

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
Escola de Engenharia
Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Ana Paula Gomes Grabe Borges

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS
PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DE LTS DE 230 E 500 KV**

Belo Horizonte
2024

Ana Paula Gomes Grabe Borges

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS
PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DE LTS DE 230 E 500 KV**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Fernando Henrique Silveira

Belo Horizonte

2024

B732a	<p>Borges, Ana Paula Gomes Grabe. Análise de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas [recurso eletrônico] : estudo comparativo de alternativas para melhoria de desempenho de LTs de 230 e 500 Kv / Ana Paula Gomes Grabe Borges. – 2024. 1 recurso online (90 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Fernando Henrique Silveira.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 86-90.</p> <p>1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade – Teses. 3. Linhas elétricas – Postes e torres – Teses. 4. Descargas elétricas – Teses. I. Silveira, Fernando Henrique. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente A Descargas Atmosféricas: Estudo Comparativo de Alternativas Para Melhoria de Desempenho de Lts de 230 e 500 Kv"

Ana Paula Gomes Grabe Borges

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 20 de agosto de 2024. Por:

Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Silvério Visacro Filho
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Ronaldo Eugenio de Souza Filho
ICT (UNIFEI)



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Henrique Silveira, Professor do Magistério Superior**, em 20/08/2024, às 12:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Silverio Visacro Filho, Professor do Magistério Superior**, em 20/08/2024, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Eugenio de Souza Filho, Usuário Externo**, em 20/08/2024, às 21:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3470499** e o código CRC **84EA0A8B**.

Este trabalho é dedicado à minha família, pelo amor e apoio incondicional em toda minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por ser o responsável pela vida, proporcionando a capacidade de aprender, interagir e transformar o universo.

Aos meus pais, Júlio e Wânia, e meu irmão, Arthur, pelo apoio incondicional em toda minha vida, em especial pelo amor e carinho em todos os momentos difíceis, que fizeram com que eu pudesse cumprir mais essa etapa com dedicação e qualidade.

Ao meu namorado, Gabriel, pelo carinho e apoio nessa etapa, que foi uma das mais difíceis da minha vida.

Aos meus avós, pelo apoio moral, presencial e amoroso os quais foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram e contribuíram na minha caminhada cada qual a sua maneira.

Ao meu professor orientador, Fernando, por todo apoio, paciência e ensinamentos, que foram além dos aspectos técnicos, me ajudando de forma imensurável na realização dessa dissertação.

Aos meus amigos e companheiros do LRC, que estiveram comigo nessa jornada do mestrado. Em especial ao Fred, que me ajudou muito no desenvolvimento de alguns aspectos muito relevantes dessa dissertação.

Aos meus companheiros da RS Engenharia, em especial ao Roberto e a Camila, pelo companheirismo, paciência, carinho e dedicação.

Aos meus amigos, pelo imenso apoio, amor e companheirismo, estando presentes em todos os momentos na minha vida.

Resumo

O desempenho das linhas de transmissão (LTs), está diretamente relacionado ao número de desligamentos que ocorrem em uma LT anualmente, sendo as descargas atmosféricas as principais causas desses eventos. Os requisitos mínimos de desempenho das linhas de transmissão são regulados e fiscalizados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e propostos, por meio dos procedimentos de rede, pelo órgão ONS (Operador Nacional do Sistema).

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo avaliar um conjunto de alternativas para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas e estabelecer critérios de aplicação dessas alternativas. Dentre as técnicas existentes, utilizou-se o aumento dos cabos contrapeso, a instalação de dispositivos para-raios e cabos *underbuilt*. A análise técnica deste trabalho foi baseada em simulações computacionais realizadas no software ATP para obtenção das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV, em função do valor da impedância de aterramento. Também foi utilizado o método de integração (Disruptive Effect (DE)) para avaliação da ocorrência de *backflashover*.

Os resultados demonstraram que a instalação dos dispositivos para-raios apresentou um desempenho notável, reduzindo a probabilidade de *backflashover* em até 83% nas linhas de 230 kV e em até 99% nas LTs de 500 kV. Um estudo de caso aprofundado possibilitou identificar o valor ideal da impedância impulsiva de aterramento para alcançar o desempenho ótimo das linhas. Além disso, foram avaliados cenários com alta resistividade do solo para determinar o comprimento adequado dos cabos contrapeso, utilizando-se ou não as alternativas de melhoria de desempenho.

Palavras-chave: *backflashover*; dispositivos para-raios; cabos *underbuilt*; cabos contrapeso; performance de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas; técnicas de melhoria de desempenho de linhas de transmissão.

Abstract

The performance of transmission lines (TLs) is directly related to the number of non-scheduled outages that occur in a TL per year, with lightning strikes being the main cause of these events, which have consequences for power utilities and consumers. The minimum requirements of transmission lines performance are regulated and monitored by ANEEL (National Electric Energy Agency) and proposed, through network procedures, by the ONS (National System Operator).

This work aims to evaluate a set of alternatives to improve the lightning performance of transmission lines due to direct lightning strikes and to determine some standards for the application of these conventional and unconventional alternatives. Among the existing techniques, the increase in counterpoise wires, the installation of surge arresters and underbuilt wires were used. The technical analysis of this work was based on computer simulations using ATP software, which obtained the resulting overvoltages across insulator string of 230 kV and 500 kV transmission lines, varying the tower-footing grounding impedance from 10 Ω to 80 Ω . The integration method (Disruptive Effect (DE)) was also used to evaluate the occurrence of backflashover.

The installation of TL surge arresters provided a reduction of occurrence of backflashover up to 83% and 99% for the 230 kV and 500 kV transmission lines, respectively. An in-depth case study made it possible to identify the ideal value of tower-footing grounding impedance to achieve optimal lightning performance of transmission lines. In addition, scenarios with high soil resistivity were evaluated to determine the appropriate length of the counterpoise wires, using or not the alternatives to improve the lightning performance of transmission lines.

Keywords: backflashover; transmission line surge arrester; underbuilt wire; counterpoise wire; lightning performance of transmission lines; techniques for improving the lightning performance of transmission lines.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Sobretensão em uma LT sem cabos de blindagem atingida por uma descarga	22
Figura 2.2 - Representação das ondas de tensão provenientes da descarga atmosférica incidente em uma torre	23
Figura 2.3 - Representação das torres e cabos de blindagem como impedâncias	25
Figura 2.4 - Representação da incidência de descarga no meio do vão	25
Figura 2.5 - Reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante	26
Figura 2.6 – Mapa isoceráunico do Brasil (ABNT, 2015)	27
Figura 2.7 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas - 1998-2013 (ONS, 2024). 29	
Figura 2.87 - Probabilidade acumulada de correntes de pico das distribuições do IEEE, CIGRE e MCS (Moreira, 2022)	33
Figura 3.1 - Componentes de corrente no eletrodo e no solo – Adaptado (Visacro, 2007)	36
Figura 3.2 - Representação simplificada: Geometria tradicional de instalação de cabos contrapeso em uma estrutura de LT	39
Figura 3.3 - Representação simplificada: Cabo underbuilt instalado em uma linha de transmissão	40
Figura 3.4 – Curva V-I do dispositivo para-raios ZnO – Adaptado (Piantini, 2020).....	41
Figura 3.5 – Dispositivo para-raios tipo NGLA – Adaptado (Khodsuz, 2022).....	42
Figura 3.6 – Dispositivo para-raios tipo EGLA – Adaptado (Khodsuz, 2022).....	43
Figura 4.1 – Silhueta das estruturas típicas de linhas de transmissão utilizadas nas análises (a) 230 kV, (b) 500 kV	45
Figura 4.2 - Modelagem do IEEE do dispositivo para-raios ZnO (IEEE, 1992)	47
Figura 4.3 – Curva V–I das características dos resistores não lineares - Adaptado de (Durbak, 1985)	48
Figura 4.4 - Modelagem Pinceti-Giannettoni do dispositivo para-raios ZnO (Pinceti and Giannettoni, 1999).....	49
Figura 5.1 - Sobretensão na cadeia de isoladores da LT 230 kV com $Z_P = 10 \Omega, 20 \Omega, 40 \Omega$ e 80Ω	54

Figura 5.2 - Sobretensão na cadeia de isoladores com colocação do NGLA na LT 230 kV. Impedância impulsiva Z_P : (a) 10 Ω (b) 20 Ω (c) 40 Ω (d) 80 Ω	56
Figura 5.3 - Posicionamento dos cabos <i>underbuilt</i> nas estruturas da LT 230 kV na altura de 28,0 m (Moreira, 2022).....	58
Figura 5.4 - Sobretensão na cadeia de isoladores da LT 500 kV com $Z_P = 10 \Omega, 20 \Omega, 40 \Omega$ e 80 Ω	60
Figura 5.5 - Disposição do dispositivo para-raios em cada caso simulado	61
Figura 5.6 - Sobretensão na cadeia de isoladores com colocação do NGLA na LT 500 kV. Impedância impulsiva Z_P : (a) 10 Ω (b) 20 Ω (c) 40 Ω (d) 80 Ω	62
Figura 5.7 - Posicionamento dos cabos <i>underbuilt</i> nas estruturas da LT 500 kV na altura de 40,8 m (Moreira, 2022).....	65
Figura 6.1 – Taxa de desligamentos em função de Z_P considerando a instalação do NGLA. Ng: (a) 1 (b) 5 e (c) 10.....	70
Figura 6.2 – Taxa de desligamentos em função de Z_P considerando a instalação do NGLA. Ng: (a) 1 (b) 5 e (c) 10.....	74
Figura 7.1 - Disposição do dispositivo para-raios em cada caso simulado	80

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Situações possíveis de acordo com o coeficiente de reflexão Γ	24
Tabela 2.2 - Parâmetros da distribuição de (CIGRE, 1991) para primeiras descargas de retorno	31
Tabela 2.3 - Valor mediano e de desvio padrão das primeiras correntes de descargas medidas na estação do Morro do Cachimbo (MCS).....	33
Tabela 2.4 - Número máximo de desligamentos de um circuito por 100 km por ano determinado	34
Tabela 4.1 - Características dos cabos.....	45
Tabela 4.2 – Valores de A_0 e A_1 conforme (Durbak, 1985).....	48
Tabela 5.1 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV para os dois modelos de TLSA analisados	52
Tabela 5.2 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 230 kV para os dois modelos de TLSA analisados (Corrente e Distribuição MCS).....	53
Tabela 5.3 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV.....	54
Tabela 5.4 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de <i>backflashover</i> para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS).....	55
Tabela 5.5 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV com uso do TLSA	56
Tabela 5.6 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS) com TLSA.....	57
Tabela 5.7 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV com uso do <i>underbuilt</i> . Fonte: Moreira, 2022	58
Tabela 5.8 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de <i>backflashover</i> para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS) com <i>underbuilt</i> . Fonte: Moreira, 2022	58
Tabela 5.9 - Correntes críticas probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS) com NGLA e cabos <i>underbuilt</i> (Moreira, 2022).....	59

Tabela 5.10 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 500 kV.....	60
Tabela 5.11 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 500 kV (Corrente e Distribuição MCS).....	61
Tabela 5.12 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 500 kV com uso do dispositivo para-raios.....	62
Tabela 5.13 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 500 kV com utilização do NGLA (Corrente e Distribuição MCS)	63
Tabela 5.14 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da LT 500 kV com uso do <i>underbuilt</i> . Fonte: Moreira, 2022	65
Tabela 5.15 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 500 kV (Corrente e Distribuição MCS) com <i>underbuilt</i> . Fonte: Moreira, 2022	65
Tabela 5.16 - Correntes críticas probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 500 kV (Corrente e Distribuição MCS) com NGLA e <i>underbuilt</i> (Moreira, 2022).....	66
Tabela 6.1 - Valores de Z_P para atingir o desempenho esperado da linha de transmissão de 230 kV.....	70
Tabela 6.2 - Comprimento complementar dos cabos contrapeso (CCP) para se alcançar o desempenho adequado de linhas de transmissão 230 kV.....	72
Tabela 6.3 - Valores de Z_P para atingir o desempenho esperado da linha de transmissão de 500kV.....	73
Tabela 6.4 - Comprimento complementar dos cabos contrapeso (CCP) para se alcançar o desempenho adequado de linhas de transmissão 500 kV.....	75
Tabela 6.5 – Alternativa de melhoria de desempenho mais adequada para cada cenário em uma LT 230 kV.....	76
Tabela 6.6 – Alternativa de melhoria de desempenho mais adequada para cada cenário em uma LT 500 kV	77

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Relevância e Motivação.....	16
1.2	Objetivo	17
1.3	Metodologia	17
1.4	Organização do texto	18
2	Fundamentos relativos às Descargas Atmosféricas e ao Desempenho de Linhas de Transmissão	20
2.1	Considerações Iniciais	20
2.2	Descargas Atmosféricas.....	20
2.2.1	Descarga negativa descendente	21
2.3	A incidência direta de descargas em linhas de transmissão	22
2.3.1	Descarga disruptiva no isolamento: o flashover	22
2.3.2	Descarga disruptiva de retorno: o backflashover.....	23
2.4	Aspectos meteorológicos	26
2.5	Mapa de densidade de descargas atmosféricas	28
2.6	Desempenho de Linhas de Transmissão	29
2.6.1	Fator de vão	30
2.6.2	Número esperado de incidências na linha (N_L)	30
2.6.3	Probabilidade de o valor de corrente exceder a corrente crítica $P(\% I \geq IC)$	31
2.7	Índice de Desempenho de Linhas de Transmissão	33
3	Alternativas de Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão	35
3.1	Introdução	35
3.2	Fundamentos associados aos Aterramentos Elétricos	35
3.2.1	Dependência da frequência dos parâmetros do solo	37
3.2.2	Efeitos de propagação no solo	37

3.2.3	Efeito da intensidade de corrente.....	38
3.3	Técnicas de Melhoria de Desempenho	38
3.3.1	Aumento do comprimento dos cabos contrapeso (CCP).....	38
3.3.2	Cabos underbuilt.....	39
3.3.3	Dispositivos para-raios (TLSA).....	40
4	Metodologia de Desenvolvimento	44
4.1	Introdução	44
4.2	Informações relativas ao sistema simulado	44
4.2.1	Modelagem das torres.....	44
4.2.2	Modelagem dos condutores das LTs	45
4.2.3	Cadeia de Isoladores	45
4.2.4	Modelagem dos aterramentos elétricos.....	46
4.3	Modelagem do dispositivo para-raios ZnO	46
4.3.1	Modelagem do NGLA	47
4.3.2	Modelagem do EGLA.....	50
4.4	Corrente de Descarga: forma de onda e parâmetros	50
4.4.1	Cálculo da Corrente Crítica e determinação da probabilidade de ocorrência de backflashover	51
5	Resultados e Análises	52
5.1	Introdução	52
5.2	Discussão da qualidade dos modelos do dispositivo para-raios tipo NGLA em LTs	52
5.3	Desempenho de LT de 230 kV	54
5.3.1	Efeito do valor da impedância impulsiva de pé de torre (Z_P).....	54
5.3.2	Efeito do dispositivo para-raios NGLA	55
5.3.3	Efeito da colocação de cabo underbuilt.....	57

5.3.4	Comparação entre as técnicas de melhoria de desempenho para LT de 230 kV: instalação de dispositivo para-raios x cabos underbuilt	59
5.4	Desempenho de LT de 500 kV	60
5.4.1	Efeito do valor da impedância impulsiva de pé de torre (Z_P)	60
5.4.2	Efeito do dispositivo para-raios NGLA	61
5.4.3	Efeito da colocação de cabo underbuilt	65
5.4.4	Comparação entre as técnicas de melhoria de desempenho para LT de 500 kV: instalação de dispositivo para-raios x cabos underbuilt	66
6	Estudo de Caso para Estabelecimento de Critérios de Aplicação	69
6.1	Introdução	69
6.2	Determinação das condições para atender o desempenho ótimo das linhas de transmissão em 230 kV	69
6.2.1	Determinação do comprimento de cabo contrapeso para atendimento do desempenho de uma LT 230 kV instalada em solo de elevada resistividade	71
6.3	Determinação das condições para atender o desempenho ótimo das linhas de transmissão em 500 kV	72
6.3.1	Determinação do comprimento de cabo contrapeso para atendimento do desempenho de uma LT 500 kV instalada em solo de elevada resistividade	75
6.4	Cenários para utilização das alternativas de melhoria de desempenho	76
7	Conclusões e Propostas de Continuidade	79
7.1	Introdução	79
7.2	Comentários gerais	80
7.3	Propostas de Continuidade	84
	Referências Bibliográficas	86

1 Introdução

1.1 Relevância e Motivação

A incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão (LTs) tem importante influência no sistema elétrico e na qualidade de energia fornecida aos consumidores, uma vez que esse tipo de evento pode levar ao desligamento da linha e interrupção do fornecimento de energia para os centros consumidores. As concessionárias responsáveis pelas LTs têm como objetivo atender aos seus clientes da melhor forma possível, maximizando a eficiência na transmissão, reduzindo os tempos de desligamentos e as perdas técnicas de forma a obter um retorno sobre os ativos disponíveis para prestação do serviço público sob sua responsabilidade. Assim, os desligamentos devem ser evitados, visando o bom desempenho das LTs. Portanto, vê-se a relevância do entendimento dos fenômenos associados às descargas atmosféricas no âmbito do desempenho das linhas de transmissão.

Os mecanismos de desligamentos relacionados à incidência direta de descargas nas LTs são o *flashover* e o *backflashover*, sendo o último a maior causa de desligamentos não-programados de linhas de transmissão instaladas em solos de resistividade moderada a elevada (Visacro, 2005). O *flashover* está associado à incidência de descarga nos cabos condutores, levando à formação de um arco elétrico entre a fase energizada e a torre. Esse fenômeno ocorre em menor frequência em linhas de transmissão de alta tensão visto a utilização de cabos de blindagem nelas. Já o mecanismo de *backflashover* está associado a incidência de descargas nos cabos guarda ou no topo da torre, podendo resultar no estabelecimento do arco elétrico entre o corpo da torre e o condutor energizado. O estabelecimento do *backflashover* é diretamente influenciado pelo sistema de aterramento das estruturas.

Tradicionalmente, para a melhoria do desempenho das linhas de transmissão buscase o aumento do comprimento dos cabos contrapeso enterrados no solo, o que leva à diminuição da impedância de aterramento de pé de torre (Visacro & Silveira, 2015). Devido à dificuldade de melhoria de desempenho em alguns casos, nos quais não há a possibilidade de aumento do comprimento dos cabos contrapesos, outras alternativas de

melhoria de desempenho podem ser empregadas, como a instalação de dispositivos para-raios em paralelo com as cadeias de isoladores. Existem também, as chamadas alternativas não-convencionais (Visacro & Silveira & Vale & Pomar, 2021), como a instalação dos cabos *underbuilt* (Moreira & Silveira & Visacro, 2021), e dos falsos estais nas torres das linhas de transmissão (Visacro & Silveira & De Conti, 2011) e (Visacro & Felipe & Oliveira, 2002).

1.2 Objetivo

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo avaliar um conjunto de alternativas para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas com base no desenvolvimento de uma análise técnica fundamentada em simulações computacionais. Essa avaliação pretende considerar configurações reais de linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão instaladas em condições típicas do Brasil, sendo considerado um solo com elevada resistividade e regiões com baixa, média e alta taxa de incidência de descargas.

Almeja-se o desenvolvimento de uma análise técnica considerando 3 metodologias de melhoria de desempenho de linhas de transmissão: o aumento do comprimento dos cabos contrapesos, a instalação dos dispositivos para-raios e a inserção dos cabos *underbuilt*. Posteriormente, é analisado um estudo de caso considerando um solo com alta resistividade e o comportamento das técnicas convencionais e não-convencionais neste cenário adverso.

1.3 Metodologia

A metodologia adotada nesta dissertação de mestrado se baseia na realização de simulações computacionais utilizando o software ATP (ATP, 1982) para a obtenção das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de linhas de 230 kV e 500 kV quando da incidência direta de uma descarga atmosférica na LT. Os parâmetros da corrente utilizada consideram os valores medianos referentes às medições da estação do Morro do Cachimbo (Silveira, et al., 2020) e (Silveira, et al., 2022) de uma corrente de primeira descarga negativa descendente, com forma de onda duplo pico. As simulações consideraram a variação do valor de pico da corrente para obtenção do valor mínimo necessário para disrupção elétrica da cadeia de isoladores, definido como corrente crítica. A determinação desse valor de corrente considerou a aplicação do Método da integração

– DE (*Disruptive effect method*) (Hileman, 1999) às sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores das LTs. As simulações foram realizadas considerando a instalação dos dispositivos para-raios em diferentes cenários nas duas linhas de transmissão analisadas, e a variação da impedância impulsiva de aterramento de 10Ω a 80Ω . Além disso, foi feita uma análise de sensibilidade para verificação do impacto da utilização dos dispositivos para-raios em comparação à instalação dos cabos *underbuilt*. Por fim, foi desenvolvido um estudo de caso considerando essas duas alternativas de melhoria de desempenho em conjunto com o aumento do comprimento dos cabos contrapeso em um solo de alta resistividade.

1.4 Organização do texto

O texto está dividido em 7 capítulos. Este capítulo inicial apresentou uma visão geral do tema, com uma breve apresentação dos principais temas abordados nesta dissertação.

No **Capítulo 2**, são abordados os conceitos fundamentais relacionados às descargas atmosféricas e o efeito delas em linhas de transmissão, por meio dos mecanismos de desligamentos provenientes da incidência direta de descargas em LTs, sendo eles o *flashover* e *backflashover*. Além disso, são feitas algumas considerações a respeito das características climáticas regionais. Por fim, são apresentados aspectos fundamentais relacionados ao desempenho de linhas de transmissão.

No **Capítulo 3**, inicialmente é apresentado um panorama geral sobre o aterramento elétrico e o seu impacto no desempenho em LTs. Depois, são apresentadas as técnicas convencionais e não convencionais de melhoria de desempenho de linhas de transmissão e o impacto de cada técnica, relacionando-as com o sistema de aterramento das estruturas da LT.

