprimento dos vãos são mostrados nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3. Finalmente, em relação aos para-raios, a Figura 6.4 mostra a configuração existente na linha de transmissão, a qual faz uso de 12 para-raios.

Tabela 6.1: Características gerais da segunda linha de transmissão.

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

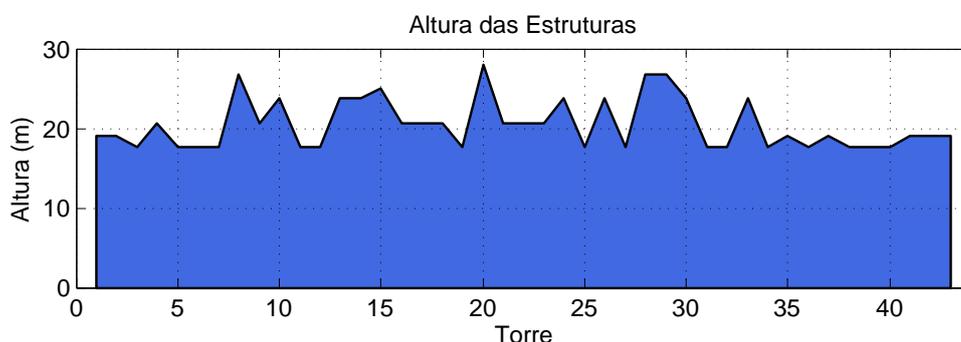


Figura 6.1: Perfil da altura das torres. Segunda linha de transmissão.

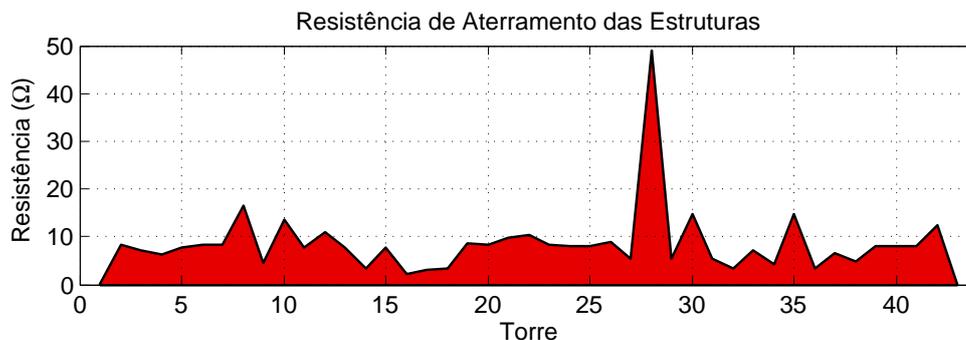


Figura 6.2: Perfil da resistência de aterramento das torres. Segunda linha de transmissão.

### 6.1.2 Linha 3

A linha 3 é formada por um circuito simples, faz uso de um cabo para-raios e todas as torres possuem a mesma altura (Tabela 6.2). Os perfis da resistência de aterramento e do comprimento dos vãos são mostrados respectivamente nas figuras 6.5 e 6.6. Em relação aos para-raios, a linha já apresenta a configuração ilustrada na Figura 6.7.

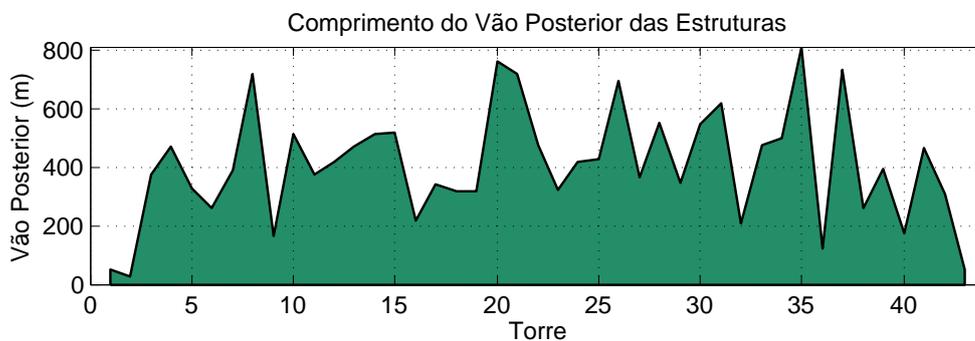


Figura 6.3: Perfil do comprimento dos vãos posteriores das torres. Segunda linha de transmissão.

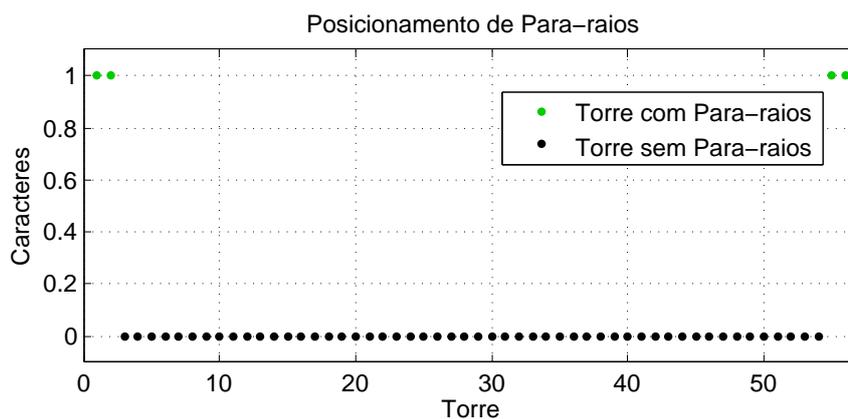


Figura 6.4: Configuração inicial de para-raios da segunda LT. Utilização de 12 para-raios.

Tabela 6.2: Características gerais da terceira linha de transmissão.

Característica	Valor
Classe de tensão ( $kV$ )	138
Quantidade de torres	61
Quantidade de para-raios na linha	45
Altura das torres ( $m$ )	16,50
$N_g$ (raios/ $km^2$ /ano)	6,00
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	1,625
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000

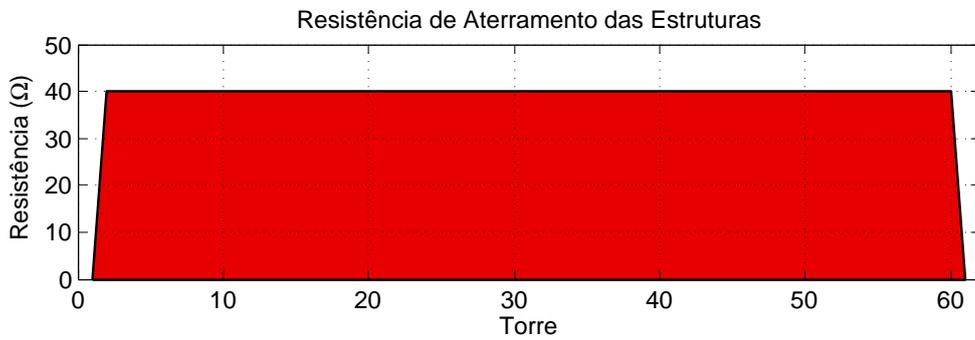


Figura 6.5: Perfil da resistência de aterramento das torres. Terceira linha de transmissão.

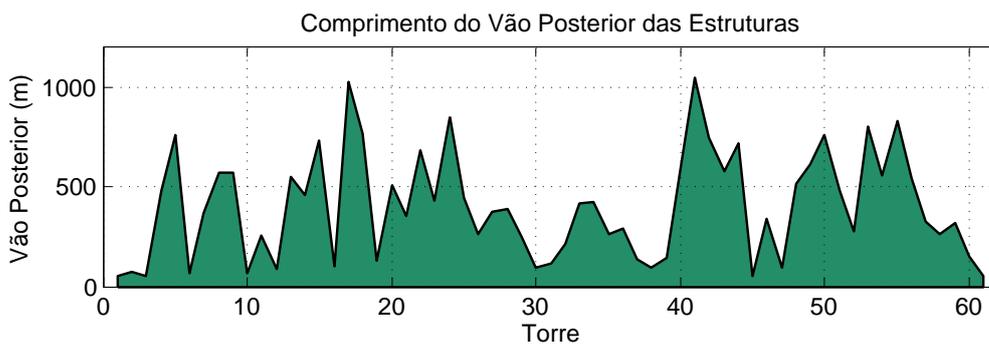


Figura 6.6: Perfil do comprimento dos vãos posteriores das torres. Terceira linha de transmissão.

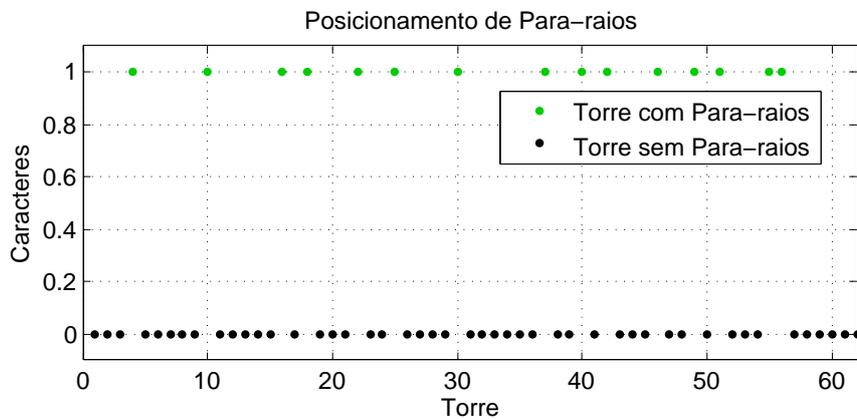


Figura 6.7: Configuração inicial de para-raios da terceira LT. Utilização de 45 para-raios.

### 6.1.3 Linha 4

A quarta linha de transmissão apresenta circuito duplo e faz uso de um cabo para-raios. A altura das torres, o comprimento dos vãos e a densidade de descargas atmosféricas são constantes e mostrados na Tabela 6.3. O perfil da resistência de aterramento, por sua vez, é apresentado na Figura 6.8.

Tabela 6.3: Características gerais da quarta linha de transmissão.

Característica	Valor
Classe de tensão ( $kV$ )	400
Quantidade de torres	53
Quantidade de para-raios na linha	0
Altura das torres ( $m$ )	53,77
Comprimento dos vãos ( $m$ )	345,00
$N_g$ ( $raios/km^2/ano$ )	0,60
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	2,80
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000

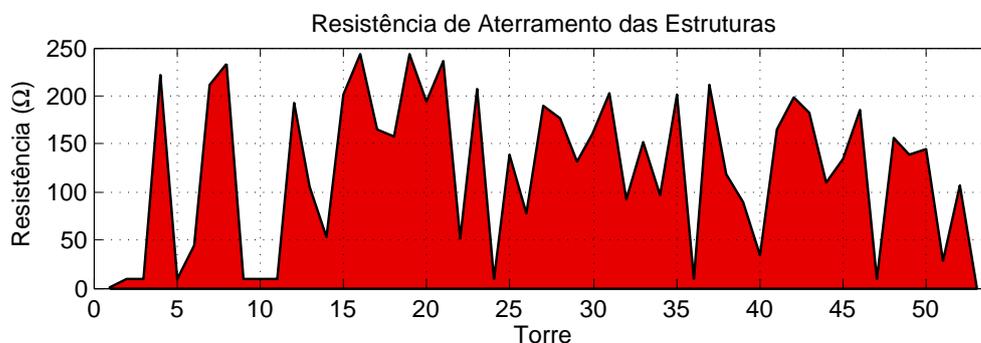


Figura 6.8: Perfil da resistência de aterramento das torres. Quarta linha de transmissão.

### 6.1.4 Linha 5

A quinta linha de transmissão apresenta circuito duplo e faz uso de um cabo para-raios. Além disso, assim como no caso anterior (Subseção 6.1.3), a altura das torres, o comprimento dos vãos e a densidade local de descargas atmosféricas são constantes e mostrados na Tabela 6.4. A Figura 6.9, por sua vez, exibe o perfil da resistência de aterramento.

Tabela 6.4: Características gerais da quinta linha de transmissão.

Característica	Valor
Classe de tensão ( $kV$ )	400
Quantidade de torres	42
Quantidade de para-raios na linha	0
Altura das torres ( $m$ )	53,77
Comprimento dos vãos ( $m$ )	345,00
$N_g$ (raios/ $km^2$ /ano)	2,00
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	2,80
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000

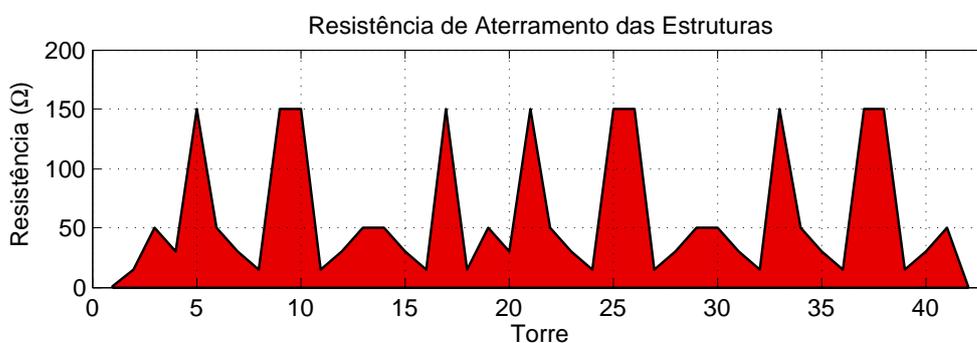


Figura 6.9: Perfil da resistência de aterramento das torres. Quinta linha de transmissão.

### 6.1.5 Linha 6

A linha 6 apresenta circuito duplo e faz uso de um cabo para-raios. A altura das torres, bem como o comprimento dos vãos são constantes e mostrados na Tabela 6.5. A Figura 6.10, por sua vez, exibe os valores da densidade local de descargas atmosféricas, enquanto que o perfil da resistência de aterramento é mostrado na Figura 6.11.

Tabela 6.5: Características gerais da sexta linha de transmissão.

Característica	Valor
Classe de tensão ( $kV$ )	400
Quantidade de torres	42
Quantidade de para-raios na linha	0
Altura das torres ( $m$ )	53,77
Comprimento dos vãos ( $m$ )	345,00
Comprimento da cadeia de isoladores ( $m$ )	2,80
Resistividade do solo ( $\Omega m$ )	1000

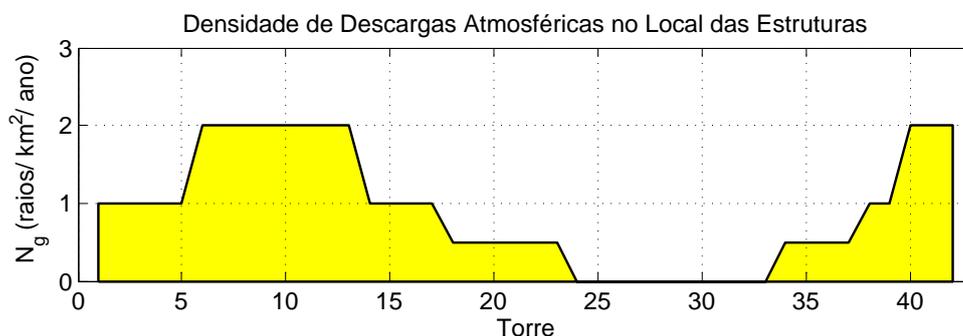


Figura 6.10: Perfil da densidade de descargas atmosféricas nas localidades das torres. Sexta linha de transmissão.

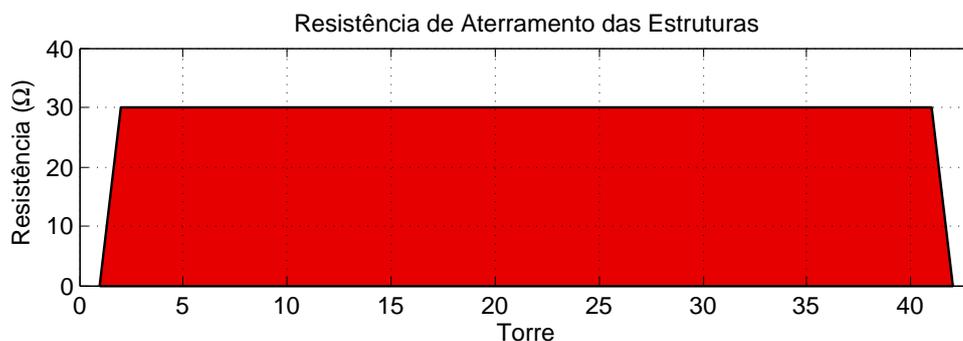


Figura 6.11: Perfil da resistência de aterramento das torres. Sexta linha de transmissão.

### 6.1.6 Linha 7

A sétima linha de transmissão é uma LT comumente encontrada na literatura em estudos computacionais. Geralmente, os temas envolvidos se relacionam com o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas (Rodrigues et al., 2014a). A linha em questão possui circuito simples, faz uso de dois cabos para-raios e é formada por torres do tipo convencional de 500 kV (Figura 6.12). Maiores detalhes sobre os parâmetros elétricos e mecânicos dos cabos podem ser vistos em (Rodrigues et al., 2014a).

Neste trabalho, considera-se que a altura das torres e o comprimento dos vãos dessa linha são constantes e seus valores são mostrados na Tabela 6.6. Em contrapartida, os dados da densidade de descargas atmosféricas são impostos, de forma arbitrária, para que a densidade mude de uma região para outra (Figura 6.13). Finalmente, os valores

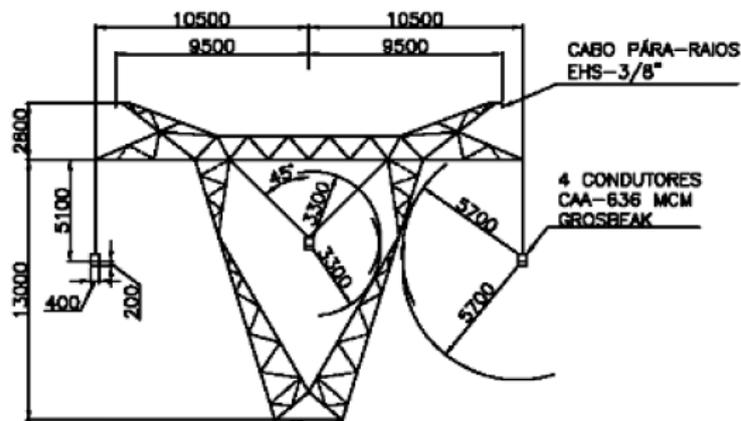


Figura 6.12: Geometria da torre do tipo convencional de linha trifásica de 500 kV. Figura retirada de (Rodrigues et al., 2014a).

da resistência de aterramento são gerados por meio de uma distribuição normal com média e desvio padrão respectivamente de  $20 \Omega$  e  $6 \Omega$  (Figura 6.14).

Tabela 6.6: Características gerais da sétima linha de transmissão.