No **Capítulo 4**, é mostrada a metodologia adotada nas simulações realizadas nesta dissertação. São apresentados os parâmetros utilizados, bem como suas características, sendo eles os cabos condutores e cabos de blindagem, a silhueta e aterramento das torres, a cadeia de isoladores e os dispositivos para-raios. Além disso, são mostradas as metodologias adotadas para representação deles nas simulações e análises realizadas.

No **Capítulo 5**, são apresentados os resultados das análises das técnicas convencionais (aumento do comprimento dos cabos contrapeso) e não convencionais (uso

de cabos *underbuilt* e dispositivos para-raios) na melhoria do desempenho de LTs de 230 kV e 500 kV frente às descargas atmosféricas.

No **Capítulo 6**, é feito um estudo de caso considerando solo de alta resistividade para as linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV, onde analisou-se o impacto das características de solos adversos nas técnicas convencionais e não convencionais de melhoria de desempenho, bem como uma análise de sensibilidade dos cenários adotados em tais técnicas.

No **Capítulo 7**, são abordados os aprendizados e as conclusões sobre as diretrizes seguidas neste trabalho, além de apresentar possíveis melhorias sobre o tema abordado.

As **referências bibliográficas** citadas ao longo do texto se encontram listadas ao final desta dissertação.

2 Fundamentos relativos às Descargas Atmosféricas e ao Desempenho de Linhas de Transmissão

2.1 Considerações Iniciais

As descargas atmosféricas consistem em uma grande ameaça à integridade e ao desempenho das linhas de transmissão (LTs). Deste modo, o entendimento desse fenômeno físico é fundamental para que sejam adotadas medidas que possam contribuir para a proteção contra o fenômeno.

A incidência direta de descargas nas LTs pode resultar em interrupção elétrica de seus isoladores e o desligamento de tais linhas, afetando, assim, o fornecimento de energia por parte das concessionárias, e a qualidade de energia fornecida aos consumidores. Dessa forma, vê-se a relevância do entendimento dos efeitos da incidência das descargas atmosféricas em linhas de transmissão, uma vez que esse fenômeno natural é o maior responsável pelos desligamentos não programados de linhas.

Este capítulo tem como principal referência Visacro, (2005), no qual são apresentados os conceitos fundamentais associados à interação das descargas atmosféricas com as linhas de transmissão.

2.2 Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica é um fenômeno natural que consiste em uma descarga elétrica intensa, que geralmente percorre o caminho nuvem-solo. Essa descarga é

caracterizada por um fluxo de corrente impulsiva de curta duração e grande intensidade (Visacro, 2005).

As descargas atmosféricas possuem várias classificações. Nesta dissertação, são consideradas somente as descargas descendentes negativas primeiras, visto a relevância deste tipo de descarga para o desempenho de linhas de transmissão frente ao fenômeno de *backflashover*.

2.2.1 Descarga negativa descendente

Quando uma nuvem está carregada com cargas elétricas negativas em sua base, há uma indução no solo, levando ao acúmulo de cargas de sinal contrário. Assim, é estabelecida uma diferença de potencial, que gera um campo elétrico intenso, capaz de romper a rigidez dielétrica do ar, ocorrendo uma descarga atmosférica, que constitui um canal ionizado de plasma. Neste canal, acumulam-se cargas negativas provenientes da região circunvizinha da nuvem, resultando em um aumento do campo elétrico nas extremidades do canal, gerando descargas consecutivas semelhantes à inicial.

Devido ao poder das pontas, o campo elétrico na extremidade inferior da coluna de plasma fica muito intenso e pode gerar uma nova descarga. No canal de plasma dessa nova descarga, ocorre novamente o processo de acúmulo de cargas negativas, podendo alimentar uma nova descarga com a mesma característica da anterior, estabelecendo o chamado canal precursor de descarga (Visacro, 2005).

Quando esse canal carregado vai se aproximando do solo, a quantidade de cargas positivas induzidas no solo aumenta, intensificando o campo elétrico na região, gerando assim canais de descargas ascendentes. Estes também podem evoluir, assim como ocorre com as descargas descendentes, através de descargas disruptivas consecutivas. Caso o canal descendente e um dos canais ascendentes cheguem a uma distância crítica inferior ao limite (associado ao valor da carga acumulada no canal descendente), pode ocorrer uma descarga que os interliga por meio de um salto final.

No momento da conexão do canal nuvem-solo, uma corrente de alta intensidade, chamada de corrente de retorno (*return stroke current*), é estabelecida, se propagando pelo canal a partir do ponto de conexão, neutralizando as cargas e dando origem a uma onda de corrente na base do canal (Visacro, 2005). O fluxo dessa corrente gera um aquecimento intenso e o efeito luminoso, além do efeito sonoro.

2.3 A incidência direta de descargas em linhas de transmissão

O desempenho das linhas de transmissão é diretamente relacionado ao número e duração das interrupções do serviço de transmissão de energia do centro gerador a sua carga. Por possuírem longas extensões, as LTs são muito propícias a serem atingidas pelas descargas atmosféricas, com possibilidade de desligamento, em decorrência das sobretensões associadas (Visacro, 2005). Existem dois tipos de incidência de descargas em relação as LTs, sendo elas: próxima a linha e direta na linha. Este último, é o foco de análise nesta dissertação. Assim, nos próximos tópicos são retratados os mecanismos de estabelecimento da sobretensão por descargas diretas.

2.3.1 Descarga disruptiva no isolamento: o *flashover*

O mecanismo de ruptura do isolamento em uma linha sem cabos de blindagem é chamado de descarga disruptiva no isolamento (*flashover*). Mesmo sendo um fenômeno menos comum que o *backflashover*, visto que a grande maioria das linhas de transmissão de alta tensão possuem cabos de blindagem, ele se mostra fundamental para auxiliar na compreensão do mecanismo de ruptura de isolamento em linhas blindadas.

Para o entendimento desse fenômeno, caracteriza-se a LT por uma impedância de surto Z_S ($Z_S = \sqrt{L/C}$). A Figura 2.1 ilustra o estabelecimento do *flashover* em uma linha de transmissão.

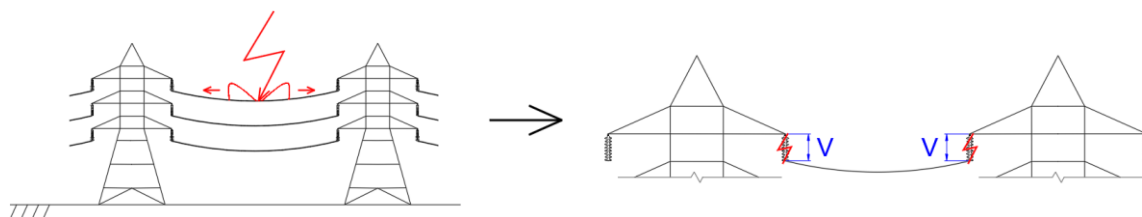


Figura 2.1 - Sobretensão em uma LT sem cabos de blindagem atingida por uma descarga

De maneira simplificada, pode-se analisar o estabelecimento do mecanismo a partir da incidência de uma descarga atmosférica, em que se flui uma corrente impulsiva I , que se divide em duas parcelas $I/2$, propagando-se pela linha. Associada a ela, tem-se uma sobretensão que também se propaga, com amplitude de $\approx V = Z_S \cdot I/2$ (Visacro, 2005). As ondas de corrente e tensão atingem uma torre que está aterrada, e assim, o isolador (utilizado para separar a estrutura metálica do condutor energizado) fica submetido a essa onda de sobretensão. Devido ao alto valor da sobretensão, pode ocorrer

a ruptura do isolamento, gerando um arco elétrico que conecta o condutor energizado à estrutura aterrada. Com a formação do arco elétrico, a corrente de descarga flui até o solo e cessa após um curto intervalo de tempo. Entretanto, devido a tensão operacional da linha, o arco se mantém. Conseqüentemente, ocorre o curto-circuito, que pode danificar os isoladores da LT em questão. O sistema de proteção atua quando a corrente de curto-circuito está fluindo e sensibiliza esses equipamentos, que desligam a LT do sistema.

Para se minimizar a ocorrência de *flashover*, utilizam-se os cabos de blindagem sobre os cabos condutores, que são conectados eletricamente ao solo e as torres através dos aterramentos elétricos. Entretanto, mesmo colocando-se cabos de blindagem nas linhas, pode ocorrer a ruptura do isolamento e conseqüentemente o curto-circuito, pelo mecanismo de *backflashover*.

2.3.2 Descarga disruptiva de retorno: o *backflashover*

A incidência de descarga atmosférica nos cabos de blindagem de linhas de transmissão pode resultar no mecanismo denominado *backflashover* na cadeia de isoladores, conforme apresentado na Figura 2.2.

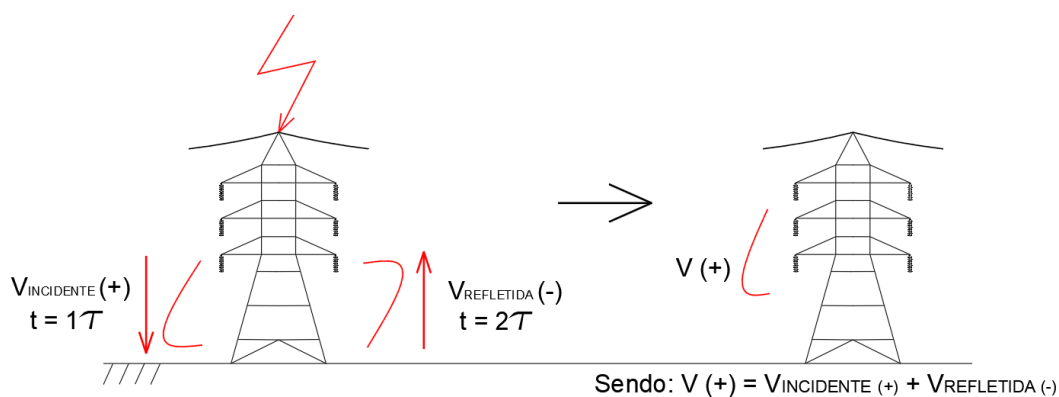


Figura 2.2 - Representação das ondas de tensão provenientes da descarga atmosférica incidente em uma torre

As características e considerações a respeito da tensão, corrente e impedância de surto consideradas no tópico anterior (*flashover*) são válidas para este caso. Entretanto, ocorre uma diferença quando há uma descontinuidade da impedância de surto da linha, Z_s , a partir de determinado ponto. Uma parte da onda de tensão é transmitida e outra parte é refletida, ou seja, essa parcela da onda se propaga em sentido contrário ao da onda incidente. No ponto de descontinuidade, o comportamento da onda de tensão refletida se dá pelo coeficiente de reflexão Γ , definido pela seguinte expressão, na qual os índices "1"

e “2” se referem a linha em que a onda se propaga e a uma segunda linha, com características diferentes em relação a LT analisada, respectivamente:

$$\Gamma = \frac{(Z_{S_2} - Z_{S_1})}{(Z_{S_2} + Z_{S_1})} \quad (2.1)$$

Com o coeficiente de reflexão tem-se uma análise da relação entre a impedância da torre e a impedância de aterramento e, como esses fatores implicam nas ondas de tensão provenientes das descargas atmosféricas. Portanto, será considerado Z_{S_1} como a impedância de surto da torre, Z_{TORRE} , e Z_{S_2} como a impedância de aterramento, $Z_{ATERRAMENTO}$.

Na Tabela 2.1 estão representados os possíveis casos das ondas de tensão resultante. Em destaque, está a situação analisada nesta dissertação, que é o caso tipicamente encontrado, no qual $Z_{Aterramento} < Z_{Torre}$.

Tabela 2.1 - Situações possíveis de acordo com o coeficiente de reflexão Γ

Coeficiente de Reflexão de Tensão	Impedância de Surto	Onda de Tensão
$\Gamma = -1$	$Z_{S_2} = 0$	Há reflexão total da onda, com amplitude igual e sinal contrário ao da onda incidente.
$\Gamma < 0$	$Z_{S_2} < Z_{S_1}$	Há reflexão de uma parcela onda de tensão e ela possui sinal contrário ao da onda incidente.
$\Gamma = 0$	$Z_{S_2} = Z_{S_1}$	Não há reflexão, V^+ continua se propagando além da descontinuidade.
$\Gamma > 0$	$Z_{S_2} > Z_{S_1}$	Há reflexão de uma parcela onda de tensão e ela possui mesmo sinal da onda incidente.

A onda de tensão resultante na linha de transmissão é a soma entre a onda incidente (V^+) e a refletida (V^-), $V = V^+ + V^-$, considerando o defasamento temporal. A onda incidente (V^+) está associada a corrente de descarga, sendo quantificada pelo produto dessa corrente pela impedância de surto da LT. A onda refletida (V^-) é quantificada pelo produto da onda incidente e o coeficiente de reflexão Γ .

Por fim, é importante conceituar o tempo de trânsito τ , visto que ele determina o valor da redução da amplitude da sobretensão, na medida em que define o instante em que a onda de tensão incidente tem seu crescimento “grampeado”. Esse parâmetro é

calculado como aproximadamente a altura da torre dividida pela velocidade da luz (Visacro, 2005). Ressalta-se que o tempo de trânsito da onda de tensão é de 2τ , o que corresponde a 2 vezes o tempo para a onda se propagar pelo corpo da torre.

Para a análise das sobretensões, considera-se que a estrutura é representada por uma impedância, Z_{Torre} , e que há um aterramento conectado nos pés da torre representado pela impedância $Z_{Aterramento}$, conforme é mostrado na Figura 2.3.

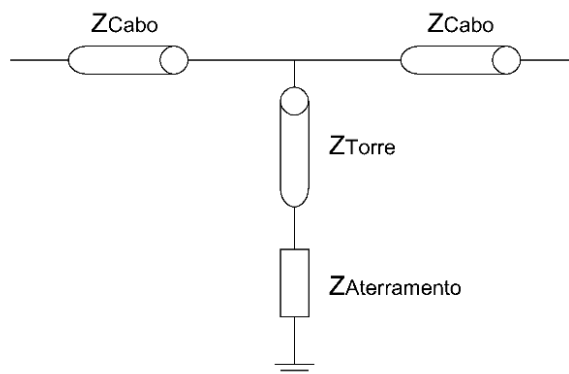


Figura 2.3 - Representação das torres e cabos de blindagem como impedâncias

Para exemplificar essa análise, será considerada a incidência de descarga no meio do vão da linha ilustrada na Figura 2.4. As ondas de corrente e tensão associadas se dividem e transitam pelo cabo de blindagem. Quando chegam ao encontro das torres adjacentes, estas ondas se deparam com um ponto de descontinuidade, que é a conexão entre as torres e os cabos. Nesse ponto, uma parte da onda é refletida, voltando ao ponto de incidência e outra parte é refratada, se propagando pelo corpo da torre até chegar ao solo (ponto de descontinuidade principal na análise de *backflashover* desta dissertação, conforme apresentado no parágrafo seguinte).

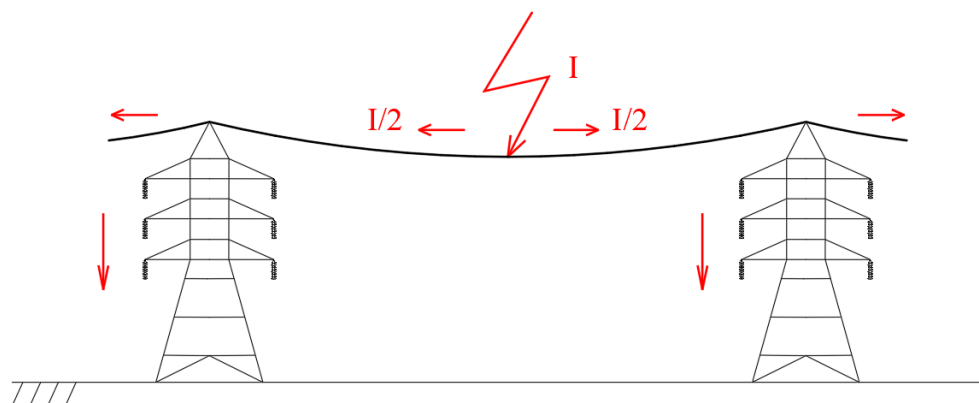


Figura 2.4 - Representação da incidência de descarga no meio do vão

Considerando $0 < Z_{\text{Aterramento}} < Z_{\text{Torre}}$, tem-se que a onda incidente é predominante até que a onda refletida alcance o topo da torre, em um tempo de trânsito de 2τ . Após esse período, nota-se na Figura 2.5 que o crescimento negativo da onda refletida não anula o crescimento positivo da onda incidente, visto que ele é inferior. Assim, a onda negativa promove uma redução nesse crescimento, até o momento de pico da onda de tensão incidente. Em função desse decrescimento, a partir desse momento, há uma diminuição da amplitude da onda resultante, devido a curva de reflexão negativa continuar tendo sua amplitude aumentada (Visacro, 2005). Após o pico (negativo) da onda refletida ser alcançado, a diminuição da amplitude resultante passa a ser menos acentuada, uma vez que, a onda refletida também possui uma redução em seu valor de tensão.

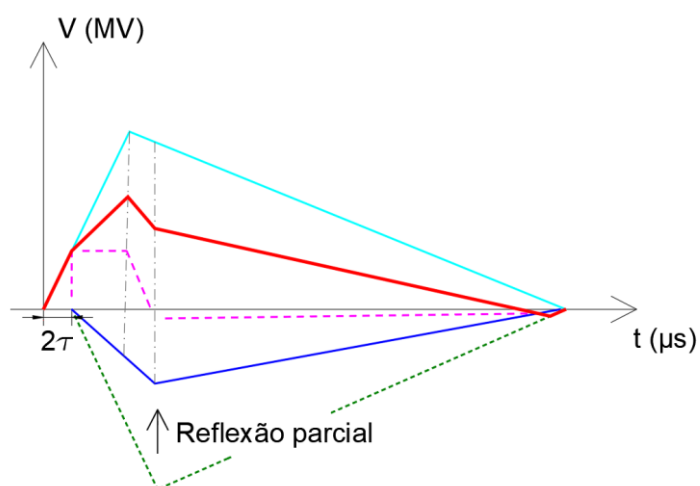


Figura 2.5 - Reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante

Portanto, tem-se a implicação do valor da impedância de aterramento na sobretensão: quanto menor for o valor da impedância de aterramento $Z_{\text{Aterramento}}$, maior é a redução da amplitude da sobretensão. Assim, tendo em vista um sistema de aterramento mais efetivo, são adotados critérios na engenharia para a limitação do valor da impedância de aterramento.

2.4 Aspectos meteorológicos

Como já foi dito, o desempenho de uma linha de transmissão está diretamente ligado ao número de desligamentos, que por sua vez, acontecem majoritariamente por causa da incidência de descargas atmosféricas. Dessa forma, vê-se uma grande importância em se conhecer a quantidade de descargas que atingem uma certa região. Assim, o parâmetro mais utilizado para quantificar essa frequência é a densidade de

descargas locais N_g (descargas/km²/ano). Além do N_g , o índice cerâmico local T_d é essencial para a caracterização meteorológica da região (IEEE, 1997). A relação entre esses dois índices se dá pela equação (2.2)(Eriksson, 1987):

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (2.2)$$

Muitos fatores influenciam no valor dos índices mencionados, sobretudo a distribuição de chuvas na região, a latitude e o relevo da região. Regiões elevadas e montanhosas tendem a apresentar índices mais elevados de densidade de descargas em relação às regiões baixas adjacentes. O mesmo ocorre com áreas de alto índice de precipitação, condição muito influenciada pela distribuição de correntes de ar no globo terrestre (VISACRO, 2005).

É comum que as curvas isocerâmicas sejam disponibilizadas através de mapas, como pode ser visto na Figura 2.6. No Brasil, a densidade de descargas é bem alta, quando comparado com países de zonas temperadas, sendo que, níveis cerâmicos acima de 80 já são considerados altos (aproximadamente 15 descargas/km²/ano).



Figura 2.6 – Mapa isocerâmico do Brasil (ABNT, 2015)

Na Figura 2.7 tem-se o mapa de densidade de descargas atmosféricas do Brasil proposto pelo ONS, em parceria com o INPE.

2.5 Mapa de densidade de descargas atmosféricas

O mapa de densidade de descargas atmosféricas, mostrado na Figura 2.7, é amplamente utilizado para que sejam feitos os estudos das linhas de transmissão, sendo uma ferramenta valiosa no cálculo da taxa de desligamento das LTs.

Tal mapa foi desenvolvido pelos órgãos brasileiros INPE e ELAT em parceria com o ONS, a partir de dados obtidos pelo sensor LIS (*Lightning Imaging Sensor*). Conforme apresentado pela NASA (NASA, 2024), o LIS é um sensor altamente sofisticado que detecta e localiza as descargas na região tropical do globo. Ele está localizado a 402 km acima da Terra, em um ponto de vista a bordo satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). O LIS é cerca de três vezes mais eficaz na detecção de descargas que seu predecessor, sendo capaz de observar um ponto na Terra ou uma nuvem por 80 segundos, tempo suficiente para estimar a taxa de flashes, que informa aos pesquisadores se uma tempestade está crescendo ou diminuindo (NASA, 2024).

Mesmo com esse grande avanço tecnológico e anos de dados coletados, o sensor ainda possui limitações que influenciam em parte no resultado obtido, sendo necessária uma interpolação de dados e considerações a respeito dos fatores utilizados, conforme listado nos comentários do próprio mapa (ONS, 2024). Além disso, a resolução considerada no mapa (25 x 25 km) restringe a precisão do índice de incidência de descarga em certas regiões, sendo utilizada de forma mais conservativa quando há estudos nas linhas de transmissão.