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

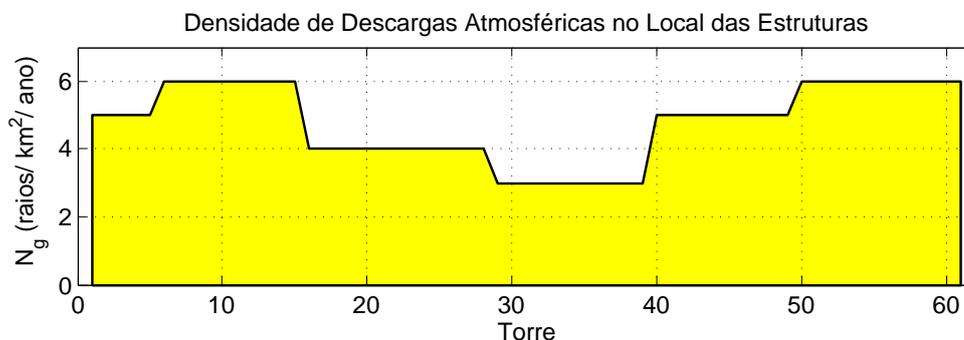


Figura 6.13: Perfil da densidade de descargas atmosféricas nas localidades das torres. Sétima linha de transmissão.

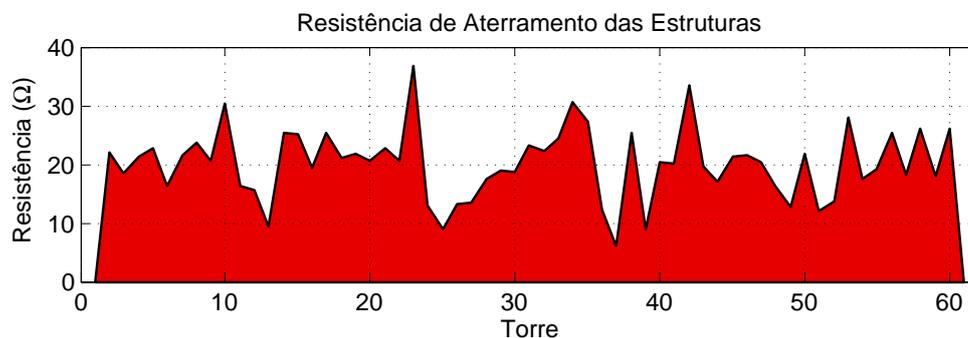


Figura 6.14: Perfil da resistência de aterramento das torres. Sétima linha de transmissão.

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

Para aplicar o processo de alocação ótima de para-raios, utiliza-se os limites de desligamentos apresentados nas seções 2.3 e 5.1. Os mesmos são reproduzidos na Tabela 6.7 juntamente com as estimativas iniciais de desempenho para cada uma das linhas de transmissão.

Tabela 6.7: Desempenhos especificados e estimados.

Linha	Classe de Tensão (kV)	Desempenho Especificado (desligamentos / 100 km/ ano)	Desempenho Inicial (desligamentos / 100 km/ ano)
2	69	5	7,79
3	138	5	4,93
4	400	1	1,28
5	400	1	2,85
6	400	1	0,89
7	500	1	1,42

De acordo com os dados da Tabela 6.7, somente as linhas 3 e 6 apresentam um desempenho abaixo dos limites especificados. No caso da terceira linha, a mesma já apresenta uma configuração inicial com 45 para-raios (Figura 6.7). Vale ressaltar que, neste trabalho, essa configuração é desconsiderada para que a aplicação desenvolvida possa ser empregada. Sendo assim, a taxa de desligamentos sem os para-raios instalados é de 7,39 desligamentos/ 100 km de linha/ ano, valor este que está acima do limite estabelecido.

Em contrapartida, a LT de número 6 não faz uso de nenhum para-raios e, ainda assim, está dentro do limite especificado. Vale lembrar que, como mostrado na Figura

6.10, a mesma está localizada em uma região de baixa atividade de descargas atmosféricas. Sendo assim, para utilizar o processo de alocação ótima de para-raios, o presente trabalho considera que essa LT está situada em uma região com maior incidência de descargas atmosféricas. Neste caso, utiliza-se o dobro dos valores apresentados na Figura 6.10. A partir daí, o desempenho estimado passa a ser de 1,79 desligamentos/100 km de linha/ ano, valor que está acima do limite preestabelecido.

### 6.3 Alocação Ótima de Para-raios

No processo de alocação ótima de para-raios, as simulações são feitas considerando somente o posicionamento por torre. Em cada simulação, o algoritmo genético é configurado com 36 gerações e o tamanho da população igual a 20 indivíduos. A modelagem utilizada é a mesma mostrada na Tabela 4.4, a qual é reproduzida a seguir.

Tabela 6.8: Configurações utilizadas no processo de otimização.

Configurações
Modelo de linha JMarti
4 vãos adjacentes
Forma de onda representativa da corrente
Ionização do solo

Em cada linha de transmissão são realizadas 30 execuções e os resultados obtidos em termos da quantidade de para-raios e do desempenho da linha são mostrados na Figura 6.15. Os dados mostram que nenhuma solução obtida viola a restrição de desempenho. Para LTs com classe de tensão inferior a 230 kV, por exemplo, o limite estabelecido é de 5,00 desligamentos/100 km de linha/ ano. Neste caso, o valor máximo encontrado é de 4,99 desligamentos/100 km de linha/ ano.

Outro aspecto interessante a ser observado é a variação mais acentuada das soluções encontradas para a linha 3 (neste caso, o *boxplot* da quantidade de para-raios possui valores de mínimo e de máximo diferentes da mediana). Vale lembrar que nessa LT, tanto a resistência de aterramento, como a densidade de descargas atmosféricas são praticamente constantes. Sendo assim, o processo de mutação é realizado puramente de forma aleatória, uma vez que os critérios determinísticos são desconsiderados.

Por outro lado, nas linhas 2, 4 e 5, a parte determinística da mutação é conduzida pela resistência de aterramento, pois a densidade de descargas atmosféricas é constante

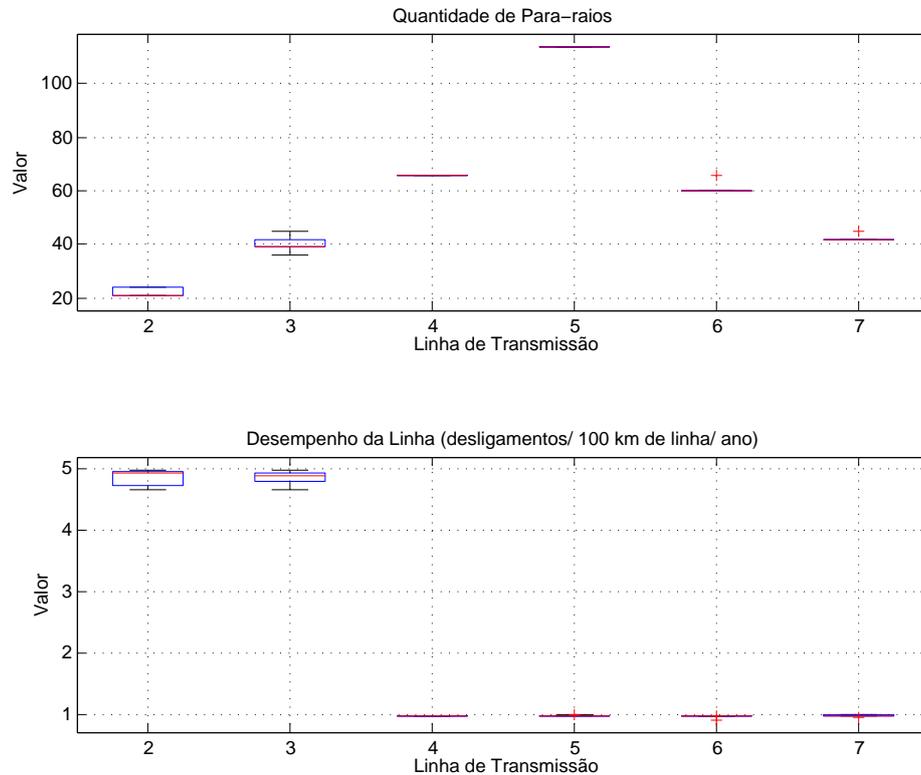


Figura 6.15: Distribuição da quantidade de para-raios e do desempenho da linha de transmissão.

durante todo o percurso da linha. Já na LT de número 6 acontece uma situação inversa, uma vez que, neste caso, são os valores de resistência que não apresentam uma variação significativa. Por fim, vale ressaltar que a linha 7 é a única que faz uso dos dois critérios em conjunto.

A título de ilustração, algumas configurações obtidas ao final do processo de otimização são apresentadas nas figuras de 6.16 até 6.21. A partir daí, pode-se destacar alguns pontos importantes como, por exemplo, a solução obtida para a terceira linha de transmissão (Figura 6.17). Se comparado com a configuração inicial (Figura 6.7), essa solução requer 9 para-raios a menos para proteger a mesma linha de transmissão ( $36 \times 45$ ). Contudo, a utilização de menos para-raios faz com que o desempenho estimado seja um pouco maior ( $4,99 \times 4,93$ ), mas ainda assim, dentro dos limites estabelecidos.

A Figura 6.20, por sua vez, mostra que na sexta linha de transmissão nenhum para-raios é alocado entre as torres de números 15 e 40. Isso porque, como mostrado na Figura 6.10, essa região apresenta os menores índices de densidade de descargas atmosféricas



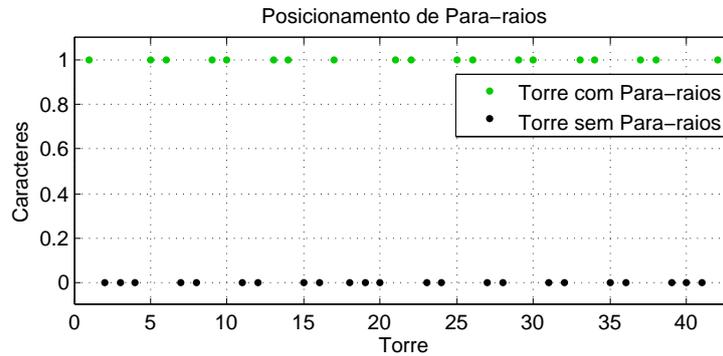


Figura 6.19: Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a quinta LT. Desempenho de 0,99 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 114 para-raios.

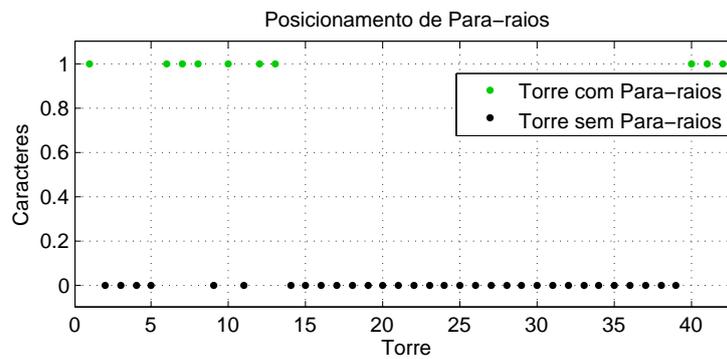


Figura 6.20: Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a sexta LT. Desempenho de 0,97 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 60 para-raios.

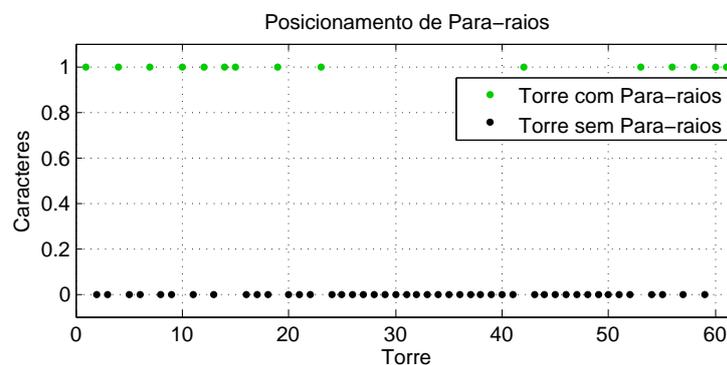


Figura 6.21: Configuração de para-raios obtida ao final da otimização para a sétima LT. Desempenho de 0,97 desligamentos/ 100 km de linha/ ano com a utilização de 45 para-raios.

da linha. Algumas vezes, esse valor chega a ser zero. Além disso, vale lembrar que, neste caso, a parte determinística da mutação considera apenas a informação proveniente da densidade de descargas atmosféricas.

Por fim, vale dizer que em todos os casos analisados, o processo de alocação ótima é capaz de fornecer soluções que atendem os limites de desligamentos previamente estabelecidos. Novamente, caso queira uma margem de segurança, o usuário pode definir um limite mais baixo do que o estipulado pela norma.

## 6.4 Impactos da Modelagem

Como visto na Seção 5.4, dependendo das características da linha de transmissão, a modelagem utilizada para representar o problema pode impactar significativamente nos resultados. Diante disso, a presente seção realiza um estudo mais abrangente com o objetivo de generalizar essa afirmação para outras linhas de transmissão. Para tal, todas as 7 LTs mencionadas até então (seções 5.1 e 6.1) são consideradas neste estudo.

Em cada LT, o *software* é executado 30 vezes e para uma mesma rodada, ou seja, em cada  $i = \{1, \dots, 30\}$ , a mesma população inicial é utilizada nas diferentes formas de modelagem. Essa prática visa eliminar qualquer influência que as condições iniciais do algoritmo poderiam ter sobre os resultados. Finalmente, em cada simulação, o algoritmo genético é configurado com 36 gerações e o tamanho da população igual a 20 indivíduos.

### 6.4.1 Quantidade de Vãos Adjacentes

Neste experimento, a questão básica de interesse é verificar se as soluções obtidas com 3 ou 4 vãos adjacentes apresentam diferenças significativas em termos da quantidade média de para-raios. Para tal, um teste é conduzido considerando as configurações apresentadas na Tabela 6.9. Além disso, vale mencionar que a única diferença entre as modelagens analisadas é exatamente a quantidade de vãos utilizada.

A Figura 6.22 apresenta a quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão (média de 30 observações). Pode-se perceber que, em geral, os valores são praticamente iguais.

Tabela 6.9: Configurações gerais do teste. Quantidade de vãos adjacentes.

Configurações
Alocação por torre
Modelo de linha JMarti
Forma de onda representativa da corrente
Ionização do solo

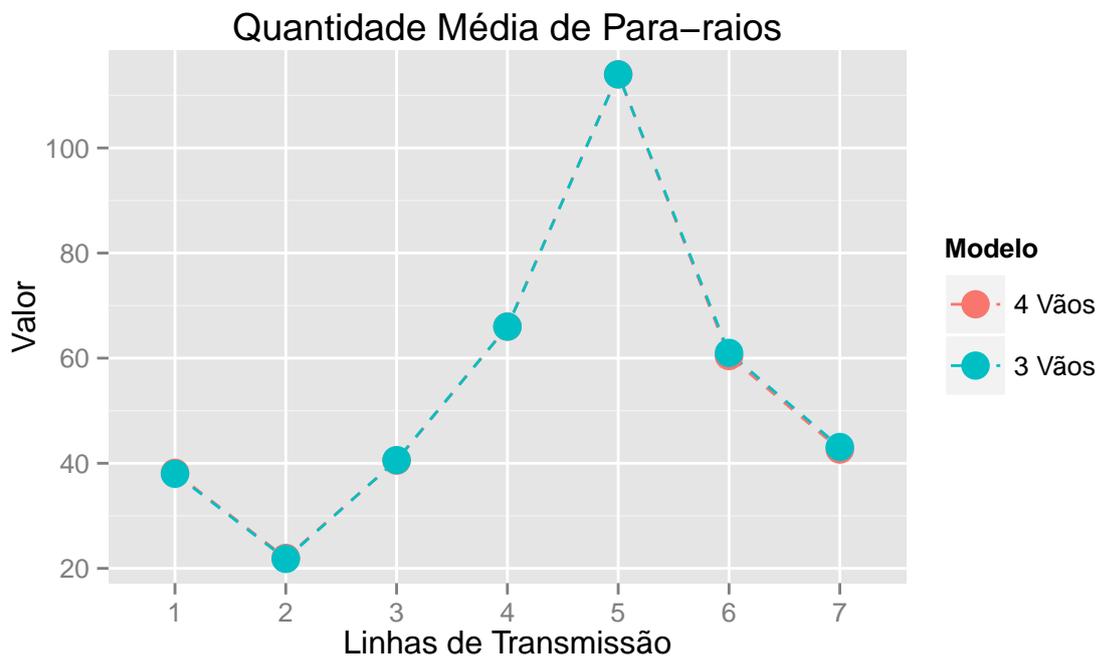


Figura 6.22: Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Modelagem com 3 ou 4 vãos adjacentes ao local de incidência da descarga.

Esse resultado está de acordo com aquele mostrado na Subseção 5.4.1. Na mesma, foi visto que quanto mais afastada a torre está do local de incidência, menor será sua influência na estimativa da corrente crítica. Em outras palavras, ao considerar as opções apresentadas na Tabela 6.9, esse cenário sugere que o usuário pode fazer uso da modelagem com três vãos adjacentes sem causar prejuízos aos resultados.

## 6.4.2 Surto Atmosférico

Na Subseção 5.4.2 foi visto que, dependendo da forma de representação do surto atmosférico, o desempenho estimado da LT pode divergir consideravelmente. Diante

disso, um novo teste é conduzido para avaliar essa situação considerando diferentes linhas de transmissão.

A questão básica de interesse é verificar se as soluções obtidas com as quatro formas de representação do surto atmosférico (Subseção 4.1.1) apresentam diferenças significativas em termos da quantidade média de para-raios. Para tal, são utilizadas as configurações apresentadas na Tabela 6.10.

Tabela 6.10: Configurações gerais do teste. Surto atmosférico.

<b>Configurações</b>
Alocação por torre
Modelo de linha JMarti
4 vãos adjacentes
Ionização do solo

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6.23, na qual é possível perceber que, dependendo da forma de representação e das características da LT, as soluções encontradas são bem diferentes. A função dupla exponencial, por exemplo, a qual tradicionalmente é utilizada para representar a descarga atmosférica em estudos computacionais, resulta em um modelo cujo comportamento nem sempre é adequado.

Nas linhas 1 e 2, pode-se dizer que o uso da função dupla exponencial acarreta em soluções superestimadas. Isso porque, se comparado aos resultados da forma de onda representativa, essa função resulta em uma quantidade bem maior de para-raios para atender ao desempenho especificado. A função CIGRE, por sua vez, quase sempre leva a um resultado subestimado. No entanto, é importante ressaltar que a modelagem com essa função apresenta um comportamento bem mais regular, se comparado ao modelo com a função dupla exponencial.