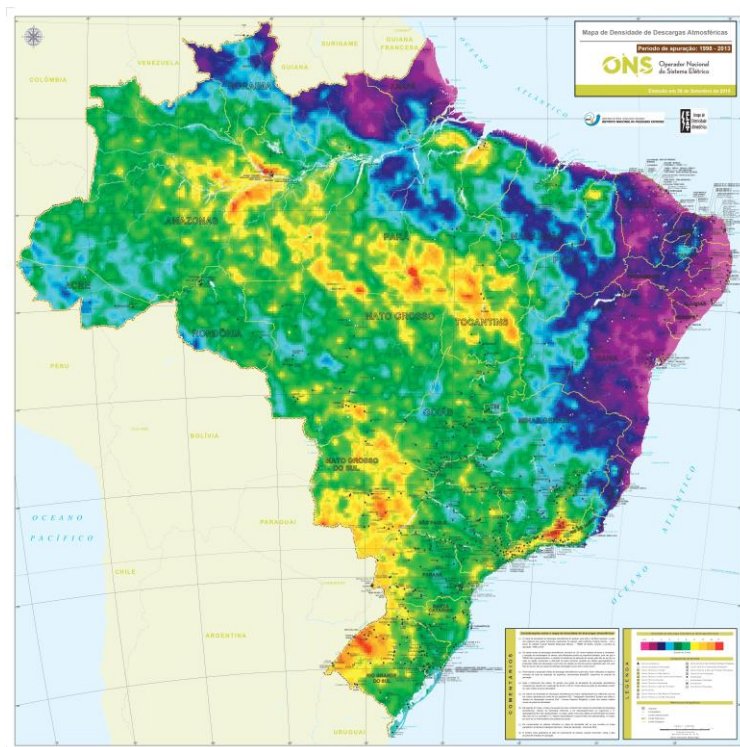


Figura 2.7 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas - 1998-2013 (ONS, 2024)

2.6 Desempenho de Linhas de Transmissão

Para se analisar o desempenho da LT frente às descargas atmosféricas é necessário se especificar os locais de possível incidência da descarga, sendo eles: os cabos de fase, cabos de blindagem ou no topo da torre. A incidência direta nesses dois últimos, pode ocasionar o fenômeno *backflashover*, responsável pela maior parte dos desligamentos de linhas de transmissão.

Os documentos de referência do CIGRE (CIGRE WG 33-01, 1991)(CIGRE WG C4.23, 2023) e IEEE (IEEE, 1997) abordam a metodologia de se calcular o desempenho a partir da taxa de desligamentos por *backflashover* considerando que a descarga incide somente no topo da torre. Para que esse valor encontrado seja ajustado de modo a

considerar eventuais incidência ao longo do vão, considera-se a multiplicação pelo chamado “fator de vão”. Dessa forma, é calculada a taxa de desligamentos conforme equação (2.3), a partir do número esperado de incidências na linha, N_L , e da probabilidade de correntes que excedem um determinado valor de corrente crítica (I_C) mínimo capaz de levar à ruptura do isolamento da cadeia de isoladores (GOMES, 2021).

$$\text{Taxa de Desligamento} = \text{fator de vão} \cdot N_L \cdot P(\% I \geq I_C) \quad (2.3)$$

Para o cálculo da taxa de desligamentos, é preciso analisar e quantificar os fatores da Equação (2.3). Assim, serão estabelecidos os conceitos fundamentais para o entendimento dos termos da taxa de desligamentos.

2.6.1 Fator de vão

Apesar da metodologia em que se adota o fator de vão igual a 0,6 ser amplamente utilizada para as análises de desempenho, ela não é muita precisa. Para que o fator 0,6 fosse determinado, muitas simplificações foram utilizadas nas formas de onda de corrente, usando-as no formato triangular, e considerando somente o valor de pico das sobretensões resultantes, isto é, desconsiderando o comportamento do formato da onda (GOMES, 2021).

Conforme apresentado em (GOMES, 2021), existem várias análises e fatores a serem avaliados para que o fator de vão seja mais preciso. Assim, considerando a variação dos valores da impedância impulsiva de aterramento Z_P , o comprimento do vão e o nível de tensão da linha, obtêm-se o fator de vão igual a 0,6 e 0,4 para linhas de 230 kV e 500 kV, respectivamente.

2.6.2 Número esperado de incidências na linha (N_L)

O número esperado de incidências na linha (N_L) pode ser calculado por algumas diferentes formas, sendo utilizada nesta dissertação a equação (2.4) (Ericksson, 1997).

$$N_L = N_g \left(\frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) \quad [\text{flashes}/100 \text{ km/ano}] \quad (2.4)$$

Sendo,

N_g - a densidade de descargas locais em descargas/km²/ano;
 h - altura das torres em metros;

b - a distância entre os para-raios da linha em metros.

2.6.3 Probabilidade do valor de corrente exceder a corrente crítica $P(\% I \geq I_C)$

O último termo para o cálculo da taxa de desligamentos de uma linha de transmissão consiste na probabilidade de um determinado valor de corrente exceder a corrente crítica. Esse parâmetro é determinado com base em distribuições acumuladas de pico de correntes.

A literatura apresenta diversas distribuições de picos de corrente. Essas distribuições podem ser classificadas como distribuições puras e distribuições estendidas (Silveira, Almeida e Visacro, 2024). As distribuições puras consideram apenas dados de medição em torres instrumentadas, como aquelas obtidas Monte San Salvatore (MSS), na Suíça (Berger, Anderson e Kroninger, 1975), e no Morro do Cachimbo (MCS), Brasil (Visacro et al., 2004), (Silveira e Visacro, 2019), (Silveira e Visacro, 2020). As distribuições estendidas se referem às distribuições do CIGRE (CIGRE, 1991) e IEEE (IEEE, 1997) que consideram, além dos dados de medição de torres instrumentadas, dados provenientes de medição por elo magnético em diferentes partes do mundo (Silveira, Almeida e Visacro, 2024).

A distribuição de picos de corrente proposta pelo CIGRE considera duas curvas lognormais, sendo uma delas para faixas de valor de corrente até 20 kA e a outra para valores maiores que 20 kA. A fórmula utilizada nesta distribuição pode ser vista na Equação (2.5) e os parâmetros na Tabela 2.2.

$$p(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{(2 \cdot \sigma^2)}\right) \quad (2.5)$$

Onde:

$p(x)$ é a probabilidade de o valor de corrente exceder a corrente crítica

σ é o desvio padrão logarítmico (base e)

μ é o valor mediano da onda de corrente

Tabela 2.2 - Parâmetros da distribuição de (CIGRE, 1991) para primeiras descargas de retorno

Parâmetro de distribuição	$I \leq 20$ kA	$I \geq 20$ kA
μ (kA)	61	33,3
σ (kA)	1,33	0,605

A equação da probabilidade de a corrente exceder a corrente crítica desenvolvida pelo IEEE (IEEE, 1997), baseada na distribuição da estação MSS, está representada pela Equação (2.6).

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad \text{Sendo: "P}_I\text{" o valor da probabilidade da corrente ser maior que a corrente crítica e "I" o valor de pico de corrente} \quad (2.6)$$

Visacro e Silveira propuseram, a partir da distribuição de correntes obtida nas medições do Morro do Cachimbo, novas equações (2.7), (2.8) e (2.9) para o cálculo da probabilidade da corrente exceder a corrente crítica, considerando-se medições de valores de pico das correntes de primeira descarga e subsequente. Além disso, foram apresentadas correlações entre os valores dos tempos de frente (T_{d10} e T_{d30}) e os valores de pico de corrente, primeiro e segundo, para correntes de primeira descarga de retorno (Silveira, et al., 2020) e (Silveira, et al., 2022).

Primeira descarga de retorno:

$$I_C < 95 \text{ kA:} \quad P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{43,3}\right)^{3,8}} \quad \text{Sendo: "P}_I\text{" o valor da probabilidade da corrente ser maior que a corrente crítica e "I" o valor de pico de corrente} \quad (2.7)$$

$$I_C \geq 95 \text{ kA:} \quad P_I = 352 \cdot e^{-0,0454 \cdot I} \quad (2.8)$$

Descarga subsequente:

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{17,3}\right)^{3,2}} \quad \text{Sendo: "P}_I\text{" o valor da probabilidade da corrente ser maior que a corrente crítica e "I" o valor de pico de corrente} \quad (2.9)$$

Na Tabela 2.3 são mostrados os valores medianos e respectivos desvios padrão dos principais parâmetros das correntes de primeira descarga, considerando uma distribuição lognormal sendo eles:

- I_{p1} (kA) – Valor do primeiro pico da corrente de descarga
 - I_p (kA) – Valor do segundo pico (valor máximo) da corrente de descarga
 - T_{d10} (μ s) – intervalo de tempo entre 10% e 90% do valor de pico da corrente I_{p1}
 - T_{d30} (μ s) – intervalo de tempo entre 30% e 90% do valor de pico da corrente I_{p1}
 - T_{50} (μ s) – tempo de meia onda
-

Tabela 2.3 - Valor mediano e de desvio padrão das primeiras correntes de descargas medidas na estação do Morro do Cachimbo (MCS)

Parâmetros	Aproximação pela Distribuição Lognormal	
	Valor Mediano μ	Desvio Padrão β
I_{p1} (kA)	37,6	0,46
I_p (kA)	43,3	0,47
T_{d10} (μ s)	6,4	0,41
T_{d30} (μ s)	4,2	0,50
T_{50} (μ s)	56,2	0,72

Nesta dissertação, será utilizada a distribuição de correntes do Morro do Cachimbo (MCS), uma vez que, essas medições são mais condizentes com os parâmetros climáticos da região no qual estão sendo analisadas as LTs nesta dissertação. A Figura 2.8 ilustra as diferentes distribuições de corrente citadas.

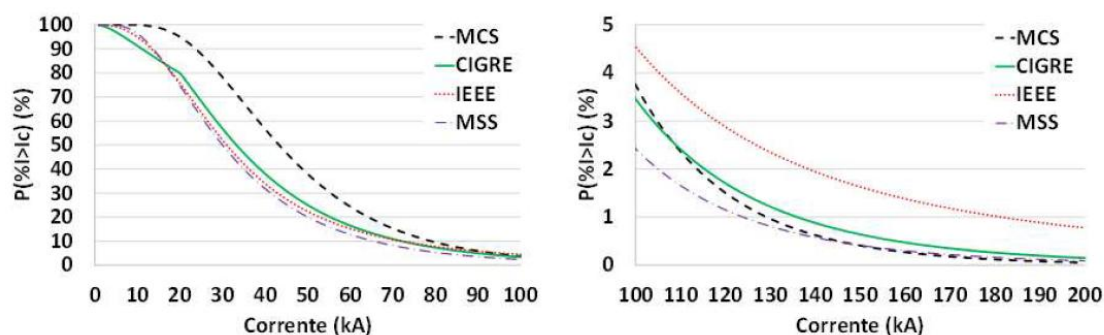


Figura 2.8 - Probabilidade acumulada de correntes de pico das distribuições do IEEE, CIGRE e MCS (Moreira, 2022)

2.7 Índice de Desempenho de Linhas de Transmissão

O desempenho das linhas de transmissão é regulamentado por órgãos públicos que estabelecem a forma como tais linhas devem funcionar dentro do SIN (Sistema Interligado Nacional). O ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) coordena a operação da geração e transmissão do SIN e, é responsável pelos Procedimentos de Rede (documentação que regulariza a geração e transmissão do SIN).

No Submódulo 2.7 - Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão (ONS, 2020), é estabelecida a taxa máxima de desligamentos das linhas de transmissão. Ela é mensurada por meio do número total de desligamentos por 100 km por ano (desligamentos/100 km/ano) da linha em análise, conforme mostrado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Número máximo de desligamentos de um circuito por 100 km por ano determinado

Tipo de LT	Classe de Tensão (kV)	Número Máximo de desligamentos de um circuito por 100 km por ano
LTA-CA	≥ 345	1
	230	2
LTA-CC	Todas	1

3 Alternativas de Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão

3.1 Introdução

Diversos fatores influenciam o comportamento da LT frente à incidência de descargas atmosféricas, sendo o aterramento das torres um dos principais. Para se projetar tal aterramento é necessário conhecer as características do solo da região de instalação, em especial a resistividade elétrica. Com esses dados, projeta-se o sistema de aterramento da estrutura, visando sua proteção caso ocorra a incidência de uma descarga. Entretanto, nem sempre o aterramento é capaz de sanar por completo os efeitos causados por esse fenômeno, sendo necessário buscar alternativas para aumentar o nível de proteção da LT e conseqüentemente, diminuir o número de desligamentos dela causadas pelas descargas atmosféricas.

Diante disso, neste capítulo é feita uma introdução teórica sobre os aterramentos elétricos e, em seguida, são apresentadas algumas alternativas de melhoria de desempenho, como o aumento do comprimento dos cabos contrapeso, a instalação de cabos *underbuilt* ou o uso de dispositivos para-raios.

3.2 Fundamentos associados aos Aterramentos Elétricos

O aterramento elétrico é elemento fundamental no estabelecimento da sobretensão resultante na cadeia de isoladores, que pode levar ao *backflashover*, fenômeno no qual esta dissertação tem interesse principal. Dessa forma, é de suma importância estudar os parâmetros e conceitos associados a ele. Este capítulo apresenta os aspectos e conceitos

principais associados aos aterramentos elétricos, tomando como principal referência o texto de Visacro, (2007).

O sistema de aterramento é constituído pelos eletrodos enterrados, pelos condutores responsáveis pela conexão dos eletrodos com o sistema e, também pelo solo que envolve tais eletrodos (Visacro, 2007). Para um melhor entendimento do aterramento elétrico, ele pode ser representado por um circuito equivalente conforme ilustrado na Figura 3.1, onde as resistências “R” em série com as indutâncias “L” representam a energia correspondente às perdas internas dos condutores e, a condutância “G” e a capacitância “C” equivalem à energia associada ao fluxo das correntes transversais. Dessa forma, o circuito equivalente possibilita a conceituação de alguns parâmetros essenciais, levando em conta os efeitos causados por tais elementos.

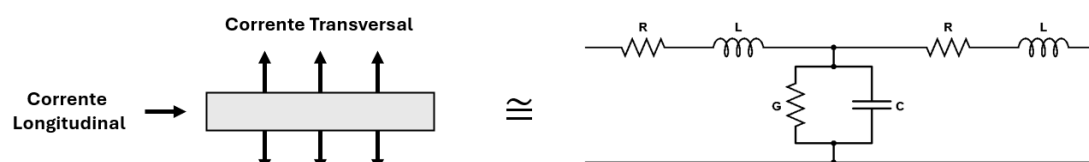


Figura 3.1 - Componentes de corrente no eletrodo e no solo – Adaptado (Visacro, 2007)

Devido aos efeitos resistivos, indutivos e capacitivos, o comportamento da impedância de aterramento depende da variação da frequência. Para baixas frequências, a impedância pode ser aproximada por uma resistência. Já para altas frequências, tem-se uma grande variação de módulo e ângulo da impedância e assim, o aterramento é mais bem representado por uma impedância (Visacro, 2007).

Em fenômenos rápidos, de ondas impulsivas, como as descargas atmosféricas, o comportamento do aterramento é mais usualmente representado através da impedância impulsiva de aterramento, Z_P , conforme equação (3.1).

$$Z_P = V_P / I_P \quad (3.1)$$

Onde V_P corresponde ao valor de pico da elevação de potencial no solo e I_P corresponde ao valor de pico de corrente de descarga atmosférica impressa no aterramento elétrico.

Em fenômenos de baixa frequência, como curtos-circuitos, a impedância de aterramento pode ser aproximada por uma resistência, visto que, os efeitos reativos

podem ser desprezados, podendo ser representada como mostrado na Equação (3.2) (Visacro, 2007).

$$R_T = V_T / I_T \quad (3.2)$$

3.2.1 Dependência da frequência dos parâmetros do solo

Para o estudo do comportamento dos aterramentos elétricos frente a ondas impulsivas, se faz necessário avaliar o impacto da frequência nos parâmetros que caracterizam o solo, sendo eles, a resistividade do solo ρ e permissividade elétrica ϵ . Notou-se que, com o aumento da frequência, ambos os parâmetros diminuem de forma significativa (Visacro & Alípio, 2012).

Para solos com baixa resistividade, na faixa de 60 a 150 Ω .m, a dependência com a frequência não é tão significativa, sendo seu decréscimo com o aumento da frequência de aproximadamente 20%. Já para solos com alta resistividade, nas faixas de 500 a 1000 Ω .m e 4 a 10 k Ω .m, o decréscimo é de 45 e 80%, respectivamente. Outro comportamento observado é a saturação da diminuição da resistividade em frequências muito altas, na faixa de 1 a 4 MHz (Visacro & Alípio, 2012).

Em relação a permissividade elétrica, notou-se uma maior dispersão de seus valores em baixas frequências, variando de 770 a 140 F/m, e quando se considera altas frequências essa dispersão e os valores da permissividade diminuem significativamente, passando de 50 a 27 F/m. Além disso, observou-se que para frequência na faixa de 4 MHz, o valor da permissividade fica em torno de 20 F/m. Por fim, a variação da permissividade não apresentou uma aparente dependência com a resistência de baixa frequência, diferente do que se observa na resistividade do solo (Visacro & Alípio, 2012).

3.2.2 Efeitos de propagação no solo

Quando um condutor longo enterrado no solo é submetido a ondas de tensão e corrente, há a propagação de ondas eletromagnéticas ao longo dele. Dessa forma, o sistema se comporta como uma LT em um meio com perdas e consequentemente, ocorre atenuação da amplitude dos sinais, devido as diferentes velocidades de propagação. Como resultado, as ondas de corrente e tensão são atenuadas, apresentando distorções ao longo da direção de propagação, além da redução da inclinação da frente de onda.

Como consequência da atenuação, a corrente longitudinal que se propaga pelo eletrodo apresenta uma distribuição não uniforme. Assim, a densidade linear de corrente (A/m) diminui ao longo do eletrodo. Com isso, Gupta propôs um conceito de comprimento efetivo do eletrodo, correspondente a um comprimento limite do eletrodo (Gupta & Thapar, 1980) a partir do qual não se observa a atenuação do sinal. Esse é o limite no qual a impedância de aterramento não apresenta redução em seu valor, permanecendo constante. Este valor de comprimento é chamado de comprimento efetivo (L_{ef}).

O comprimento efetivo decresce com o aumento da condutividade e da frequência. Isso ocorre, pois esses dois elementos são responsáveis pelo aumento das perdas na propagação.

3.2.3 Efeito da intensidade de corrente

As correntes provenientes das descargas atmosféricas são impulsivas e muito intensas, levando a ionização do solo quando da ocorrência do fenômeno, visto que, o campo elétrico na região circunvizinha ao local de incidência fica muito intenso, levando ao rompimento da rigidez dielétrica do meio. O efeito desse comportamento nos eletrodos concentrados do aterramento é manifestado através da diminuição da resistência de aterramento, devido ao aumento de área para dissipação no eletrodo, uma vez que, os canais ionizados das descargas apresentam alta condutividade em comparação ao solo (Visacro, 2007).

3.3 Técnicas de Melhoria de Desempenho

3.3.1 Aumento do comprimento dos cabos contrapeso (CCP)

O desempenho das linhas de transmissão é diretamente afetado pelo valor da resistência de aterramento de baixa frequência (R_{LF}) e pela impedância impulsiva associada (Z_P) (Visacro, et al, 2012) (Hileman, 1999) (IEEE, 1997) (CIGRE, 1991). Isso ocorre devido à reflexão da sobretensão que percorre a torre quando uma descarga atmosférica atinge os cabos de blindagem. Quanto menor o valor de Z_P , maior é essa reflexão de sobretensão, resultando na diminuição da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores de linha. Isso contribui para diminuir a probabilidade de ocorrência de *backflashover*.

Para reduzir o valor da impedância impulsiva de aterramento Z_P , o comprimento dos cabos contrapeso deve ser aumentado. Esta técnica é eficaz até que o comprimento atinja o valor de comprimento efetivo L_{EF} . Após este limite, o valor da impedância impulsiva de aterramento não reduz significativamente enquanto o valor da resistência de aterramento de baixa frequência continua diminuindo (Visacro et al, 2016).

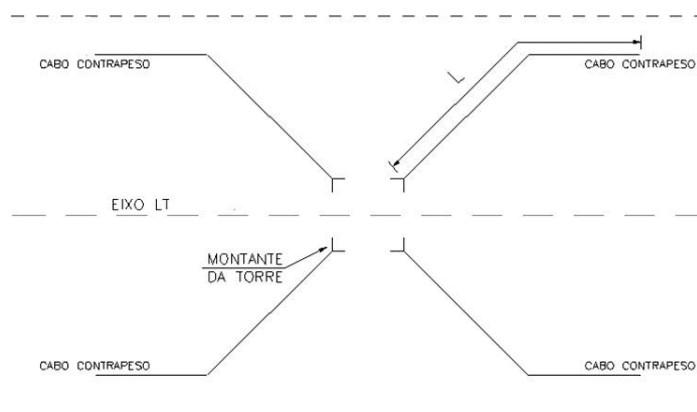


Figura 3.2 - Representação simplificada: Geometria tradicional de instalação de cabos contrapeso em uma estrutura de LT

Dentre as técnicas abordadas nesta dissertação, o aumento do comprimento dos cabos contrapeso é o mais comumente utilizada. Entretanto, alguns agentes externos, como construções prediais, estradas, linhas de transmissão/distribuição, bem como fatores ambientais podem restringir a implementação desta alternativa.