Finalmente, muitas vezes utilizada devido a sua facilidade de implementação, a função triangular fornece os resultados que mais se aproximam daqueles obtidos com a forma de onda representativa. Contudo, deve-se ter em mente, de que essa aproximação nem sempre é verdadeira. Essa situação fica evidente na terceira linha de transmissão, na qual a diferença entre as duas médias é de aproximadamente 18 para-raios.

### 6.4.3 Ionização do Solo

A questão básica deste experimento é verificar se as soluções obtidas, considerando ou não o efeito da ionização do solo, apresentam diferenças em termos da quantidade de

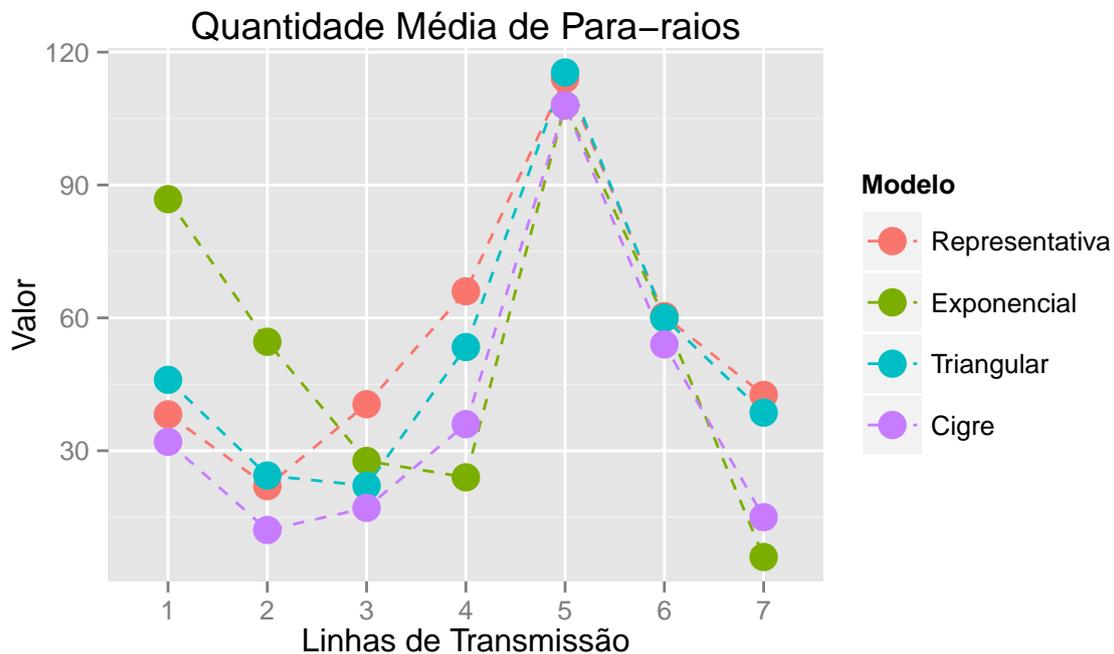


Figura 6.23: Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Efeito das diferentes formas de representação do surto atmosférico.

para-raios. Para tal, um teste é conduzido considerando as configurações apresentadas na Tabela 6.11.

Tabela 6.11: Configurações gerais do teste. Ionização do solo.

Configurações
Alocação por torre
Modelo de linha JMarti
4 vãos adjacentes
Forma de onda representativa

A Figura 6.24 mostra os resultados obtidos. Percebe-se que, somente nas linhas 1 e 2, as soluções são similares em termos da quantidade média de para-raios. Neste caso, é importante ressaltar que, quanto menor é o valor da resistência de aterramento da torre, menor será a sua redução provocada pelo efeito da ionização do solo (Subseção 5.4.3). É por esse motivo que nas linhas 1 e 2, as duas formas de representação proporcionam resultados praticamente iguais. Vale lembrar que neste caso, boa parte das estruturas analisadas apresenta uma resistência de aterramento inferior a  $10 \Omega$  (figuras 5.2 e 6.2).

Por outro lado, essa aproximação não ocorre no restante das linhas de transmissão. Isso porque nessas LTs, os valores da resistência de aterramento são suficientemente

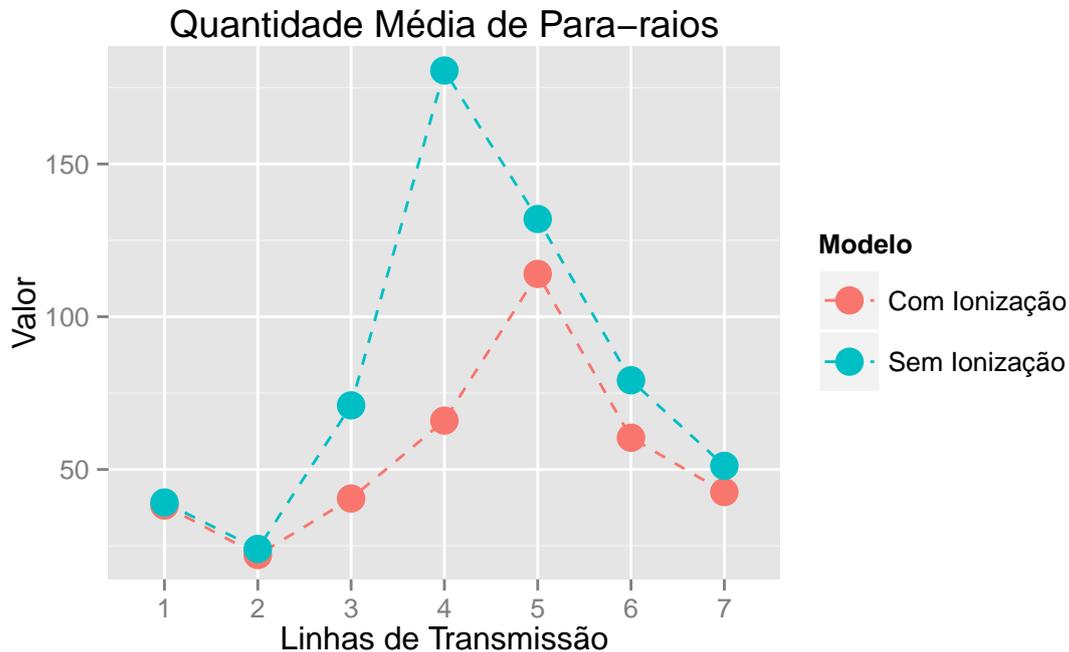


Figura 6.24: Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Modelagem considerando ou não o efeito da ionização do solo.

elevados para causar diferenças acentuadas na estimativa de desempenho. Ao considerar o efeito da ionização do solo, essa estimativa tende a ser menor, uma vez que o escoamento da corrente para o solo é facilitado. Por consequência, a quantidade de para-raios necessários para proteger a linha de transmissão também tende a cair.

Para ilustrar essa condição, pode-se tomar como exemplo a linha de número 4. Na mesma, é possível identificar uma diferença entre as médias de 114 para-raios ( $66 \times 180$ ), quando não se leva em conta o efeito da ionização do solo.

#### 6.4.4 Modelos de Linha

Neste experimento, a questão básica de interesse é verificar se as soluções obtidas com as três formas de representação dos vãos de linha (Subseção 4.1.2) apresentam diferenças significativas em termos da quantidade média de para-raios. Para tal, são utilizadas as configurações apresentadas na Tabela 6.12.

A Figura 6.23 apresenta a quantidade média de para-raios obtida em cada linha de transmissão. Neste caso, é possível ver que na linha 7, por exemplo, a utilização do

Tabela 6.12: Características gerais do teste. Modelos de linha.

Característica
Alocação por torre
Ionização do solo
4 vãos de linhas
Forma de onda representativa da corrente

modelo Bergeron 500 kHz fornece soluções com a quantidade mínima de para-raios. Isto é, os para-raios são alocados apenas nas extremidades da linha de transmissão.

Além disso, esse modelo estima uma quantidade média de 12 para-raios na linha 3, enquanto que esse número praticamente triplica ( $12 \times 39$ ) quando se usa o modelo JMarti. De certa forma, pode-se dizer que, nos casos analisados, o modelo Bergeron 500 kHz subestima o problema, uma vez que sempre acarreta em soluções com uma quantidade inferior de para-raios.

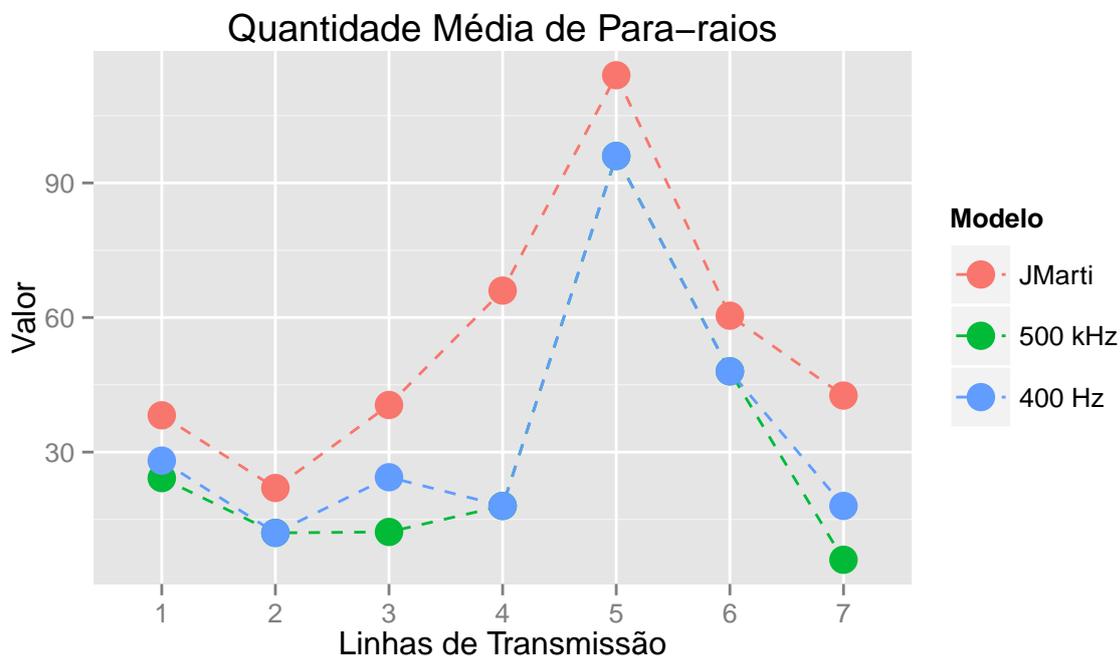


Figura 6.25: Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Efeito das diferentes formas de representação dos parâmetros elétricos da linha.

Ao considerar a frequência de 400 Hz, esse quadro praticamente não se altera. Isso porque, como mostrado na Figura 6.25, as soluções encontradas com esse modelo não se diferem significativamente daquelas obtidas com a frequência de 500 kHz. Em outras

palavras, mesmo alterando o valor da frequência, o modelo com parâmetros constantes fornece resultados bem diferentes daqueles encontrados como o modelo de JMarti.

## 6.5 Tipos de Alocação

Como visto na Seção 5.3, se comparado ao posicionamento por torre, o processo de alocação por fase tende a apresentar soluções com um número menor de para-raios. Contudo, no caso mencionado, o estudo é realizado de forma específica, uma vez que a análise é feita considerando apenas uma linha de transmissão. Por outro lado, nesta seção, um teste estatístico é conduzido com o intuito de realizar um estudo mais abrangente.

### 6.5.1 Planejamento Experimental

Com o objetivo de verificar se, na prática, a alocação por fase fornece soluções com um número menor de para-raios, um experimento planejado é empregado. Para tal, a solução de cada execução é obtida e a respectiva quantidade de para-raios é armazenada. Como é de conhecimento, a solução encontrada dependerá das características da linha de transmissão. No entanto, na realização desse teste, essa influência não é considerada importante e, por isso, deve ser removida. Sendo assim, um teste pareado é empregado. Maiores detalhes sobre esse tipo de teste podem ser vistos em (Montgomery e Runger, 2010) e (Normando et al., 2010).

Neste cenário, o teste de hipóteses é formulado baseado na questão de interesse. Define-se a hipótese nula,  $H_0$ , como a equivalência entre as médias pareadas, significando uma possível igualdade no número de para-raios. Em contrapartida, a hipótese alternativa,  $H_1$ , é utilizada para verificar se a alocação por fase fornece soluções com uma quantidade menor de para-raios, isto é, a diferença entre as médias pareadas menor que zero. Assim, o teste de hipóteses pode ser formulado como:

$$\begin{cases} H_0 : \mu_D = 0 \\ H_1 : \mu_D < 0. \end{cases}$$

O experimento é realizado considerando as sete linhas de transmissão descritas a priori,  $N = 7$  (seções 5.1 e 6.1). Além disso, define-se o nível de confiança  $\alpha = 0,05$ , a probabilidade de ocorrência de falso negativo  $\beta = 0,2$  e o desvio mínimo de interesse prático  $\delta^* = 3,0$ .

Em cada LT, a metodologia é executada 30 vezes ( $n = 30$ ) considerando cada tipo de alocação. O algoritmo genético, por sua vez, é executado com 30 indivíduos e 36 gerações. Além disso, assim como nos casos anteriores (Seção 6.4), em cada execução uma mesma população inicial é utilizada nas duas opções de alocação.

### 6.5.2 Análise Exploratória dos Dados

Inicialmente, os dados são carregados e a média em cada linha de transmissão é calculada (Figura 6.26). Os resultados mostram que, em boa parte das LTs analisadas, o processo de alocação por fase apresenta soluções com um número menor de para-raios. Mais especificamente, essa situação acontece nas linhas 1, 2, 3, 4 e 5.

Por outro lado, nas linhas 6 e 7, ocorre uma situação inversa onde é o posicionamento por torre que fornece os valores mais baixos. Como o espaço de busca na alocação por fase engloba as mesmas configurações do posicionamento por torre, é bem provável que nessas duas linhas de transmissão seja necessária a utilização de um número maior de indivíduos e ou de gerações para melhorar os resultados da alocação por fase.

Além disso, vale ressaltar que a maior diferença entre as médias é encontrada justamente na linha de número 7. Não por coincidência, tal linha é a única que apresenta variações significativas nos valores da resistência de aterramento e da densidade de descargas atmosféricas. Essa característica dificulta a resolução do problema, ainda mais se alocação por fase for a opção escolhida.

### 6.5.3 Análise Estatística

De posse dos dados mostrados na Figura 6.26, um teste  $T$  com amostras pareadas é realizado. Os resultados<sup>1</sup> indicam que a hipótese nula não pode ser rejeitada a nível de confiança de 95%. Em relação ao valor de  $\delta^* = 3,0$  estipulado inicialmente, é importante notar que o valor mínimo do intervalo de confiança ( $-3,146$ ) ultrapassa esse valor. No entanto, a amostra obtida não fornece evidências fortes o suficiente para rejeitar a hipótese nula de igualdade.

---

<sup>1</sup>Valor p: 0,2532. Intervalo de Confiança:  $[-3,146 \quad 1,234]$ .

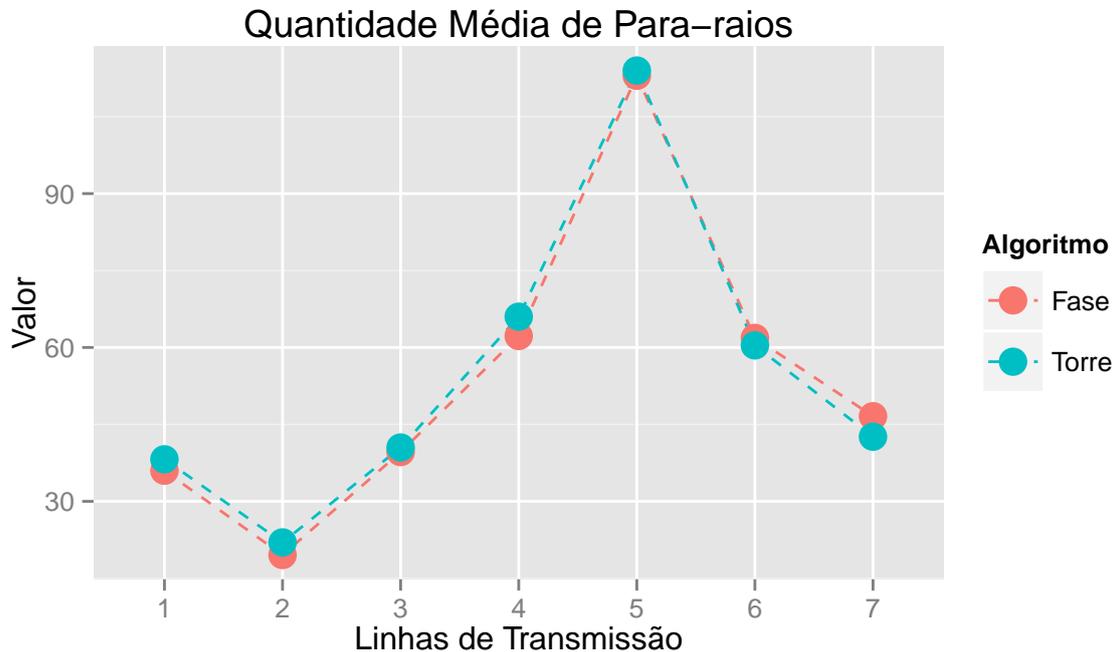


Figura 6.26: Quantidade média de para-raios em cada linha de transmissão. Alocação por fase ou torre.

#### 6.5.4 Verificação das Premissas

O teste estatístico realizado assume como premissas: a normalidade e a independência dos resíduos. Vale ressaltar que essas premissas devem ser verdadeiras para que o teste conduzido seja validado. A primeira é verificada por meio de um gráfico quantil-quantil, mostrado na Figura 6.27. Além dessa análise, um teste estatístico de Shapiro-Wilk<sup>2</sup> também é realizado. Em ambos os casos, é possível concluir que a premissa de normalidade é verdadeira.

Em relação à independência dos resíduos, o próprio planejamento e natureza do experimento assegura a validade dessa premissa. Por se tratar de um experimento puramente computacional, o mesmo não está sujeito a efeitos de ordem ou erros de medição.

#### 6.5.5 Conclusão

Os resultados do teste indicam que a hipótese nula não pode ser rejeitada a um nível de confiança de 95%. Em outras palavras, a amostra obtida não fornece evidências

<sup>2</sup>Valor p: 0,5104.