Em Visacro & Silveira, (2016), são estabelecidas equações que relacionam o valor da resistividade do solo e comprimento dos cabos contrapeso com o valor de Z_P . Estas são indicadas a seguir.

$$Z_P = 0,16 \cdot \rho \cdot L^{-0,687} \quad (\text{para } 100 \leq \rho \leq 600 \Omega m) \quad (3.3)$$

$$Z_P = 0,4 \cdot \rho^{0,89} \cdot L^{-0,75} \quad (\text{para } 600 \leq \rho \leq 4000 \Omega m) \quad (3.4)$$

3.3.2 Cabos *underbuilt*

Os cabos *underbuilt* são cabos metálicos, geralmente instalados abaixo dos cabos fase das LTs, que permitem modificar a distribuição de corrente da torre, proporcionando um novo caminho para o fluxo da corrente da descarga atmosférica. Os cabos *underbuilt* também promovem um aumento do acoplamento eletromagnético entre os cabos condutores, reduzindo as sobretensões na cadeia de isoladores e, conseqüentemente,

melhorando o desempenho de linhas de transmissão (Visacro, et al, 2012) (Moreira, et al, 2021) (Visacro, et al, 2021) (Visacro, et al, 2004).

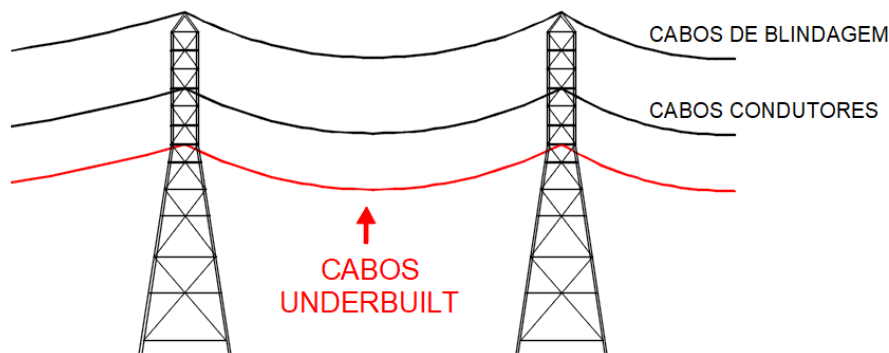


Figura 3.3 - Representação simplificada: Cabo underbuilt instalado em uma linha de transmissão

Mesmo podendo ser instalados ao longo de toda a linha de transmissão, preferencialmente instala-se os cabos *underbuilt* nas torres nos quais o solo apresenta maior resistividade, para que a impedância de aterramento da estrutura seja reduzida e consequentemente ocorra uma melhora no desempenho da LT.

Ressalta-se que esse novo caminho para o fluxo da corrente de descarga criado através dos cabos *underbuilt* é muito eficaz na diminuição da sobretensão na cadeia de isoladores, visto que ocorre uma redução do efeito de elevação de potencial no solo (GPR), pois a parcela da corrente que flui até o aterramento da torre é menor (Visacro et al., 2012), (Moreira et al., 2021) e (Moreira et al., 2022).

Além disso, um aspecto que contribui para que a utilização do *underbuilt* seja mais eficaz na melhora do desempenho é a diminuição da distância entre o cabo *underbuilt* e os cabos condutores da LT. Essa redução contribui para o aumento do efeito de acoplamento eletromagnético entre os cabos e, consequentemente, a diminuição da sobretensão resultante na cadeia de isoladores e assim, a técnica se torna mais eficaz (Moreira, 2022).

3.3.3 Dispositivos para-raios (TLSA)

Os dispositivos para-raios de linha de transmissão (do inglês, *transmission line surge arresters* - TLSA) são equipamentos instalados em paralelo com as cadeias de isoladores. Quando uma descarga atmosférica atinge uma torre e estabelece-se a sobretensão na cadeia de isoladores, o dispositivo para-raios atua de modo a limitar a

tensão a um valor pré-determinado e, assim, evita a ocorrência da disrupção dos isoladores.

Os dispositivos para-raios são constituídos por resistores não-lineares denominados de varistores. Atualmente no mercado existem dois principais dispositivos: com resistor variável feito de SiC (carboneto de silício) e com varistor de ZnO (Óxido de Zinco). Este último é o mais comumente utilizado e será abordado nesta dissertação.

Os dispositivos para-raios são caracterizados por uma curva de tensão versus corrente (curva V-I). Quando a tensão aplicada no dispositivo para-raios é próxima a sua tensão nominal, a corrente correspondente possui um comportamento capacitivo e amplitude muito baixa, na ordem de miliamperes. Com o aumento da tensão, a corrente cresce mais rapidamente, demonstrando o comportamento não-linear do dispositivo (Martinez, 2010), conforme é visto na Figura 3.4. Ou seja, o dispositivo para-raios tem seu comportamento caracterizado pela tensão na qual é submetido: para baixas tensões, apresenta alta impedância, funcionando como um circuito aberto; para altas tensões, acima de um determinado limite, tem impedância muito baixa, funcionando como um curto-circuito (Piantini, 2020).

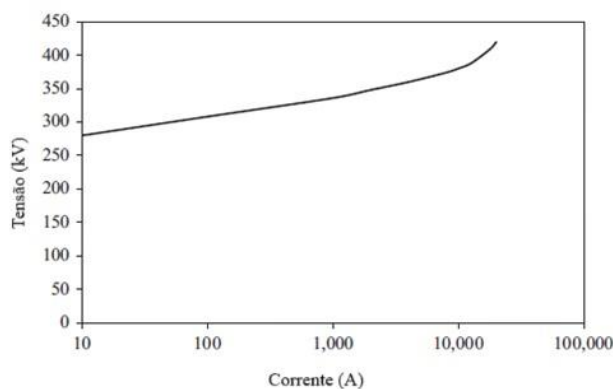


Figura 3.4 – Curva V-I do dispositivo para-raios ZnO – Adaptado (Piantini, 2020)

3.3.3.1 Tipos de dispositivos para-raios: NGLA X EGLA

Dentre os dispositivos para-raios de ZnO existem dois tipos principais: os dispositivos para-raios sem gap de ar, denominados NGLA (*non-gapped line arrester*); e, os dispositivos com gap, denominados EGLA (*externally gapped line arrester*).

3.3.3.1.1 NGLA

O dispositivo para-raios tipo NGLA só possui parte ativa e este é conectado em paralelo com a cadeia de isoladores e a parte aterrada da estrutura. Conforme dito no

tópico anterior, a tensão resultante da incidência da descarga é grampeada, para que o valor do BIL (*basic insulation level*) da cadeia não seja ultrapassado e ocorra o *flashover*. Para a instalação do dispositivo são necessários alguns equipamentos, sendo eles: um seccionador do cabo de aterramento – GLD (*Ground Lead Disconnect*), um sistema de conexão no condutor e, muitas vezes um anel de corona (Giraudet, 2019). Em caso da ocorrência da falha, o desconector que é instalado em série, separa o dispositivo para-raios tipo NGLA da torre, permitindo que a LT seja reenergizada e volte a operar normalmente (Bauch, 2015). Por fim, ressalta-se que os NGLAs são projetados para suportar esforços mecânicos, bem como esforços elétricos, uma vez que estão sempre conectados e ativos ao sistema (Giraudet, 2019).

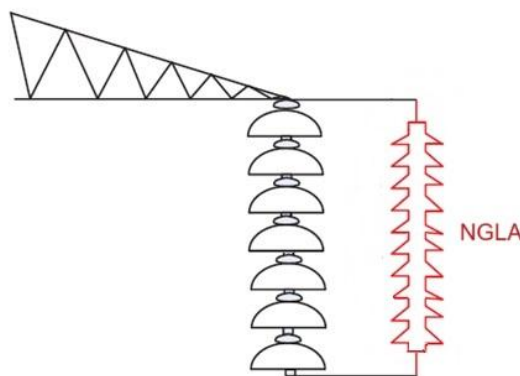


Figura 3.5 – Dispositivo para-raios tipo NGLA – Adaptado (Khodsuz, 2022)

3.3.3.1.2 EGLA

O dispositivo para-raios tipo EGLA é constituído de 2 principais partes instaladas em série. Uma delas é o gap de ar e a outra é o componente ativo, chamado de SVU (*surge varistor unit*), que é muito similar ao dispositivo para-raios tipo NGLA, tendo em consideração sua composição física (CIGRE, 2021). Uma diferença entre os dois tipos de dispositivo se refere ao comprimento, sendo necessária a utilização de um ou dois varistores para o dispositivo para-raios tipo EGLA, dependendo da classe de tensão da linha de transmissão no qual o dispositivo é empregado (Giraudet, 2019).

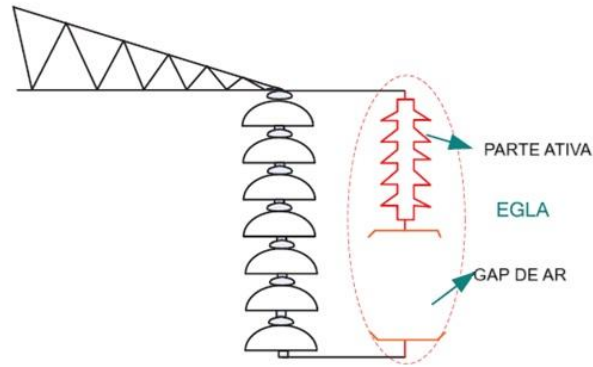


Figura 3.6 – Dispositivo para-raios tipo EGLA – Adaptado (Khodsuz, 2022)

O gap de ar do dispositivo tipo EGLA é projetado para ter um comprimento no qual, com a incidência de uma descarga atmosférica, ocorra uma centelha capaz de gerar a ruptura da rigidez dielétrica do ar levando ao aparecimento de um arco elétrico, que descarrega a sobretensão resultante da incidência da descarga. O componente ativo protege a cadeia de isoladores com a tensão residual e, também limita a corrente subsequente, garantindo que, no primeiro meio ciclo da corrente de frequência industrial, o arco elétrico seja extinto (CIGRE, 2021) (Giraudet, 2019).

4 Metodologia de Desenvolvimento

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas para a elaboração das análises da dissertação. Neste trabalho considera-se o desenvolvimento de simulações computacionais, usando o software ATP (ATP, 1982) para cálculo das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de linhas de transmissão típicas com nível de tensão de 230 kV e 500 kV devido à incidência de descarga atmosférica no topo da torre, e o método da integração (DE) (Hileman, 1999) para avaliação da ocorrência de *backflashover* nas cadeias de isoladores. As principais informações referentes aos modelos e configurações utilizadas nas simulações são descritas a seguir.

4.2 Informações relativas ao sistema simulado

4.2.1 Modelagem das torres

As torres da linha de transmissão foram modeladas seguindo o *Modelo Revisado de Jordan* (A. De Conti, et al, 2006). As análises de sensibilidade apresentadas em (Almeida, et al, 2021) indicaram que a aplicação deste modelo com o conjunto correto de parâmetros é responsável pelos resultados com melhor concordância com os fornecidos pelo modelo Hybrid Electromagnetic Model (HEM) (Visacro, Soares, 2005).

A Figura 4.1 apresenta as silhuetas das linhas de transmissão simuladas neste trabalho. Para a linha de 230 kV, a silhueta escolhida é de circuito simples com os condutores dispostos horizontalmente. Já para a linha de 500 kV, a silhueta adotada foi de circuito duplo e disposição vertical dos condutores.

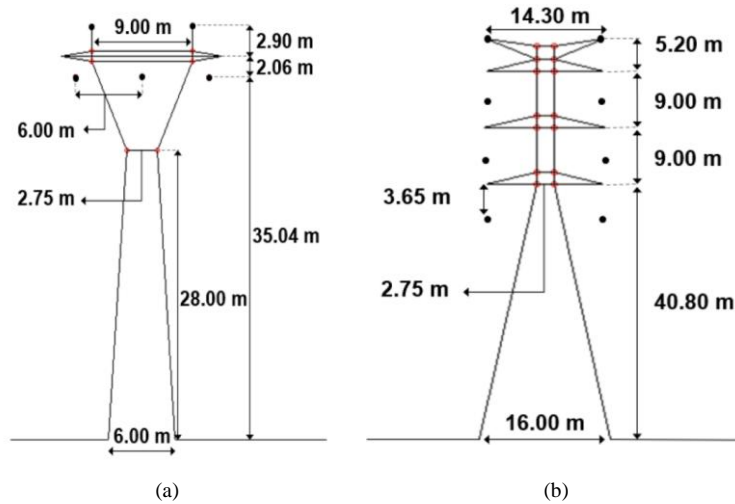


Figura 4.1 – Silhueta das estruturas típicas de linhas de transmissão utilizadas nas análises (a) 230 kV, (b) 500 kV

4.2.2 Modelagem dos condutores das LTs

Os condutores das linhas de transmissão são representados através do modelo JMarti (J. R. Marti, 1982), considerando-se 2 vãos adjacentes de 500 m para cada lado da LT atingida pela descarga atmosférica, totalizando-se 4 vãos. Além desses vãos, considerou-se uma extensão de linha de 10 km de modo a minimizar os efeitos de reflexão na torre central em análise. Em ambas as LTs analisadas, adotou-se 1 cabo condutor por fase e 2 cabos de blindagem. As características dos cabos considerados nas simulações são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dos cabos

Tipo	Rin (cm)	Rout (cm)	Resistência _{cc} (Ω/km)
Cabos condutores	0,336	1,130	0,170
Cabo blindagem (para-raios)	-	0,400	3,810

4.2.3 Cadeia de Isoladores

A cadeia de isoladores foi modelada no ATP através de uma chave conectada a uma Model (ATP, 1982), que envia um sinal digital discreto e aciona a chave. Nesta Model foi implementado o Método de Integração (DE) (Hileman, 1999), sendo esta uma metodologia comumente utilizada em estudos de desempenho de linhas para representar a ocorrência de descargas disruptivas, *flashover*.

O método DE faz a integração de uma curva de tensão (DE) e quando este valor excede o valor limite (DE_b), é caracterizado como a interrupção da cadeia de isoladores

($DE > DE_b \rightarrow flashover$). Conforme apresentado em Hileman, (1999), para a representação das cadeias de isoladores de porcelana e gap de ar, o Método DE deve ser utilizado com as constantes mostradas nas Equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4).

$$DE = \int_0^{\infty} [e(t) - V_0]^{k_d} dt \quad (4.1)$$

$$DE_b = 1,1506 \times CFO^{k_d} \quad (4.2)$$

$$k_d = 1,36 \quad (4.3)$$

$$V_0 = 0,77 \times CFO \quad (4.4)$$

O valor do CFO adotado nas simulações varia de acordo com a classe de tensão da LT, sendo 1200 kV e 1800 kV para a LT 230 kV e LT 500 kV, respectivamente.

4.2.4 Modelagem dos aterramentos elétricos

Os aterramentos elétricos das torres das linhas de transmissão foram modelados como um parâmetro concentrado com valor de impedância impulsiva de aterramento (Z_P), conforme recomendação de (Visacro, Silveira, 2016). As simulações assumiram valores entre 10 Ω e 80 Ω .

4.3 Modelagem do dispositivo para-raios ZnO

A literatura apresenta diversos tipos de modelagem para o dispositivo para-raios tipo NGLA, conforme (Piantini, 2020). Neste texto será abordado o *Modelo do IEEE* e *Modelo de Pinceti–Giannettoni*, com uma breve abordagem da metodologia e posteriormente, os resultados de simulação de cada método.

Já para o dispositivo para-raios tipo EGLA, a literatura apresenta a modelagem baseada no *Modelo do IEEE*, com a inserção de um dispositivo capaz de simular o gap de ar. Este último pode ser modelado por meio do Método DE, conforme parâmetros e procedimentos apresentados em (Hileman, 1999), (Khodsuz, 2022), (Smiee, 2014), (Stanchev, 2020) e ser representado em uma Model no ATP.

Em todas as metodologias, são necessários os dados de catálogo do dispositivo. Dessa forma, é primordial conhecer as características da linha de transmissão para que o dispositivo apropriado seja escolhido entre as possibilidades disponíveis no mercado.

4.3.1 Modelagem do NGLA

4.3.1.1 Modelo IEEE

Essa metodologia foi desenvolvida pelo grupo de estudos do IEEE a partir de informações de varistores de óxido de zinco (IEEE, 1992).

Conforme apresentado na Figura 4.2, o dispositivo para-raios é modelado por um circuito composto por dois resistores não lineares A_0 e A_1 separados por um filtro RL (Piantini, 2020). O indutor L_0 representa a indutância associada aos campos magnéticos nas proximidades do dispositivo para-raios, como os campos associados aos cabos de blindagem, o resistor R_0 evita instabilidade numérica em simulações computacionais e o capacitor C representa a capacitância externa do dispositivo para-raios. Ressalta-se, que este circuito é válido apenas para modelar dispositivo para-raios de óxido metálico sem gap (Piantini, 2020).

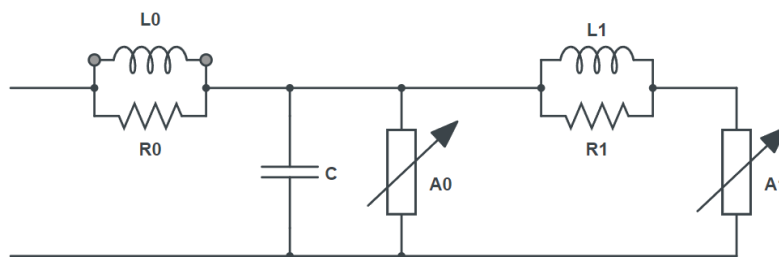


Figura 4.2 - Modelagem do IEEE do dispositivo para-raios ZnO (IEEE, 1992)

O modelo proposto corresponde ao comportamento geral de um dispositivo para-raios de óxido metálico. Para surtos de frente lenta, a influência do filtro RL é desprezível e os dois resistores não lineares estão basicamente em paralelo. Para surtos de frente rápida, a impedância do filtro RL aumenta, levando a um aumento da corrente em A_0 . Como o comportamento de A_0 é caracterizado por uma tensão maior para uma determinada corrente em relação a A_1 , conforme curvas mostradas na Figura 4.3 (IEEE, 1992), o modelo de dispositivo para-raios mostrado na Figura 4.2 reproduzirá o aumento da tensão residual devido para surtos de frente rápida observados em dispositivos para-raios de óxido de metal reais (Piantini, 2020).

Os parâmetros A_0 e A_1 a serem utilizados na simulação devem ser calculados multiplicando os valores apresentados Tabela 4.2 e na Figura 4.3 pela tensão de descarga, V_{10} , sendo essa a tensão residual máxima das correntes de descarga subsequentes em kV, para uma corrente de 10 kA, 8/20 μ s.

A tensão de descarga V_{10} varia de acordo com o dispositivo para-raios adotado, sendo esse parâmetro definido de acordo com o nível de tensão da linha de transmissão. Nesta dissertação utilizou-se 490 kV e 945 kV para a LT 230 e 500 kV, respectivamente. Essas tensões foram selecionadas a partir de instruções para definição do dispositivo para-raios no catálogo do fabricante.

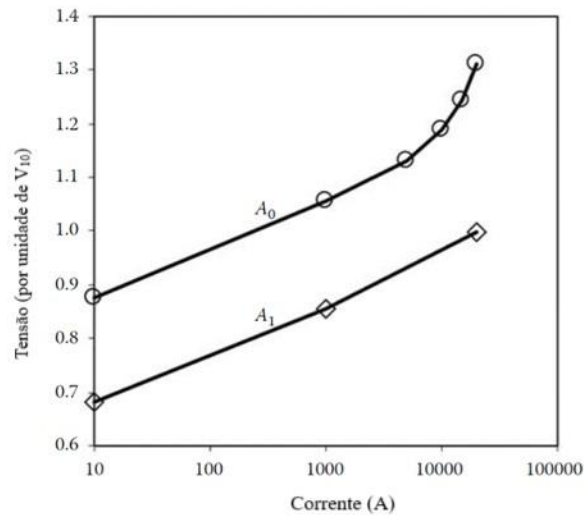


Figura 4.3 – Curva V-I das características dos resistores não lineares - Adaptado de (Durbak, 1985)

Tabela 4.2 – Valores de A_0 e A_1 conforme (Durbak, 1985)

Corrente (kA)	Tensão (por unidade de V_{10})	
	A_0	A_1
0,01	0,875	0,681
1	1,056	0,856
5	1,131	-
10	1,188	-
15	1,244	-
20	1,313	1,000

Com base nas dimensões físicas do dispositivo para-raios, são propostas as equações (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10), para se quantificar L_0 , R_0 , L_1 , R_1 , C , respectivamente.

$$L_0 = 0,2 \cdot \frac{d}{n} \text{ } [\mu H] \quad (4.5)$$

$$L_1 = 15 \cdot \frac{d}{n} \text{ } [\mu H] \quad (4.6)$$

$$R_0 = 100 \cdot \frac{d}{n} \text{ } [\Omega] \quad (4.7)$$

$$R_1 = 65 \cdot \frac{d}{n} \text{ } [\Omega] \quad (4.8)$$

$$C = 100 \cdot \frac{n}{d} \text{ [pF]} \quad (4.9)$$

Onde, n é o número de dispositivos para-raios escolhidos e d, o comprimento do dispositivo para-raios.

4.3.1.2 Modelo de Pinceti-Giannettoni

O modelo Pinceti e Giannettoni (Pinceti and Giannettoni, 1999) é uma versão simplificada do Modelo IEEE, composto por somente um resistor nos terminais de entrada, colocado para se evitar instabilidade numérica em simulações computacionais. Os resistores não lineares são mantidos e o capacitor é eliminado, conforme ilustrado na Figura 4.4.

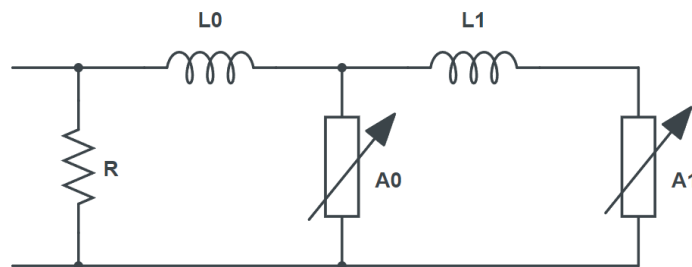


Figura 4.4 - Modelagem Pinceti-Giannettoni do dispositivo para-raios ZnO (Pinceti and Giannettoni, 1999)

O princípio do modelo Pinceti-Giannettoni é semelhante ao do modelo IEEE. No entanto, o critério proposto para a identificação dos parâmetros é mais simples, considerando a estimativa dos parâmetros do modelo diretamente dos dados elétricos informados no catálogo do dispositivo para-raios. As dimensões físicas do para-raios não são dados de entrada para este modelo (Piantini, 2020).

O modelo de Pinceti-Giannettoni considera R igual a 1 MΩ, as mesmas características não lineares A₀ e A₁ descritas pelo modelo IEEE e fórmulas específicas para determinação de L₁ e L₀, conforme apresentado nas equações (4.11) e (4.12).

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \quad (4.10)$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \quad (4.11)$$

Onde V_n é a tensão nominal do dispositivo para-raios, $V_{r1/T2}$ é a tensão residual para uma descarga de 10 kA da forma $r_1/T_2 \mu s$, e $V_{r8/20}$ é a tensão residual para uma descarga de 10 kA da forma 8/20 μs (Pinceti and Giannettoni, 1999).

No próximo capítulo é feita uma análise qualitativa entre as duas modelagens do dispositivo para-raios tipo NGLA apresentadas nesta dissertação.

4.3.2 Modelagem do EGLA

Conforme apresentado no item 3.3.3.1.2, o dispositivo para-raios com gap de ar é um dispositivo dividido em duas partes principais: parte ativa e o gap de ar. Para a sua modelagem, também são necessárias duas abordagens distintas, visto a diferença de composição física das partes que compõe esse dispositivo para-raios.

Na parte ativa (do inglês, *series varistor units* - SVU), utiliza-se o Modelo IEEE, similar à modelagem apresentada no tópico 4.3.1 do dispositivo para-raios tipo NGLA (Khodsuz, 2022), mudando somente os parâmetros de entrada de acordo com o dispositivo escolhido no catálogo do fabricante.

Para a modelagem do gap de ar utiliza-se o Método DE (Hileman, 1999) (Stanchev, 2020), considerando-se 85% do valor do CFO da LT para o gap de ar (Smieeee, 2014). Essa metodologia é adotada considerando-se o comprimento mínimo e máximo que o gap de ar precisa ter para que o dispositivo para-raios tipo EGLA suporte as oscilações de tensão típicas durante eventos de sobretensão temporária e seja de uma tamanho suficiente para que sempre ocorra uma centelha, que leva a formação do arco elétrico no gap de ar (Smieeee, 2014).

Para o cálculo dos dados a serem inseridos na simulação, devem ser empregadas as Equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4) (Hileman, 1999).

4.4 Corrente de Descarga: forma de onda e parâmetros

A corrente de descarga incidente foi simulada utilizando a forma de onda de corrente duplo pico proposta em De Conti e Visacro, (2007) com parâmetros medianos de correntes de primeira descarga negativa descendente medidas na estação do Morro do Cachimbo (Silveira & Visacro, 2020) (Silveira & Visacro, 2022).

4.4.1 Cálculo da Corrente Crítica e determinação da probabilidade de ocorrência de backflashover

A corrente crítica I_C , definida como o valor mínimo de corrente de descarga que leva os isoladores da linha de transmissão a disrupção, é determinada por meio do método de integração (DE Model) com os parâmetros do modelo sugerido em (Hileman, 1999). A probabilidade de ocorrência de *backflashover* é determinada como a porcentagem das correntes de descarga que excedem a corrente crítica $P (\% I \geq I_C)$ considerando a distribuição cumulativa de picos de corrente de primeira descarga negativa descendente associada aos dados de medição da estação Morro do Cachimbo (Silveira, Visacro, 2020).

Conforme apresentado em Almeida, (2023), a tensão de regime permanente influencia a sobretensão resultante na cadeia de isoladores quando uma descarga atmosférica incide na LT e conseqüentemente, no valor da corrente crítica associada. Com base na metodologia ATP-DE-MC (Almeida, 2023) aplicada para LTs de 138, 230 e 500 kV, foram consideradas simulações no ATP para obtenção das sobretensões resultantes e a implementação do Método Monte Carlo para o cálculo a probabilidade de ocorrência de *backflashover* e corrente crítica. Os resultados obtidos indicaram que a multiplicação da corrente crítica obtida sem o efeito da tensão de regime permanente pelo fator 0,88, conforme mostrado na Equação (4.12), é uma alternativa consistente para se representar o efeito da tensão de fase no cálculo de desempenho de uma forma eficiente e expedita.

$$I_{C_RESULTANTE} = 0,88 \times I_{C_0} \quad (4.12)$$

Nesta dissertação será utilizada para Equação (4.12) para o ajuste das correntes críticas obtidas nas simulações realizadas.

5 Resultados e Análises

5.1 Introdução

Este capítulo contempla os principais resultados de simulação desta dissertação, referentes à utilização de técnicas para melhoria do desempenho frente às descargas atmosféricas de linhas de transmissão de 230 e 500 kV, sendo elas os dispositivos para-raios tipo NGLA e os cabos *underbuilt*. Foram realizadas análises sobre os valores de pico das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores, corrente crítica e probabilidade de ocorrência de *backflashover*.

5.2 Discussão da qualidade dos modelos do dispositivo para-raios tipo NGLA em LTs

Este tópico compreende uma análise qualitativa dos resultados referentes ao uso das duas modelagens do dispositivo para-raios tipo NGLA apresentadas nesta dissertação (modelo IEEE e modelo Pinceti-Giannettoni).

Para a análise do comportamento da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores, nas tabelas deste capítulo, os valores de pico para simulações dos dispositivos para-raios são apresentados em pu, por unidade, considerando o valor a partir da divisão da tensão (kV) pela I crítica (kA).

Os valores de pico de sobretensão resultante na cadeia de isoladores da LT de 230 kV que apresenta as maiores sobretensões estão indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV para os dois modelos de TLISA analisados

Z_p (Ω)	Sobretensão V_p (pu)								
	S/ NGLA	IEEE				PINCETI-GIANNETTONI			
		1 NGLA	Varição*	2 NGLA	Varição*	1 NGLA	Varição*	2 NGLA	Varição*
10	11	10	-13	8	-26	10	-13	8	-26
20	14	12	-13	11	-26	12	-13	11	-26
40	19	17	-14	14	-26	17	-14	14	-26
80	27	23	-15	20	-27	23	-15	20	-27

*Redução percentual referente à sobretensão sem uso do dispositivo para-raios

Conforme esperado, o uso de dispositivo para-raios resulta na redução nos valores de pico de sobretensão das cadeias de isoladores da LT.

As reduções proporcionadas pelo uso de ambos os modelos de para-raios foi o mesmo para os casos simulados, denotando que o tipo de modelo não afetou os resultados em termos de sobretensão.

Os valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de *backflashover* referentes à aplicação dos modelos IEEE e Pinceti-Giannettoni são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 230 kV para os dois modelos de TLSA analisados (Corrente e Distribuição MCS)

Z_p (Ω)	Situação	$I_{critica}$ (kA)	BF (%)	Variação*
10	s/ TLSA	171,6	0,170	-
	1 NGLA - IEEE	191,8	0,077	-55
	2 NGLA - IEEE	219,1	0,028	-83
	1 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	192,7	0,074	-56
	2 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	220,9	0,026	-84
20	s/ TLSA	117,9	1,652	-
	1 NGLA - IEEE	131,1	0,920	-44
	2 NGLA - IEEE	149,6	0,417	-75
	1 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	131,1	0,920	-44
	2 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	149,6	0,417	-75
40	s/ TLSA	76,6	11,264	-
	1 NGLA - IEEE	85,4	7,436	-34
	2 NGLA - IEEE	97,7	4,173	-63
	1 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	85,4	7,436	-34
	2 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	97,7	4,173	-63
80	s/ TLSA	50,2	37,718	-
	1 NGLA - IEEE	57,2	27,681	-27
	2 NGLA - IEEE	65,1	19,263	-49
	1 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	57,2	27,681	-27
	2 NGLA - PINCETI-GIANNETTONI	65,1	19,263	-49

*Redução percentual referente ao caso sem o uso do dispositivo para-raios

Como esperado, a utilização dos dispositivos para-raios proporcionou uma diminuição da probabilidade de ocorrência de *backflashover*. Na Tabela 5.2 foi observado que, utilizando a modelagem do IEEE, obteve-se uma redução de 27 a 55% com 1 dispositivo para-raios e de 49 a 83% com 2 dispositivos para-raios. Já usando a modelagem do Pinceti-Giannettoni observou-se uma diminuição de 27 a 56% e de 49 a

84%, com 1 e 2 dispositivos para-raios, respectivamente. Dessa forma, tem-se que a mudança na modelagem resultou em uma diferença máxima de 1% na redução do valor da probabilidade de ocorrência de *backflashover*.

Conclui-se então, que em questão dos resultados das simulações de sobretensão, corrente crítica e probabilidade de ocorrência de *backflashover*, ambos os modelos são adequados para a obtenção do comportamento da LT utilizando o dispositivo para-raios visando a melhoria do desempenho frente às descargas atmosféricas. Entretanto, buscando praticidade na utilização, o modelo IEEE se mostrou uma melhor opção, uma vez que os parâmetros utilizados em sua modelagem são facilmente encontrados nos catálogos de fornecedores brasileiros, já o parâmetro $V_{F1/T2}$ do modelo Pinceti-Giannettoni não é, dificultando assim sua utilização.

Portanto, visando todas as premissas discutidas neste tópico, para a avaliação da eficiência do dispositivo para-raios nas próximas seções desta dissertação, é utilizado o modelo IEEE.

5.3 Desempenho de LT de 230 kV

5.3.1 Efeito do valor da impedância impulsiva de pé de torre (Z_P)

As sobretensões obtidas nas simulações, da cadeia em que se obteve o maior valor de pico, variando as impedâncias impulsivas de aterramento entre 10 e 80 Ω são apresentadas na Figura 5.1.

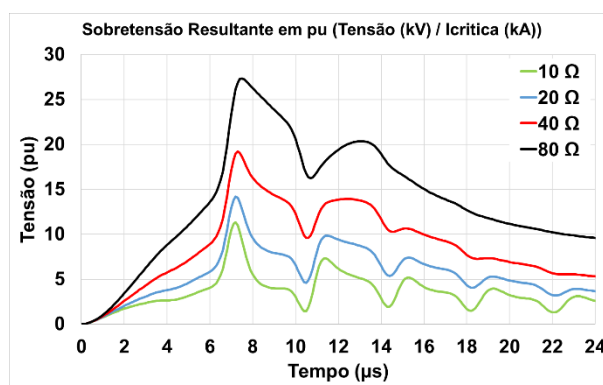


Figura 5.1 - Sobretensão na cadeia de isoladores da LT 230 kV com $Z_P = 10 \Omega, 20 \Omega, 40 \Omega$ e 80Ω .

As sobretensões resultantes, da cadeia com o maior valor de pico, obtidas nas simulações para a LT 230 kV são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV

Z_P (Ω)	Sobretensão V_P (pu)
10	11
20	14
40	19
80	27

As correntes críticas resultantes e a probabilidade de ocorrência de *backflashover* são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de *backflashover* para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS)

Z_P (Ω)	I_c (kA)	BF (%)
10	171,6	0,170
20	117,9	1,652
40	76,6	11,264
80	50,2	37,718

Conforme mostrado na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4, a impedância impulsiva de aterramento influencia significativamente na sobretensão resultante na cadeia de isoladores. À medida que esse parâmetro aumenta, a corrente necessária para que ocorra a disrupção da cadeia diminui, podendo levar ao desligamento da LT pelo fenômeno *backflashover*.

Nos dados apresentados na Tabela 5.4, nota-se que a corrente crítica diminuiu cerca de 34% a cada aumento da impedância impulsiva de aterramento. Já a probabilidade da ocorrência do *backflashover* aumentou de 0,17% a 38% com o aumento da impedância de aterramento de 10 a 80 Ω .

5.3.2 Efeito do dispositivo para-raios NGLA

As sobretensões na cadeia de isoladores desprotegida e, conseqüentemente, o maior valor de pico de tensão ao se inserir o dispositivo para-raios na linha de transmissão em 230 kV são apresentadas na Figura 5.2, sendo seus valores mostrados em pu.

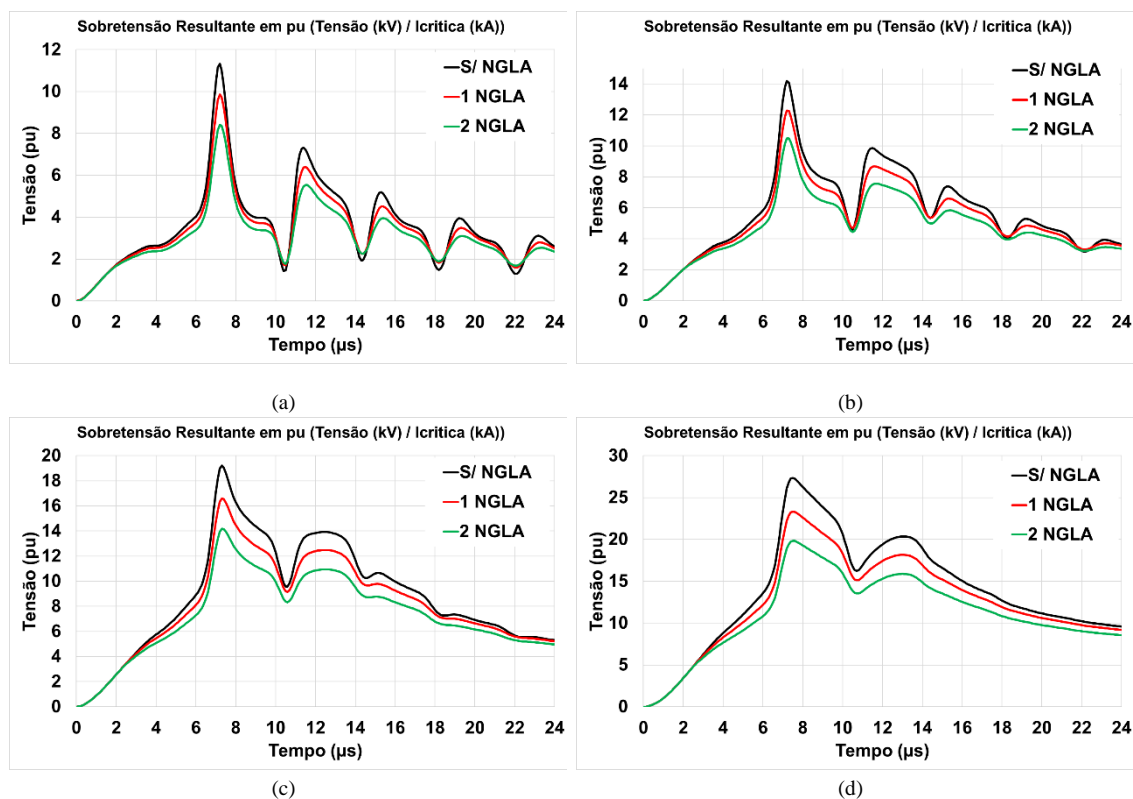


Figura 5.2 - Sobretensão na cadeia de isoladores com colocação do NGLA na LT 230 kV. Impedância impulsiva Z_P : (a) 10 Ω (b) 20 Ω (c) 40 Ω (d) 80 Ω

As sobretensões resultantes da cadeia com os maiores valores de pico obtidos nas simulações para a LT 230 kV com a utilização de 1 ou 2 dispositivos para-raios são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV com uso do TLISA

Z_P (Ω)	Sobretensão V_P (pu)				
	s/ TLISA	1 NGLA	Variação*	2 NGLA	Variação*
10	11	10	-13	8	-26
20	14	12	-13	11	-26
40	19	17	-14	14	-26
80	27	23	-15	20	-27

*Variação percentual referente ao caso sem o dispositivo para-raios

De acordo com as simulações feitas, notou-se que a utilização de 1 dispositivo para-raios, variando impedância de aterramento de 10 Ω a 80 Ω , resultou na diminuição de 13 a 15% no valor de pico da onda de sobretensão. Com a inserção de 2 dispositivos para-raios houve uma diminuição de 26% a 27% com a mesma variação da impedância impulsiva de aterramento Z_P .

As correntes críticas resultantes e a probabilidade de ocorrência de *backflashover* das simulações para a LT 230 kV com a inserção de 1 ou 2 dispositivos para-raios são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS) com TLISA

Z_p (Ω)	Situação	Icritica (kA)	BF (%)	Variação*
10	s/ TLISA	171,6	0,170	-
	1 NGLA	191,8	0,077	-55
	2 NGLA	219,1	0,028	-83
20	s/ TLISA	117,9	1,652	-
	1 NGLA	131,1	0,920	-44
	2 NGLA	149,6	0,417	-75
40	s/ TLISA	76,6	11,264	-
	1 NGLA	85,4	7,436	-34
	2 NGLA	97,7	4,173	-63
80	s/ TLISA	50,2	37,718	-
	1 NGLA	57,2	27,681	-27
	2 NGLA	65,1	19,263	-49

*Variação percentual referente à BF sem uso do dispositivo para-raios

Conforme esperado, a utilização dos dispositivos para-raios tipo NGLA promove um aumento do valor de corrente crítica em todos os casos analisados. A Tabela 5.6 mostra uma diminuição na probabilidade de ocorrência de *backflashover* de 27% a 55% utilizando 1 dispositivo para-raios e uma redução de 49 a 83% utilizando-se 2 dispositivos para-raios, variando a impedância de aterramento de 10 Ω a 80 Ω .

5.3.3 Efeito da colocação de cabo *underbuilt*

Para efeitos de comparação com os dados obtidos nesta dissertação, alguns resultados referentes à instalação de cabos *underbuilt* apresentados em Moreira, (2022) são aqui reproduzidos. Considera-se, para a linha de 230 kV, resultados referentes à instalação de 1 e 2 cabos *underbuilt* a 28 m de altura da torre, conforme ilustrado na Figura 5.3.

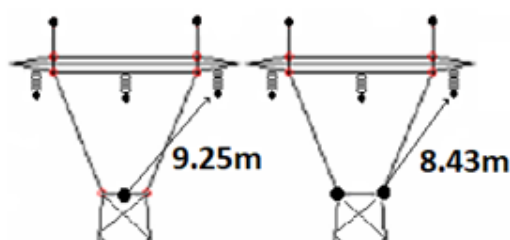


Figura 5.3 - Posicionamento dos cabos *underbuilt* nas estruturas da LT 230 kV na altura de 28,0 m (Moreira, 2022)

As sobretensões resultantes das simulações para a LT 230 kV com a utilização de 1 e 2 cabos *underbuilt* são apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 230 kV com uso do *underbuilt*. Fonte: Moreira, 2022

Z_P (Ω)	Sobretensão V_P (kV)				
	s/ UW	1 UW	Varição*	2 UW	Varição*
10	489	401	-18	358	-27
20	614	491	-20	432	-30
40	836	644	-23	557	-33
80	1190	872	-27	734	-38

*Redução percentual referente ao caso sem UW

De acordo com as simulações feitas em (Moreira, 2022) mostradas na Tabela 5.7, observou-se uma redução de 18% a 27% no valor de pico da onda de sobretensão utilizando 1 cabo *underbuilt* e, com a instalação de 2 cabos *underbuilt*, uma diminuição de 27% a 38% no valor de pico da sobretensão.

As correntes críticas resultantes e a probabilidade de ocorrência de *backflashover* das simulações para a LT 230 kV com a inserção de 1 cabo *underbuilt* ou 2 cabos *underbuilt* são apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de *backflashover* para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS) com *underbuilt*. Fonte: Moreira, 2022

Z_P (Ω)	Situação	$I_{critica}$ (kA)	BF (%)	Varição*
10	s/ UW	172,6	0,16	-
	1 UW	215,7	0,03	-81
	2 UW	245,0	0,01	-94
20	s/ UW	116,6	1,75	-
	1 UW	152,4	0,37	-79
	2 UW	176,8	0,14	-92
40	s/ UW	75,4	11,87	-
	1 UW	102,1	3,40	-71
	2 UW	120,8	1,45	-88
80	s/ UW	49,5	38,73	-
	1 UW	69,0	16,10	-58
	2 UW	82,3	8,59	-78

*Variação percentual referente à BF sem uso do UW

Conforme esperado e apresentado na Tabela 5.8 (Moreira, 2022), a instalação dos cabos *underbuilt* resultou em um aumento do valor de corrente crítica e, conseqüentemente, uma diminuição da probabilidade de ocorrência de *backflashover*. Notou-se uma redução na probabilidade de ocorrência de *backflashover* de 58% a 81% utilizando 1 cabo *underbuilt* e, de 78% a 94% utilizando-se 2 cabos *underbuilt*, variando a impedância impulsiva de aterramento de 10 Ω a 80 Ω .

5.3.4 Comparação entre as técnicas de melhoria de desempenho para LT de 230 kV: instalação de dispositivo para-raios x cabos *underbuilt*

A Tabela 5.9 resume a influência da instalação dos dispositivos para-raios e dos cabos *underbuilt* nos valores de correntes críticas e na probabilidade de as correntes excederem a corrente crítica. Os resultados relativos à instalação de um e dois cabos *underbuilt* a 28 m de altura foram apresentados anteriormente em (Moreira, 2022).

Tabela 5.9 - Correntes críticas probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 230 kV (Corrente e Distribuição MCS) com NGLA e cabos *underbuilt* (Moreira, 2022).

Z _P (Ω)	Situação	I _{critica} (kA)	BF (%)	Varição*
10	s/ UW / s/ TLISA	171,6	0,17	-
	1 NGLA	191,8	0,08	-55
	2 NGLA	219,1	0,03	-83
	1 UW	215,7	0,03	-82
	2 UW	245	0,01	-94
20	s/ UW / s/ TLISA	117,9	1,65	-
	1 NGLA	131,1	0,92	-44
	2 NGLA	149,6	0,42	-75
	1 UW	152,4	0,37	-78
	2 UW	176,8	0,14	-92
40	s/ UW / s/ TLISA	76,6	11,26	-
	1 NGLA	85,4	7,44	-34
	2 NGLA	97,7	4,17	-63
	1 UW	102,1	3,40	-70
	2 UW	120,8	1,45	-87
80	s/ UW / s/ TLISA	50,2	37,72	-
	1 NGLA	57,2	27,68	-27
	2 NGLA	65,1	19,26	-49
	1 UW	69	16,10	-57
	2 UW	82,3	8,59	-77

*Variação percentual referente à BF sem uso do NGLA

Vale destacar que os valores de corrente crítica e probabilidade de ocorrência de *backflashover* apresentados na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9 referentes aos casos sem técnica de melhoria de desempenho aplicada são ligeiramente diferentes. Tal fato se deve ao uso de diferentes softwares de simulação para tais casos.