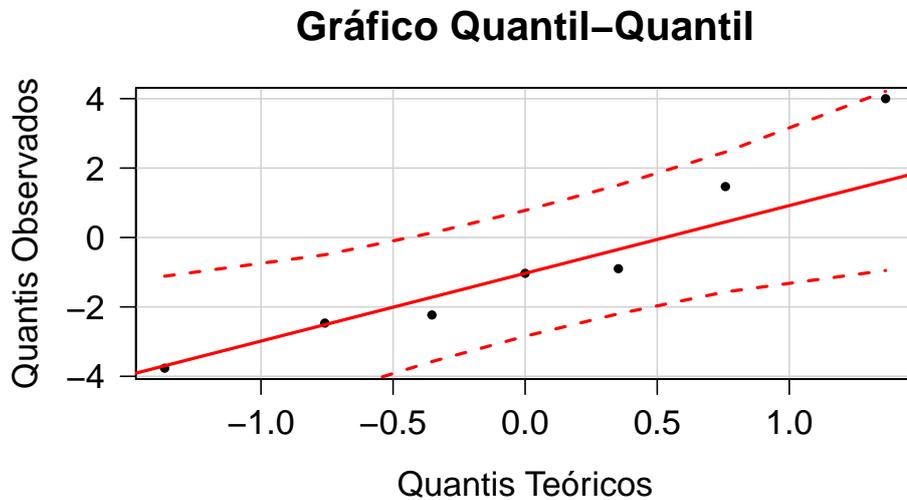


Figura 6.27: Validação da premissa de normalidade dos resíduos.

fortes o suficiente para rejeitar a hipótese nula de igualdade. Na prática, não é possível afirmar, por meio do teste realizado, que a alocação por fase implementada fornece soluções com uma quantidade menor de para-raios.

Contudo, é interessante a realização de um teste mais amplo envolvendo um número maior de linhas de transmissão. Isso porque, no procedimento realizado, a potência obtida para o teste é de apenas 64%. Ou seja, a mesma é inferior aos 80% estabelecidos a priori. Vale lembrar que, a probabilidade de ocorrência de um falso negativo (a não rejeição da hipótese nula quando ela é falsa) é dada pelo parâmetro  $\beta$ . A potência, por sua vez, é o valor igual a  $1 - \beta$ .

## 6.6 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados do *software* considerando o estudo de diferentes linhas de transmissão. Inicialmente, o processo de alocação ótima de para-raios foi empregado e, em todos os casos analisados, o programa foi capaz de fornecer soluções que atendem aos limites de desligamentos previamente estabelecidos.

Logo após essa etapa, um estudo sobre as diferentes formas de modelagem do problema foi apresentado. Nesta análise, foi visto que, dependendo da linha de transmissão e da modelagem considerada, os resultados em termos da quantidade média de para-raios das soluções podem divergir consideravelmente.

Por fim, ao final do capítulo, um teste estatístico foi realizado considerando os dois tipos de alocação: torre e fase. Neste caso, não foi possível afirmar, por meio desse teste, que a alocação por fase implementada realmente fornece soluções com uma quantidade menor de para-raios.

# Conclusões e Propostas de Continuidade

---

## 7.1 Considerações Iniciais

As linhas de transmissão desempenham um papel fundamental para garantir a demanda de energia elétrica do país. Como já mencionado, muitas vezes, elas são longas e atravessam várias regiões como vales, rios e montanhas. Dependendo de sua localização, a LT pode se destacar em relação ao ambiente local e se tornar um ponto preferencial para a incidência de descargas atmosféricas.

Com o objetivo de proteger a LT, geralmente são instalados cabos para-raios no topo da torre. No entanto, mesmo em linhas blindadas por esse tipo de cabo, pode existir um número excessivo de desligamentos causados por *backflashover*. Nessas condições, o uso de para-raios de ZnO tem sido uma das soluções encontradas para melhorar o desempenho da linha.

Nesse contexto, a presente dissertação abordou um *software* para o posicionamento ótimo de para-raios em linhas de transmissão. A metodologia visa diminuir a quantidade de desligamentos da linha fazendo uso dos recursos de forma ótima. Isto é, o programa faz uso dos para-raios na medida necessária para atingir o desempenho especificado pelo usuário.

## 7.2 Avaliações Conclusivas

### 7.2.1 Conclusões Gerais

Os resultados mostram que o uso do *software* permite reduzir a quantidade de desligamentos da linha através do uso de para-raios. Essa melhora é fundamental para

garantir o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, minimizando os efeitos danosos causados pelas descargas atmosféricas. Além disso, a metodologia se mostra bastante genérica e flexível. A mesma pode ser aplicada a qualquer LT com cabo para-raios, desde que se tenham à disposição todas as informações necessárias para o bom funcionamento da aplicação.

Em relação à flexibilidade, a metodologia permite o posicionamento por torre ou fase e ainda contempla várias formas de modelagem do problema. Neste último caso, pode-se citar, por exemplo: i) a utilização de diferentes tipos de surto atmosférico, ii) a impedância de aterramento que pode ser retratada com ou sem o efeito da ionização do solo, entre outros.

Essa flexibilidade só é possível porque o modelo construído no ATP é formado pela junção de vários componentes. Sendo assim, é possível modificar apenas o elemento em questão, sem que haja a necessidade de alterar o restante da implementação. Essa característica é de grande importância para o aprimoramento da metodologia, pois permite que cada componente possa evoluir de forma isolada.

Finalmente, vale ressaltar que o *software* de nada adianta se os dados das linhas de transmissão não condizem com a realidade. Dessa forma, recomenda-se que as empresas do setor elétrico, sempre que possível, façam medições e mantenham esses dados atualizados. Neste caso, pode-se citar, por exemplo, parâmetros como: a densidade local de descargas atmosféricas, a resistência de aterramento, o comprimento dos vãos, entre outros.

### 7.2.2 Tipos de Alocação

Em relação ao tipo de posicionamento, na Seção 6.5 foi realizado um experimento planejado, no qual os resultados indicam a não rejeição da hipótese nula de igualdade. Em outras palavras, não é possível afirmar, através desse teste, que a alocação por fase implementada fornece soluções com uma quantidade menor de para-raios. Contudo, as condições do teste definidas a priori não foram satisfeitas, o que sugere a realização de um novo experimento envolvendo um número maior de linhas de transmissão.

Por ora, sem a realização de um teste mais abrangente, recomenda-se a utilização da alocação por fase. Isso porque, nesse tipo de posicionamento, o espaço de busca é maior e ainda engloba as mesmas configurações do posicionamento por torre. Além

disso, pode-se fazer uso de uma população maior ou aumentar o número de gerações do algoritmo, em busca de melhores soluções.

Por outro lado, o posicionamento por torre é menos caro computacionalmente e, por isso, aumenta o desempenho da aplicação. Na Seção 5.3, esse ganho de desempenho é quantificado pelo tempo de execução. No exemplo considerado, enquanto que a alocação por fase demora cerca de 13 minutos para cada execução, na alocação por torre esse tempo diminui para 7 minutos.

Apesar de não ser, a princípio, um ganho considerável, deve-se ter em mente de que essa diferença pode aumentar dependendo das características da linha de transmissão. De certa forma, quanto maior for o número de fases e da quantidade de torres envolvidas no estudo, maior tende a ser o ganho de desempenho com a utilização da alocação por torre.

### 7.2.3 Estratégias de Avaliação

Em relação ao tempo de simulação, algumas estratégias são utilizadas para reduzir o custo computacional do processo. Na prática esse ganho foi verificado através de algumas medições feitas na Seção 5.3. Neste experimento, a utilização da memória na alocação por torre reduz o tempo de execução de 176 para 14 minutos. Uma queda de aproximadamente 92%. Isso porque, o uso da memória evita em média mais de 25000 chamadas ao ATP. Além disso, ao considerar a junção dessa estratégia com o esquema *MultiThread*, o tempo de execução diminui cerca de 96%.

Em relação ao posicionamento por fase, a utilização da memória também reduz de forma considerável o tempo de execução. No entanto, pode-se dizer que essa redução não é tão drástica, como ocorre no caso da alocação por torre. O tempo diminui de 202 para 38 minutos, totalizando uma queda de 81% no tempo de execução. Vale lembrar que, o posicionamento por fase possibilita uma gama maior de configurações, o que por consequência, acaba exigindo uma quantidade maior de execuções do ATP (6232,00 × 2350,10).

Em contrapartida, na alocação por fase, o ganho gerado pela “paralelização” aumenta, uma vez que a principal vantagem dessa estratégia ocorre quando um indivíduo é avaliado pelo ATP. Sendo assim, a utilização desse esquema juntamente com a memória reduz o tempo de execução em aproximadamente de 93% (de 202 para 13 minutos). Novamente, é possível ver que o uso dessas estratégias em conjunto permite reduzir consideravelmente o custo computacional do processo.

### 7.2.4 Impactos da Modelagem

Em relação à modelagem, a metodologia implementada permite retratar o problema de diferentes formas. Na representação dos vãos de linha, por exemplo, o *software* considera o uso de 3 ou 4 vãos adjacentes. Nas subseções 5.4.1 e 6.4.1 foi visto que, nas LTs analisadas, a utilização das duas formas de modelagem resulta em soluções praticamente iguais. Dessa forma, em situações onde o usuário queira aumentar o desempenho da aplicação, pode-se considerar o uso de 3 vãos adjacentes. Contudo, deve-se ter em mente que essa aproximação foi obtida com as opções de modelagem apresentadas na Tabela 6.9 e, não necessariamente, é válida para as outras formas de modelagem.

Em relação ao surto atmosférico, as subseções 5.4.2 e 6.4.2 mostram que, dependendo da linha de transmissão e da modelagem considerada, os resultados podem divergir consideravelmente. Essa situação só reforça a necessidade de se representar o surto atmosférico pela forma de onda representativa, uma vez que a mesma é capaz de retratar o problema de maneira mais adequada. Por outro lado, dentre as formas padrões de se representar o surto atmosférico, a melhor aproximação obtida foi por meio da função triangular.

Na representação do aterramento elétrico, este pode ser modelado considerando ou não o efeito da ionização do solo. Nas subseções 5.4.3 e 6.4.3 foi visto que, caso o valor da resistência de aterramento seja suficientemente elevado, a consideração ou não desse efeito pode provocar diferenças acentuadas em relação às soluções encontradas.

Por fim, os parâmetros elétricos da linha podem ser modelados considerando ou não a variação destes com a frequência. Nas subseções 5.4.4 e 6.4.4 foi visto que, dependendo da linha de transmissão, os resultados obtidos com as formas de representação são bem diferentes. Essa situação só reforça a premissa de que o problema em questão é dependente da frequência. Assim, sempre que possível, deve-se representar os vãos de linha considerando essa condição.

## 7.3 Propostas de Continuidade

Os desenvolvimentos apresentados sugerem algumas propostas de continuidade relativas ao tema analisado. Dentre elas, pode-se citar a inclusão de uma abordagem

probabilística através da utilização do Método Monte Carlo. Dessa forma, os parâmetros de interesse nas simulações poderiam ser definidos a partir desse método. Além disso, o uso dessa abordagem permitiria incorporar na metodologia o fenômeno de rupturas a meio do vão. Neste caso, um valor entre 0 e 1 poderia ser sorteado de forma aleatória, por exemplo, para indicar o local de incidência da descarga atmosférica (torre ou no meio do vão).

Outro aspecto a ser destacado é que, neste trabalho, quando a linha de transmissão apresenta dois cabos para-raios, somente a situação de descarga simétrica é considerada. Isto é, a simulação considera uma situação particular onde a descarga elétrica atinge simultaneamente os pontos de ligação na torre dos dois cabos para-raios. No entanto, como mencionado em (de Carvalho Rocha, 2009), essa situação é menos crítica se comparada ao caso de quando a descarga atinge somente um dos cabos para-raios. Sendo assim, esse tópico necessita da realização de um estudo mais aprofundado.

Em trabalhos futuros, pode-se considerar também a utilização do método DE (do inglês, *Disruptive Effect*) ou do modelo LPM (do inglês, *Leader Progression Model*) para se determinar a suportabilidade da cadeia de isoladores. Esses modelos são considerados mais adequados do que a curva  $V \times t$ , quando a forma de onda do surto atmosférico se difere do padrão. Maiores detalhes sobre esses modelos podem ser vistos em (EPRI, 2005).

Em relação à otimização, em vez de considerar o problema com um único objetivo, em trabalhos futuros, a alocação ótima de para-raios poderia ser feita considerando vários critérios ao mesmo tempo. Pode-se citar, por exemplo, a minimização da quantidade de para-raios e do número de desligamentos da linha através do uso de algoritmos de otimização multiobjetivo.

Além disso, uma abordagem diferente também poderia ser utilizada. Neste caso, ao invés da taxa de desligamentos da linha, seria interessante considerar, por exemplo, a minimização do custo esperado de falha, uma vez que o mesmo apresenta um maior apelo na prática. Por fim, outro aspecto importante seria considerar uma quantidade máxima de para-raios que podem ser alocados na LT. Essa restrição viabilizaria casos onde a empresa disponha de recursos financeiros limitados para a aquisição de para-raios.



---

## Referências Bibliográficas

---

- ANEEL (2004). Resolução normativa n. 67. *Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível Em: < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2004067.pdf>*.
- ANEEL (2012). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST: Módulo 8 - qualidade da energia elétrica. *Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível Em: < [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8\\_Revis%C3%A3o\\_4.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf)*.
- ANEEL (2016). ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível Em: < <http://www.aneel.gov.br/>*.
- Araújo, A. E. A. e Neves, W. L. A. (2005). *Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. Ed. da UFMG.
- Balestro Ltda, I. E. (2016). Catálogo de para-raios poliméricos para linhas de transmissão. *Disponível Em: < <http://balestronovo.hospedagemdesites.ws/wp-content/uploads/2015/05/Para-raios-Polim-Linhas-Transm-TLA-PBPE-LT.pdf>*.
- Bedoui, S., Bayadi, A., e Haddad, A. M. (2010). Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: Case of an HV 220kV double circuit line. In *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, páginas 1–6.
- CIGRÉ (1991). *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*. Cigré Brochure 63.
- Conti, A. D. e Visacro, S. (2007). Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(2):448–451.

- Cunha, L. V. (2010). *Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- de Britto, T. M. (2006). *Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada a Para-raios de Alta Tensão*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- de Carvalho Rocha, L. (2009). *Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UAT Frente a Descargas Atmosféricas: Influência da Ruptura a Meio de Vão*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- de Castro Assis, S., Filho, E. B. G., Coutinho, R. M., Almeida, J. H. M., Teixeira, A. M. N., e de Franco, J. L. (2012). *Metodologia de Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas Considerando Para-Raios ZnO*. SBSE 2012, Goiânia- GO, Brasil.
- de Souza Filho, R. E. (2013). *Avaliação de Metodologias para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- EPE (2015). Balanço energético nacional 2015. *Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Disponível Em: < [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)*.
- EPRI (1982). Transmission line reference book-345 kV and above, ch. 12. *Electric Power Research Institute*.
- EPRI (2005). Transmission line reference book-200 kV and above, ch. 6. *Electric Power Research Institute*.
- GHRC (2016). GHRC. *Global Hydrology Resource Center. Disponível Em: < <https://ghrc.nsstc.nasa.gov/home/>*.
- Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1):66-72.
- IEEE (1985). A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines. *IEEE Trans. Power App. Syst*, 104(4):919-932.

- INPE/ELAT (2016). *INPE/ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível Em: < <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>*.
- Jia, W. e Xiaoqing, Z. (2006). Double-exponential expression of lightning current waveforms. In *The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, páginas 320–323.
- Mariano, J. A. S., Schroeder, M. A. O., Nascimento, L. C., Sales, W. S., e Assis, S. C. (2012). *Desenvolvimento de um Aplicativo para Estudos de Sensibilidade Paramétrica em Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas Utilizando uma Interface Matlab-ATP*. CBA 2012, Campina Grande- PB, Brasil.
- Meister, A. (2005). *Modelagem de Varistores de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- Montgomery, D. C. e Runger, G. C. (2010). *Applied Statistics and Probability for Engineers, Ch. 10*. John Wiley & Sons.
- Mota, P. C. A., Chaves, M. L. R., e Camacho, J. R. (2011). *Estimativa da Impedância de Surto de Torres das Linhas de Transmissão Utilizando o Método de Elementos Finitos*. IX CEEL, Uberlândia- MG, Brasil.
- Normando, D., Tjäderhane, L., e Quintão, C. C. A. (2010). A escolha do teste estatístico - um tutorial em forma de apresentação em powerpoint. *Dental Press J. Orthod*, 15(1):101–106.
- ONS (2009). Submódulo 20.1: Glossário de termos técnicos. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível Em: < [http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento\\_rede/procedimento\\_rede.aspx](http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento_rede/procedimento_rede.aspx)*.
- ONS (2011). Submódulo 2.4: Requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível Em: < [http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/CB3C1CCC10CDF25583257945005D5185/\\$file/Subm%C3%B3dulo%202.4\\_Rev\\_2.0.pdf?openelement](http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/CB3C1CCC10CDF25583257945005D5185/$file/Subm%C3%B3dulo%202.4_Rev_2.0.pdf?openelement)*.
- ONS (2014). Dados Relevantes - Operação do SIN. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível Em: < [http://www.ons.org.br/biblioteca\\_virtual/publicacoes\\_operacao\\_sin.aspx/](http://www.ons.org.br/biblioteca_virtual/publicacoes_operacao_sin.aspx/)*.
- ONS (2016). ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível Em: < <http://www.ons.org.br/>*.

- Orille-Fernandez, A. L., Rodriguez, S. B., e Gotes, M. A. G. (2004). Optimization of surge arrester's location. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1):145–150.
- Parreiras, R. O. (2006). *Algoritmos Evolucionários e Técnicas de Tomada de Decisão em Análise Multicritério*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Prikler, L. e Høidalen, H. K. (2002). *ATPDraw for Windows 9x/ NT/ 2000/ XP*. Users' Manual, Version 3.5, Release No. 1.0.
- Rodrigues, A. R., Guimarães, G. C., Chaves, M. L. R., e Boaventura, W. C. (2014a). *Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas aplicada à Coordenação de Isolamento*. SBSE 2014, Foz do Iguaçu- PR, Brasil.
- Rodrigues, A. R., Tamashiro, M. A., Piccini, A. R., Rezende, J. O., Guimarães, G. C., e Chaves, M. L. R. (2014b). *Modelagem Computacional da Corrente de Retorno em Descargas Atmosféricas para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão*. XII CEEL, Uberlândia- MG, Brasil.
- Sargent, M. A. e Darveniza, M. (1969). Tower surge impedance. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5):680–687.
- Vasconcelos, J. A., Araújo, A. E. A., Braga, M. A. F., Lima, F. L. R., Lavarini, G. V. M., Alves, L. C., Martins, M. B., Teixeira, F. B., Senna, S. L., Tavares, I. C., Franco, J. L., e Abreu, S. R. (2012). *Software para Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão e de Distribuição*. SBSE 2012, Goiânia- GO, Brasil.
- Vasconcelos, J. A., Ramirez, J. A., Takahashi, R. H. C., e Saldanha, R. R. (2001). Improvements in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(5):3414–3417.
- Viana, J. C. C. (2009). *Estudo de Aplicação de Para-raios ZnO em Linhas de Transmissão em Regiões de Nível Cerâmico e Resistência de Aterramento Elevados*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Visacro Filho, S. (2005). *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. Artliber.