A Tabela 5.9 mostra uma diminuição na probabilidade de ocorrência do *backflashover* de 58% a 81% usando 1 cabo *underbuilt* e de 78% a 93% utilizando 2 cabos *underbuilt*. Já instalando os dispositivos para-raios houve uma redução de 27% a 55% e de 49% a 83% com 1 e 2 dispositivos para-raios, respectivamente. Em resumo, a instalação dos cabos *underbuilt* levou a um maior aumento da corrente crítica em todos os casos.

5.4 Desempenho de LT de 500 kV

5.4.1 Efeito do valor da impedância impulsiva de pé de torre (Z_P)

As sobretensões obtidas nas simulações, da cadeia em que se obteve o maior valor de pico, variando as impedâncias impulsivas de aterramento em 10, 20, 40 e 80 Ω são mostradas na Figura 5.4.

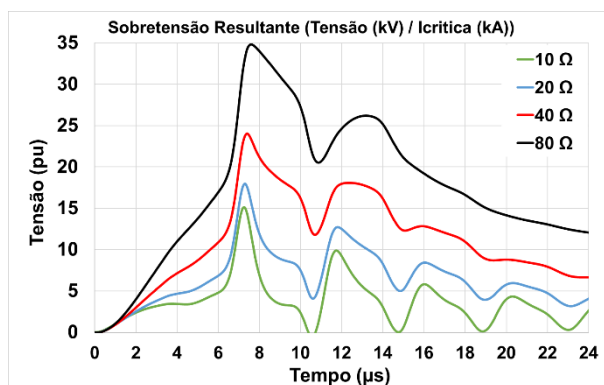


Figura 5.4 - Sobretensão na cadeia de isoladores da LT 500 kV com $Z_P = 10 \Omega$, 20Ω , 40Ω e 80Ω .

As sobretensões resultantes das simulações para a LT 500 kV são apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 500 kV

Z_P (Ω)	Sobretensão V_P (pu)
10	15
20	18
40	24
80	35

As correntes críticas resultantes e a probabilidade de ocorrência de *backflashover* das simulações para a LT 500 kV são mostradas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de *backflashover* para a linha de 500 kV (Corrente e Distribuição MCS)

Z_P (Ω)	I_c (kA)	BF (%)
10	198,88	0,059
20	139,92	0,629
40	89,76	6,045
80	58,08	26,604

Conforme também foi apresentado no caso da linha de 230 kV, a impedância impulsiva de aterramento influencia significativamente na sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Na Tabela 5.11, observou-se o mesmo comportamento para os valores de corrente crítica apresentado anteriormente (LT 230 kV), sendo seu valor cerca de 34% menor a cada aumento da impedância impulsiva de aterramento Z_P . Além disso, a probabilidade da ocorrência do *backflashover* aumentou de 0,059% a 26,604% com o aumento da impedância impulsiva de aterramento de 10 a 80 Ω .

5.4.2 Efeito do dispositivo para-raios NGLA

Na Figura 5.5 são mostrados os oito casos que foram analisados, sendo um caso sem a utilização de nenhum dispositivo de melhoria de desempenho e, sete nos quais os dispositivos para-raios foram dispostos em diferentes configurações nas cadeias de isoladores da torre de 500 kV.

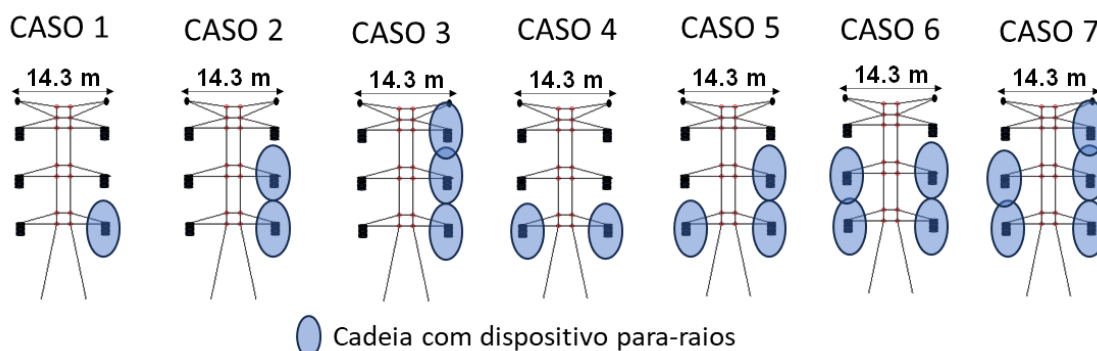


Figura 5.5 - Disposição do dispositivo para-raios em cada caso simulado

As sobretensões resultantes para os casos simulados em função do valor da impedância de aterramento são apresentadas na Figura 5.6 em pu.

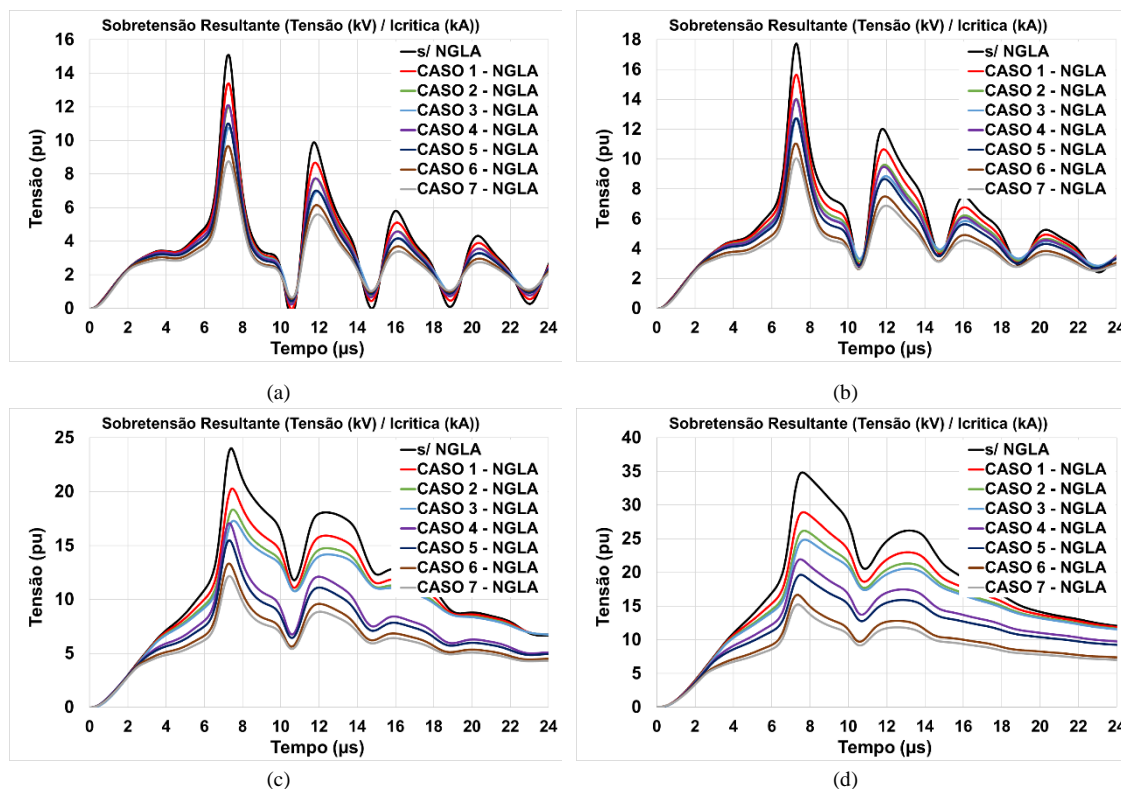


Figura 5.6 - Sobretensão na cadeia de isoladores com colocação do NGLA na LT 500 kV. Impedância impulsiva Z_P : (a) 10 Ω (b) 20 Ω (c) 40 Ω (d) 80 Ω

As sobretensões resultantes das simulações para a LT 500 kV para todos os 8 casos analisados, conforme Figura 5.5, são apresentadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da linha de transmissão de 500 kV com uso do dispositivo para-raios

Sobretensão V_P (pu)								
Caso	$Z_P = 10 \Omega$		$Z_P = 20 \Omega$		$Z_P = 40 \Omega$		$Z_P = 80 \Omega$	
	Valor	Variação*	Valor	Variação*	Valor	Variação*	Valor	Variação*
s/ TLISA	15	-	18	-	24	-	35	-
CASO 1	13	-11	16	-13	20	-16	29	-17
CASO 2	12	-21	14	-22	18	-24	26	-25
CASO 3	11	-29	13	-29	17	-28	25	-29
CASO 4	12	-20	14	-22	17	-28	22	-37
CASO 5	11	-27	13	-29	16	-35	20	-43
CASO 6	10	-36	11	-38	13	-44	17	-52
CASO 7	9	-42	10	-44	12	-49	15	-56

*Variação percentual referente ao caso sem o dispositivo para-raios

Como esperado, a presença do dispositivo para-raios contribuiu para a diminuição da sobretensão resultante na cadeia de isoladores desprotegida. Notou-se que a redução no valor de pico da sobretensão foi de 11% a 42%, 13 a 44%, 16% a 49% e 17% a 56% para as impedâncias de aterramento de 10, 20, 40 e 80 Ω , respectivamente. Conforme esperado, os casos nos quais são colocados mais dispositivos para-raios, as sobretensões apresentaram menores valores de pico de tensão e conseqüentemente, uma redução mais elevada em relação ao caso sem o uso da técnica de melhoria de desempenho.

As correntes críticas resultantes e a probabilidade de ocorrência de *backflashover* das simulações para a LT 500 kV com a inserção do dispositivo para-raios nos 7 casos analisados, além do caso sem dispositivo para-raios, são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de backflashover para a linha de 500 kV com utilização do NGLA (Corrente e Distribuição MCS)

Z_P (Ω)	Caso	Icritica (kA)	BF (%)	Variação*
10	s/ NGLA	198,88	0,059	-
	CASO 1	219,12	0,028	-52
	CASO 2	240,24	0,013	-77
	CASO 3	263,12	0,006	-90
	CASO 4	240,24	0,013	-77
	CASO 5	260,48	0,007	-89
	CASO 6	293,04	0,002	-96
	CASO 7	319,44	0,001	-98
20	s/ NGLA	139,92	0,629	-
	CASO 1	159,28	0,279	-56
	CASO 2	171,6	0,170	-73
	CASO 3	178,64	0,128	-80
	CASO 4	183,04	0,108	-83
	CASO 5	194,48	0,070	-89
	CASO 6	237,6	0,015	-98
	CASO 7	257,84	0,007	-99
40	s/ NGLA	89,76	6,045	-
	CASO 1	102,96	3,267	-46
	CASO 2	110,88	2,272	-62
	CASO 3	115,28	1,861	-69
	CASO 4	132	0,886	-85
	CASO 5	145,2	0,502	-92
	CASO 6	175,12	0,147	-98
	CASO 7	189,2	0,085	-99
80	s/ NGLA	58,08	26,604	-
	CASO 1	67,76	17,034	-36
	CASO 2	73,92	12,757	-52

Z_P (Ω)	Caso	$I_{critica}$ (kA)	BF (%)	Variação*
	CASO 3	76,56	11,264	-58
	CASO 4	90,64	5,800	-78
	CASO 5	99,44	3,845	-86
	CASO 6	124,08	1,255	-95
	CASO 7	134,64	0,790	-97

*Variação percentual referente ao caso sem dispositivo para-raios

A Tabela 5.13 mostra que todas as simulações realizadas com o dispositivo para-raios proporcionaram um aumento na corrente crítica, sendo de 198,88 – 319,44 kA para Z_P igual a 10 Ω , uma faixa de corrente crítica de 139,92 – 257,84 kA para Z_P igual a 20 Ω , para Z_P igual a 40 Ω valores de corrente de 89,76 – 189,20 kA e, por fim, para Z_P igual a 80 Ω correntes críticas com valores de 58,08 – 134,64 kA. Observou-se também uma redução na probabilidade de ocorrência do *backflashover* de 52-98%, 59-99%, 46-99% e 36-97% variando a impedância de aterramento Z_P de 10, 20, 40 e 80 Ω , respectivamente.

Alguns cenários analisados possuem a mesma quantidade de dispositivos para-raios com posicionamento diferente na torre. Isso ocorre nos casos 2 – 4 e 3 – 5. Conforme observado na Tabela 5.13, para as impedâncias de aterramento de 20 a 80 Ω , os casos 4 e 5 apresentaram uma maior redução na probabilidade de ocorrência de *backflashover*, sendo uma diminuição de 73%, 62% e 52% para o caso 2 e uma redução de 83%, 85% e 78% para o caso 4, para Z_P igual a 20, 40 e 80 Ω , respectivamente. Já para os casos 3 e 5, variando a impedância de aterramento de 20 a 80 Ω , a diminuição da probabilidade de ocorrência de *backflashover* foi de 80%, 69%, 58% e 89%, 92%, 86% para os cenários 3 e 5, respectivamente. Para a impedância de 10 Ω , notou-se que a variação da probabilidade de ocorrência de *backflashover* foi muito similar nos dois casos (2-4 e 3-5), tendo uma diferença máxima percentual de 1%.

Esses resultados mostraram que é mais efetivo para a melhoria do desempenho global da linha priorizar o posicionamento dos dispositivos para-raios nas fases inferiores e posteriormente, instalá-los nas fases centrais e superiores. Isso ocorre devido as fases inferiores serem as mais críticas em relação ao fenômeno *backflashover*. Diante disso, quando as duas cadeias inferiores são protegidas por meio dos dispositivos para-raios tem-se uma maior efetividade na redução da probabilidade de ocorrência de *backflashover* na torre.

5.4.3 Efeito da colocação de cabo *underbuilt*

Para efeitos de comparação com os resultados desta dissertação, alguns resultados referentes à instalação de cabos *underbuilt* apresentados em (Moreira, 2022) são aqui reproduzidos. Considera-se, para a linha de 500 kV, resultados referentes à instalação de 1 e 2 cabos *underbuilt* a 40,8 m de altura da torre, conforme ilustrado na Figura 5.7.

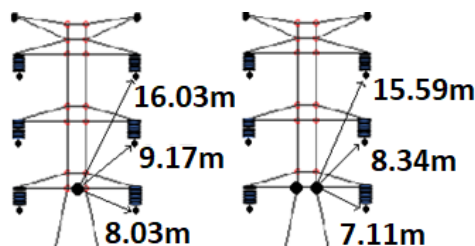


Figura 5.7 - Posicionamento dos cabos *underbuilt* nas estruturas da LT 500 kV na altura de 40,8 m (Moreira, 2022)

As sobretensões resultantes das simulações para a LT 500 kV com a utilização de 1 cabo *underbuilt* e 2 cabos *underbuilt* são apresentadas na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Valores de pico de tensão na cadeia de isoladores da LT 500 kV com uso do *underbuilt*. Fonte: Moreira, 2022

Z_P (Ω)	Sobretensão V_P (kV)				
	s/ UW	1 UW	Variação*	2 UW	Variação*
10	687	579	-16	536	-22
20	805	660	-18	603	-25
40	1038	797	-23	717	-31
80	1511	1031	-32	881	-42

*Redução percentual referente ao caso sem UW

De acordo com as simulações feitas (Moreira, 2022), na Tabela 5.14 observou-se uma redução de 16% a 32% no pico da onda de sobretensão utilizando 1 *underbuilt* e, com a instalação de 2 cabos *underbuilt*, uma diminuição de 22% a 42% no valor de pico da sobretensão, variando a impedância impulsiva de aterramento Z_P de 10 Ω a 80 Ω .

As correntes críticas resultantes e a probabilidade de ocorrência de *backflashover* das simulações para a LT 500 kV com a inserção de 1 ou 2 cabos *underbuilt* são apresentadas na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de *backflashover* para a linha de 500 kV (Corrente e Distribuição MCS) com *underbuilt*. Fonte: Moreira, 2022

Z_P (Ω)	Situação	$I_{critica}$ (kA)	BF (%)	Variação*
10	s/ UW	197,8	0,06	-
	1 UW	237,4	0,015	-76
	2 UW	258,3	0,007	-88

Z_P (Ω)	Situação	Icritica (kA)	BF (%)	Variação*
20	s/ UW	139,1	0,65	-
	1 UW	190,9	0,08	-88
	2 UW	211,9	0,04	-94
40	s/ UW	88,8	6,33	-
	1 UW	127,6	1,07	-83
	2 UW	152	0,38	-94
80	s/ UW	57,5	27,26	-
	1 UW	85,4	7,44	-73
	2 UW	102,5	3,34	-88

*Variação percentual referente à BF sem uso do UW

Conforme esperado e apresentado na Tabela 5.15 (Moreira, 2022), a instalação dos cabos *underbuilt* resultou em um aumento da corrente crítica. Notou-se uma redução na probabilidade de ocorrência de *backflashover* de 73% a 88% utilizando 1 cabo *underbuilt* e, de 88% a 94% utilizando-se 2 cabos *underbuilt*, variando a impedância de aterramento de 10 Ω a 80 Ω .

5.4.4 Comparação entre as técnicas de melhoria de desempenho para LT de 500 kV: instalação de dispositivo para-raios x cabos *underbuilt*

A Tabela 5.16 resume a influência da instalação de dispositivos para-raios e de cabos *underbuilt* nos valores de correntes críticas e na probabilidade de as correntes excederem a corrente crítica para valores da impedância impulsiva de aterramento entre 10 e 80 Ω .

Tabela 5.16 - Correntes críticas probabilidade de ocorrência de *backflashover* para a linha de 500 kV (Corrente e Distribuição MCS) com NGLA e *underbuilt* (Moreira, 2022)

Z_P (Ω)	Caso	Icritica (kA)	BF (%)	Variação*
10	s/ NGLA	198,88	0,06	-
	CASO 1 - NGLA	219,12	0,03	-52
	CASO 2 - NGLA	240,24	0,01	-77
	CASO 3 - NGLA	263,12	0,01	-90
	CASO 4 - NGLA	240,24	0,01	-77
	CASO 5 - NGLA	260,48	0,01	-89
	CASO 6 - NGLA	293,04	0,00	-96
	CASO 7 - NGLA	319,44	0,00	-98
	1 UW	237,4	0,02	-75
	2 UW	258,3	0,01	-88
20	s/ NGLA	139,92	0,63	-
	CASO 1 - NGLA	159,28	0,28	-56
	CASO 2 - NGLA	171,6	0,17	-73

Z _P (Ω)	Caso	I _{crítica} (kA)	BF (%)	Varição*
	CASO 3 - NGLA	178,64	0,13	-80
	CASO 4 - NGLA	183,04	0,11	-83
	CASO 5 - NGLA	194,48	0,07	-89
	CASO 6 - NGLA	237,6	0,01	-98
	CASO 7 - NGLA	257,84	0,01	-99
	1 UW	190,9	0,08	-87
	2 UW	211,9	0,04	-94
40	s/ NGLA	89,76	6,04	-
	CASO 1 - NGLA	102,96	3,27	-46
	CASO 2 - NGLA	110,88	2,27	-62
	CASO 3 - NGLA	115,28	1,86	-69
	CASO 4 - NGLA	132	0,89	-85
	CASO 5 - NGLA	145,2	0,50	-92
	CASO 6 - NGLA	175,12	0,15	-98
	CASO 7 - NGLA	189,2	0,09	-99
	1 UW	127,6	1,07	-82
	2 UW	152	0,38	-94
80	s/ NGLA	58,08	26,60	-
	CASO 1 - NGLA	67,76	17,03	-36
	CASO 2 - NGLA	73,92	12,76	-52
	CASO 3 - NGLA	76,56	11,26	-58
	CASO 4 - NGLA	90,64	5,80	-78
	CASO 5 - NGLA	99,44	3,85	-86
	CASO 6 - NGLA	124,08	1,25	-95
	CASO 7 - NGLA	134,64	0,79	-97
	1 UW	85,4	7,44	-72
	2 UW	102,5	3,34	-87

*Variação percentual referente à BF sem uso do dispositivo para-raios

Conforme apresentado para a LT 230 kV, também observa-se na Tabela 5.15 e na Tabela 5.16 que os valores encontrados de corrente crítica e probabilidade de ocorrência de *backflashover* nas simulações sem nenhuma técnica de melhoria de desempenho são diferentes, devido a diferença de softwares utilizados.

Para efeito de análise, na Tabela 5.16 são utilizados os valores encontrados no software ATP para o caso sem nenhum dispositivo. Dessa forma, nota-se uma diminuição na probabilidade de ocorrência do *backflashover* de 72% a 87% usando 1 cabo *underbuilt*, 87% a 94% utilizando 2 cabos *underbuilt*. Já instalando os dispositivos para-raios houve uma redução na probabilidade de ocorrência de *backflashover* de 36% a 56%, de 52% a 77%, de 58% a 90%, de 77% a 85%, de 86% a 92%, de 95% a 98% e de 97% a 98%, nos casos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente.



6 Estudo de Caso para Estabelecimento de Critérios de Aplicação

6.1 Introdução

Conforme apresentado no item 2.7 desta dissertação, o número máximo de interrupções não-programadas das linhas de transmissão é estipulado pelo ONS e regulado por meio da ANEEL, para que seja respeitado o limite máximo de 2 desligamentos/100 km/ano para linhas de 230 kV e de 1 desligamento/100 km/ano para linhas de 500 kV. Dessa forma, foi desenvolvido um estudo de caso para determinar o valor máximo da impedância impulsiva de aterramento para garantir o desempenho requerido para linhas nessas duas classes de tensão. As análises aqui desenvolvidas assumiram a densidade de descargas, N_g , de 1, 5 e 10 flashes/km²/ano.

6.2 Determinação das condições para atender o desempenho ótimo das linhas de transmissão em 230 kV

As taxas de desligamento por *backflashover* foram calculadas assumindo a influência dos dispositivos para-raios e dos cabos *underbuilt* nos resultados. Deste último, foram reproduzidos os resultados apresentados em (Moreira, 2022), para fins de comparação dos métodos de melhoria de desempenho em diversos cenários.

Os valores máximos da impedância impulsiva de aterramento Z_P para garantir o desempenho requerido para a linha de transmissão em função da densidade de descargas são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Valores de Z_P para atingir o desempenho esperado da linha de transmissão de 230 kV

Ng	Técnica	Z_P (Ω)	Varição*
1	s/ UW / s/ TLSA	42,1	-
	1 NGLA	50,7	20
	2 NGLA	62,8	49
	1 UW	69,8	66
	2 UW	103,0	145
5	s/ UW / s/ TLSA	22,3	-
	1 NGLA	26,5	19
	2 NGLA	34,0	52
	1 UW	36,7	65
	2 UW	49,4	122
10	s/ UW / s/ TLSA	18,8	-
	1 NGLA	21,4	14
	2 NGLA	26,9	43
	1 UW	28,0	49
	2 UW	38,7	106

*Variação percentual referente à Z_P sem uso do NGLA ou UW

A Figura 6.1 ilustra os resultados para utilização do dispositivo para-raios para os três casos analisados, variando a densidade de descarga entre 1, 5 e 10 flashes/km²/ano.

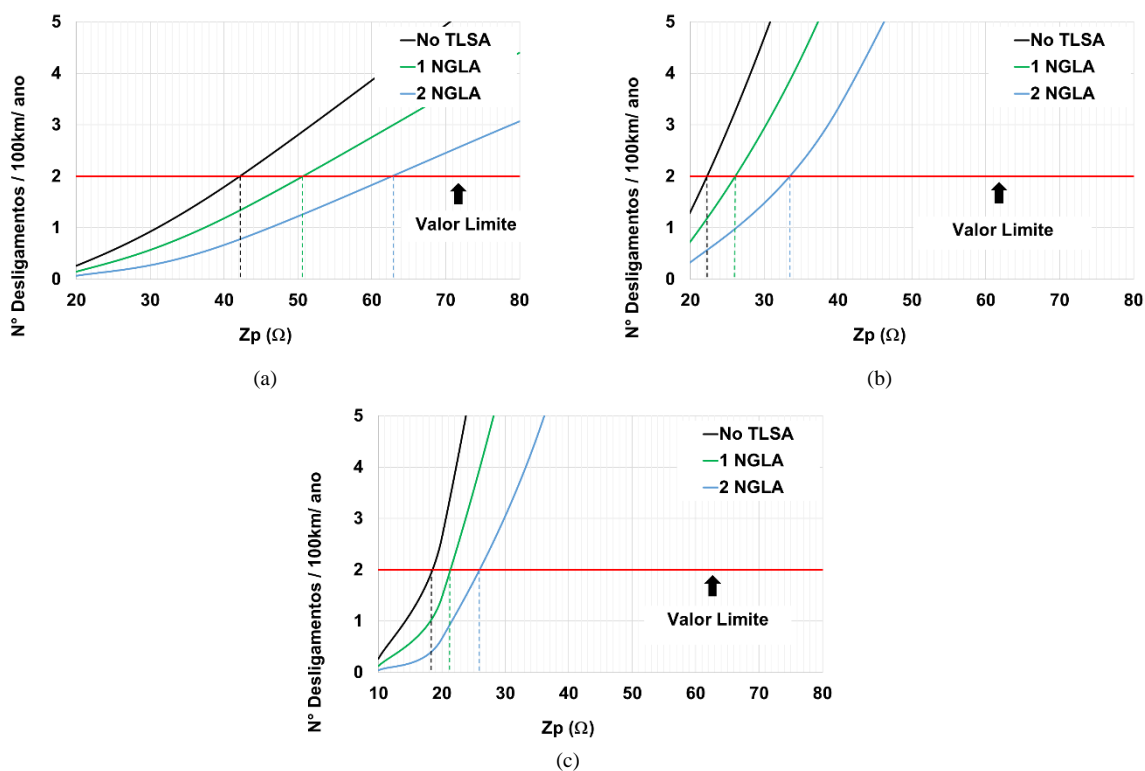


Figura 6.1 – Taxa de desligamentos em função de Z_P considerando a instalação do NGLA. Ng: (a) 1 (b) 5 e (c) 10

A utilização das técnicas de melhoria analisadas contribui para aumentar o valor máximo de impedância impulsiva de aterramento, Z_p , necessário para atender o limite de 2 desligamentos/100 km/ano.

Considerando a densidade de descargas igual a 1 flash/km²/ano, tem-se que o valor da impedância de aterramento de 42 Ω aumenta para 70 Ω e 103 Ω usando 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente, e para 51 Ω e 63 Ω utilizando-se 1 e 2 dispositivos para-raios, respectivamente. Já quando a densidade de descargas é de 5 flashes/km²/ano, a impedância impulsiva de aterramento que tem valor inicial de 22 Ω , aumenta para 37 Ω e 49 Ω para 1 e 2 cabos *underbuilt* e 27 Ω e 34 Ω para 1 e 2 dispositivos para-raios. Finalmente, considerando-se uma densidade de descargas de 10 flashes/km²/ano, nota-se que, respectivamente, o valor de Z_p aumenta de 19 Ω para 28 Ω e 39 Ω usando-se 1 e 2 cabos *underbuilt* e para 21 Ω e 27 Ω para 1 e 2 dispositivos para-raios, respectivamente. Esses resultados mostram que o uso dos cabos *underbuilt* proporcionou um maior aumento no valor da impedância de aterramento em relação ao proporcionado pela instalação de dispositivos para-raios em todos os casos analisados.

6.2.1 Determinação do comprimento de cabo contrapeso para atendimento do desempenho de uma LT 230 kV instalada em solo de elevada resistividade

Uma etapa adicional no estudo de caso considerou a linha de 230 kV com cabos contrapeso de 50 m de comprimento instalados em solos de resistividade de 8000 Ω .m em uma região com densidade de descargas N_g de 5 flashes/km²/ano. Esta condição representa um valor de impedância impulsiva de aterramento de 53,2 Ω , considerando a dependência da frequência dos parâmetros do solo (CIGRE, 2021) (Alipio & Visacro, 2014), valor muito superior ao limite necessário de impedância impulsiva de aterramento de 22,3 Ω que garantiria os 2 desligamentos/100km/ano, conforme notado na Tabela 6.1. A Tabela 6.2 mostra os valores complementares de cabo contrapeso para alcançar a impedância de aterramento necessária em cada caso analisado.

Tabela 6.2 - Comprimento complementar dos cabos contrapeso (CCP) para se alcançar o desempenho adequado de linhas de transmissão 230 kV

ρ ($\Omega \cdot m$)	Técnica	ZP Alvo (Ω)	Cabos Contrapeso (CCP)	
			ΔL (m)	Total extra L(m) = $4 \times \Delta L$
8000	CCP	22,3	87,8	351,2
	CCP + 1 NGLA	26,5	63,4	253,6
	CCP + 2 NGLA	34,0	36,7	146,8
	CCP + 1 UW	36,7	28,9	110,6
	CCP + 2 UW	49,4	5,2	20,9

Os resultados mostraram que são necessários diferentes comprimentos de cabos contrapeso para a linha de transmissão em estudo atingir o desempenho desejado. A utilização da técnica que considera apenas a extensão do comprimento dos cabos contrapeso indicou a necessidade de estender cada ramo de cabo contrapeso em aproximadamente 88 m. Por outro lado, utilizando os cabos *underbuilt*, a extensão foi de 28,9 m e 5,2 m para 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente. Esses comprimentos são maiores quando se considera o uso dos dispositivos para-raios: 63,4 m e 36,7 m para 1 e 2 dispositivos para-raios, respectivamente.

Os resultados deste tópico mostraram que, com a instalação dos cabos *underbuilt*, uma extensão muito menor de cabos contrapesos é necessária, em relação ao comprimento quando se considera a instalação de dispositivos para-raios.

6.3 Determinação das condições para atender o desempenho ótimo das linhas de transmissão em 500 kV

Similar ao que foi apresentado no item 6.2, foram encontrados os valores limites da impedância de aterramento Z_P para cada densidade de descargas analisada: 1, 5 e 10 flashes/km²/ano. Os resultados do cabo *underbuilt* foram apresentados em (Moreira, 2022) para efeito de comparação com os resultados do dispositivo para-raios obtidos nesta dissertação.

Os valores limite de Z_P para garantir o desempenho requerido para a LT 500 kV em função da densidade de descargas N_g são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Valores de Z_p para atingir o desempenho esperado da linha de transmissão de 500 kV

Ng	Técnica	Z_p (Ω)	Variação*
1	No UW / No TLSA	42,3	-
	CASO 1 - NGLA	52,0	23
	CASO 2 - NGLA	59,0	39
	CASO 3 - NGLA	62,7	48
	CASO 4 - NGLA	88,0	108
	CASO 5 - NGLA	105,7	150
	CASO 6 - NGLA	166,0	292
	CASO 7 - NGLA	203,7	382
	1 UW	63,5	50
	2 UW	97,5	130
5	No UW / No TLSA	24,5	-
	CASO 1 - NGLA	31,7	29
	CASO 2 - NGLA	35,4	44
	CASO 3 - NGLA	37,4	53
	CASO 4 - NGLA	45,0	84
	CASO 5 - NGLA	52,0	112
	CASO 6 - NGLA	84,5	245
	CASO 7 - NGLA	98,4	302
	1 UW	38,9	59
	2 UW	48,7	99
10	No UW / No TLSA	20,4	-
	CASO 1 - NGLA	25,3	24
	CASO 2 - NGLA	29,5	45
	CASO 3 - NGLA	31,8	56
	CASO 4 - NGLA	38,0	86
	CASO 5 - NGLA	43,0	111
	CASO 6 - NGLA	62,0	204
	CASO 7 - NGLA	76,3	274
	1 UW	33,9	66
	2 UW	41,5	103

*Variação percentual referente à Z_p sem uso do NGLA ou UW

A Figura 6.2 ilustra os resultados para utilização do dispositivo para-raios para os três casos analisados, variando a densidade de descarga entre 1, 5 e 10 flashes/km²/ano.

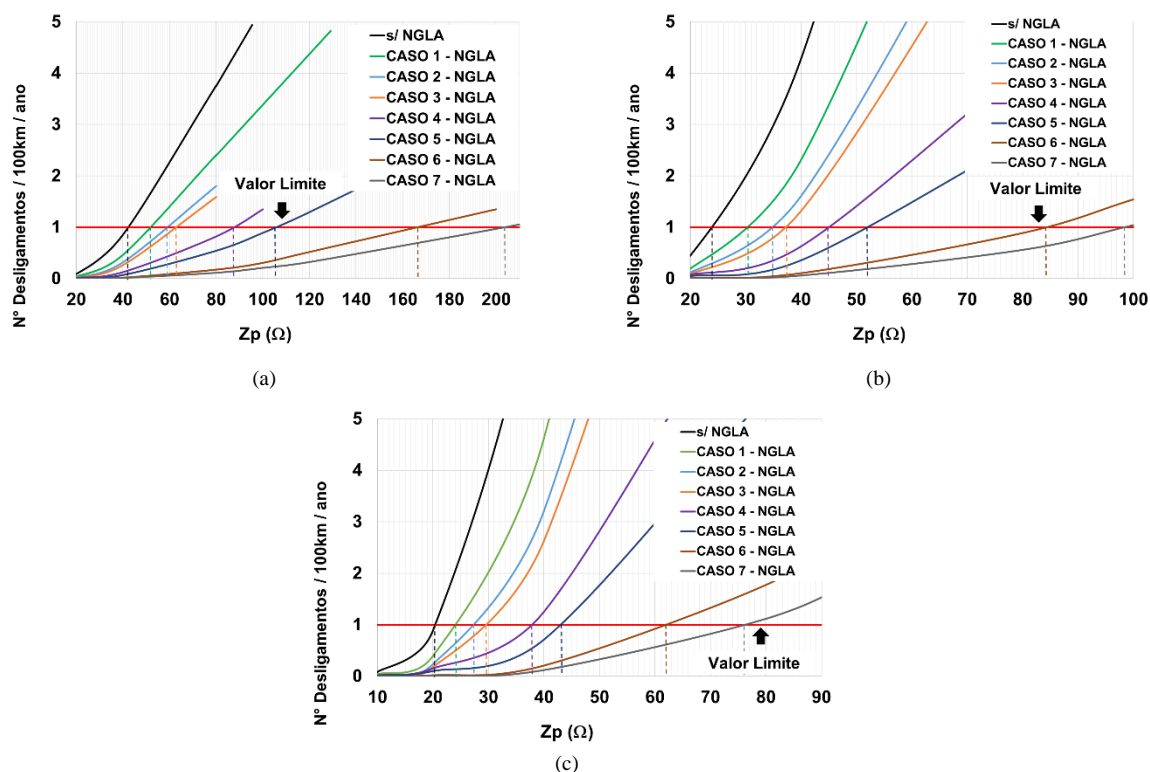


Figura 6.2 – Taxa de desligamentos em função de Z_p considerando a instalação do NGLA. Ng: (a) 1 (b) 5 e (c) 10

Considerando a densidade de descargas igual a 1 flash/km²/ano, tem-se que o valor da impedância de aterramento aumenta para 64 Ω e 98 Ω usando 1 e 2 cabos *underbuilt*, e para 52 Ω a 204 Ω usando de 1 a 5 dispositivos para-raios, considerando que o valor inicial da impedância de aterramento é de 42 Ω . Já quando a densidade de descargas é de 5 flashes/km²/ano, a impedância impulsiva de aterramento de 25 Ω aumenta para 39 Ω a 49 Ω com a instalação de 1 e 2 cabos *underbuilt* e, e para 32 Ω a 98 Ω usando o dispositivo para-raios. Por fim, considerando-se uma densidade de descargas de 10 flashes/km²/ano, são notados aumentos de 34 Ω a 42 Ω usando 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente, e para 26 Ω a 76 Ω com a instalação de dispositivos para-raios, em relação ao valor inicial de 20 Ω . Esses resultados mostram que o uso dos cabos *underbuilt* proporcionou um aumento maior do valor da impedância impulsiva de aterramento em relação àquele relativo ao uso de dispositivos para-raios nos casos 1 a 4. Já analisando os casos 5 a 7, observa-se que à instalação de dispositivos para-raios proporciona maior aumento nos valores de Z_p .

6.3.1 Determinação do comprimento de cabo contrapeso para atendimento do desempenho de uma LT 500 kV instalada em solo de elevada resistividade

Conforme apresentado para a LT 230 kV, também considerou-se um estudo de caso para o solo com resistividade de 8000 $\Omega \cdot m$ e em uma região com densidade de descargas N_g de 5 flashes/ km^2 /ano para a LT 500 kV. Para esse estudo, foi utilizado o cabo contrapeso com 50 m de comprimento e assim, obteve-se o valor de impedância impulsiva de aterramento de 53,2 Ω , considerando a dependência da frequência dos parâmetros do solo (CIGRE, 2021) (Alipio e Visacro, 2014), valor muito superior ao limite necessário de impedância impulsiva de aterramento de 24,5 Ω que garantiria 1 desligamento/100km/ano. A Tabela 6.4 mostra os valores complementares de comprimento do cabo contrapeso para alcançar a impedância de aterramento Z_P necessária em cada caso analisado.

Devido a similaridade apresentada na Tabela 6.3 para o valor da impedância de aterramento Z_P alvo, serão abordados os casos de forma agrupada na Tabela 6.4

Tabela 6.4 - Comprimento complementar dos cabos contrapeso (CCP) para se alcançar o desempenho adequado de linhas de transmissão 500 kV

ρ ($\Omega \cdot m$)	Técnica	Z_P Alvo (Ω)	Cabos Contrapeso (CCP)	
			ΔL (m)	Total extra L(m) = $4x\Delta L$
8000	CCP	24,5	74,5	298,0
	CCP + CASO 1 - NGLA	31,7	43,8	175,2
	CCP + CASO 2 - NGLA	35,4	32,6	130,4
	CCP + CASO 3 - NGLA	37,4	27,2	108,8
	CCP + CASO 4 - NGLA	45,0	11,8	47,2
	CCP + CASO 5 - NGLA	52,0	1,8	7,2
	CCP + CASO 6 - NGLA	84,5	0,0	0,0
	CCP + CASO 7 - NGLA	98,4	0,0	0,0
	CCP + 1 UW	38,9	23,4	93,6
	CCP + 2 UW	48,7	6,5	26,0

Conforme apresentado na Tabela 6.4, para atingir o desempenho desejado são necessários diferentes comprimentos de cabo contrapeso. Considerando apenas a extensão do cabo contrapeso, é preciso aumentar cada ramal do cabo em aproximadamente 75 m. Já utilizando-se os cabos *underbuilt*, a extensão do comprimento

dos cabos contrapeso foi de 23,4 m e 6,5 m para 1 e 2 *underbuilt*, respectivamente. Esses comprimentos são maiores quando se considera o uso dos dispositivos para-raios nos casos 1 a 3: 31,7 m, 35,4 m e 37,4 m para os casos 1, 2 e 3, respectivamente. Nos casos 4 e 5, a extensão do comprimento dos cabos contrapeso foram menores do que os cenários com os cabos *underbuilt*, sendo de 45 m e 52 m, para o caso 4 e 5, respectivamente. Por fim, para os casos 6 e 7, notou-se que não seria necessário o aumento do comprimento dos cabos contrapeso para se atingir a impedância impulsiva de aterramento alvo, que este valor já seria alcançado com os 50 m considerados de cada ramo do cabo contrapeso e com o número de dispositivos para-raios considerados.

6.4 Cenários para utilização das alternativas de melhoria de desempenho

Em alguns casos, o número de desligamentos não-programados das linhas de transmissão está ligeiramente acima do limite máximo estabelecido. Para esses casos não seria necessária a aplicação de medidas que causassem uma redução drástica na taxa de desligamentos. Visando analisar casos nos quais isso ocorre, neste tópico da dissertação são avaliados os cenários nos quais as alternativas de melhoria de desempenho são mais bem aproveitadas.

Dessa forma, neste tópico serão mostrados diversos cenários e será avaliada qual a melhor solução, do ponto de vista técnico, utilizando os dispositivos para-raios e os cabos *underbuilt*, para cada situação analisada. Na Tabela 6.5 e na Tabela 6.6 são apresentadas as soluções para cada cenário avaliado das LTs em 230 kV e 500 kV.

Tabela 6.5 – Alternativa de melhoria de desempenho mais adequada para cada cenário em uma LT 230 kV

Redução Percentual Alvo BF (%)	Alternativa Escolhida	
	$Z_P = 40 \Omega$	$Z_P = 80 \Omega$
10% - 20%	1 NGLA	1 NGLA
20% - 30%	1 NGLA	1 NGLA
30% - 40%	1 NGLA	2 NGLA
40% - 50%	2 NGLA	2 NGLA
50% - 60%	2 NGLA	1 UW
60% - 70%	2 NGLA	2 NGLA ou 2 UW
70% - 80%	1 UW	2 UW
80% - 90%	2 UW	-
Acima de 90%	-	-

Tabela 6.6 – Alternativa de melhoria de desempenho mais adequada para cada cenário em uma LT 500 kV

Redução Percentual Alvo BF (%)	Alternativa Escolhida	
	$Z_P = 40 \Omega$	$Z_P = 80 \Omega$
10% - 20%	CASO 1 - NGLA	CASO 1 - NGLA
20% - 30%	CASO 1 - NGLA	CASO 1 - NGLA
30% - 40%	CASO 1 - NGLA	CASO 1 - NGLA
40% - 50%	CASO 1 - NGLA	CASO 2 - NGLA
50% - 60%	CASO 2 - NGLA	CASO 2 - NGLA
60% - 70%	CASO 2 - NGLA	CASO 4 - NGLA ou 1 UW
70% - 80%	CASO 4 - NGLA ou 1 UW	CASO 4 - NGLA ou 1 UW
80% - 90%	CASO 4 - NGLA ou 1 UW	CASO 5 - NGLA ou 2 UW
90% - 95%	2 UW	CASO 6 - NGLA
95% - 100%	CASO 6 - NGLA	CASO 7 - NGLA

Para a LT 230 kV, foi observado que para cenários nos quais é necessária uma redução menor da probabilidade de ocorrência de *backflashover* o dispositivo para-raios se mostrou a melhor solução, podendo ser empregado em reduções percentuais de até 70% para o caso com valor de impedância de aterramento de 40Ω . Já no caso da impedância de aterramento igual a 80Ω , o dispositivo para-raios pode ser utilizado para reduções de até 70%. Os cabos *underbuilt* se mostram a melhor solução para diminuição da probabilidade de ocorrência de *backflashover* acima de 70% e acima de 50% para impedância de aterramento igual a 40Ω e 80Ω , respectivamente. Ressalta-se que, para a situação de redução entre 60 e 70% e impedância de aterramento de 80Ω , podem ser empregadas as duas soluções, 2 dispositivos para-raios ou 2 cabos *underbuilt*, sendo necessária uma avaliação da condição da LT em específico para averiguar qual solução melhor se aplica.

Para a LT 500kV, notou-se que o dispositivo para-raios ou o cabo *underbuilt* podem ser empregados em mais cenários concomitantes do que para a linha em 230 kV. Para a impedância de aterramento de 40Ω , e reduções de 10% a 70% e 95% a 100%, a solução escolhida para diminuição da probabilidade de ocorrência de *backflashover* foi o dispositivo para-raios, sendo utilizado o cabo *underbuilt* quando a redução é entre 70% e 95%. Já para impedância de aterramento igual a 80Ω , os dispositivos para-raios podem ser empregados para minimização da probabilidade de ocorrência de *backflashover* em todos os casos, mas destaca-se que ele é usado exclusivamente nos casos de redução de 10% - 60% e de 95% - 100%. Conforme também apresentado para 230 kV, em alguns casos houve mais de uma solução entre as alternativas avaliadas, sendo imprescindível

uma análise detalhada da linha em específico para averiguar qual solução se faz mais bem aplicada.

Ressalta-se que para a linha em 500kV, há mais casos, dentre os 7 analisados nesta dissertação usando-se os dispositivos para-raios, que atendem as reduções de probabilidade de ocorrência de *backflashover* propostas neste tópico. Entretanto, optou-se pelo caso no qual era utilizado o menor número de dispositivos para-raios, pensando em uma questão de custo e manutenção.

7 Conclusões e Propostas de Continuidade

7.1 Introdução

Esta dissertação de mestrado teve como objetivo avaliar um conjunto de alternativas para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas de modo a prover elementos que facilitem a melhor escolha e aplicação de cada uma delas. Dentre as técnicas existentes, utilizou-se o aumento do comprimento dos cabos contrapeso, a instalação de dispositivos para-raios e cabos *underbuilt*.

A análise técnica deste trabalho foi baseada em simulações computacionais em que se obtém as sobretensões nas cadeias de isoladores de linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV, variando a impedância de aterramento de 10Ω a 80Ω , com diferentes cenários envolvendo as técnicas de melhoria de desempenho. A partir dos resultados das simulações, foi calculada a corrente crítica e o desempenho das linhas e, por fim, feita a análise de sensibilidade de cada técnica avaliada.

As simulações computacionais consideraram o software ATP para modelagem do sistema e cálculo das sobretensões nas cadeias de isoladores, obtidas para a incidência de uma corrente de primeira descarga negativa descendente com forma de onda duplo pico com valores medianos obtidos a partir de medições da Estação do Morro do Cachimbo (MCS). Foi utilizado o método da integração (DE) para avaliação da ocorrência de *backflashover* na cadeia de isoladores (Hileman, 1999).

Foram desenvolvidas análises comparando os resultados provenientes da aplicação das técnicas de melhoria de desempenho e também, estudos de caso para avaliar o comportamento dessas alternativas frente a um cenário adverso e para atendimento do desempenho ótimo da linha de transmissão.

7.2 Comentários gerais

Inicialmente, foram analisadas as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores obtidas em todos os cenários simulados, com ou sem alternativas de melhoria de desempenho. Para a LT 230 kV, variando a impedância impulsiva de aterramento de 10 a 80 Ω , resultou na diminuição de 13 a 15% e de 26% a 27% no valor de pico da onda de sobretensão para 1 e 2 dispositivos para-raios, respectivamente. Já para a LT 500 kV, com a inserção dos dispositivos para-raios, notou-se que a redução no valor de pico da sobretensão foi de 11% a 42%, 13 a 44%, 16% a 49% e 17% a 56% para as impedâncias de 10, 20, 40 e 80 Ω , respectivamente.

Na Figura 7.1 estão representadas as posições nos quais os dispositivos para-raios foram colocados na torre da linha de 500 kV, conforme mostrado na Figura 5.5 e, que aqui serão reproduzidos para fins de contextualização na leitura deste tópico.

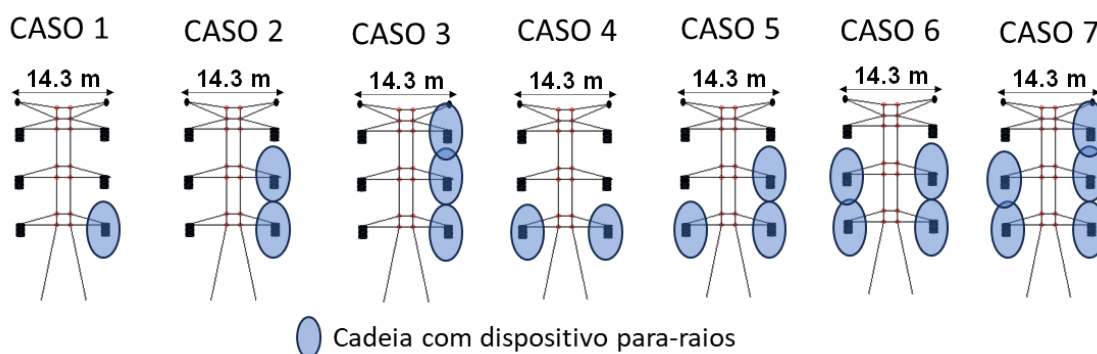


Figura 7.1 - Disposição do dispositivo para-raios em cada caso simulado

Considerando a probabilidade de ocorrência de *backflashover*, observou-se pra LT 230 kV uma diminuição de 27% a 55% utilizando 1 dispositivo para-raios e uma redução de 49 a 83% utilizando-se 2 dispositivos para-raios, variando a impedância de aterramento de 10 a 80 Ω . Já para a LT 500 kV, foram simulados 8 casos diferentes, sendo um deles sem utilização de técnicas de melhoria de desempenho, nos quais os casos 6 e 7 resultaram nas maiores reduções, sendo elas de 95% a 98% no caso 6 e, uma diminuição de 97% a 99% no caso 7 na probabilidade de ocorrência de *backflashover*, variando impedância de aterramento de 10 a 80 Ω .

Devido aos diversos cenários analisados na LT 500kV, em alguns deles (2 – 4 e 3 – 5) foi utilizado o mesmo número de dispositivos para-raios. Notou-se que houve uma maior redução na probabilidade de ocorrência de *backflashover* nos casos 4 e 5. Considerando o primeiro conjunto, 2 – 4, houve uma diminuição de 73%, 62% e 52%

para o caso 2 e uma redução de 83%, 85% e 78% para o caso 4, para impedância de aterramento igual a 20, 40 e 80 Ω , respectivamente. Considerando os casos 3 e 5, a diminuição da probabilidade de ocorrência de *backflashover* foi de 80%, 69%, 58% e 89%, 92%, 86% para os cenários 3 e 5, respectivamente, variando impedância de aterramento Z_P de 20 a 80 Ω . Considerando a impedância de 10 Ω , foi observada uma variação da probabilidade de ocorrência de *backflashover* muito próxima nos dois casos (2-4 e 3-5), tendo uma diferença máxima percentual de 1%.

Os resultados avaliados mostraram que o posicionamento dos dispositivos para-raios influencia na melhoria do desempenho global da linha, sendo mais efetivo quando se coloca os dispositivos para-raios nas fases inferiores e, posteriormente, nas fases acima.

Para fins de comparação, foram apresentados os resultados obtidos em Moreira, (2022) para a inserção de 1 ou 2 cabos *underbuilt* na LT 230 kV e LT 500kV variando a impedância de aterramento de 10 a 80 Ω . No valor de pico das sobretensões resultantes, houve uma diminuição de 18% a 27% e de 27% a 38% para a inserção de 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente, na linha em 230 kV. Para a LT 500 kV, notou-se uma redução no valor de pico das sobretensões de 16% a 32% para 1 cabo *underbuilt* e uma diminuição de 22% a 42% para 2 cabos *underbuilt*.

Em complemento, observou-se o efeito dos cabos *underbuilt* na probabilidade de ocorrência de *backflashover*. Houve uma redução de 58% a 81% e de 78% a 93%, utilizando-se 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente, para a LT 230 kV. Já para a linha de 500 kV, notou-se uma diminuição de 73% a 88% e de 88% a 94% na probabilidade de ocorrência de *backflashover*, utilizando-se 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente.

Buscando o desempenho ótimo das linhas de transmissão em questão, analisou-se o valor máximo da impedância impulsiva de aterramento para que a taxa de desligamentos da LT 230 kV e 500 kV respeitasse os valores de 1 e 2 desligamentos/100km/ano, respectivamente, preconizadas pelo ONS.

Para a linha de 230 kV, observou-se que para a densidade de descargas N_g igual a 1 flash/km²/ano, a impedância de aterramento Z_P aumenta de 42 Ω para 70 Ω e 103 Ω usando o cabo *underbuilt* e de 51 Ω e 63 Ω usando o dispositivo para-raios; já considerando-se a densidade de descargas de 5 flashes/ km²/ano, a impedância de aterramento Z_P aumenta de 22 Ω para 37 Ω e 49 Ω usando os cabos *underbuilt* e para 27

Ω e 34Ω usando o dispositivo para-raios; finalmente, considerando-se uma densidade de descargas de $10 \text{ flashes/km}^2/\text{ano}$, nota-se que usando 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente, obtém-se aumentos na impedância de aterramento, de 19Ω , inicialmente, para 28Ω e 39Ω , já com os dispositivos para-raios esse aumento foi de 21Ω e 27Ω para 1 e 2 dispositivos, respectivamente.

Já para a linha de 500 kV, considerando a densidade de descargas igual a $1 \text{ flash/km}^2/\text{ano}$, o valor da impedância de aterramento aumenta de 42Ω para 64Ω e 98Ω usando 1 e 2 cabos *underbuilt*, e o seu valor aumenta para 52Ω a 204Ω usando o dispositivo para-raios. Já quando a densidade de descargas é de $5 \text{ flashes/km}^2/\text{ano}$, os aumentos nos valores da impedância de aterramento, que estava inicialmente com 25Ω , são de 39Ω a 49Ω para 1 e 2 cabos *underbuilt* e, os aumentos são de 32Ω a 98Ω usando o dispositivo para-raios. Por fim, considerando-se uma densidade de descargas de $10 \text{ flashes/km}^2/\text{ano}$, nota-se que usando 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente, obtém-se aumento para 34Ω a 42Ω na impedância de aterramento, que tinha valor inicial de 20Ω , já com os dispositivos para-raios, esse aumento foi para 26Ω a 76Ω .

Diante disso, nota-se que para a linha em 230 kV, o uso dos cabos *underbuilt* proporcionou um aumento maior para a impedância de aterramento Z_P em comparação com o resultado obtido utilizando-se os dispositivos para-raios em todos os casos analisados. Isso também acontece para a linha de 500 kV nos casos de 1 a 4 de implantação do dispositivo para-raios. Contudo analisando os casos 5 a 7, observa-se que o dispositivo para-raios proporciona um aumento muito maior do valor da impedância de aterramento.

Também foi feito um estudo de caso em um cenário de resistividade de solo de $8000 \Omega.m$ em que se avaliou o aumento do comprimento necessário de cabo contrapeso associado ao uso cada alternativa de desempenho avaliada nesse trabalho. Três cenários de densidade de descargas N_g foram aqui considerados: 1, 5 e $10 \text{ flashes/km}^2/\text{ano}$. Para a LT 230 kV, sem utilização de nenhuma técnica, observou-se a necessidade de estender o comprimento de cada ramo de cabo contrapeso em aproximadamente 88 m. Já utilizando-se os dispositivos para-raios, a extensão do comprimento do cabo contrapeso foi de 63,4 m e 36,7 m para 1 e 2 dispositivos para-raios, respectivamente; com os cabos *underbuilt* a extensão do comprimento do cabo contrapeso foi de 28,9 m e 5,2 m, para 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente.

Já para a linha de 500 kV, sem utilização de técnica, o aumento de cada ramo do contrapeso foi de aproximadamente 75 m. Considerando os cabos *underbuilt*, a extensão do comprimento dos cabos contrapeso foi de 23,4 m e 6,5 m para 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente. Utilizando-se os dispositivos para-raios, nos casos 1 a 3, o aumento do comprimento dos cabos contrapeso foi maior do que utilizando-se o cabo *underbuilt*, sendo 31,7 m, 35,4 m e 37,4 m para os casos 1, 2 e 3, respectivamente. Considerando os casos 4 e 5 do dispositivo para-raios, notou-se que extensão do comprimento do cabo contrapeso foi menor do que quando se utiliza os cabos *underbuilt*, sendo necessários 45 m e 52 m, para o caso 4 e 5, respectivamente. Já para os casos 6 e 7, observou-se a não necessidade de aumento da extensão dos cabos contrapeso para se atingir a impedância de aterramento Z_P alvo, sendo que, este valor de impedância de aterramento já seria alcançado com os 50 m considerados do cabo contrapeso e com o número de dispositivos para-raios considerados.

Por fim, foi feito um estudo de caso analisando diferentes cenários de porcentagem de diminuição na probabilidade de ocorrência de *backflashover* para se alcançar o desempenho ótimo das linhas. Essa análise técnica se mostra relevante visto que, em alguns casos, o número de desligamentos não-programados das linhas de transmissão estão um pouco acima do limite máximo estabelecido, podendo ser adotadas medidas não tão robustas capazes de melhorar o desempenho da linha.

Para a LT 230 kV, nota-se que o dispositivo para-raios é mais bem empregado em situação de redução da probabilidade de ocorrência de *backflashover* de até 70%. Já os cabos *underbuilt* são mais bem aproveitados em maiores reduções, de 50% até 90%. Para a linha de 500 kV, existem mais cenários que o dispositivo para-raios ou o cabo *underbuilt* podem ser empregados de forma concomitante do que para a linha em 230 kV, analisando o melhor aproveitamento de cada técnica. Nota-se que para pequenas reduções, os dispositivos para-raios são melhor empregados, conforme ocorreu para a linha em 230 kV, mas destaca-se somente o dispositivo para-raios pode ser usado para reduções de 95% a 100%.

Portanto, avaliando ambas as linhas, 230 kV e 500 kV, em alguns casos houve mais de uma solução entre as alternativas avaliadas, sendo imprescindível uma análise detalhada da linha em específico para averiguar qual solução se faz mais bem aplicada.

Conclui-se então, que os resultados obtidos para as duas linhas de transmissão analisados se mostraram muito condizentes. Em relação as técnicas avaliadas, a instalação dos cabos *underbuilt* proporcionou, em todos os cenários analisados uma melhoria no desempenho das linhas de transmissão em 230 kV mais significativa do que a instalação do dispositivo para-raios. Já para a linha em 500 kV, algumas configurações do dispositivo para-raios apresentaram maiores reduções na probabilidade de ocorrência de *backflashover* do que utilizando-se os cabos *underbuilt*. Ambas as técnicas avaliadas são soluções robustas para melhorar o desempenho das linhas de transmissão, sendo necessária a avaliação de qual situação é mais adequada o uso de cada uma dessas alternativas.

7.3 Propostas de Continuidade

Neste trabalho foi apresentada a análise do impacto da instalação dos dispositivos para-raios em linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV visando a melhoria do desempenho delas. Além disso, foi desenvolvida uma análise de sensibilidade técnica desta alternativa com outras duas, sendo elas o aumento do comprimento dos cabos contrapeso e a instalação de cabos *underbuilt*.

Uma proposta de continuidade para este trabalho é o desenvolvimento das simulações do cabo *underbuilt* no software ATP, visto que foram utilizados os resultados obtidos em (Moreira, 2022), desenvolvidos no software HEM.

Outro ponto é incluir uma análise técnica ao se utilizar os dispositivos para-raios tipo EGLA. Por ser um dispositivo que ainda não foi implementado em linhas de transmissão do Brasil, suas informações não são de fácil acesso, dificultando sua parametrização para realização de simulações. Dessa forma, para trabalhos futuros seria necessário buscar informações mais concretas de tais dispositivos para as simulações serem mais robustas e confiáveis.

Por fim, uma outra proposta de continuidade é o desenvolvimento de uma análise técnica-econômica das técnicas de melhoria de desempenho de linhas de transmissão estudadas nesta dissertação, buscando avaliar de forma mais aprofundada, do ponto de vista financeiro, qual cenário apresentaria a melhor solução.



Referências Bibliográficas

ATP. (1982). ATP - Eletromagnetic Transients Program Rule Book. Portland: Bonneville Power Administration.

CIGRE. (1991). CIGRE Guide to Procedures for Estimating the Lightning of Transmission Lines, WG 01 (Lightning). Study Committee 33.

CIGRE Brochure 839, “Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines – new aspects”, WG C4.23, Jun. 2021.

EPRI, Transmission line reference book, 345 kV and above, 2 edition ed., Pittsfield, Mass: Electric Power Research Institute, 1982.

Eriksson, A. J. 1987. The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery. 1987, Vol. 2, pp. 859 - 870.

F. S. Almeida, F. H. Silveira and S. Visacro. (2023). A New Approach for Considering the Effect of the Power-Frequency Voltage on the Calculated Lightning Performance of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 3, pp. 2141-2148.

Harrington R. J., & Mueen M. (1996). A simple approach to improve lightning performance of an uprated substation. *IEEE transactions on power delivery*, 11(3), 1633-1639.

Hileman, A. (1999). *Insulation Coordination for Power System*. Boca Raton, FL: CRC.

IEEE. (Dez de 1997). *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*. IEEE Standard 1243-1997.

NASA. Site NASA – Global Precipitation Measurement. 2024. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/TRMM/satellite/LIS>>.

ONS. Site ONS - Mapas. 2024. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-oi-sin/mapas/>>.

ONS. Procedimentos de Rede; Submódulo 2.7: Requisitos mínimos para linhas de transmissão (Agosto, 2022). Piantini, Alexandre. “Lightning interaction with power systems, volume 1”, Institution of Engineering & Technology Editora, São Paulo, SP, 2020.

R. Alipio, S. Visacro. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 56 (5) (Oct. 2014) 1163–1171.

R. Alipio (Julho, 2013). Dependência da frequência dos parâmetros do solo: efeito no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos. Tese de Doutorado, PPGEE - UFMG.

Silveira, F., Visacro, S., & R.E., S. (2017). Lightning Performance of Transmission Lines: Assessing the Quality of Traditional Methodologies to Determine Backflashover Rate of Transmission Lines Taking as Reference Results provided by an Advanced Approach. *Electric Power Systems Research*, Vol. 153 , 60-65.

Silveira, F., Visacro, S., De Conti, A., & Mesquita, C. (Abr de 2012). Backflashovers of Transmission Lines Due to Subsequent Lightning Strokes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 54, nº 2 , 316- 322.

Silveira, F. H.; Visacro, S. Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019.

Silveira, F. H. e Visacro, S. 2020. Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* Agosto de 2020, Vol. 62, pp. 1186 - 1191.

Silveira, F. H., Almeida, F. S. e Visacro, S. 2022. Avaliação do efeito dos parâmetros de corrente de descarga medidos no Brasil no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. *Anais do XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXVI SNPTEE)*. Maio de 2022.

Silveira, Fernando H.; Almeida, Frederico S. ; Visacro, Silverio . Recommendations related to the Peak-current distributions in studies of lightning performance of transmission lines based on the range of critical currents associated with Backflashover. *Electric Power Systems Research*, v. 236, p. 110884, 2024. Souza, R. (Jul de 2013). Avaliação de Metodologias para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas. Dissertação de Mestrado, PPGEE - UFMG.

Visacro S. e Silveira F. H., “Lightning performance of transmission lines: Methodology to design grounding electrodes to ensure an expected outage rate,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, pp. 237-245, Feb 2015

Visacro S., Felipe M. A., Oliveira R. Z., “Non-Conventional Methodology To Improve the Lightning Performance Of Transmission Lines”, *Proceedings of GROUND’2002 – Internacional Conference on Grounding and Earthing & Workshop on Atmospheric Electricity*, pp. 267-270, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 2002.

Visacro S., Silveira F. H., & De Conti A. (2011). The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines. *IEEE transactions on power delivery*, 27(1), 205-213.

Visacro S., Silveira F. H., Pereira B., & Gomes R. M, (2020). Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 180, 106064.

Visacro S., Silveira F. H., Vale M. H. M. & Pomar G. D. Uma experiência no uso de underbuilt wires e aplicação conjugada de dispositivos para-raios e impedâncias limites de pé-de-torre para melhoria de desempenho frente a descarga atmosféricas de linhas de transmissão instaladas em condições inóspitas. *XXV SNPTEE, 2019, Belo Horizonte. Anais do XXV Seminário Nacional De Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, 2019. p. 1-8.

Visacro S., Soares A. J., Oliveira R., Felipe M., Silva A. & Vale M. H. (2004, September). Non-conventional measures for improvement of lightning performance of transmission lines. In *Proc. 27th Int. Conf. Light. Protection* (pp. 684-687).

Visacro S., Soares A. Jr “Enhance of Lightning Performance of Transmission Lines Through Non-Conventional Grounding Practices”, *Proceedings of GROUND’2004–*

Internacional Conference on Grounding and Earthing & First International Conference on Lightning Physics and Effects, pp. 257-261, Belo Horizonte, Brazil, Nov. 2004.

Visacro, S. (2002). *Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento*. São Paulo: ArtLiber.

Visacro, S. (2005). *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*. São Paulo: ArtLiber.

Visacro, S. (Abr de 2004). A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, L07112.

Visacro, S. (Jan de 2007). A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 22, nº 1, 381-386.

Visacro, S., & Alípio, R. (2012). Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2179070.

Visacro, S., & Silveira, F. (2016). Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 31, pp. 1524-1532.

Visacro, S., & Soares, J. A. (Abr de 2005). HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. *IEEE Trans. Power Del*, Vol. 20, nº2, pp. 1026-1208.

Visacro, S., "Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines.," *Journal of Lightning Research*, vol. 1, pp. 60-68, 2007.

Visacro, S., Schroeder, M., Jr.A., S., Cherchiglia, L., & Sousa, V. (2004). Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. *J. Geophys.*, Vol. 109, nº D01105, pp. 1-11.

Visacro, S.; Soares, A. (1995). Análise do Efeito da Intensidade de Corrente de Descarga no Comportamento Transitório de Aterramentos Elétricos. XIII SNPTEE Seminário Nacional de Produção E Transmissão de Energia Elétrica, Balneário Camboriú.

Visacro, S. (2007). Resposta dos Aterramentos Elétricos Frente a Corrente de Descarga. XIX SNPTEE Seminário Nacional de Produção E Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro.