



Universidade Federal  
de São João del-Rei



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL  
ASSOCIAÇÃO AMPLA UFSJ/CEFET - MG**

**TÚLIO OLIVEIRA SILVA E ASSUNÇÃO**

**IMPACTO DO USO DE *UNDERBUILT WIRES* COMO MÉTODO COMPLEMENTAR  
DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE  
TRANSMISSÃO**

**Orientador:** Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder

**Coorientador:** Prof. Dr. Antonio Carlos Siqueira de Lima

**São João del-Rei - MG  
São João del-Rei, 27 de dezembro de 2023**





Universidade Federal  
de São João del-Rei



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL  
ASSOCIAÇÃO AMPLA UFSJ/CEFET - MG**

**TÚLIO OLIVEIRA SILVA E ASSUNÇÃO**

Dissertação apresentada à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Orientador:** Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder

**Coorientador:** Prof. Dr. Antonio Carlos Siqueira de Lima

**São João del-Rei - MG  
São João del-Rei, 27 de dezembro de 2023**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a Deus pelo dom do conhecimento e por guiar-me por caminhos que culminaram neste momento.

Aos meus pais, Shesman e Telma, expresso minha gratidão pelos ensinamentos que permearam toda a minha vida. A meu irmão, Artur, dedico meu reconhecimento pela amizade e incentivo constantes na minha jornada pela Engenharia Elétrica.

Minha noiva, Brunie, merece uma sincera manifestação de agradecimento por sua paciência, apoio constante e compreensão ao longo dessa trajetória desafiadora.

Aos meus avós, agradeço pelo apoio incondicional que sempre ofereceram ao longo dos anos.

Ao Professor Rodolfo Antônio, minha justa gratidão pela disponibilidade, ensinamentos, orientação e paciência ao longo da elaboração deste trabalho.

Ao Professor Marco Aurélio, meu orientador, agradeço por iluminar o caminho que James C. Maxwell traçou, para que eu fosse capaz de enxergá-los.

Ao Professor Antonio Carlos Siqueira de Lima, por me coorientar nessa jornada.

Aos amigos que tive a honra de conhecer através do Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), meu reconhecimento pela troca constante de conhecimentos e pela agradável convivência.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia Elétrica (INERGE), pelo apoio financeiro proporcionado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Esse suporte foi fundamental para a elaboração e conclusão desta pesquisa.

## RESUMO

Este trabalho se concentra na análise da influência do *Underbuilt Wire* (UBW) em sistemas elétricos de alta tensão e extra alta tensão, particularmente no cenário em que ocorre a sobretensão devido a descargas atmosféricas. A modelagem dos sistemas elétricos leva em consideração a geometria das torres, complexidade e não-linearidades, integrando estudos de transitórios eletromagnéticos ao *software Alternative Transients Program* (ATP). Com o intuito de verificar a alocação ótima do UBW, foi criado um ambiente computacional na qual é empregada a linguagem de programação Julia em conjunto com o ATP. Esse ambiente computacional integrado, permite a aplicação do método meta-heurístico de otimização por enxame de partículas. Segundo os resultados, verifica-se a eficácia do UBW na redução de sobretensões, especialmente em solos de alta resistividade e incrementada quando sua posição é otimizada para minimizar as sobretensões. Dentre os resultados obtidos destacam-se aqueles que mostram sistemas com o UBW em combinação com para-raios, demonstrando redução na sobretensão e na energia absorvida pelos para-raios, um parâmetro essencial para a manutenção desses equipamentos. Previstas tais análises, constata-se a efetividade de uma medida complementar de proteção concentrada na diminuição de sobretensões na cadeia de isoladores e proteção adicional aos níveis já proporcionados pelos para-raios.

**Palavras-chave:** Transitório Eletromagnético, Linhas de Transmissão, *Underbuilt Wire*, Descarga Atmosférica, Otimização da posição do *Underbuilt Wire*, ATP, Para-Raios.

## ABSTRACT

This work focuses on the analysis of the influence of the Underbuilt Wire (UBW) in High Voltage and Extra High Voltage electrical systems, particularly in the scenario where overvoltage occurs due to lightning strikes. The modeling of the electrical system takes into account the geometry of the towers, complexity, and non-linearities, integrating studies of electromagnetic transients into the Alternative Transients Program (ATP) software. With the aim of verifying the optimal allocation of the UBW, the Julia programming language was used in conjunction with the ATP. This integrated computational environment allows the application of the meta-heuristic method of optimization by particle swarm. According to the results, the effectiveness of the UBW in reducing overvoltages is verified, especially in high resistivity soils and increased when its position is optimized to minimize overvoltages. Among the results obtained, those that stand out are those that bring systems that have the UBW in combination with surge arresters, showing a reduction in overvoltage and in the energy absorbed by the lightning rods, an essential parameter for the maintenance of these equipment. Given these analyses, the effectiveness of a complementary protection measure focused on reducing overvoltages in the insulator string and additional protection to the levels already provided by the surge arresters is verified.

**Palavras-chave:** Electromagnetic transient, Transmission lines, Underbuilt Wire, Lightning stroke, Underbuilt Wire position optimization, ATP, Surge Arresters.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> . . . . .	<b>12</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1 Relevância do tema abordado . . . . .	13
1.2 Contextualização da dissertação . . . . .	14
1.2.1 Objetivo geral . . . . .	15
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	16
1.3 Metodologia . . . . .	17
1.4 Organização do texto . . . . .	18
1.5 Publicações decorrentes da dissertação . . . . .	18
<b>2 MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO</b> . . . . .	<b>20</b>
2.1 Visão geral do capítulo . . . . .	20
2.2 Modelagem da Linha de Transmissão . . . . .	20
2.3 Modelagem de Torres . . . . .	21
2.3.1 Impedância dos segmentos da torre . . . . .	23
2.3.2 Comprimento e velocidade de propagação da onda na torre . . . . .	24
2.3.3 Cálculo da Torre de AT . . . . .	25
2.3.4 Cálculo da Torre de EAT . . . . .	26
2.3.5 Introduzir os modelos de torres no <i>ATPDraw</i> . . . . .	30
2.4 Modelo de Descarga Atmosférica . . . . .	30
2.5 Modelo de dispositivo Para-raios . . . . .	32
2.5.1 Implementação do para-raios no <i>ATPDraw</i> . . . . .	33
2.6 Modelagem do Sistema de Aterramento . . . . .	37
2.6.1 Implementação da impedância harmônica via HEM . . . . .	37
2.7 Síntese do capítulo . . . . .	39
<b>3 COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO</b> . . . . .	<b>40</b>
3.1 Visão geral do capítulo . . . . .	40
3.2 Variáveis geográfica e atmosférica . . . . .	41
3.2.1 Cálculo da DS para o sistema de AT . . . . .	41
3.2.2 Cálculo da DS para o sistema de EAT . . . . .	44
3.2.3 Modelagem da Cadeia de Isoladores . . . . .	47
3.3 Síntese do capítulo . . . . .	49
<b>4 OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO UBW</b> . . . . .	<b>50</b>
4.1 Visão geral do capítulo . . . . .	50
4.2 Definição do Problema de Otimização . . . . .	51
4.3 Método de Otimização . . . . .	52
4.4 Solução Ótima e o ATP . . . . .	53

4.5	Parâmetros do PSO . . . . .	53
4.6	Evolução das partículas ao longo das iterações . . . . .	54
4.7	Síntese do capítulo . . . . .	55
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES . . . . .</b>	<b>56</b>
5.1	Visão geral do capítulo . . . . .	56
5.2	Caso Base . . . . .	57
5.3	Sobretensões para LTs inoperantes . . . . .	58
5.4	Sobretensões para os sistemas com a LT operante . . . . .	60
5.5	Influência do UBW em conjunto com os elementos para-raios . . . . .	63
5.5.1	Sobretensões nos para-raios . . . . .	63
5.5.2	Correntes nos para-raios . . . . .	65
5.5.3	Energias Absorvidas pelos para-raios . . . . .	68
5.6	Influência da localização otimizada do UBW . . . . .	71
5.6.1	Sobretensão com a LT inoperante . . . . .	72
5.6.2	Sobretensões com a LT em operação . . . . .	73
5.6.3	Sobretensões nos para-raios . . . . .	74
5.6.4	Correntes nos para-raios . . . . .	75
5.6.5	Energia nos para-raios . . . . .	77
5.7	Síntese do capítulo . . . . .	78
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>79</b>
6.1	Síntese da Dissertação e Principais Resultados . . . . .	79
6.2	Principais Resultados . . . . .	79
6.3	Propostas de Trabalhos Futuros . . . . .	80
6.4	Considerações Finais . . . . .	81
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>Apêndice . . . . .</b>	<b>85</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da estrutura vertical da torre aproximada por cilindros [Adaptado de [13] . . . . .	23
Figura 2 – Segmentação da torre do sistema de AT [desenho feito a mão pelo autor] . .	26
Figura 3 – Segmentação da torre do sistema de EAT [desenho feito a mão pelo autor] .	27
Figura 4 – Representação do segmento 2 da torre modelada para o sistema de EAT . . .	28
Figura 5 – Representação do segmento 3 da torre modelada para o sistema de EAT . . .	28
Figura 6 – Representação do segmento 4 da torre modelada para o sistema de 230kV .	29
Figura 7 – Modelagem no <i>ATPDraw</i> das torres das linhas de transmissão . . . . .	31
Figura 8 – Modelo de para-raios IEEE implementado no <i>ATPDraw</i> . . . . .	33
Figura 9 – Relação $V \times I$ para os resistores não lineares do modelo IEEE. (Adaptado de [18]). . . . .	35
Figura 10 – Modelo de Fonte Dupla Exponencial . . . . .	35
Figura 11 – Circuito elétrico para verificar a impedância harmônica . . . . .	38
Figura 12 – Comparação das resposta de impedância harmônica na linguagem Julia e no <i>ATPDraw</i> . . . . .	38
Figura 13 – Estrutura de interesse da torre do sistema de AT para o cálculo do comprimento da cadeia de isoladores . . . . .	42
Figura 14 – Fluxograma do cálculo iterativo da DS para o sistema elétrico de AT . . . .	43
Figura 15 – Estrutura de interesse da torre do sistema de EAT para o cálculo do comprimento da cadeia de isoladores . . . . .	45
Figura 16 – Janela do condutor central da torre do sistema de EAT . . . . .	45
Figura 17 – Restrição da posição do UBW em relação à coordenação de isolamento . . .	52
Figura 18 – Evolução das partículas ao longo das iterações até o ponto ótimo . . . . .	54
Figura 19 – Torres com a distribuição geométrica dos condutores dos sistemas base (a) Sistema de AT (b) Sistema de EAT . . . . .	57
Figura 20 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	58
Figura 21 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	59
Figura 22 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	59
Figura 23 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	59
Figura 24 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	60
Figura 25 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	61

Figura 26 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	61
Figura 27 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	61
Figura 28 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de AT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	63
Figura 29 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	64
Figura 30 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de AT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	64
Figura 31 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	64
Figura 32 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	66
Figura 33 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	66
Figura 34 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	67
Figura 35 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	67
Figura 36 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	69
Figura 37 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	69
Figura 38 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	70
Figura 39 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW . . . . .	70
Figura 40 – Torres com a distribuição geométrica dos condutores dos sistemas base (a) Sistema de AT com UBW fora do ponto ótimo (b) UBW localizado no ponto ótimo . . . . .	71
Figura 41 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . . .	72
Figura 42 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . . .	72

Figura 43 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . . .	73
Figura 44 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . . .	73
Figura 45 – Sobretensão nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . . .	74
Figura 46 – Sobretensão nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . . .	75
Figura 47 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . .	76
Figura 48 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima . . . .	76
Figura 49 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima	77
Figura 50 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima	77
Figura 51 – Representação do caso base no <i>ATPDraw</i> para o sistema de AT . . . . .	86
Figura 52 – Representação do caso base no <i>ATPDraw</i> para o sistema de EAT . . . . .	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Distribuição geométrica dos condutores da torre do sistema de 138kV. . . . .	25
Tabela 2	– As variáveis de entrada para cada segmento . . . . .	25
Tabela 3	– Valores de impedância e comprimento para os segmentos da torre do sistema de AT . . . . .	26
Tabela 4	– Distribuição geométrica dos condutores da torre do sistema de EAT . . . . .	29
Tabela 5	– As variáveis de entrada para cada segmento . . . . .	30
Tabela 6	– Valores de impedância e comprimento para os segmentos da torre do sistema de EAT . . . . .	30
Tabela 7	– Parâmetros das correntes de Heidler [17] . . . . .	32
Tabela 8	– Valores de $A_0$ e $A_1$ do modelo IEEE . . . . .	34
Tabela 9	– Tabela com parâmetros de entrada no <i>software ATPDraw</i> das fontes dupla exponenciais . . . . .	36
Tabela 10	– Tabela com parâmetros físicos e elétricos dos para-raios usados para cada sistema elétrico com valores comerciais . . . . .	36
Tabela 11	– Valores do método iterativo para estimar o comprimento da cadeia de isoladores para o sistema elétrico de AT . . . . .	43
Tabela 12	– Valores comerciais dos isoladores poliméricos para AT . . . . .	44
Tabela 13	– Valores do método iterativo para estimar o comprimento da cadeia de isoladores para o sistema elétrico de 230 kV . . . . .	46
Tabela 14	– Valores comerciais dos isoladores poliméricos para AT . . . . .	47
Tabela 15	– Valores dos parâmetros do método DE para modelar a cadeia de isoladores das linhas de AT e EAT . . . . .	49
Tabela 16	– Picos de sobretensão (kV) na LT inoperante de AT . . . . .	60
Tabela 17	– Picos de sobretensão (kV) na LT inoperante de EAT . . . . .	60
Tabela 18	– Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT com a LT em operação . . . . .	62
Tabela 19	– Picos de sobretensão (kV) no sistema de EAT com a LT em operação . . . . .	62
Tabela 20	– Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT equipado com três para-raios . . . . .	65
Tabela 21	– Picos de sobretensão (kV) no sistema de EAT equipado com três para-raios . . . . .	65
Tabela 22	– Picos de Corrente (A) no sistema de AT equipado com três para-raios . . . . .	67
Tabela 23	– Picos de Corrente (A) no sistema de EAT equipado com três para-raios . . . . .	68
Tabela 24	– Energia total absorvida (J) pelos para-raios no sistema de AT . . . . .	70
Tabela 25	– Energia total absorvida (J) pelos para-raios no sistema de EAT . . . . .	71
Tabela 26	– Picos de sobretensão (kV) na LT inoperante de AT . . . . .	73
Tabela 27	– Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT com LT em operação . . . . .	74
Tabela 28	– Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT equipado com três para-raios . . . . .	75
Tabela 29	– Picos de correntes (A) no sistema de AT equipado com três para-raios . . . . .	76
Tabela 30	– Energia total absorvida (J) pelos para-raios no sistema de AT . . . . .	78

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Relevância do tema abordado

A crescente demanda por energia elétrica destaca a urgente necessidade de modernização do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro. Em decorrência desse cenário, surge a necessidade de aprimorar o sistema de proteção das linhas de transmissão (LTs) que conectam os diversos elementos do SEP. Um dos focos da proteção está na implementação de medidas eficazes para mitigar os impactos das descargas atmosféricas (DAs), visando não apenas à segurança dos equipamentos conectados ao SEP, mas também à elevação da confiabilidade do sistema, traduzida na redução do número de falhas e interrupções no fornecimento de energia.

Ao concentrar a análise ao estado de Minas Gerais, torna-se evidente um agravamento significativo no que tange às DAs. Esse estado, caracterizado por altas taxas de incidência de DAs além, às características dos solos com elevados valores de resistividade, resulta em sobretensões acentuadas nas cadeias de isoladores das LTs. Tal cenário resulta no aumento considerável da probabilidade de interrupções no fornecimento de energia, conforme é detalhado na referência [1].

Dados provenientes da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) indicam que aproximadamente 70% dos desligamentos não programados em suas LTs de até 230 kV ocorrem devido à incidência de DAs, como delineado por [2]. Esses números confirmam a urgência de aprimorar os métodos de proteção contra DAs, especialmente no contexto específico de Minas Gerais.

A fim de unificar a atualização das LTs e reduzir o número de desligamentos relacionados às DAs, devem ser direcionados novos estudos à compreensão da interação entre o SEP e as DAs. No panorama da coordenação de isolamento, diversas técnicas buscam mitigar os efeitos das DAs, como a instalação de cabos para-raios, a redução da resistência de aterramento das torres de transmissão e a inclusão de dispositivos para-raios em paralelo às cadeias de isoladores das torres. A implementação conjunta desses elementos forma um sistema de proteção que demonstrou melhorar significativamente o desempenho da linha, conforme evidenciado em dissertações anteriores [3, 4], defendidas no programa de pós-graduação em engenharia elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de

Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Apesar da eficácia demonstrada pelos para-raios na redução de sobretensões, há uma lacuna na literatura em relação aos estudos sobre a energia absorvida por esses dispositivos durante a ocorrência de DAs. Informações técnicas nesse âmbito tornam essencial a realização de estudos específicos, considerando as condições adversas a que esses componentes são submetidos, que implicam em necessidades de reposições antecipadas. Assim, a instalação de para-raios, juntamente com um projeto de aterramento adequado, não deve ser a única forma de proteção da linha. A experiência prática sugere que a adoção de técnicas complementares é a abordagem mais prudente na engenharia aplicada.

Diante desse panorama, torna-se evidente a importância de explorar abordagens adicionais de proteção no contexto das interações entre DAs e LTs. Nesse contexto, técnicas não-convencionais, como a utilização de cabos *Underbuilt Wire* (UBW), são encontrados na literatura. Esses cabos, instalados abaixo da fase inferior da LT, buscam reduzir sobretensões, oferecendo um caminho alternativo para as ondas de corrente provenientes da DA e amplificando o efeito de acoplamento entre os condutores. A combinação desses efeitos resulta na diminuição das sobretensões na cadeia de isoladores, contribuindo para a melhoria do desempenho da linha de transmissão [5].

Neste sentido, esta dissertação apresenta um estudo detalhado sobre a técnica de implementação do UBW, oferecendo uma base teórica para futuras investigações e para projetos de LT que visem a utilizar o UBW como uma medida suplementar de proteção.

## **1.2 Contextualização da dissertação**

A abordagem adotada nesta dissertação não apenas é de interesse da comunidade científica, ao explorar um método não convencional de proteção contra DAs em LTs, mas também chama a atenção das empresas do setor energético, especialmente aquelas envolvidas na transmissão e manutenção de LTs. Embora a instalação inicial do UBW possa ser vista como um investimento adicional, sua incorporação apresenta justificativa plausível sob uma perspectiva de longo prazo, uma vez que tem o potencial de reduzir sobretensões na cadeia de isoladores da LT. Essa redução, se confirmada através dos resultados, conduz a melhorias significativas no desempenho da LT, promovendo não apenas o aprimoramento da infraestrutura do SEP, mas

também fortalecendo a continuidade no serviço de transmissão de energia e, por conseguinte, aumentando a confiabilidade do sistema.

Cabe ressaltar que a implementação do UBW não constitui uma técnica inovadora no meio científico, originalmente proposto no trabalho de [6] e referido como condutores aterrados abaixo das fases. Ademais, existem estudos recentes sobre seu emprego em linhas de Extra Alta Tensão (EAT) [5, 7]. No entanto, observa-se uma lacuna na avaliação do impacto do UBW quando utilizado em conjunto com as técnicas convencionais de proteção. Por ser um condutor aterrado abaixo das fases que percorre vários vãos das LTs, seus efeitos se propagam por todos os elementos do sistema que interagem com as DAs, especialmente LTs, torres, para-raios e o sistema de aterramento. Nesse sentido, é de fundamental importância que seja feita uma análise minuciosa em um sistema que englobe todos esses elementos, visando a compreender de que forma a implementação do UBW afeta a eficácia do conjunto inicial de proteção, composto por aterramento e para-raios.

Ao realizar essa análise detalhada, é de grande relevância que esses estudos forneçam resultados adequados aos estudos de transitórios eletromagnéticos. Para isso, é necessário que os modelos matemáticos utilizados representem da forma mais fidedigna possível as DAs e cada componente do SEP que interage com as DAs. Para que o objetivo seja devidamente alcançado, este estudo culmina na avaliação do impacto do UBW como uma medida adicional de proteção, com o auxílio do *Alternative Transients Program* (ATP) [8].

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é realizar comparações focadas às sobretensões nas cadeias de isoladores das linhas, e avaliar o desempenho dos para-raios quando utilizados em conjunto ou de forma isolada com o UBW. Essas análises abrangem diferentes cenários, visando a diversificar as possibilidades de aplicação do UBW. Os cenários considerados envolvem sistemas de transmissão de Alta Tensão (AT), representados por uma tensão de operação de 138 kV e de EAT por 230 kV<sup>1</sup>, levando em conta solos com baixa (300  $\Omega\text{m}$ ) e alta (4.000  $\Omega\text{m}$ ) resistividades. Para avaliar o impacto do UBW em variados contextos, são comparados sistemas que contenham

<sup>1</sup> A classificação de AT e EAT é feita baseada na referência [1], a qual trata da coordenação de isolamento de LTs.

ou não equipamentos para-raios. Além disso, é conduzido um estudo específico sobre a relevância do posicionamento adequado do UBW, com o intuito de identificar de que forma sua localização influencia nos resultados obtidos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, que consiste em mensurar o impacto do UBW em LTs por meio de simulações, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

1. **Estudo bibliográfico dos modelos envolvendo o sistema de transmissão:** Realizar uma revisão aprofundada dos principais modelos que representam os elementos essenciais das LTs, DAs, torres, para-raios, cadeias de isoladores e sistemas de aterramento. Este passo visa garantir a escolha de modelos adequados para o estudo.
2. **Implementação dos modelos do sistema de transmissão no ATP:** Utilizar o ATP para a implementação computacional do sistema, integrando os modelos apropriados dos diversos componentes selecionados. Isso proporcionará um ambiente de simulação adequado, no qual todos os componentes estarão associados.
3. **Estudo de Coordenação de Isolamento:** Conduzir um estudo de coordenação de isolamento em cada sistema (AT e EAT) para estabelecer os limites de validade do posicionamento do condutor UBW. Esse estudo leva ao problema de otimização da posição do UBW na linha de AT.
4. **Desenvolvimento de Ferramenta de Comunicação Julia-ATP:** Criar uma ferramenta que habilite a comunicação entre a linguagem Julia e o ATP, permitindo a realização de múltiplas simulações de forma eficiente e sistemática, sem a necessidade de intervenção do usuário.
5. **Otimização da alocação do UBW:** Abordar o problema de otimização relacionado à posição do UBW por meio da aplicação de um método de otimização adequado. Isso visa a determinar a localização mais eficaz do UBW em termos de mitigação de sobretensões nas três fases da linha de AT.



Esses objetivos específicos são interdependentes e, quando cumpridos, forma-se a base para a realização do objetivo geral proposto.

### 1.3 Metodologia

A metodologia adotada nesta dissertação abrange os seguintes estudos e procedimentos:

1. **Estudo do Estado da Arte:** Realização de uma revisão abrangente das modelagens eletromagnéticas relacionadas aos principais modelos que representam os elementos das LTs, DA, torres, para-raios, cadeias de isoladores e sistemas de aterramento. Em paralelo é feita a pesquisa aprofundada sobre UBW.
2. **Modelagem dos Componentes:** Modelagem individual de cada componente no *software* *ATPDraw*. Subsequentemente, integração desses elementos em um sistema elétrico.
3. **Cálculo da Coordenação de Isolamento:** Avaliação da coordenação de isolamento nos sistemas de AT e EAT para a inclusão de um novo condutor sem violar o isolamento existente.
4. **Desenvolvimento de Ferramenta Integrada:** Desenvolvimento de uma ferramenta capaz de integrar a linguagem Julia e o ATP para conduzir o estudo de otimização da posição do UBW na LT de AT.
5. **Simulação do Sistema no ATPDraw:** Condução de simulações dos sistemas no *ATPDraw* em diferentes cenários, sendo eles:
  - LT inoperante, sem tensão de operação e sem elemento para-raio;
  - LT em operação, considerando a tensão de operação e sem elemento para-raio;
  - LT em operação, com três para-raios em paralelo à cadeia de isoladores na torre onde ocorre a incidência da DA.
6. **Análise Gráfica e Numérica:** Realização de uma análise abrangente, tanto gráfica quanto numérica, dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

Essa metodologia visa não apenas à execução das simulações, mas também à compreensão aprofundada das interações entre os componentes do sistema elétrico, permitindo uma avaliação rigorosa do impacto do UBW na mitigação de sobretensões nas LTs.

#### 1.4 Organização do texto

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo esta introdução.

O capítulo 2 é dedicado à apresentação dos modelos empregados. Nesse capítulo, são justificados os modelos utilizados, destacando de maneira concisa as restrições, condições e vantagens inerentes a cada componente. A clareza desses detalhes serve para a compreensão da robustez e aplicabilidade dos modelos selecionados.

No capítulo 3, realiza-se o cálculo necessário para garantir a integridade da coordenação de isolamento do sistema, determinando o comprimento da cadeia de isoladores e os limites de posicionamento do UBW.

O capítulo 4 detalha a comunicação entre a linguagem de programação Julia e o *software* ATP, abordando a incorporação do método de otimização da posição do UBW nessa ferramenta.

No capítulo 5, são apresentados inicialmente os casos base simulados. Em seguida, os resultados para cada cenário delineados na seção 1.3 são apresentados em seções distintas. A parte final desse capítulo é reservada para a comparação da eficiência do UBW em diferentes posições, considerando o ponto ótimo calculado no capítulo 4.

O capítulo 6 traz as conclusões derivadas dos resultados obtidos, bem como sugestões sobre como esses resultados podem ser aplicados. Posteriormente às conclusões, são apresentadas propostas para trabalhos futuros.

#### 1.5 Publicações decorrentes da dissertação

Durante a elaboração desta dissertação, foram elaborados três artigos:

1. O primeiro artigo intitulado **Estudo Comparativo do Ajuste de Funções Racionais em Modelos de Linhas Aéreas de Transmissão**, foi apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos em 2022 na cidade de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul.

Esse artigo mostra uma comparação do uso do Ajuste Assintótico de Bode e do Ajuste Vetorial para estudos de transitórios eletromagnéticos.

2. O segundo artigo, intitulado de **Avaliação de Energia Absorvida por Para-Raios de Linhas de Transmissão com *Underbuilt Wire* Devido a Descarga Atmosférica** foi apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos de 2023 na cidade de Manaus, no estado do Amazonas. Esse artigo mostra que, quando presente, o UBW reduz a energia absorvida por para-raios durante a descarga atmosférica.
3. O terceiro artigo, intitulado de ***Impact of Underbuilt Wire Position on Transmission Line Performance***, apresentado no IEEE Colombian Caribbean Conference (C3), na cidade de Barranquilla, Colombia, em 2023. Esse artigo apresenta um método de determinar a posição do UBW por meio da distribuição de Poisson.

## 2 MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO

### 2.1 Visão geral do capítulo

O objetivo deste capítulo é fornecer uma descrição completa dos modelos utilizados neste estudo, apresentando suas características qualitativas e sua implementação no ATP. Cada seção aborda as particularidades, conceitos fundamentais, aplicações específicas e objetivos associados a cada componente.

As seções se iniciam com uma análise qualitativa do modelo empregado, destacando a justificativa deste ter sido considerado adequado para o estudo. Em sequência, como parte essencial do estudo, é apresentada de maneira concisa a introdução do modelo no ATP. A combinação desses componentes no ATP resulta em um sistema elétrico apropriado para a realização das simulações.

Esse sistema holístico<sup>1</sup>, em perfeita analogia à palavra, incorpora metodologias robustas e empíricas. O foco dessas metodologias é compreender como o sistema reage diante da ocorrência de uma DA. Essa abordagem integrada permite uma análise profunda das interações no sistema elétrico, contribuindo para a exatidão e relevância dos resultados obtidos nas simulações.

### 2.2 Modelagem da Linha de Transmissão

Como um dos âmagos deste trabalho, a linha de transmissão é a peça fundamental em um estudo que avalia a interação do sistema elétrico com uma DA. Na literatura técnica, são apresentados diferentes modelos de linha, destacando os seguintes:

1. **Modelo PI:** Utiliza parâmetros concentrados, sendo inadequado para estudo de transitórios associados às DAs.
2. **Modelo de Bergeron:** Considera a natureza dos parâmetros distribuídos da linha, sendo mais adequado para estudo de transitórios quando comparado ao modelo PI. No entanto, o modelo de Bergeron não é indicado para transitórios devidos às DAs, por se tratar de um transitório da ordem de microssegundos.

---

<sup>1</sup> def. Holismo, também chamado *Não Reduccionismo*, define que as propriedades de um sistema não podem ser explicadas apenas pela soma dos seus componentes, no qual o sistema total determina como se comportam as partes.

3. **Modelo de J.Marti:** Esse modelo, assim como o de Bergeron, considera a linha como parâmetros distribuídos, mas, como diferencial, ele também considera a dependência da frequência desses parâmetros. Os cálculos desse modelo são realizados no domínio modal, o qual permite realizar estudos de transitórios referentes às DAs, contemplando transitórios da ordem de microssegundos.
4. **Modelo ULM:** Esse modelo é o mais adequado para estudos de transitórios em consequência de DAs. Além de abranger as vantagens do modelo de J.Marti, ele realiza seus cálculos no domínio das fases, que contribui para maior exatidão nos resultados. Apesar de ser o mais indicado, não apresenta diferenças significativas para o método de J.Marti em linhas de transmissão aéreas. Entretanto, em linhas aterradas ou submersas o método de J.Marti apresenta erros significativos. Nesses casos utiliza-se o ULM.

Para maiores detalhes sobre as subjetividades desses modelos de linha e comparação entre eles, recomenda-se a leitura de [9]. Para este trabalho, emprega-se o modelo proposto por J. Marti [10]. É uma escolha amplamente adotada para simulações de transitórios eletromagnéticos.

A principal vantagem do J.Marti sobre o ULM se deve ao fato de que o primeiro utiliza ajustes mais simples. Além disso, o modelo de J.Marti já está integrado ao ATP, não sendo necessária implementação externa do modelo<sup>2</sup>.

### 2.3 Modelagem de Torres

Um trabalho relevante sobre transitórios em torres de transmissão é abordada em [11]. Nesse trabalho, os autores modelam a torre por meio de multicondutores cilíndricos verticais sem perdas. Embora esse modelo atenda aos requisitos de exatidão para este estudo, ele não abrange explicitamente os condutores horizontais, essenciais para modelar a torre do sistema de EAT, a qual possui segmentos horizontais. Em [11], destaca-se a necessidade de considerar as interações entre o circuito modelado e os condutores horizontais. No entanto, a própria referência reconhece a falta de contemplação dessas interações, recomendando uma análise experimental prévia para

<sup>2</sup> É possível encontrar na versão mais recente do ATP o modelo ULM, no entanto encontra-se em fase de desenvolvimento, visto que está em fase experimental. Esse modelo foi desenvolvido pelo Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (LRC) da UFMG.

determinar a viabilidade do método em tais casos. Esses casos podem ser generalizados como conexões na estrutura da torre que têm um impacto direto na onda viajante que percorre a torre.

Diante disso, é necessário avaliar outro método para modelar a torre. O trabalho de conclusão de curso de [12] compara objetivamente várias metodologias de modelagem de torres, realizando um estudo minucioso que explora o tema em questão. A partir de uma avaliação das metodologias de modelagem de torres, conclui-se que o modelo proposto por [13] é o mais adequado para atender às necessidades desta pesquisa.

Os principais pontos que levaram a essa conclusão são:

1. **Validação Empírica:** O modelo proposto por [13] é validado empiricamente e desenvolvido com o intuito de representar torres de forma geral para estudos de transitórios. Assim, é capaz de contemplar os segmentos horizontais na torre de EAT.
2. **Consideração de Diversos Elementos:** Esse modelo incorpora equações que compreendem não apenas o efeito dos condutores verticais, mas também os efeitos causados por mísulas e estruturas horizontais. Além disso, o modelo de Hara inclui a influência das treliças nas ondas viajantes, considerando um maior número de elementos adjacentes aos condutores verticais da torre.

Com o modelo de torre definido, deve-se realizar os cálculos necessários para a torre conforme a metodologia proposta por [13]. Em uma análise mais detalhada do modelo, verifica-se que há certa similaridade com o modelo de [11], em que são considerados multicondutores cilíndricos verticais, conforme ilustrado na Figura 1.

Esse modelo também representa as seções da torre por linhas de transmissão com parâmetros distribuídos e constantes. Essas seções de linhas são representadas no ATP pelas variáveis de velocidade em que a onda propaga nessa linha, seu comprimento e a impedância de surto. Esse modelo trata a torre como composta por um conjunto de três tipos diferentes de impedâncias. A primeira corresponde aos condutores verticais, onde a onda viajará predominantemente ( $Z_T$ ), a segunda representa as mísulas, ou braços, da torre ( $Z_A$ ) e a impedância devido às treliças da torre ( $Z_L$ ).

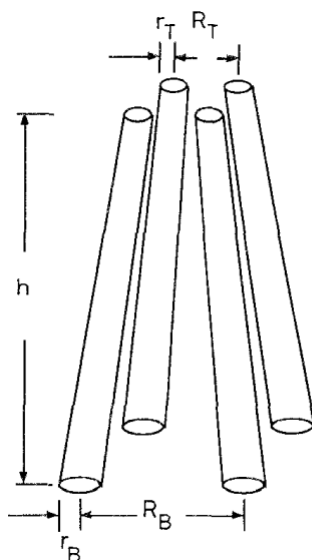


Figura 1 – Representação da estrutura vertical da torre aproximada por cilindros [Adaptado de [13]]

Em síntese, deve-se dividir a torre em  $k$  segmentos; cada segmento terá suas respectivas impedâncias, dependendo da necessidade. Desse modo, para cada segmento, faz-se necessária uma análise minuciosa da geometria da torre para realizar uma modelagem adequada com as devidas impedâncias.

### 2.3.1 Impedância dos segmentos da torre

A impedância de surto  $Z_{T_k}$  representa as estruturas verticais da torre e pode ser calculada por (2.1)<sup>3</sup>.

$$Z_{T_k} = 60 \left( \ln \frac{2\sqrt{2}h_k}{r_{eq_k}} - 2 \right) \quad (2.1)$$

em que  $h_k$  é a distância entre o condutor vertical  $k$  e o solo,  $r_{eq_k}$  é o raio equivalente do segmento  $k$  e deve ser calculado pela Eq. (2.2), que terá como base para o cálculo a estrutura e comprimento apresentados na Fig. 1.

$$r_{eq_k} = 2^{1/8} (r_{T_k}^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} (R_{T_k}^{1/3} R_B^{2/3})^{3/4} \quad (2.2)$$

em que as variáveis dessa equação são apresentadas na Fig. 1. É importante observar que os valores de  $r_{T_k}$  e  $r_B$  são exclusivos para torres fabricadas com estruturas tubulares. No caso de

<sup>3</sup> Ressalta-se que todas as equações apresentadas nesta seção, a qual trata da modelagem de torres, são descritas em [13].

torres com estruturas formadas por ângulos retos, recomenda-se consultar a referência [13], que oferece uma explicação detalhada para essa situação.

Os resultados experimentais conduzidos por [13] indicam uma redução de aproximadamente 10% na impedância dos multicondutores verticais quando as treliças são consideradas. Além disso, observa-se uma diferença no tempo que a tensão atinge seu valor máximo nos resultados empíricos, sendo maior nos casos em que as treliças são contabilizadas. Isso sugere que a onda viajante leva mais tempo para atravessar a estrutura vertical que possui treliças.

A partir de uma análise minuciosa dos resultados obtidos de forma empírica, é notado por [13] a deficiência do modelo, e, como forma de solução, é incluída a impedância que representa as treliças. Para incorporar esse efeito na estrutura da torre, é adicionada em paralelo à impedância  $Z_{TK}$  a impedância  $Z_{LK}$ . O cálculo de  $Z_{LK}$  é realizado com base na Eq. (2.3).

$$Z_{LK} = 9 \cdot Z_{TK} \quad (2.3)$$

O efeito dos braços horizontais da torre, comumente chamados de mísulas, também são considerados. Sob uma perspectiva teórica, esses caminhos oferecem impedância às ondas viajantes. A impedância que modela a influência das mísulas no modelo é calculada por (2.4).

$$Z_{AK} = 60 \ln \left( \frac{2h_K}{r_{AK}} \right) \quad (2.4)$$

em que  $h_K$  é a altura do braço (associado à altura calculada anteriormente para Eq. (2.1)) e  $r_{AK}$  é o raio equivalente, que pode ser obtido a partir do valor da largura da torre no ponto de junção, sendo igual a 1/4 dessa largura.

### 2.3.2 Comprimento e velocidade de propagação da onda na torre

O modelo adotado segue uma metodologia própria para considerar o comprimento e velocidade de propagação da onda nos condutores verticais que modelam a torre. Para o cálculo do comprimento de  $Z_{TK}$  é utilizado o comprimento vertical real do segmento;  $Z_{LA}$  tem 1,5 vezes o comprimento de  $Z_{TK}$ ; e por fim,  $Z_{AK}$  possui um comprimento igual a distância da ponta do braço até o ponto de junção com a torre.



A velocidade de propagação da onda viajante é a mesma da luz no vácuo ( $3 \cdot 10^8 m/s$ ). Uma explicação empírica é fornecida por [13], apresentando dados que comprovam que, quando considerada 80% da velocidade da luz (assim como visto em outros modelos de torre), o modelo apresenta um erro maior dos obtidos nos experimentos.

### 2.3.3 Cálculo da Torre de AT

Esta subseção visa a apresentar o cálculo detalhado da impedância de surto da torre de AT, modelada pelo modelo de Hara. Os dados geométricos da torre estão dispostos na Tabela 1<sup>4</sup>.

Tabela 1 – Distribuição geométrica dos condutores da torre do sistema de 138kV.

Condutor	A	B	C	C.G.
Altura (m)	22,15	20,35	18,55	26,55
Distância Horizontal (m)	-2,75	2,75	-2,75	0

Para o modelo da torre em que não há a presença do UBW a torre é dividida em 4 segmentos, como apresentado na Figura 2.

Para os 4 segmentos são feitas aplicações diretas das Eqs. (2.1), (2.3) e (2.4).

As variáveis de cada segmento são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – As variáveis de entrada para cada segmento

Segmento	$h_k$ (m)	$R_k$ (m)	$r_k$ (m)
1	26,55	0,7	0,065
2	23,65	0,7	0,065
3	21,85	0,7	0,065
4	20,05	0,7	0,065

Fazendo uma aplicação direta na Eq. (2.2) tem-se como resultado o raio equivalente para cada um dos segmentos da torre. Portanto, pode-se calcular a impedância de cada segmento, os quais estão evidenciados na Tabela 3.

Para o caso em que a torre tiver o condutor UBW, haverá um segmento adicional. Esse segmento adicional não modificará os valores calculados na Tabela 3, exceto pelo comprimento dos

<sup>4</sup> Um valor comum para a seção transversal das estruturas cilíndricas dessa torre é de 0,065m, assim como utilizado por [14].

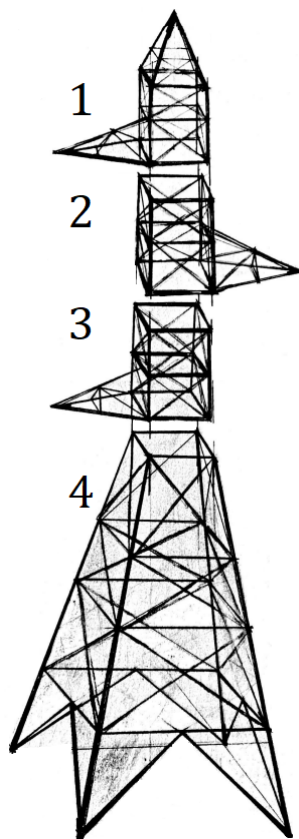


Figura 2 – Segmentação da torre do sistema de AT [desenho feito a mão pelo autor]

Tabela 3 – Valores de impedância e comprimento para os segmentos da torre do sistema de AT

Segmento	$Z_T$ ( $\Omega$ )	$l_T$ (m)	$Z_L$ ( $\Omega$ )	$l_L$ (m)	$Z_A$ ( $\Omega$ )	$l_A$ (m)
1	190,98	2,9	1.718,8	4,35	342,91	2
2	184,04	1,8	1.656,6	2,7	335,97	2
3	179,29	1,8	1.613,6	2,7	331,22	2
4	109,67	20,05	987,1	30,07	-	-

segmentos que serão relacionados à altura do UBW. Esse último assunto é tratado posteriormente, quando o modelo de torre for inserido no *ATPDraw*<sup>5</sup>.

### 2.3.4 Cálculo da Torre de EAT

A torre do sistema de EAT possui uma estrutura excessivamente mais complexa de modelar quando comparada à torre anterior. Diante disso, essa torre é seccionada em 9 segmentos assim como mostrado na Fig. 3, os quais possuem formas geométricas distintas. Dentre esses segmentos, 4 deles possuem simetria, simplificando o cálculo de suas impedâncias.

<sup>5</sup> O *ATPDraw* é a interface gráfica do ATP.

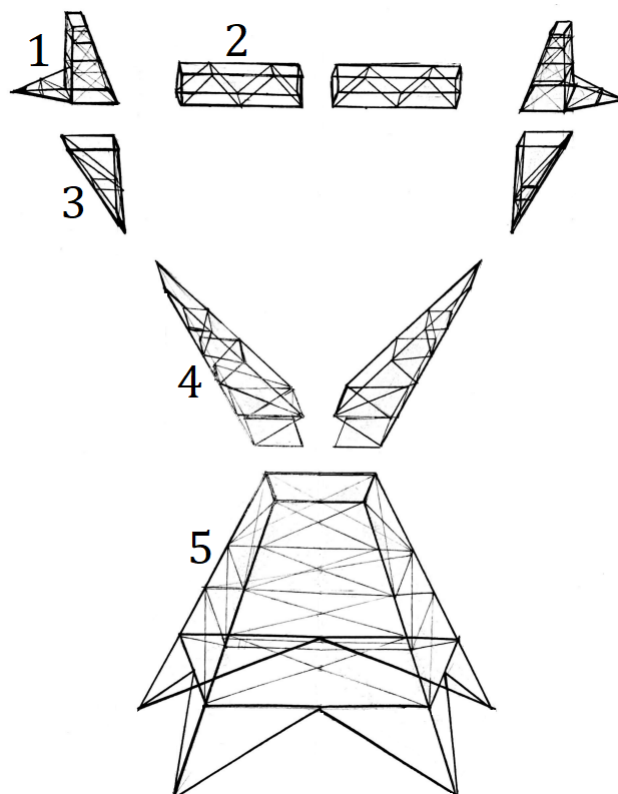


Figura 3 – Segmentação da torre do sistema de EAT [desenho feito a mão pelo autor]

Algumas considerações devem ser feitas antes de realizar os cálculos para essa torre.

- O primeiro segmento é calculado pela forma direta das Eqs. (2.1), (2.3) e (2.4). Também deve-se considerar o raio ( $R_B$ ) tendo a mesma largura do ponto de junção do segmento 1 com 3.
- O segundo segmento é calculado a partir da Eq. (2.4), a qual é usada para condutores horizontais. A condição para usar essa equação é calcular o raio equivalente de acordo com a geometria adequada do segmento. Para isso, é feito o cálculo utilizando a altura do segmento como  $h_k$  e o raio equivalente calculado por:

$$r_{Ak} = 2^{1/8} r^{1/4} l^{3/4}$$

em que  $r$  é o valor da seção transversal cilíndrica da estrutura (0,065m) e  $l$  é a largura transversal do segmento. Essas dimensões podem ser melhores vistas na Fig. 4.

- Considera-se o raio de 0,065m da seção transversal cilíndrica da estrutura para toda a torre.



Figura 4 – Representação do segmento 2 da torre modelada para o sistema de EAT

- Para modelar o terceiro segmento é feito o cálculo normalmente para um condutor vertical (Eqs.: (2.1), (2.3) ), entretanto o raio equivalente dessa estrutura é calculado assim como é feito para mísulas. A geometria do segmento permite que essa aproximação seja feita, visto que afetará a onda viajante conforme um condutor vertical, porém de forma triangular, tal como a mísula. Com isso, seu raio equivalente é estimado por  $1/4$  da largura da junção que o conecta ao primeiro segmento. Essa largura pode ser mais bem compreendida através da Fig. 5.



Figura 5 – Representação do segmento 3 da torre modelada para o sistema de EAT

- O quarto segmento possui uma forma diagonal, como mostrado na Fig. 6, o que dificulta sua modelagem. Para esse segmento, deve ser feita uma análise trigonométrica aprofundada da sua geometria com intuito de modelá-lo adequadamente. As considerações para isso são:

1. As dimensões traçadas mostram que esse segmento possui um ângulo com a vertical de  $39,57^\circ$ . Logo, são feitas duas constatações: a primeira é que o comprimento do segmento é maior do que a distância vertical do início do segmento ao próximo (como geralmente é determinado o comprimento das seções verticais). O segundo ponto é que a contribuição vertical é maior do que a horizontal. Para contornar o problema da geometria diagonal desse segmento, é proposto que seja modelado conforme um condutor vertical, devido a sua posição predominantemente vertical.

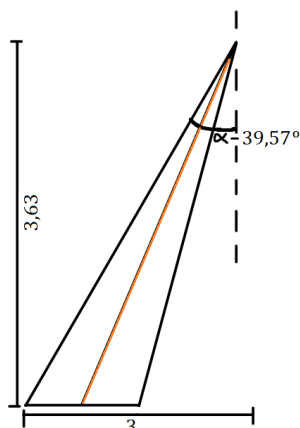


Figura 6 – Representação do segmento 4 da torre modelada para o sistema de 230kV

2. Seu comprimento é considerado como o da diagonal média (reta destacada na Fig. 6). Isso se deve ao fato de que a onda viajante levará mais tempo para percorrer esse segmento do que um condutor vertical. Essa consideração implica que, caso somados todos os comprimentos das seções da torre, tem-se como resultado um valor maior que a altura da torre, mas isso é apenas uma compensação matemática. O raio equivalente dessa partição será calculado assim como é feito para o segmento 3, devido a sua forma triangular.

- O último segmento é calculado normalmente, assim como é feito para o último segmento da torre de AT. Conseqüentemente, a inclusão do UBW será feita de maneira análoga.

A Tabela 4 mostra a posição geométrica dos condutores na torre.

Tabela 4 – Distribuição geométrica dos condutores da torre do sistema de EAT

Condutores	A	B	C	C.G. 1	C.G. 2
Altura (m)	25,03	25,03	25,03	30,5	30,5
Distância Horizontal (m)	-6,1	0	6,1	-4	4

A Tabela 5 mostra quais são as variáveis no de entrada para o cálculo dos segmentos pelo modelo.

A partir dos valores de entrada da Tabela 5, calculam-se as impedâncias. A Tabela 6 traz esses valores para cada segmento.

Tabela 5 – As variáveis de entrada para cada segmento

Segmento	$h_k$	$r_{eq}$
1	30,5	0,4991
2	28,84	0,7463
3	27,03	0,325
4	25,03	0,25
5	19,5	1,577

Tabela 6 – Valores de impedância e comprimento para os segmentos da torre do sistema de EAT

Segmento	$Z_T$	$l_T$	$Z_L$	$l_L$	$Z_A$	$l_A$
1	201,3	2,5	1.881,8	3,75	333,04	2,1
2	-	-	-	-	275,21	4
3	223,37	2	2.010,4	3	-	-
4	194,43	5,97	1.749,9	8,96	-	-
5	81,58	19,4	734,22	29,1	-	-

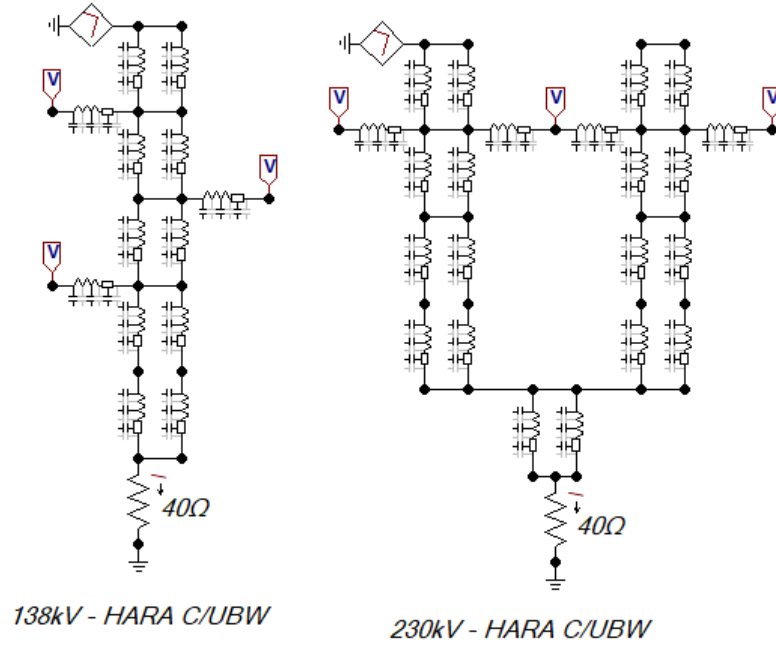
### 2.3.5 Introduzir os modelos de torres no ATPDraw

Para que o modelo de torre seja representado no ATPDraw, deve-se utilizar, para representar cada segmento, uma linha de transmissão sem perdas. As Figs. 7 (a) e (b) mostram como devem ser posicionados os segmentos das torres. Nota-se que o quarto segmento das duas torres estão divididos em 2 segmentos (segmentos apresentados nas Figs. 2 e 3). Isso é devido ao UBW que será conectado posteriormente entre essas seções<sup>6</sup>.

## 2.4 Modelo de Descarga Atmosférica

Para a modelagem da DA, é essencial empregar um modelo robusto, complexo e com alta confiabilidade, visto que o estudo está entorno desse fenômeno. Especificamente na região de Minas Gerais, há uma estação de estudos direcionados à avaliar a tipicidade das DAs locais. A partir de dados coletados nesta estação, denominada *Estação do Morro do Cachimbo* [15], foram desenvolvidos modelos capazes de reproduzir, matematicamente, a Forma de Onda de Corrente de uma Descarga Atmosférica (FDA) típica da região de Minas Gerais. Este último ponto sustenta a ideia de que o modelo proposto por [15] é o mais adequado, devido à sua

<sup>6</sup> Essa separação é feita usando a mesma impedância e mantendo o mesmo comprimento total, dessa forma a resposta da torre não será alterada. Para melhor compreensão de como é feita a conexão do UBW na torre, recomenda-se as Figs. 51 e 52, as quais se encontram-se no apêndice.



(a) Torre do sistema elétrico de AT      (b) Torre do sistema elétrico de EAT

Figura 7 – Modelagem no ATPDraw das torres das linhas de transmissão

formulação empírica e conveniente em razão da localidade que foram obtidos os dados.

Esse modelo em específico utiliza da função matemática desenvolvida por [16], para representar a FDA. A função de Heidler, expressa em (2.5), possibilita, através das variações de seus parâmetros, ajustar a FDA em concordância com natureza da frente de onda côncava e seu duplo pico [15].

$$i(t) = \sum_{k=1}^N \frac{I_{0k}}{\eta_k} \frac{(t/\tau_{1k})^{n_k}}{1 + (t/\tau_{1k})^{n_k}} e^{(-t/\tau_{2k})} \quad (2.5)$$

em que  $\eta_k$  é o fator de correção ou fator de inclinação e pode ser calculado por (2.6);  $I_0$  é a corrente injetada no canal;  $\tau_1$  é a constante de tempo associada ao tempo de frente da onda;  $\tau_2$  é a constante de tempo associada ao tempo de decaimento da onda,  $n_k$  é um fator adimensional que controla a taxa de crescimento da curva.

$$\eta_k = \exp \left[ - \left( \frac{\tau_{1k}}{\tau_{2k}} \right) \left( n_k \frac{\tau_{2k}}{\tau_{1k}} \right)^{\frac{1}{n_k}} \right] \quad (2.6)$$

Dotados de dados empíricos e da ferramenta matemática apropriada, [17] propuseram um método que associa sete funções de Heidler, capaz de recriar a FDA mediana das primeiras

descargas de retorno descendentes negativas<sup>7</sup> medidas no Morro do Cachimbo.

A Tabela 7 apresenta os valores dos parâmetros das 7 funções, os quais são fornecidos por [17] para se ter uma FDA com valores medianos.

Tabela 7 – Parâmetros das correntes de Heidler [17]

k	$I_{0k}$ [kA]	$\tau_{1k}$ [ $\mu$ S]	$\tau_{2k}$ [ $\mu$ S]	$n_k$
1	6	3	76	2
2	5	3,5	10	3
3	5	4,8	30	5
4	8	6	26	9
5	16,5	7	23,3	30
6	17	70	200	2
7	12	12	26	14

Em resumo, com valores medianos para FDA, é possível verificar o efeito do UBW de maneira abrangente, visto que esse modelo contempla as características de frente de onda côncava, múltiplos picos de corrente, inclinação máxima próxima do primeiro pico, as quais resultam na precisão desejada para este estudo.

## 2.5 Modelo de dispositivo Para-raios

Os para-raios são agentes fundamentais para proteção de LTs. Eles protegem os diversos componentes que integram o sistema elétrico perante os transitórios que ocorrem, através da atenuação da sobretensão.

Nesse contexto, considera-se, em situações específicas, que os dispositivos para-raios sejam o método mais efetivo para melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, visto sua relação de custo-benefício. Esse benefício se torna mais evidente em lugares nos quais a resistividade do solo são altas. Assim, o modelo adotado para representar o elemento para-raio nesta pesquisa é o desenvolvido pelo IEEE [18], considerado ideal para estudos de surtos de frente de ondas rápidas, conforme mencionado em [4].

Um estudo aprofundado sobre esse modelo de para-raios é feito para poder compreender as limitações e possibilidades do uso desse método, que possui uma metodologia de aplicação definida e requer exatidão na implementação.

<sup>7</sup> Esse fenômeno se caracteriza pela polaridade e direção de propagação do canal precursor da descarga, que ocorre entre nuvem e solo.



### 2.5.1 Implementação do para-raios no ATPDraw

Imaginando ser a melhor forma de compreender essa modelagem, é mostrado primeiramente o modelo já construído no ATPDraw; posteriormente, cada elemento é detalhado ao longo da seção.

Primeiramente, observa-se na Figura 8 o equivalente elétrico do para-raios no ATPDraw.

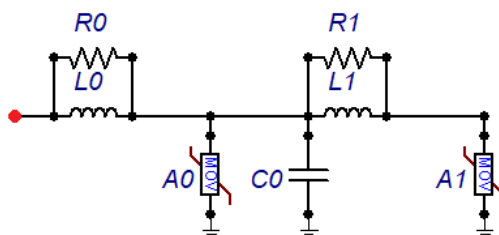


Figura 8 – Modelo de para-raios IEEE implementado no ATPDraw

O ponto em vermelho e o ponto de referência serão conectados em paralelo à cadeia de isoladores no sistema elétrico. Os parâmetros elétricos dos elementos presentes no modelo são descritos brevemente abaixo:

- $R_0$  é a resistência usada para estabilizar a integração numérica quando o modelo é implantado nas simulações digitais;
- $R_1$  é a resistência do filtro passa baixas;
- $L_0$  é a indutância associada aos campos magnéticos nas proximidades do para-raios;
- $L_1$  é a indutância do filtro passa baixas;
- $C_0$  é a capacitância entre os terminas do para-raio;
- $A_0$  e  $A_1$  representam o material de Óxido de Zinco (ZnO), modeladas por duas não linearidades, as quais têm valores da curva  $V \times I$  do para-raios.

Para o cálculo dos parâmetros do modelo IEEE, utilizam-se as Eqs. (2.7)-(2.11), apresentadas em [18].

$$R_0 = \frac{100 \cdot d}{n} [\Omega] \quad (2.7)$$

$$R_1 = \frac{65 \cdot d}{n} [\Omega] \quad (2.8)$$

$$L_0 = \frac{0,2 \cdot d}{n} [\mu H] \quad (2.9)$$

$$L_1 = \frac{15 \cdot d}{n} [\mu H] \quad (2.10)$$

$$C_0 = \frac{100 \cdot n}{d} [pF] \quad (2.11)$$

em que  $d$  é o comprimento do para-raios e  $n$  o número de discos, normalmente especificados pelo fabricante.

O bloco *MOV*, utilizado para incluir as não linearidades no *ATPDraw*, é uma função em que a entrada é tensão e a saída corrente. Dessa forma, o objetivo do usuário é ajustar adequadamente esses valores. A Tabela 8 mostra os valores que devem ser utilizados para realizar esse ajuste.

Tabela 8 – Valores de  $A_0$  e  $A_1$  do modelo IEEE

Corrente[kA]	$A_0$	$A_1$
0,01	1,40	—
0,1	1,54	1,23
1	1,68	1,36
2	1,74	1,43
4	1,80	1,48
6	1,82	1,50
8	1,87	1,53
10	1,90	1,55
12	1,93	1,56
14	1,97	1,58
16	2,00	1,59
18	2,05	1,60
20	2,10	1,61

Os valores apresentados para  $A_0$  e  $A_1$  estão em p.u., ou seja, o valor de tensão de referência ainda deve ser definido e podem ser vistos, em uma representação gráfica da curva implementada na *MOV*, dentro do *ATPDraw*, na Fig. (9).

Para que esses valores sejam estimados, é preciso simular sobretensões de manobra, com pico de corrente de 500A; tempo de pico e tempo de cauda de 30 e 60 $\mu$ s, respectivamente. Para DA

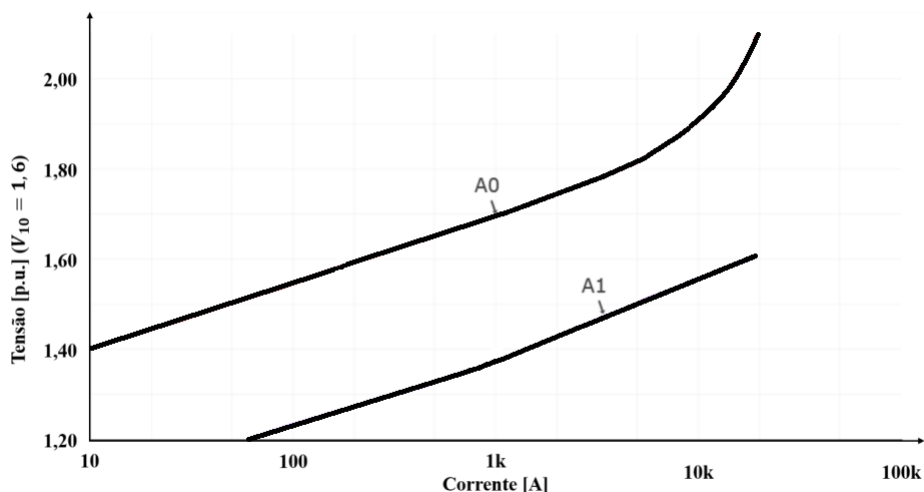


Figura 9 – Relação V x I para os resistores não lineares do modelo IEEE. (Adaptado de [18]).

tem-se 10kA de pico de corrente; tempo de pico e tempo de cauda de 8 e 20 $\mu$ s, respectivamente. Sobre o modelo do para-raios, utilizando uma fonte dupla exponencial, conforme indicado em [18]. No *ATPDraw*, a fonte dupla exponencial é definida pelos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e A, vistos na Eq. (2.12).

$$I(t) = A(e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (2.12)$$

Para encontrar as funções desejadas é feito um algoritmo genético capaz de ajustar os parâmetros da curva. Como resultado, foram obtidas as curvas apresentadas na Fig. 10, em que (a) refere-se à DA e (b) à manobra.

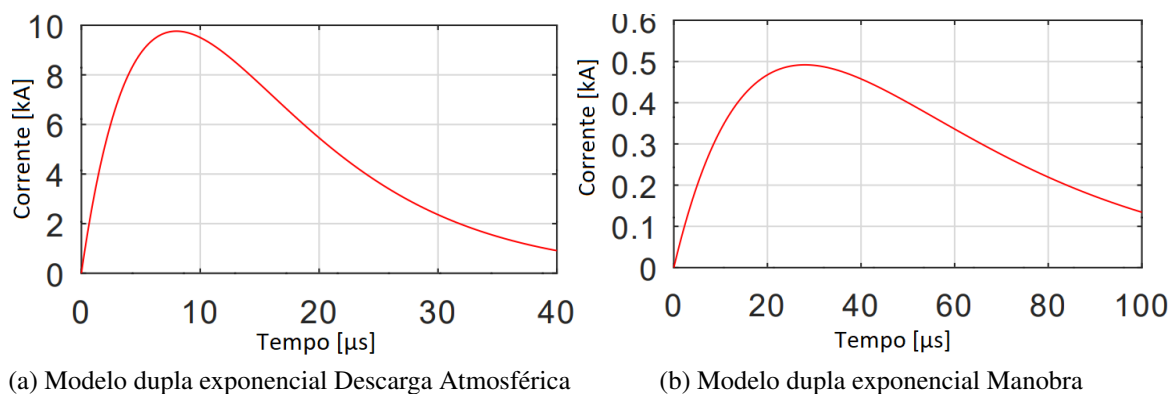


Figura 10 – Modelo de Fonte Dupla Exponencial

Na Tabela 9 são mostrados os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e A.

Tabela 9 – Tabela com parâmetros de entrada no *software* ATPDraw das fontes dupla exponenciais

Dupla Exponencial	$\alpha$	$\beta$	A
10kA - 8/20 $\mu$ s	-114935,90	-135634,71	164300
500A - 30/60 $\mu$ s	-34541,54	-36930,028	20000

Após obter os modelos das fontes, para a implementação do modelo de para-raio, é preciso calcular os parâmetros das Eqs. (2.7)-(2.11). A partir desse cálculo, tem-se como resultado os valores descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Tabela com parâmetros físicos e elétricos dos para-raios usados para cada sistema elétrico com valores comerciais

MODELO DE PARA-RAIO	138 kV	230 kV
Dimensão [m]	1,358	2,617
Nº de colunas de Disco Paralelo	1	1
Máxima Tensão Residual [V] (10kA-8/20 $\mu$ s)[V]	320000	536000
Máxima Tensão Residual [V] (0,5kA-30/60 $\mu$ s)[V]	258200	438000
$R_0$ ( $\Omega$ )	135,8	261,7
$R_1$ ( $\Omega$ )	88,27	170,105
$L_0$ (mH)	0,000272	0,000523
$L_1$ (mH)	0,02037	0,039255
C ( $\mu$ F)	7,363E-5	3,8212E-5

Para finalizar, como parte do processo iterativo de modelagem do para-raios, são utilizadas as fontes duplas exponenciais para excitar o para-raio e realizar um ajuste fino dos valores das não linearidades e dos parâmetros, para que o para-raio tenha uma resposta igual à do *datasheet*.

As não linearidades são ajustadas a partir da fonte que desempenha o papel do surto de manobra. Primeiro é selecionada uma tensão de referência ( $V_{pu}$ ) igual à descrita na Tabela 10; após a primeira simulação, é verificado o pico de sobretensão. Caso o pico seja diferente do apresentado no *datasheet*, a tensão de referência deve ser ajustada até o momento que o pico de sobretensão no para-raios seja igual à tensão residual de manobra.

Já a fonte que representa a descarga atmosférica é utilizada para o ajuste fino no elemento indutivo ( $L_1$ ), que deve ser alterado até que, quando excitado por essa fonte, o para-raio apresente uma máxima tensão residual igual à Tabela 10.

A partir desse último passo, temos o para-raio seguindo as diretrizes do guia [18], pronto para ser integrado ao sistema a ser simulado.

## 2.6 Modelagem do Sistema de Aterramento

Assim como feito para os elementos para-raios, uma modelagem adequada para o sistema de aterramento deve ser feita, visto que esse sistema tem grande influência na sobretensão na cadeia de isoladores resultante da DA. O modelo de aterramento utilizado nesta dissertação é o eletromagnético híbrido (HEM)<sup>8</sup> devida sua alta precisão e eficiência computacional quando comparado a outros modelos [19].

A simulação considera uma largura de banda de 100 Hz até 2 MHz, que abrange espectro de frequência da grande maioria das FDAs. O solo é modelado pelo valor de resistividade e permissividade elétrica. O valor de permissividade elétrica relativa do solo se manterá em 10; já a resistividade do solo deverá variar de acordo com as simulações feitas.

O aterramento é representado, fisicamente, por hastes e/ou cabos enterrados no solo, denominados contrapesos. O raio do contrapeso é de 7 mm e seu comprimento, neste estudo, deverá variar para análise de sensibilidade, sendo considerado um importante ponto destacado no trabalho de [20], o qual aponta valores de comprimento efetivos para solos de alta e baixa resistividades. Dessa forma, neste trabalho, serão avaliados os comprimentos de 22 e 132 metros dos contrapesos para solos de baixa e alta resistividade, respectivamente.

O algoritmo utilizado para o cálculo do HEM está disponível em [21]. A partir da rotina, obtém-se como resultado a impedância harmônica  $Z(\omega)$ , a qual será utilizada para introduzir o sistema de aterramento no ATP.

### 2.6.1 Implementação da impedância harmônica via HEM

Para que seja possível entrar com o sistema de aterramento no ATP, deve-se realizar o ajuste das funções de impedância harmônica de aterramento. Para isso, é utilizado o *Vector Fitting* [22], que retorna os valores de impedância em forma de função racional. Através dessa função, é possível gerar um sistema elétrico equivalente. Essa função permite gerar um sistema elétrico equivalente ao aterramento é gerado por uma *toolbox*, que pode ser acessada em [23], do *Vector*

<sup>8</sup> Modelo híbrido devido a mesclagem da teoria de campo e da teoria de circuitos para o cálculo da corrente que flui pelo sistema de aterramento.

*Fitting*, responsável por esse cálculo. Como resposta, a *toolbox* gera um código que deve ser introduzido no *ATPDraw*. Esse código é introduzido no *ATPDraw* por meio de uma *Library*<sup>9</sup>.

Para verificar se o circuito equivalente gerado pela *toolbox* é compatível com a função de impedância harmônica gerada pela rotina em Julia, é realizada uma comparação gráfica. Com a finalidade de comparar ambos sistemas de aterramento, o circuito da Fig. 11 é montado no *ATPDraw*.

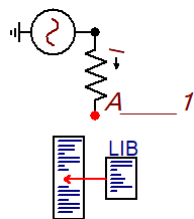


Figura 11 – Circuito elétrico para verificar a impedância harmônica

O objetivo desta simulação é realizar uma análise de impedância no domínio da frequência, por isso é executada uma simulação do tipo *Frequency Scan* no *ATPDraw*. A resistência no circuito da Fig. 11 possui valor de  $1 \mu\Omega$ , somente para auxiliar no cálculo numérico do sistema. A Fig. 12 mostra a comparação entre as funções geradas pela rotina em Julia e do circuito equivalente modelado no *ATPDraw*.

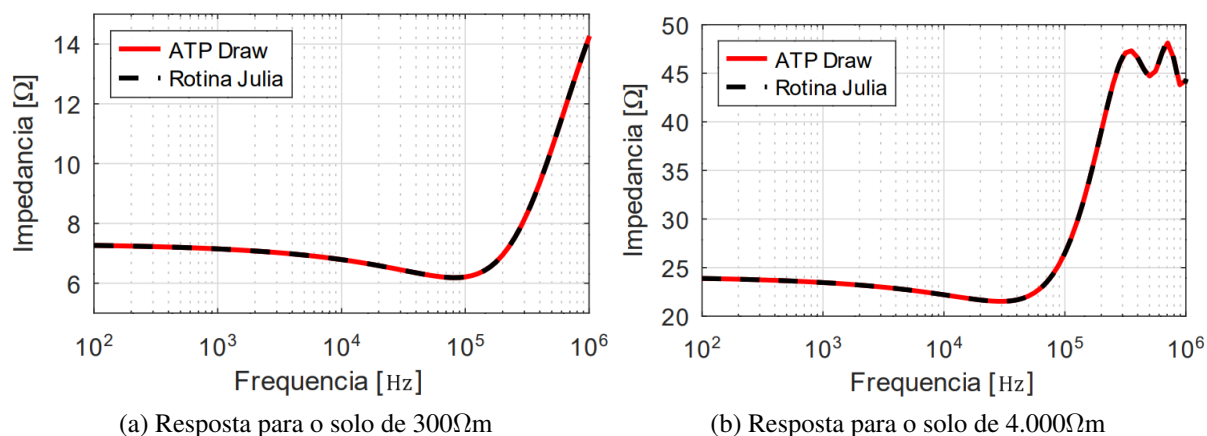


Figura 12 – Comparação das resposta de impedância harmônica na linguagem Julia e no *ATPDraw*

Nota-se que ambas respostas, tanto em Julia quanto no *ATPDraw* estão bem próximas,

<sup>9</sup> *Library* é uma ferramenta do ATP que permite ao usuário incluir elementos de circuitos que não estão presentes em sua biblioteca nativa.

mesmo para solos de altas resistividades. Isso mostra que o circuito equivalente gerado pela *toolbox* possui exatidão suficiente para representar a impedância harmônica  $Z(\omega)$ <sup>10</sup>.

## 2.7 Síntese do capítulo

Este capítulo desempenha um papel central na compreensão dos modelos empregados no presente estudo, apresentando uma análise qualitativa e delineando a aplicação prática desses modelos no contexto de simulação pelo ATPDraw. Cada seção deste capítulo foi meticulosamente estruturada para dissecar as complexas particularidades, conceitos fundamentais, aplicações específicas e metas associadas a cada elemento do sistema elétrico empregados na simulação. Este capítulo teve por finalidade, criar um ambiente de simulação que se aproxime, de forma precisa, da realidade dos sistemas elétricos que operam em AT e EAT. Para assegurar a integridade e eficácia desses modelos, foram adotadas abordagens empiricamente robustas, submetidas a exaustivos testes, validando sua capacidade de resposta na análise de fenômenos eletromagnéticos transitórios.

Em resumo, este capítulo guia o leitor por uma intrincada trajetória que culmina na criação de um sistema holístico, abraçando modelos que refletem com fidelidade os padrões e informações mais atualizados na literatura acerca dos estudos de transitórios.

---

<sup>10</sup> É válido apontar que, por não se tratar de um estudo voltado exclusivamente para aterramentos, não faz-se necessário uma análise aprofundada da precisão da *toolbox*, sendo estas curvas apresentadas apenas para demonstrar o comportamento dessa ferramenta. Isto é, a representação do aterramento no ATPDraw não é exata à gerada pela rotina do HEM, no entanto o erro é irrelevante (maior diferença percentual menor que 1%) para esse estudo.

### 3 COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

#### 3.1 Visão geral do capítulo

Este capítulo dedica-se à elaboração detalhada dos conceitos empregados para assegurar a não ocorrência de disrupção elétrica entre os condutores de fase e o UBW durante eventos de sobretensões. A aplicação do método discutido neste capítulo possibilita a determinação dos limites de aplicação da UBW, respeitando a integridade da isolação da linha. Esses limites são estabelecidos com base na potencial violação do isolamento entre os condutores no momento do transitório.

Com o propósito de estabelecer uma Distância de Segurança (DS) entre os dois pares - condutores/torre e condutores/UBW - é necessário obter o valor do *Critical Flashover Voltage* (CFO) da LT. Este valor é determinado pela tensão que, quando aplicada sobre a cadeia de isoladores, possui 50% de probabilidade de causar o rompimento do dielétrico. Essa probabilidade serve como base para definição de uma variável matemática relacionada à variação desse valor, denominada coeficiente de variação ( $\sigma_f$ ). A razão entre esse coeficiente e o CFO representa o desvio padrão do CFO. O valor padrão adotado para surtos de manobra é de 5%, conforme detalhado na referência [1].

A mesma referência fornece um valor de desvio padrão para surtos provenientes de descargas atmosféricas, estimado entre 2 a 3%. Devido à consideração de duas estruturas de torres distintas, as DS são calculadas individualmente, levando em consideração as peculiaridades únicas de cada torre. Apesar das particularidades, ambas as torres compartilham das mesmas condições geográficas e atmosféricas.

Diante desse panorama, emprega-se um método determinístico iterativo para calcular as DS para ambas as torres. Esse método segue uma sequência estruturada de cálculos que será apresentada ao longo do capítulo, que resulta nos valores de DS para cada sistema. A partir das DS obtidas, é possível estimar o comprimento ideal da cadeia de isoladores, estabelecendo, assim, uma DS mínima que assegure a preservação da isolação da LT e a posição segura do UBW.



### 3.2 Variáveis geográfica e atmosférica

Em um primeiro momento, são definidas as condições geográficas e atmosféricas às quais os sistemas estão submetidos. Estas variáveis são detalhadas conforme [1]:

1. **Altitude:** As LTs estão situadas a uma altitude de 700 metros, correspondendo à altitude média do Planalto Atlântico, onde o estado de Minas Gerais está localizado.
2. **Umidade do ar:** Em projetos relacionados à coordenação de isolamento de LT, a umidade do ar é comumente considerada úmida ou molhada.
3. **Densidade do ar:** A densidade relativa do ar está vinculada à altura em que a LT é construída. Essa densidade é calculada pela equação:  $\delta = \exp(-A/8,6)$ , onde A representa a altitude da linha em quilômetros em relação ao mar. Importante notar que essa equação é modelada para situações de tempestades, consideradas o pior caso a ser avaliado.

#### 3.2.1 Cálculo da DS para o sistema de AT

Antes de realizar o cálculo iterativo para estimar o comprimento da cadeia de isoladores da LT de AT, alguns pontos devem ser constatados. Dentre esses pontos, o primeiro é que o método empregado foi originalmente proposto para projetar linhas de EAT que variam entre 230 a 750 kV, seguindo a referência [1]. Entretanto, após uma avaliação criteriosa do equacionamento, nota-se que não há prejuízo na aplicação desse método para a linha de AT e suas subjetividades. O segundo ponto se refere a estrutura em questão, a qual possui condutores fases posicionados externos à torre, conforme é destacado na Fig. 13. Nessa figura pode-se observar as distâncias  $S_1$ ,  $S_2$  e W, as quais correspondem respectivamente às distâncias: condutor/mísula, condutor/corpo da torre e largura da torre.

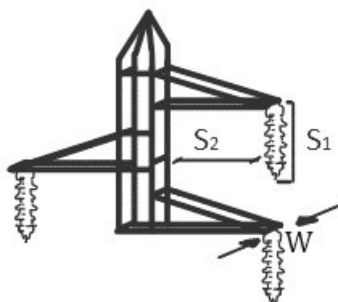


Figura 13 – Estrutura de interesse da torre do sistema de AT para o cálculo do comprimento da cadeia de isoladores

Um terceiro ponto se deve à tensão de operação desse sistema, a qual sofre maior influência de transitórios devidos às DAs. Para esse transitório em questão, utiliza-se um valor de 3% para o desvio padrão do CFO, conforme indicado em [1].

O cálculo do *Gap Factor*<sup>1</sup>, da torre mostrada na Figura 13, é feito mediante aplicação da Eq. (3.1)<sup>2</sup>.

$$K_g = 1,45 + 0,015 \left( \frac{h}{S_1} - 6 \right) + 0,35 \left( \exp \left( \frac{-8W}{S_1} \right) - 0,2 \right) + 0,135 \left( \frac{S_2}{S_1} - 1,5 \right) \quad (3.1)$$

A altura  $h$  definida é igual à do condutor posicionado no braço inferior da torre,  $S_1$  será, após o processo de iteração, considerada a DS,  $S_2$  é igual a 2,4 m devido à geometria da torre e a largura ( $W$ ) é igual a 0,7 m. Dentre essas variáveis, as que são mostradas na Fig. 13 variam juntamente ao método iterativo. Ressalta-se que o cálculo de  $K_g$  é feito partindo do valor do  $CFO^+$  de polaridade positiva da LT, que utiliza da Eq. (3.2), proposta por [24], para chegar nesse valor.

$$CFO^+ = 383 + 147 \cdot K_g \quad (3.2)$$

A partir do conjunto das Eqs. (3.1 e 3.2), calcula-se  $K_g$  para uma determinada  $DS_i$  estimada; em seguida, é calculado o  $CFO^+$ , que é para condições padronizadas. Para considerar as condições da seção 3.2, o  $CFO^+$  é multiplicado pelo fator  $\delta^m$  (resultando no valor de  $CFO_A$ , o qual considera as condições geográficas), em que  $\delta$  é 0,922 para altitude de 0,7 km.

<sup>1</sup> Esse parâmetro é utilizado para que no cálculo da DS sejam considerados os efeitos das condições ambientais e da geometria da cadeia de isoladores, detalhado em [1].

<sup>2</sup> Todas as equações apresentadas nesse capítulo, o qual trata da coordenação de isolamento das LTs, são detalhadas em [1].

Para o cálculo da variável  $m$ , associada às condições geográficas, é empregado o par de equações a seguir:

$$G_0 = \frac{CFO^+}{DS} \quad m = 1,25G_0(G_0 - 0,2) \quad (3.3)$$

Por se tratar de um método iterativo, ao fim, tem-se como resultado uma nova DS, e são refeitos os cálculos. Para que haja um melhor entendimento desse método, segue-se o fluxograma apresentado na Fig. 14. Esse fluxograma mostra a sequência de cálculo, em que a convergência é alcançada quando o último valor de DS está próxima da calculada na iteração seguinte, com uma tolerância de  $10^{-3}$  de diferença em metros.

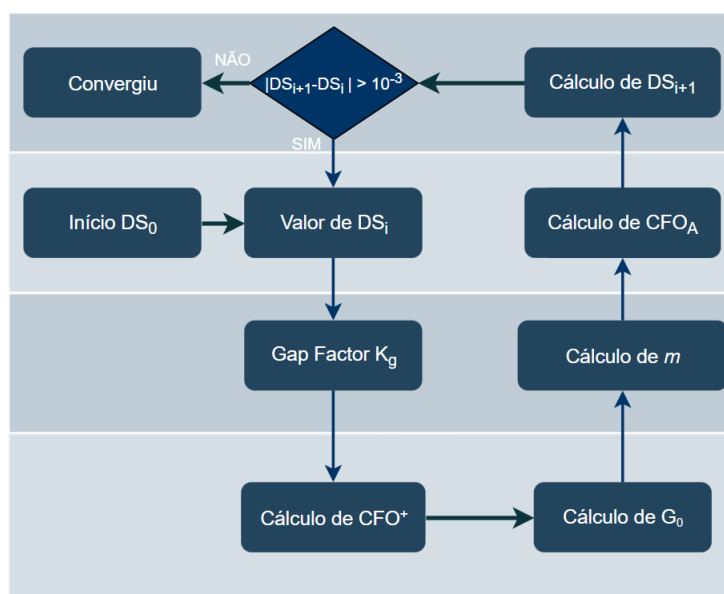


Figura 14 – Fluxograma do cálculo iterativo da DS para o sistema elétrico de AT

A Tabela 11 apresenta os valores calculados para encontrar a DS. Foram necessárias 4 iterações.

Tabela 11 – Valores do método iterativo para estimar o comprimento da cadeia de isoladores para o sistema elétrico de AT

Iteração	DS	$K_g$	$CFO_S$	$G_0$	$m$	$CFO_A$
0	1,1	1,637	623,64	1,134	1,324	560,06
1	1,08	1,647	625,11	1,157	1,384	558,65
2	1,075	1,64	624,08	1,164	1,402	556,92
3	1,073	1,652	625,84	1,1698	1,418	557,76
4	<b>1,073</b>					

Como estratégia para se aproximar de uma aplicação prática, procede-se à busca por isoladores poliméricos adequados para a aplicação de AT. A partir do valor determinado para o comprimento do isolador e considerando um fator de segurança de 20% — conforme indicado em [25] como um acréscimo ao comprimento total do isolador —, é então selecionado um isolador com as seguintes características: i) Tensão de operação de 138 kV; ii) Comprimento de 1,32 metros; iii) Tensão disruptiva positiva de 650 kV ( $CFO^+$ ).

A fim de se validar a escolha desse isolador, uma comparação é realizada na Tabela 12 entre o isolador em destaque e os isoladores imediatamente abaixo e acima na seguinte folha de dados [26].

Tabela 12 – Valores comerciais dos isoladores poliméricos para AT

Tensão de Operação [kV]	Comprimento [m]	Tensão Disruptiva [kV]
69	1,138	530
138	1,32	650
138	1,460	730

Evidencia-se a inviabilidade do uso do primeiro, uma vez que este é incompatível com a tensão de operação. O comprimento, quando ajustado considerando o fator de segurança, bem como o valor do  $CFO^+$ , são inferiores aos valores estimados na Tabela 12. Por outro lado, o último isolador da lista aparenta estar em conformidade; no entanto, quando comparado ao modelo selecionado, revela-se superdimensionado, o que resultaria em custos exponencialmente mais elevados durante a construção da LT.

### 3.2.2 Cálculo da DS para o sistema de EAT

O cálculo da Distância de Segurança (DS) para a linha de 230 kV segue uma abordagem iterativa semelhante à anterior. No entanto, algumas condições diferenciam esse caso. Primeiramente, a LT é tratada como EAT na referência utilizada. Nesse contexto, o surto de manobra assume maior relevância em relação ao surto por DA durante o cálculo da DS. Tendo em mente que o surto de manobra é a principal preocupação, o cálculo do  $CFO^+$  é realizado a partir da Eq. (3.4) [1].

$$CFO^+ = 0,96 \cdot K_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{DS}} \quad (3.4)$$

A segunda condição distintiva é a configuração da estrutura da torre, apresentada na Fig. 15, diferindo daquela retratada na Fig. 13. Essa disparidade influencia o cálculo de  $K_g$ , o qual é determinado para a fase central da linha, posicionada na abertura da torre. Embora a referência indique que o comprimento da DS para as fases nas extremidades seja aproximadamente 8% menor, para fins deste estudo, o mesmo isolador será considerado para todas as fases, sendo norteadado pelo isolador central.

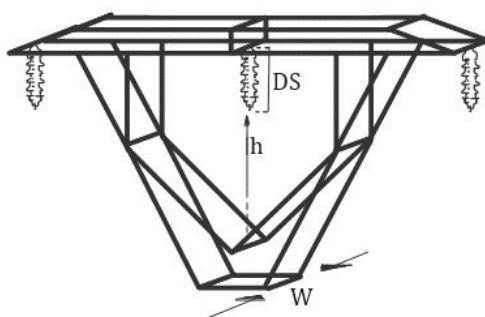


Figura 15 – Estrutura de interesse da torre do sistema de EAT para o cálculo do comprimento da cadeia de isoladores

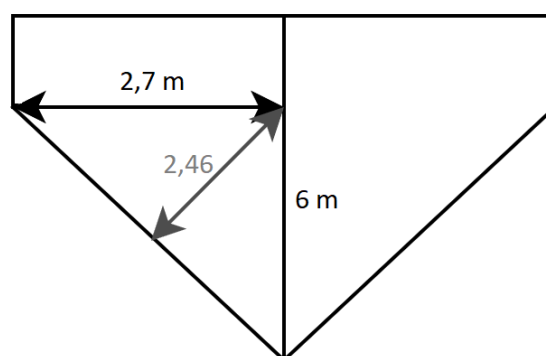


Figura 16 – Janela do condutor central da torre do sistema de EAT

Uma análise preliminar é conduzida para a abertura na qual o condutor central está posicionado, conforme ilustrado na Fig. 16. Nessa análise, uma distância de 2,46 m é calculada<sup>3</sup>, representando o comprimento máximo admissível para a cadeia de isoladores. Deve-se respeitar

<sup>3</sup> Esse cálculo é feito a partir da seguinte análise trigonométrica:  $(6 \cdot \text{sen}(\text{arctg}(2,7/6)))$ .

essa distância para garantir que, em caso de um surto, a proteção seja efetuada pelo isolador e o rompimento não seja direcionado à torre. Para esse caso, em que a torre possua janela, o cálculo do  $K_g$  é feito por meio da Eq. (3.5).

$$K_g = 1,25 + 0,005 \left( \frac{h}{DS} - 6 \right) + 0,25 \left( \exp \left( \frac{-8W}{DS} - 0,2 \right) \right) \quad (3.5)$$

Seguindo as dimensões da torre, segundo as quais sua largura  $W$  é de 1,3 m, a altura dos condutores das fases é inicialmente de 25,03 m (os quais são primeiramente apresentados na Tabela 4), e a DS inicial é de 3 m. Para a condução do cálculo iterativo, o mesmo fluxograma (Fig. 14) é seguido. No entanto, a equação para o cálculo de  $DS_{i+1}$  é a (3.6), o  $CFO^+$  é obtido pela Eq. (3.4), e o  $CFO_A$  é dado por:  $\frac{2 \text{ p.u.}}{1-\sigma}$ , em que 2 p.u. corresponde a duas vezes o valor de pico da tensão de operação (765,33 kV), e  $\sigma$  é o desvio padrão para surtos de manobra, que é igual a 5%.

$$DS = \frac{8}{\frac{3400 \cdot 0,96 \cdot K_g \cdot \delta^m}{CFO_A} - 1} \quad (3.6)$$

A Tabela 13 apresenta os resultados de 3 iterações.

Iteração	DS	$K_g$	$CFO^+$	$G_0$	m
0	3	1,219	1085,59	0,723	0,4738
1	2,0399	1,2328	817,632	0,8016	0,6028
2	2,0506	1,2326	820,844	0,8005	0,6010
3	<b>2,0506</b>				

Tabela 13 – Valores do método iterativo para estimar o comprimento da cadeia de isoladores para o sistema elétrico de 230 kV

O parâmetro de segurança não é aplicado neste caso, devido à possibilidade de rompimento entre o condutor da fase na janela da torre pelo caminho mais próximo do condutor e da torre. A não consideração desse fator não compromete a integridade do isolamento da LT; no entanto, a consideração desse fator compromete, devido o limite estabelecido de 2,46 m. Com os resultados, prossegue-se com a mesma análise realizada para o sistema de AT. A Tabela 14 apresenta os valores comerciais obtidos no catálogo [26], destacando em vermelho o isolador escolhido.

Ao analisar a Tabela 14, retirada de [26], verifica-se que o modelo de isolador imediatamente abaixo do isolador destacado em vermelho apresenta um comprimento inferior ao estimado

Tabela 14 – Valores comerciais dos isoladores poliméricos para AT

Tensão de Operação [kV]	Comprimento [m]	Tensão Disruptiva [kV]
230	2,023	1060
230	2,163	1090
230	2,303	1170

para a DS. Já o modelo imediatamente acima do destacado, além de ter uma tensão disruptiva superdimensionado, possui um comprimento próximo a 2,46 m.

### 3.2.3 Modelagem da Cadeia de Isoladores

O método adotado para modelar a cadeia de isoladores no ATP segue a abordagem proposta por [27]. Essa abordagem foi desenvolvida para prever o comportamento de isoladores diante de impulsos com formas de onda não convencionais, sendo adequada para a FDA empregada.

Esta seção tem como objetivo apresentar, de forma concisa e simplificada, o método do efeito disruptivo (DE) e sua implementação computacional. Esse método foi desenvolvido a partir de duas análises teóricas: a primeira é uma aproximação baseada no comportamento de isoladores gasosos, líquidos e sólidos submetidos ao impulso de rompimento; a segunda análise leva em conta o balanço de energia aplicado ao momento de desenvolvimento do canal de rompimento em dielétricos. Vale ressaltar que esta última análise não será discutida neste trabalho.

A primeira aproximação é feita através do estudo do comportamento do isolador sujeito ao impulso. Com isso, tem-se uma formulação empírica desse comportamento, que pode ser entendida como sendo o DE da cadeia de isoladores em função da onda aplicada e sua duração. Matematicamente, o método DE pode ser descrito pela Eq. (3.7).

$$DE = f(u(t), t) \quad (3.7)$$

em que  $u(t)$  é a tensão aplicada no isolador e  $t$  é o instante de tempo. Já a função  $f(u(t), t)$ , pode ser obtida por meio da Eq. (3.8).

$$f(u(t), t) = \int_{t_0}^t [u(t) - u_0]^k dt \quad (3.8)$$

Na equação (3.8),  $t_0$  representa o instante em que  $u(t)$  ultrapassa  $u_0$ , uma tensão inicial associada ao CFO da linha, e  $k$  é uma constante determinada empiricamente. Em [1], é proposto um método para calcular as constantes do método DE quando  $u_0$  não é igual a zero. Os valores de  $u_0$  e  $k$  são obtidos por meio de testes realizados em isoladores utilizando formas de onda padronizadas para modelar a corrente de impulso de uma DA. Outra variável que deve ser estimada juntamente com as duas citadas anteriormente é  $DE_b$ , valor esse que determina o limiar da disrupção. Se o valor de  $DE$  ultrapassar o valor de  $DE_b$ , ocorrerá a disrupção; e logicamente, o contrário é válido. Isso significa que  $DE_b$  é um limiar que determina se houve ou não rompimento da cadeia de isoladores.

A partir dos testes realizados com ondas padronizadas, são determinadas as 3 constantes para o método DE em função do CFO da LT, sendo elas descritas pelas Eqs. (3.9), (3.10) e (3.11) [27].

$$DE_b = 1,1506 \cdot CFO^k \quad (3.9)$$

$$k = 1,36 \quad (3.10)$$

$$u_0 = 0,77 \cdot CFO \quad (3.11)$$

Em resumo, o método DE oferece uma abordagem abrangente para avaliar o desempenho dos isoladores em resposta a formas de onda não convencionais, mesmo que o teste para determinar as constantes seja com ondas padronizadas. Isso se deve ao fato de que o cálculo realizado é adaptado para contemplar outros tipos de formas de ondas.

Para introduzir no ATP esse método, calculam-se as variáveis às LTs de AT e EAT. Conforme estimados anteriormente, os CFO's dos isoladores das LTs são, respectivamente, 650 e 1090 kV. A partir das Eqs. (3.9) - (3.11), são estimados os seguintes valores para as variáveis do método, apresentados na Tabela 15.

Para incluir o método DE no *ATPDraw*, é utilizada uma *MODELS*<sup>4</sup>. A *MODELS* implemen-

<sup>4</sup> Assim como a *Library* é utilizada para implementar o sistema de aterramento, a função *MODELS* permite o usuário interagir com o sistema elétrico durante a simulação. A diferença é que pela *MODELS* o usuário utiliza valores do sistema durante a simulação para realizar cálculos. A partir das medidas de tensão realizadas pela



Sistema	$DE_b$	$u_0$ [kV]
138 kV	7.699,25	500,5
230 kV	15.553,36	839,3

Tabela 15 – Valores dos parâmetros do método DE para modelar a cadeia de isoladores das linhas de AT e EAT

tada no *ATPDraw* é conectada entre o ponto de conexão na torre e a linha, desempenhando o papel de isolador.

### 3.3 Síntese do capítulo

Este capítulo cumpre em abordar a coordenação de isolamento das LTs de AT e EAT, conforme sequenciado na referência [1]. A inclusão do UBW nessas LTs exige uma proteção específica, a qual se deve às disrupções elétricas entre os condutores. Ao analisar dois sistemas distintos, com torres e tensões de operação diferentes, são demonstradas duas sequências de cálculos para determinar as suas DS. Como resultado, é obtido um valor de limite para o posicionamento do UBW, garantindo a manutenção da coordenação de isolamento e evitando violações.

Essa abordagem prática visa à adaptação das estratégias de proteção à mudança na topologia da LT, assegurando a integridade do sistema elétrico com a introdução do condutor adicional. Ao compreender as implicações práticas de diferentes configurações, este capítulo oferece restrições claras para o próximo capítulo, em que é feito o posicionamento do UBW.

Por fim, esse capítulo informa, em paralelo às restrições que o UBW está sujeito, como é feita a implementação da cadeia de isoladores no *ATPDraw*. O uso da metodologia desenvolvida por [27] trouxe uma abordagem capaz de abranger a FDA empregada nessa pesquisa.

---

*MODELS*, são feitos cálculos internamente em cada passo da simulação utilizando o método DE para avaliar se houve ou não disrupção da cadeia de isoladores.

## 4 OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO UBW

### 4.1 Visão geral do capítulo

Numa abordagem inicial, conforme discutido no capítulo 3, o UBW é instalado em uma posição padrão dentro dos limites estabelecidos, proporcionando um maior acoplamento, que resulta em menor sobretensão devido ao transitório<sup>1</sup>. A proximidade do UBW em relação aos condutores de fase é alcançada por meio de seu deslocamento no eixo vertical da torre, que, por padrão, está centralizado.

Este capítulo visa a encontrar a posição que maximize a eficiência do UBW em relação ao pico de sobretensão nas cadeias de isoladores, inicialmente buscando o ponto ótimo para os dois sistemas desenvolvidos nesta dissertação. Ao analisar a geometria do sistema de AT, observa-se a presença de apenas um condutor de proteção sobre as fases e simetria vertical, gerando diferentes valores de sobretensão conforme a posição do UBW é ajustada horizontal e verticalmente, como pode ser visto na Fig. 17. Em contrapartida, essas condições não são verificadas no sistema de EAT, o qual apresenta obstáculos para o estudo de posicionamento ótimo do UBW. O impasse principal é a presença de dois condutores de proteção neste sistema, possibilitando incidência próxima tanto às fases B/A quanto às fases B/C. Além disso, esse sistema possui simetria horizontal, sugerindo incoerência ao posicionar o UBW em um ponto diferente do central. Portanto, o estudo de otimização da posição do UBW concentra-se exclusivamente no sistema de AT.

Resumidamente, o capítulo inicia definindo o problema de otimização a ser resolvido e, em seguida, detalha o método utilizado para encontrar o ponto ótimo. Uma breve descrição do método é apresentada para verificar sua compatibilidade com o problema em questão. Posteriormente, é explicada de forma concisa a integração entre o método de otimização e o ATP, utilizando a linguagem Julia como intermediária. Por fim, são apresentados os resultados obtidos no processo de otimização.

---

<sup>1</sup> Outro ponto de relevância do UBW é a capacidade de drenar parte da corrente da DA, o que corrobora na diminuição da sobretensão.

## 4.2 Definição do Problema de Otimização

Para definir um problema de otimização, deve-se estabelecer a função objetivo, que, nesse caso, é reduzir a soma do máximo valor absoluto das sobretensões nas três fases. Em sequência são impostas as restrições às quais a função objetivo está sujeita. A princípio, a função objetivo é uma função de posição, em que  $x$  e  $y$  referem-se, respectivamente, à posição horizontal e vertical do UBW. Essa função tem três restrições. As duas primeiras estão relacionadas aos limites, ou bordas externas, em que o UBW poderá ser instalado, garantindo que se tenha valores factíveis. Os limites horizontais se devem às posições horizontais das fases. Os limites verticais se devem à lógica do problema, em que o UBW deve permanecer abaixo das fases, mas não próximo do solo.

A terceira restrição refere-se à coordenação de isolamento feita anteriormente, que determina uma DS mínima que o UBW deve estar do condutor da fase C. Para garantir o isolamento, o UBW é posicionado a, pelo menos, a  $DS + 5\%^2$  dessa distância, resultando em uma distância mínima entre o condutor da fase C e o UBW de 1,386 m. Para determinar uma função de restrição, utiliza-se da equação da circunferência, aplicando translações vertical e horizontal. Dessa forma, os valores de translação são iguais à posição do condutor da fase C e o raio da circunferência é a distância mínima. A representação gráfica dessa restrição pode ser vista na Fig. 17, em que o UBW não pode ser posicionado na região em vermelho.

Em termos matemáticos, modela-se o problema de otimização conforme (4.1):

$$\begin{aligned} \min_{f(x,y)} \quad & f(x,y) = \text{Max}(|V_A|) + \text{Max}(|V_B|) + \text{Max}(|V_C|) \\ \text{s.a.} \quad & -2,75 \leq x \leq 2,75 \\ & 15 \leq y \leq 18 \\ & 1,386^2 \leq (x + 2,75)^2 + (y - 18,55)^2 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Com o problema definido matematicamente, o próximo passo é resolvê-lo. Para isso, é feito na próxima seção o estudo voltado para o método de solução do problema de otimização.

<sup>2</sup> O valor de 5% adicionado é referente a uma porcentagem adicional de segurança para o posicionamento do condutor, para maiores detalhes recomenda-se consultar [1].

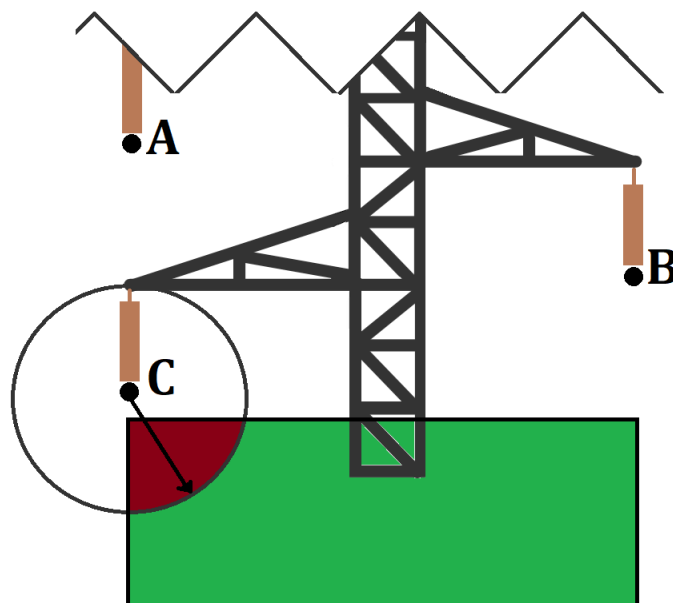


Figura 17 – Restrição da posição do UBW em relação à coordenação de isolamento

### 4.3 Método de Otimização

A complexidade e não-linearidades inerentes ao sistema demandam um método de busca pelo ponto ótimo que considere tais condições. Dessa forma, acredita-se que a função  $f(x, y)$  reage de maneira não convexa<sup>3</sup> ao posicionamento do UBW. Tal condição descarta a viabilidade de técnicas baseadas em derivadas, como o Gradiente Descendente. Em estudos recentes voltados a problemas de engenharia elétrica, métodos meta-heurísticos têm sido amplamente desenvolvidos e empregados para solucionar problemas de otimização, dado que esses métodos levam em consideração a natureza não-linear e não convexa desses problemas.

Diante desse cenário, este estudo adotou o método meta-heurístico *Particle Swarm Optimization* (PSO). Esse método destaca-se pela simplicidade de implementação e rápida convergência em casos específicos nos quais a função é não-linear e não-convexa. Quando comparado a outros métodos, suas desvantagens residem na busca pela combinação ideal de seus parâmetros, além de que o PSO pode apresentar convergência prematura a soluções subótimas. Para uma compreensão mais aprofundada sobre o método, recomenda-se a leitura do trabalho de [28].

Apesar das desvantagens mencionadas, a escolha do PSO proporciona a implementação de

<sup>3</sup> De forma simplificada, uma função não convexa pode apresentar mínimos locais, os quais métodos de otimização baseados em derivadas encontram como ótimos.

um método projetado para solucionar problemas com natureza similar à deste trabalho, os quais se originam em sistemas não-lineares. A facilidade de implementação do PSO também é um fator relevante, considerando que deve ser incorporado ao ambiente integrado entre a linguagem Julia e o ATP.

#### 4.4 Solução Ótima e o ATP

Até o momento, o problema de otimização foi delineado, e um método para sua resolução foi escolhido. Contudo, o método selecionado opera exclusivamente com a função objetivo, o que demanda a obtenção dos valores absolutos dos picos de sobretensão nas três fases. Com esse propósito, desenvolveu-se uma ferramenta que estabelece a comunicação entre a linguagem de programação Julia e o ATP. Através dessa rotina em Julia, torna-se possível alterar sistematicamente as posições dos condutores na LT e utilizar o ATP para obter as sobretensões resultantes da DA.

Assim, realiza-se um estudo de sensibilidade, em que a entrada é a posição do UBW, e a saída são os picos de sobretensão em cada uma das fases. É nesse contexto que o PSO é introduzido, pois, a partir dos valores de saída do ATP, o PSO conduz a busca pela solução, fornecendo novos valores para o posicionamento do UBW à medida que evolui ao longo das iterações.

#### 4.5 Parâmetros do PSO

Como apresentado anteriormente, um ponto negativo do PSO é a sensibilidade aos parâmetros, os quais influenciam diretamente na dinâmica do método e, por consequência, a busca pelo ponto ótimo. Devido à complexidade da função trabalhada, são feitos ajustes iterativos para encontrar a combinação ideal que conduza à busca eficiente pelo ponto ótimo.

Dessa forma, as variáveis de entrada finais são definidas conforme detalhadas a seguir:

- **Variável de Inércia:**  $w = 1$
- **Peso de Comportamento Cognitivo:**  $C_1 = 2$
- **Peso de Comportamento Social:**  $C_2 = 1,2$
- **Número de Partículas:**  $n_p = 7$

Valores aleatórios são usados para determinar as variáveis randômicas do método ( $r_1$  e  $r_2$ ).

#### 4.6 Evolução das partículas ao longo das iterações

A evolução do método ocorre quando cada partícula do PSO realiza uma simulação no ATP. Como resultado, cada partícula terá valores para  $x$  e  $y$ , e retornará um valor para a função objetivo  $f(x, y)$ , que deve ser minimizada. O método, então, fornece novos valores de  $x$  e  $y$  para as partículas.

O produto dessas iterações é uma posição vertical situada no limite da restrição, equivalente a 18 m de altura. A posição horizontal encontrada foi de -1,49 m. A Fig. 18 apresenta, em três dimensões, como ocorre a busca pelo ponto ótimo das sete partículas ao longo das iterações.

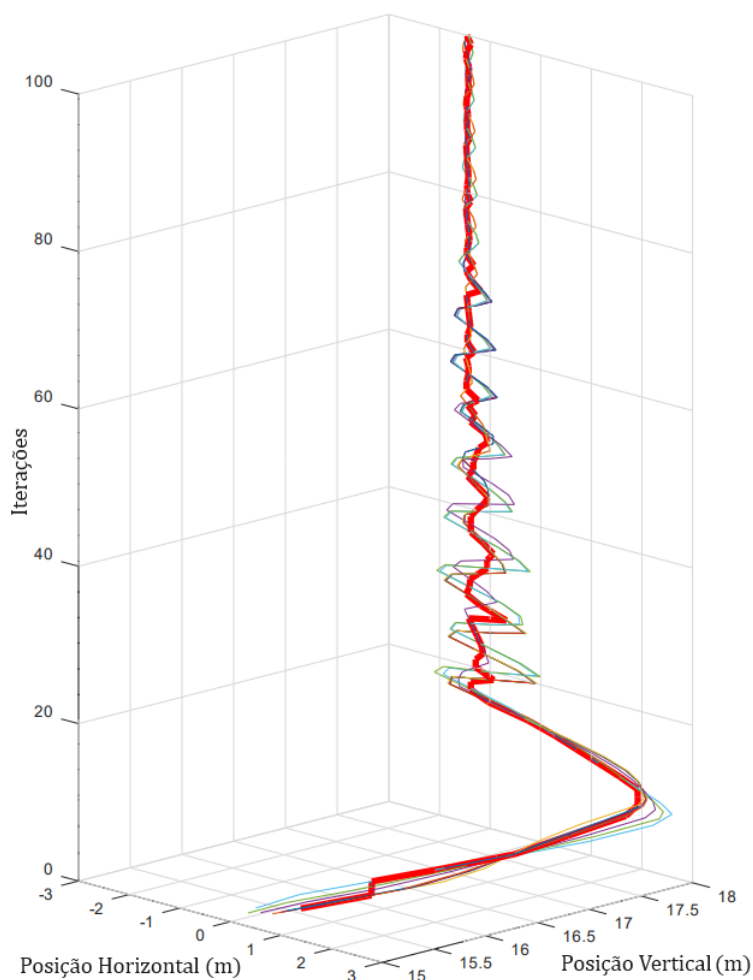


Figura 18 – Evolução das partículas ao longo das iterações até o ponto ótimo

Na Fig. 18, é destacado em vermelho o melhor caminho em busca do ponto ótimo. Inicial-

almente, define-se uma tolerância de 100 iterações, a qual foi adequada para este estudo, pois, próximo a esse valor, a melhor partícula sofreu pouca variação. Considerando as limitações do método de otimização meta-heurístico e a complexidade do sistema, considera-se que a solução está, em termos práticos, dentro do aceitável.

#### **4.7 Síntese do capítulo**

Este capítulo aborda o desenvolvimento do método de solução ótima para posicionar o UBW de forma a maximizar a eficiência em relação ao pico de sobretensão nas cadeias de isoladores. Inicialmente, definiu-se o problema de otimização, que consiste em reduzir a soma dos valores absolutos das sobretensões nas três fases da LT. Dentro do problema de otimização, são estimadas as restrições relacionadas à posição do UBW.

Diante da complexidade e não-linearidade do sistema, optou-se pelo uso do método meta-heurístico PSO para solucionar o problema de otimização. A ferramenta desenvolvida para integrar a linguagem de programação Julia com o ATP possibilitou a execução do estudo de sensibilidade, que forneceu as entradas necessárias para o PSO.

Por fim, obteve-se como resultado do processo de otimização uma posição vertical no limite da restrição de altura do condutor e uma posição horizontal de -1,49 m. Este capítulo, assim, oferece uma visão abrangente do método de solução ótima empregado para a posição do UBW, destacando sua aplicação prática e resultados obtidos.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 Visão geral do capítulo

Como objetivo principal deste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas nos sistemas de transmissão com níveis de tensão de 130 kV e 230 kV. A seção a seguir apresenta, de forma sucinta, um resumo do caso base que está construído ao longo do capítulo 2. Posteriormente, tem-se a seção em que são apresentados os resultados das simulações para ambos os sistemas trabalhados. Nessa primeira ocasião, é estudada uma linha que está inoperante, isto é, a tensão de operação é desconsiderada. A seção 5.4 contempla os mesmos sistemas nas mesmas situações, entretanto a linha está em operação. Na sequência, a seção 5.5 é direcionada à verificação dos efeitos da DA sobre os mesmos sistemas quando são adicionados três dispositivos para-raios. Uma última seção deste capítulo é destinada a investigar a influência da posição ótima do UBW.

Sendo a base do estudo, as análises feitas nas próximas três seções são comparações entre o sistema que possui ou não o UBW. Em paralelo, são feitas análises em que o solo próximo à LT seja de baixa ou alta resistividade. Isso posto, concebem-se quatro resultados para cada seção, em que as duas primeiras são referentes ao sistema quando há ou não UBW para um solo de baixa resistividade. Por consequência, as duas últimas são para solos de alta resistividade. Na última seção, como supramencionado, é feito um estudo de sensibilidade da posição do UBW.

Os resultados das simulações estão retratados na forma gráfica, em que o intervalo de tempo de interesse é compreendido por  $30 \mu\text{s}$ . Embora a análise gráfica seja capaz de mostrar visualmente o comportamento do sistema ao longo do tempo, ela pode se tornar imprecisa ao comparar pequenas diferenças. Para contornar esse problema e complementar os resultados gráficos, em cada seção, próxima das figuras, estão tabelas, as quais informam os valores de pico das sobretensões das três fases, para os sistemas sem e com o UBW. Também é feita uma comparação simples, vista na tabela como *Diff(%)*, que representa a diferença em porcentagem



do sistema com e sem UBW, calculada a partir de (5.1)<sup>1</sup>.

$$\text{Diff} = \left( \frac{c/\text{ubw}}{s/\text{ubw}} - 1 \right) \cdot 100 (\%) \quad (5.1)$$

## 5.2 Caso Base

Esta breve seção inicial introduz os dois casos base, representados pelos sistemas elétricos operando a AT e EAT. Esses sistemas são tratados como referência para avaliar o impacto do UBW em LTs que operam nesse valor de tensão. O sistema elétrico de AT possui a disposição espacial de seus condutores conforme a Fig. 19 (a). A incidência da DA ocorre no topo da torre, no cabo guarda. Para incluir o UBW foi definida uma posição padrão no centro da torre a uma altura de 18 m. O sistema de EAT é mostrado na Fig. 19 (b). O posicionamento padrão do UBW é definido no centro da torre a uma altura de 22,5 m. O posicionamento do UBW para ambos os sistemas respeita as distâncias calculadas no capítulo 3.

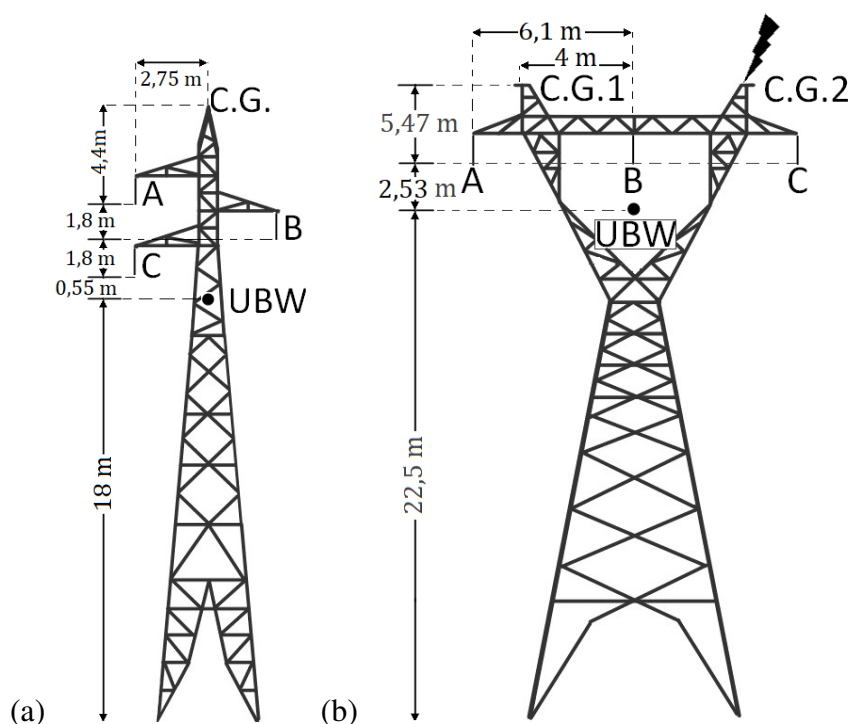


Figura 19 – Torres com a distribuição geométrica dos condutores dos sistemas base (a) Sistema de AT (b) Sistema de EAT

<sup>1</sup> Essa expressão é formulada para que quando o emprego do UBW for benéfico, o valor da diferença seja negativo, levando a uma conclusão intuitiva de que houve redução da sobretensão.

### 5.3 Sobretensões para LTs inoperantes

Nesta seção, estão concentrados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas nas LTs desconectadas do sistema elétrico. Sem a influência da tensão de operação no sistema, é possível observar as sobretensões nas cadeias de isoladores causadas exclusivamente pela DA. As Figs. 20 e 22 exibem as sobretensões nas cadeias de isoladores do sistema de AT. As Figs. 21 e 23 apresentam as mesmas medições para EAT. Comparam-se os sistemas sem o UBW (figuras (a)) com aqueles em que o UBW é incorporado à LT (figuras (b)), considerando tanto solos de baixa quanto alta resistividade.

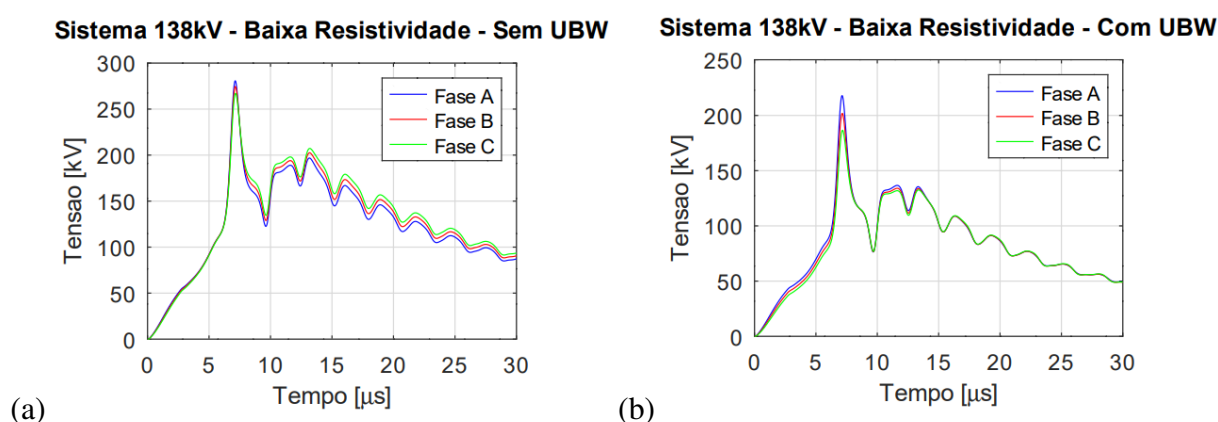


Figura 20 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

Ao comparar as Figs. 20 (a) e (b), pode-se notar uma leve redução nas sobretensões na resposta do sistema que possui o UBW. Essa redução é confirmada pela Tabela 16, em que para solos de baixa resistividade são observadas reduções consideráveis de até 30,14%. A Fig. 21 (b) também mostra uma redução nas sobretensões em relação à Fig. 21 (a), que pode chegar até 19,05%.

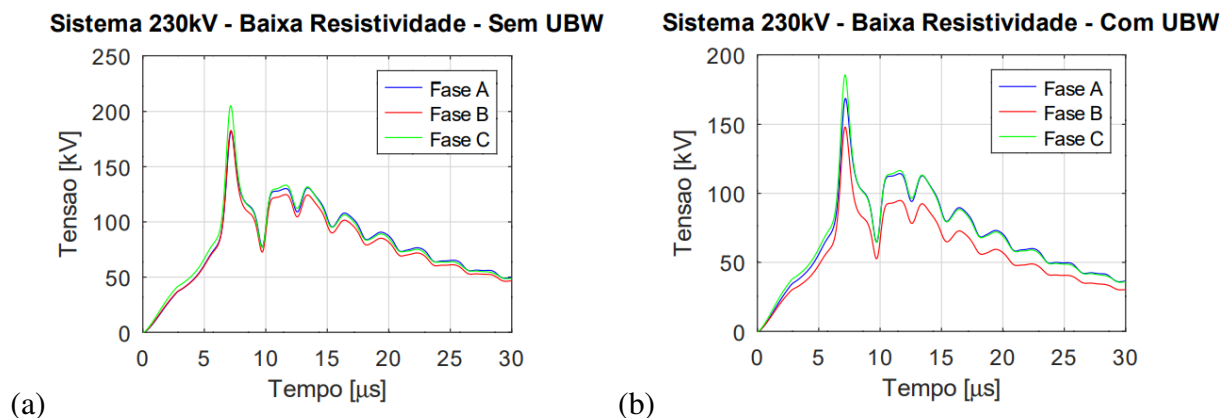


Figura 21 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

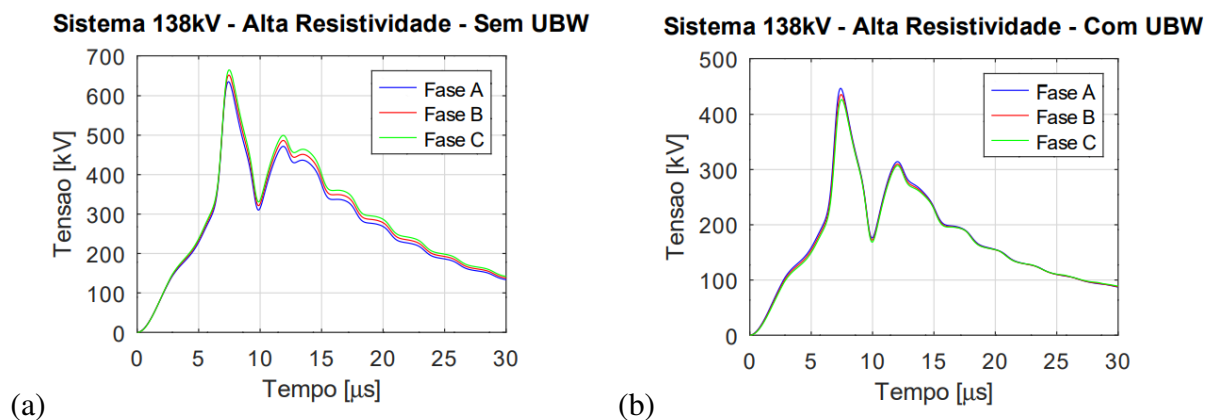


Figura 22 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

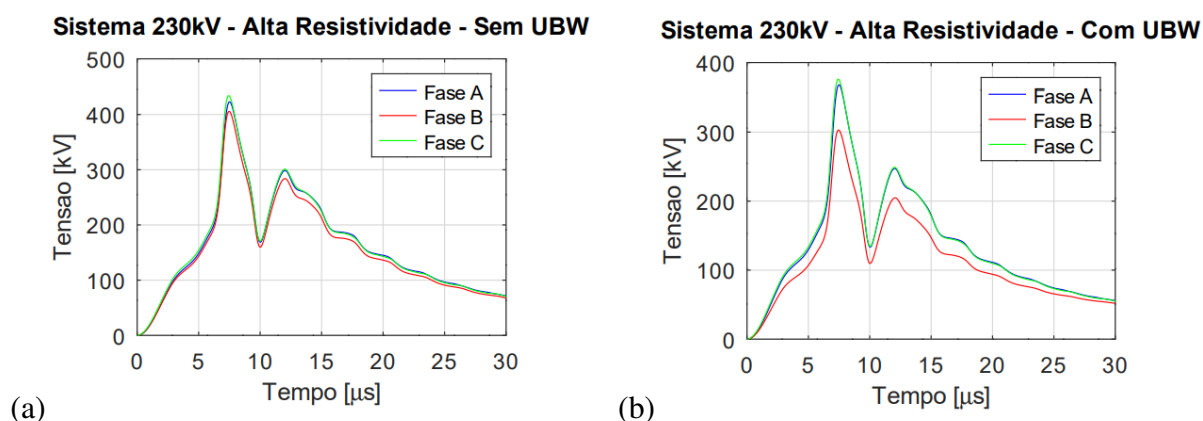


Figura 23 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

Assim como os resultados apresentados nas Figs. 20 e 21, as sobretensões dos sistemas que incorporaram o UBW são menores nas Figs. 22 e 23 (sistema EAT). Ao consultar as Tabelas 16

e 17, verifica-se que o valor em módulo da *Diff* é maior em solos de alta resistividade. À vista disso, o UBW mostra-se mais eficiente quando instalado próximo a esse tipo de solo.

Tabela 16 – Picos de sobretensão (kV) na LT inoperante de AT

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Max( $ V_A $ ) (kV)			Max( $ V_B $ ) (kV)			Max( $ V_C $ ) (kV)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	280,7	217,95	-22,35	274,54	201,89	-26,46	267,12	186,61	-30,14
4.000	635,45	447,08	-29,64	651,15	435,87	-33,06	664,21	426,72	-35,76

Tabela 17 – Picos de sobretensão (kV) na LT inoperante de EAT

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Max( $ V_A $ ) (kV)			Max( $ V_B $ ) (kV)			Max( $ V_C $ ) (kV)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	181,71	168,76	-7,13	182,84	148,01	-19,05	205,3	185,5	-9,64
4.000	422,97	367,77	-13,05	405,69	302,93	-25,33	434,17	375,98	-13,40

#### 5.4 Sobretensões para os sistemas com a LT operante

Espera-se que nessa seção o sistema elétrico de EAT apresente diferenças mais significativas nas curvas de sobretensão, devido à sua maior tensão de operação<sup>2</sup>. Por interesse, a análise se concentra na diferença de tensão entre os terminais das cadeias de isoladores, com valores de sobretensões absolutos.

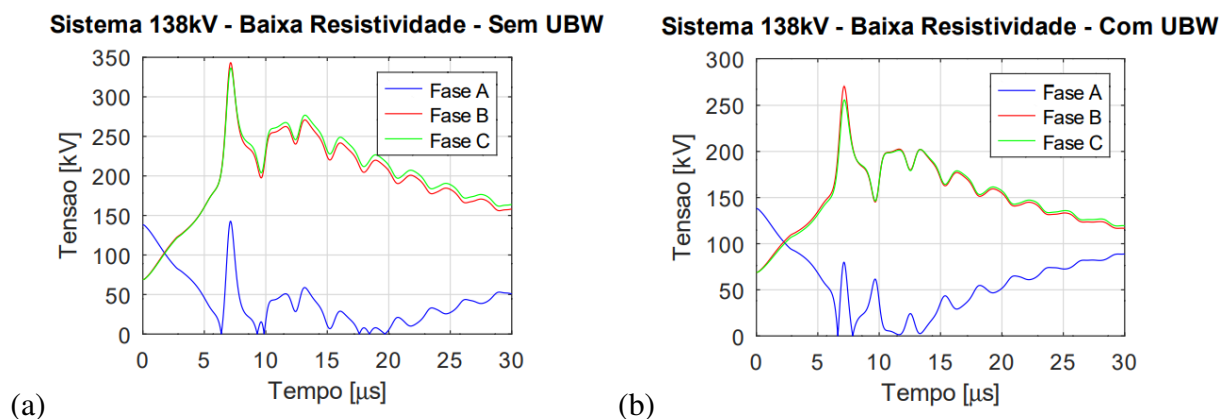


Figura 24 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

<sup>2</sup> Faz-se necessário ressaltar que o sequenciamento das fases é positivo, com a fase A em 0°.

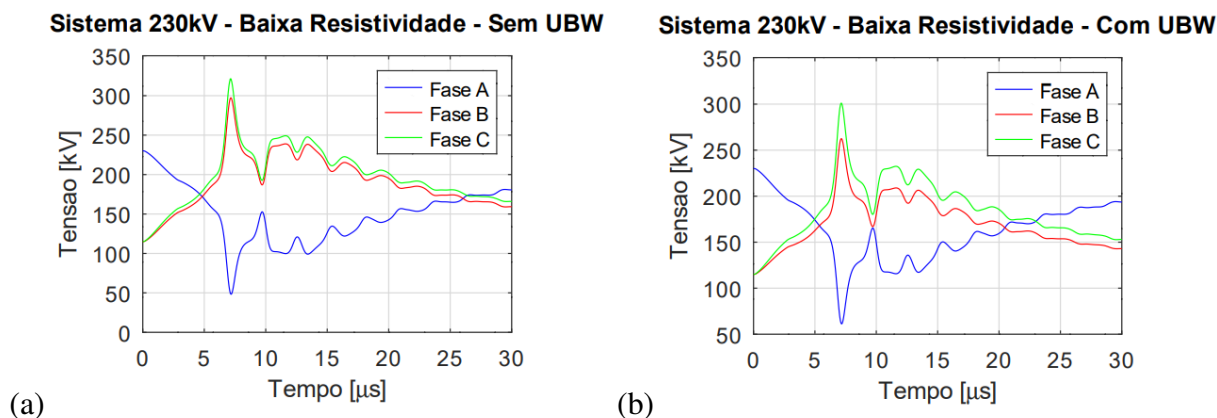


Figura 25 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

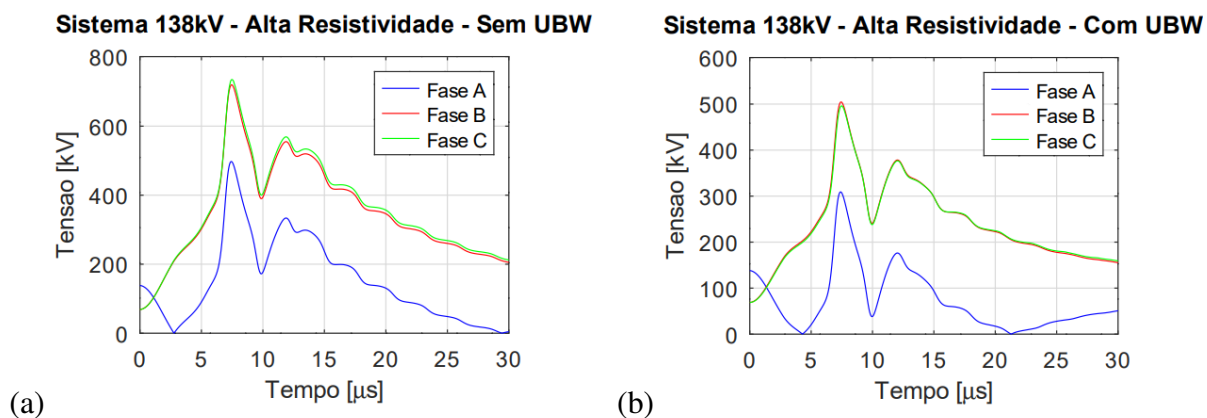


Figura 26 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

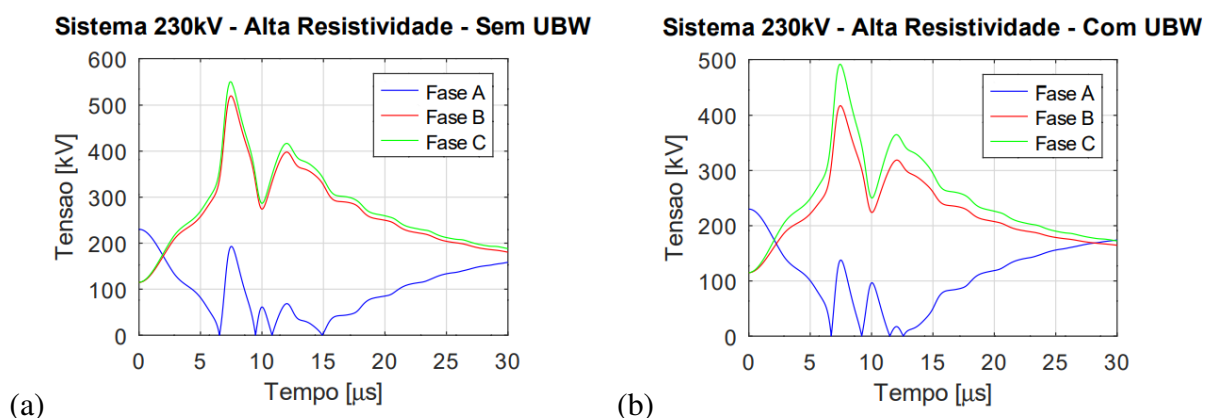


Figura 27 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de EAT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

Ao observar as figuras desta seção, confirma-se que a tensão de operação tem maior influência no sistema de EAT. Em uma primeira análise, a qual o UBW é desconsiderado, é feita a

comparação das Tabelas 16/17 e 18/19. Verifica-se que em solos de baixa resistividade, no sistema de EAT, ocorre um aumento de até 63%, diferença observada nos picos de sobretensão da fase B, em que inoperante foi de 182,84 kV e em operação esse valor alcançou 297,31kV. Enquanto que para o sistema de AT esse aumento é próximo a 26%, na fase C. Também é possível observar que o pico na fase A reduziu consideravelmente quando considerada a tensão de operação.

Em solos de alta resistividade também acontece um aumento mais expressivo no sistema de EAT, representando uma elevação de até 28% na sobretensão da fase B, em contraste dos 10% do sistema de AT da fase C<sup>3</sup>.

Quando considerado o uso do UBW, quando as LTs estão em operação, vê-se um menor impacto nos dois sistemas. Ao comparar as diferenças dos sistemas inoperante para operante, nota-se uma diminuição, principalmente, no sistema de EAT. Isto mostra que, quando considerada a tensão de operação, o UBW tem uma redução em sua eficiência. Entretanto, mesmo com essa redução, o UBW mostra-se benéfico, principalmente no sistema de AT, o qual apresenta uma redução de 37,87% na fase A.

Tabela 18 – Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT com a LT em operação

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Max( $ V_A $ ) (kV)			Max( $ V_B $ ) (kV)			Max( $ V_C $ ) (kV)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	142,69	138,02	-3,27	343,22	270,58	-21,16	336,44	255,93	-23,93
4.000	497,43	309,07	-37,87	719,82	504,54	-29,91	733,55	496,06	-32,38

Tabela 19 – Picos de sobretensão (kV) no sistema de EAT com a LT em operação

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Max( $ V_A $ ) (kV)			Max( $ V_B $ ) (kV)			Max( $ V_C $ ) (kV)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	230,03	230,03	0,00	297,31	262,49	-11,71	320,84	301,04	-6,17
4.000	230,04	230,03	0,00	520,14	417,38	-19,76	549,74	491,54	-10,59

<sup>3</sup> É válido pontuar que são avaliadas diferenças percentuais diretas, o que se tem são diferenças não ponderadas pelo valor em kV.

## 5.5 Influência do UBW em conjunto com os elementos para-raios

Uma evolução na complexidade dos sistemas é construída ao longo dos resultados. Neste ponto, tem-se um conjunto de três elementos para-raios conectados ao sistema, em que a linha está em operação. É possível pressupor que todos os picos de sobretensão sejam reduzidos em relação aos dados obtidos anteriormente. Para apresentação dos resultados desta seção, é feita uma subdivisão de três partes, as quais abordam respectivamente os seguintes resultados: sobretensões, corrente e energia absorvida nos elementos para-raios.

### 5.5.1 Sobretensões nos para-raios

A partir de uma análise gráfica das Figs. 28 e 29, é possível constatar que, assim como ocorre nos casos em que não há para-raios, quando há a presença do UBW tem-se uma redução na sobretensão. Dessarte, verifica-se que o UBW reduz a sobretensão mesmo que haja três elementos para-raios conectados na torre de incidência. Com o mesmo ponto de vista, as Figs. 30 e 31 também mostram redução na sobretensão nos casos em que o UBW está presente. Para esse último caso, o sistema de AT apresentou valores de sobretensão próximos para as fases B e C.

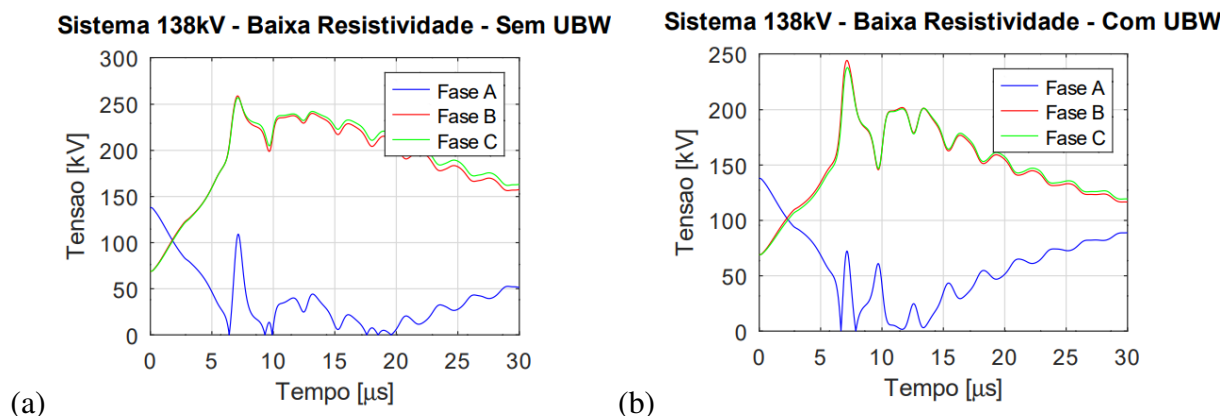


Figura 28 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de AT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

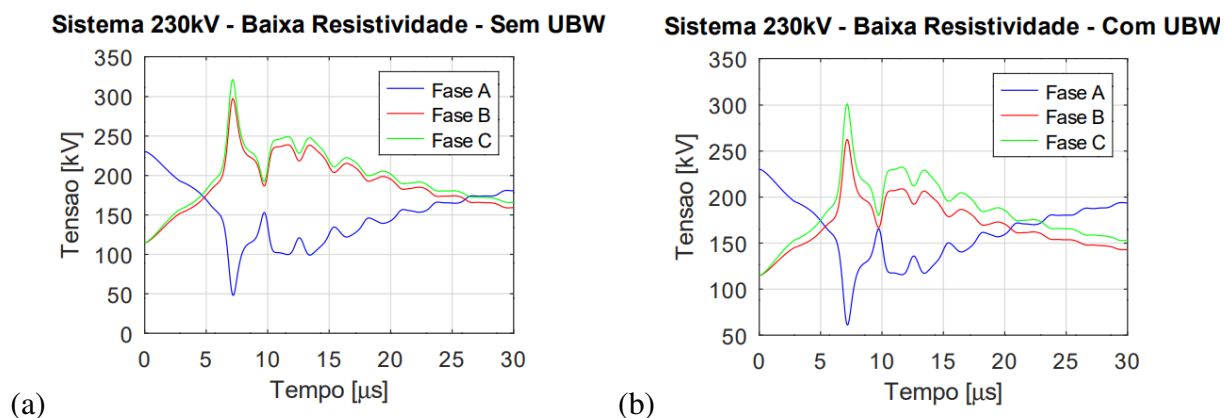


Figura 29 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo ao solo de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

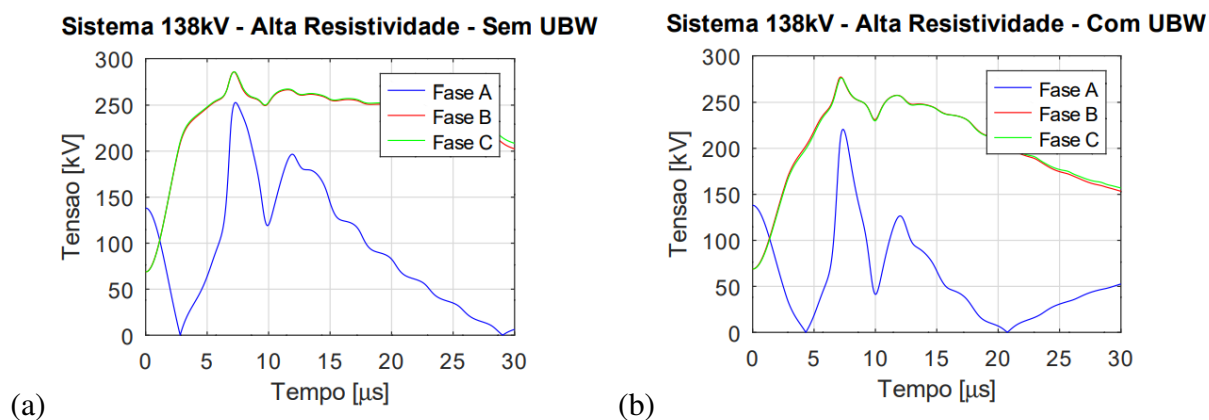


Figura 30 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de AT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

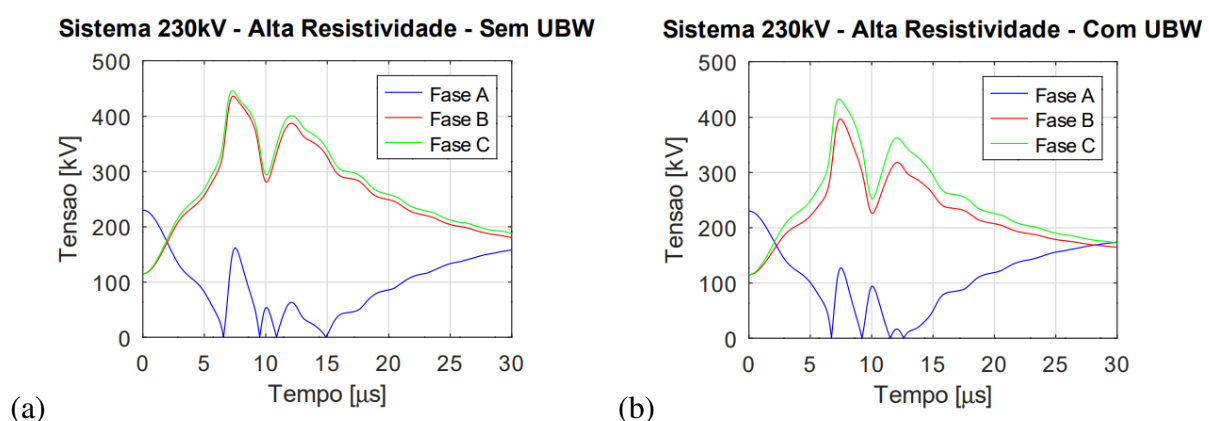


Figura 31 – Sobretensões nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo ao solo de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

Confirma-se, em um primeiro momento, ao observar os valores mostrados nas Tabelas 20 e 21, que todos os picos de sobretensões foram reduzidos em relação aos sistemas que não



comportam para-raios (subseções anteriores). Com maior relevância para essa pesquisa, constata-se que, quando empregado em conjunto com para-raios, a diminuição nos picos de sobretensões devido ao uso do UBW é minimizada. Posto isso, inclina-se a acreditar que o uso do UBW torna-se dispensável quando instalado em torres que possuam para-raios. Em razão disso, é feito o estudo amplo, em que é avaliada a influência do UBW como medida de proteção complementar desses elementos, visando a prolongar a vida útil desses componentes. Para isso, são computadas as correntes e energias absorvidas pelos para-raios e comparadas.

Tabela 20 – Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT equipado com três para-raios

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\text{Max}( V_A )$ (kV)			$\text{Max}( V_B )$ (kV)			$\text{Max}( V_C )$ (kV)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	138,01	138,01	0,00	259,05	244,08	-5,78	257,14	237,59	-7,60
4.000	252,82	220,06	-12,96	285,58	276,96	-3,02	285,75	275,94	-3,43

Tabela 21 – Picos de sobretensão (kV) no sistema de EAT equipado com três para-raios

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\text{Max}( V_A )$ (kV)			$\text{Max}( V_B )$ (kV)			$\text{Max}( V_C )$ (kV)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	230,03	230,03	0,00	297,52	262,62	-11,73	320,99	301,26	-6,15
4.000	230,04	230,03	0,00	436,59	396,81	-9,11	446,84	433,31	-3,03

### 5.5.2 Correntes nos para-raios

Essa subseção visa a apresentar um indicador do esforço realizado pelo para-raios. Partindo da ideia de que o para-raios é um elemento não-linear que relaciona corrente e tensão, é possível deduzir que uma maior corrente deverá fluir pelos para-raios do sistema que não possuir o UBW. O motivo disso é que, quando não há para-raios, a sobretensão é maior nos sistemas que não possuem UBW.

Em uma análise na Fig. 32, constata-se que, para quando o UBW não é empregado, a corrente é expressivamente maior nos para-raios posicionados nas fases B e C. A Fig. 33, mostra que houve um esforço do para-raio da fase C quando não há UBW. Neste último caso, tanto o para-raio da fase B quanto da A não apresentaram esforço perceptível. O mesmo acontece para os três para-raios da linha com UBW.

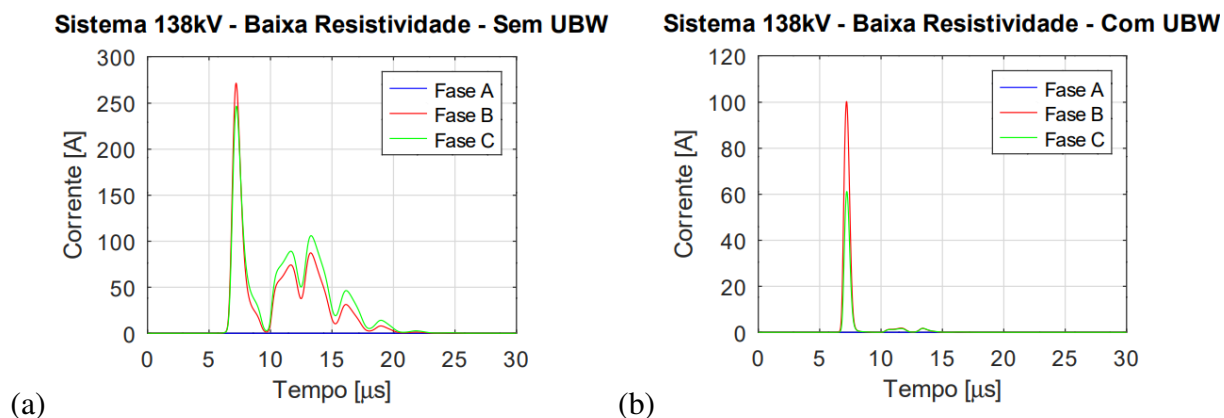


Figura 32 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

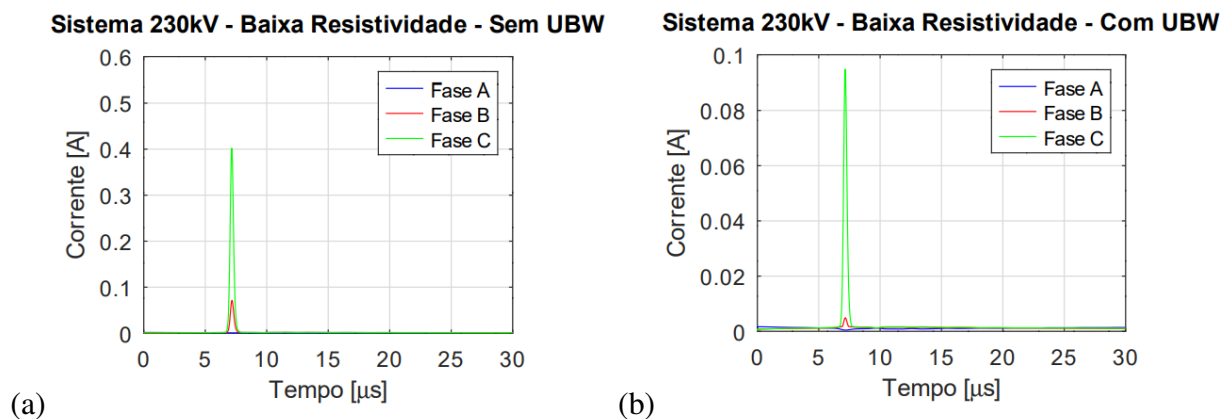


Figura 33 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

Um forte contraste surge quando comparadas as Figs. 34 e 35 com as de sobretensões, Figs. 30 e 31, pois as sobretensões aparentam estar próximas, entretanto há uma notável diferença na corrente nos elementos para-raios entre os sistemas que possuem ou não UBW. A primeira diferença é o pico de corrente, os quais foram nitidamente maiores nos sistemas que não têm UBW. Outro ponto relevante é o tempo de uso do elemento para-raio, que no sistema de AT foi aproximadamente 150% maior, chegando a apresentar corrente até os  $30\mu s$ , no caso em que não tem UBW.

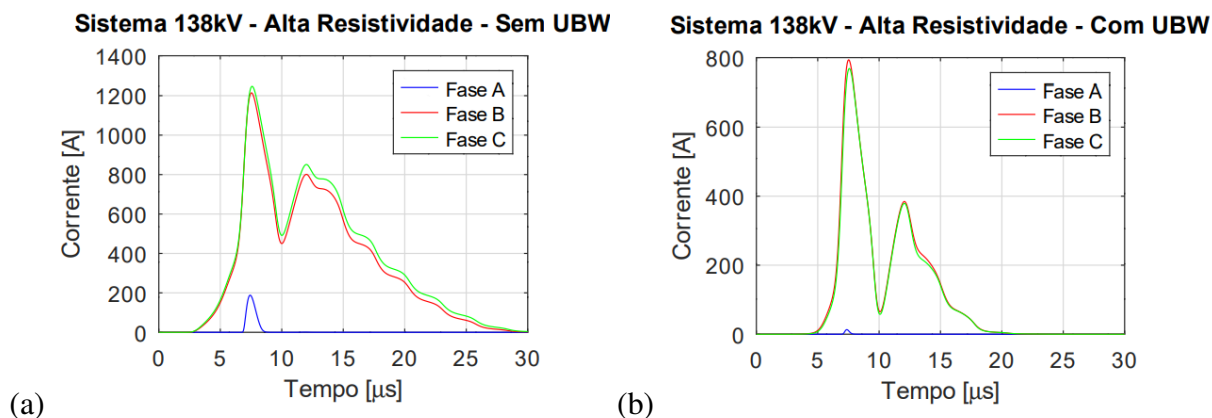


Figura 34 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

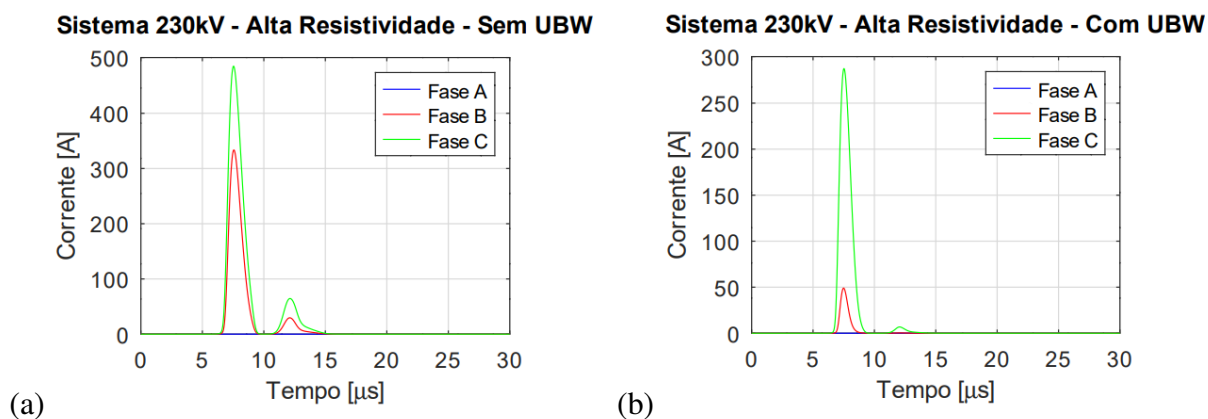


Figura 35 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

Quando feita a análise dos picos de correntes, observando as Tabelas 22 e 23, torna-se evidente a influência do UBW. Os para-raios que atuaram em conjunto com o UBW apresentaram picos de correntes de até 478,9 A menores nos sistemas de AT.

Tabela 22 – Picos de Corrente (A) no sistema de AT equipado com três para-raios

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\text{Max}( I_A )$ (A)			$\text{Max}( I_B )$ (A)			$\text{Max}( I_C )$ (A)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	0,001	0,001	0,00	271,71	100,3	-63,09	246,76	61,21	-75,19
4.000	188,22	13,16	-93,01	1.214,3	793,59	-34,65	1.247,3	768,4	-38,39

Tabela 23 – Picos de Corrente (A) no sistema de EAT equipado com três para-raios

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\text{Max}( I_A )$ (A)			$\text{Max}( I_B )$ (A)			$\text{Max}( I_C )$ (A)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	0,001	0,001	0,00	0,07	0,004	-94,29	0,4	0,09	-77,50
4.000	0,001	0,001	0,00	333,51	48,98	-85,31	484,37	286,99	-40,75

### 5.5.3 Energias Absorvidas pelos para-raios

Para avaliar o UBW em conjunto dos elementos para-raios, como critério final são avaliadas as energias absorvidas totais por esses elementos. Mediante o cálculo da energia absorvida, é possível abranger sobretensões, correntes e tempo de uso dos para-raios, que pode ser traduzido como esforço realizado pelo para-raios durante a DA. O cálculo da energia absorvida é feito pela Eq. (5.2).

$$E(t) = \int_0^t [v(t) \cdot i(t)] dt \quad (5.2)$$

Com intuito de apresentar uma visualização gráfica e não apenas do valor total da energia, nesta subsecção são retratadas figuras que mostram o incremento em relação ao tempo da área sob a curva da energia.

A partir da análise da Fig. 36, observa-se que a energia absorvida pelo sistema que não emprega o UBW é maior. Nota-se que o sistema com o UBW não só reduziu a energia total absorvida como também fez com que o para-raio da fase B realizasse maior esforço em comparação ao da fase C. Com isso, verifica-se que quanto mais próxima a fase está do UBW, menor será o esforço realizado pelo para-raio desta fase. As Figs. 38 (a) e (b) reforçam a ideia de que a presença do UBW reduz a energia absorvida e inverte o para-raio com maior energia absorvida.

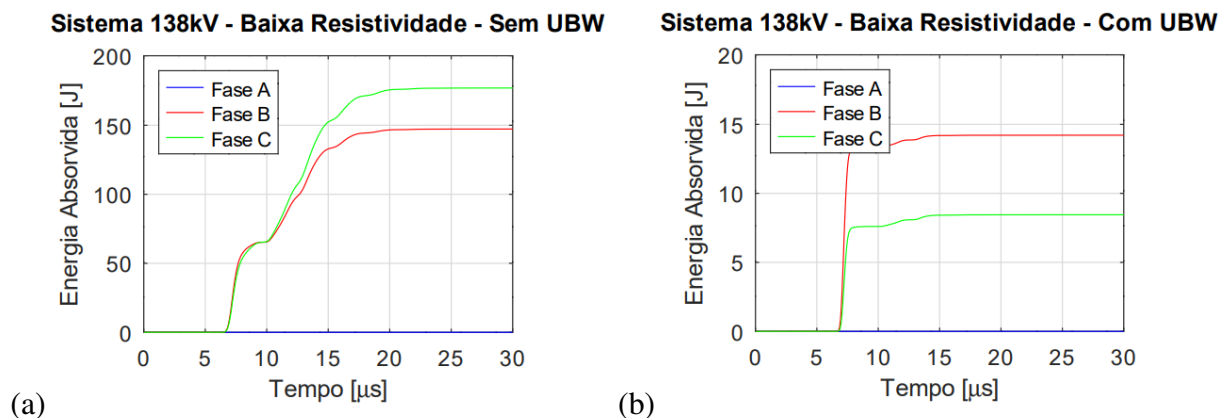


Figura 36 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

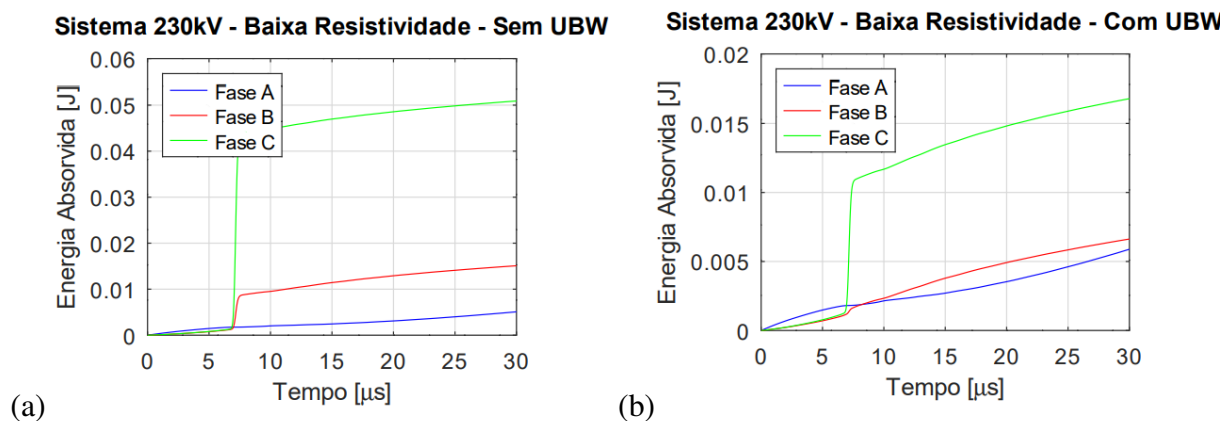


Figura 37 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de baixa resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

As Figs. 37 (a) e (b) apresentam um esforço dos para-raios. Isto se deve ao fato de que os para-raios do sistema de EAT são mais robustos. Por consequência, quando ocorre uma descarga típica nesse sistema, com solo de baixa resistividade, o impacto não é expressivo em relação à tensão de operação. Dessa forma, esses para-raios não são excitados de forma a conduzir corrente a ponto de absorver valores relevantes de energia. As Figs. 39 mostram que o emprego do UBW reduziu de forma considerável, em solos de alta resistividade, a energia absorvida pelo para-raios da fase B da linha.

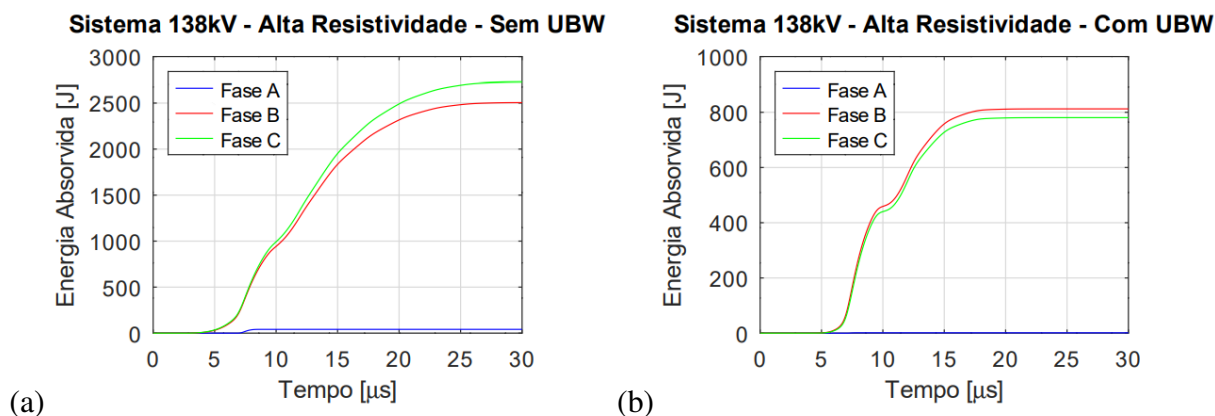


Figura 38 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

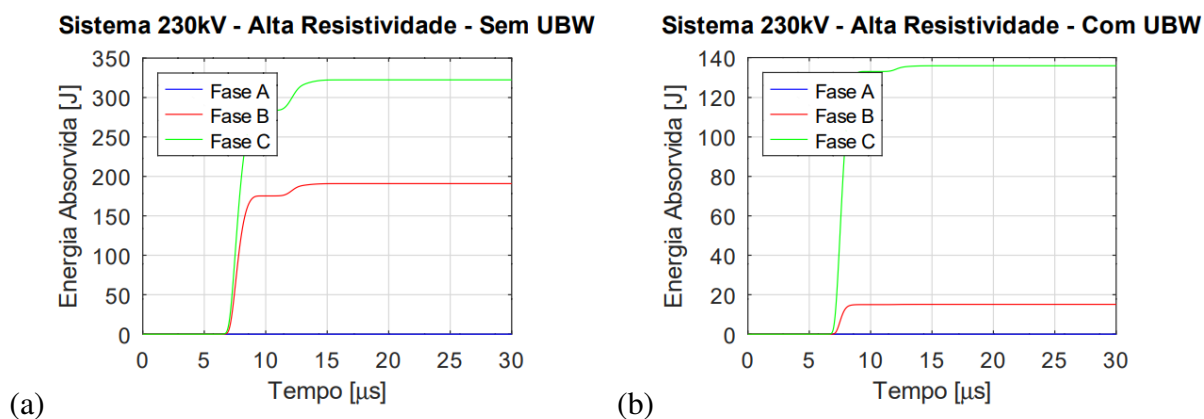


Figura 39 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de EAT próximo a solos de alta resistividade (a) sem UBW (b) com UBW

Tendo as Tabelas 24 e 25 como base de comparação, verificam-se valores expressivos em relação à diminuição do esforço dos para-raios em sistemas com UBW. Com reduções de até 1947,23 J, o uso do UBW em conjunto com os elementos para-raios mostrou sinergia significativa nos sistemas de AT. À vista disso, pode-se prolongar a vida útil do para-raios e reduzir manutenções ao instalar o UBW.

Tabela 24 – Energia total absorvida (J) pelos para-raios no sistema de AT

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$E_A$ (J)			$E_B$ (J)			$E_C$ (J)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	0	0	0	147,26	14,21	-90,35	177	8,44	-95,23
4.000	41,1	1,24	-96,98	2.505	812,35	-67,57	2.727,9	780,67	-71,38

Tabela 25 – Energia total absorvida (J) pelos para-raios no sistema de EAT

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$E_A$ (J)			$E_B$ (J)			$E_C$ (J)		
	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)	Sem	Com	Diff(%)
300	0	0	0	0,015	0,006	-60,00	0,05	0,016	-68,00
4.000	0	0	0	190,83	15,1	-92,09	322,38	135,85	-57,86

## 5.6 Influência da localização otimizada do UBW

Esta seção tem como objetivo central investigar a possibilidade de aumentar a eficiência do UBW. Desse modo, são feitas as mesmas comparações das seções anteriores; no entanto, o estudo de sensibilidade é voltado para o posicionamento do UBW. Ou seja, o interesse não está em verificar a redução de sobretensão devida a implementação do UBW, mas da posição em que o UBW deve ser instalado para se ter a maior redução.

Para isso, utilizam-se sistemas em que o UBW está em sua posição ótima, encontrada no capítulo 4, comparados com sistemas com o UBW na posição padrão. A Fig. 40 mostra o caso base, Fig. 40 (a), e a Fig. 40 (b), em vermelho, a posição ótima do UBW.

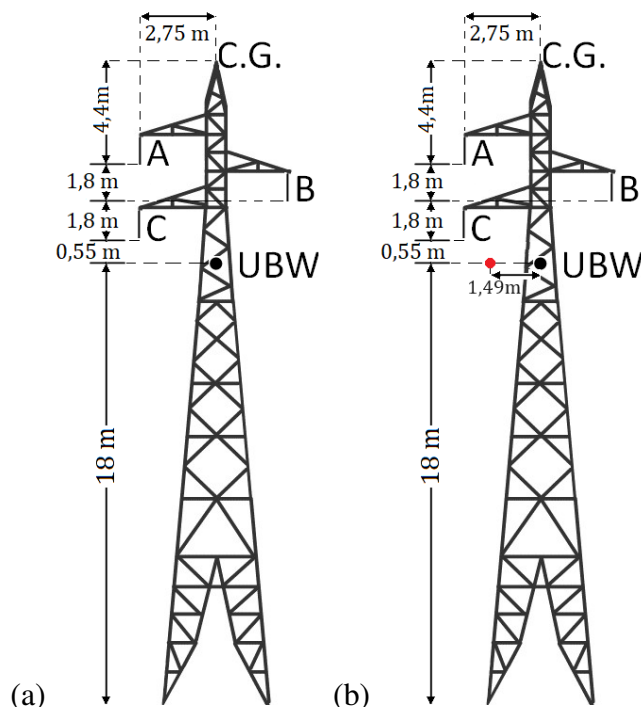


Figura 40 – Torres com a distribuição geométrica dos condutores dos sistemas base (a) Sistema de AT com UBW fora do ponto ótimo (b) UBW localizado no ponto ótimo

Seguindo a ordem estabelecida anteriormente, são feitas análises das sobretensões com a linha inoperante, com a linha em operação e, por fim, o estudo em torno dos elementos para-raios.

### 5.6.1 Sobretensão com a LT inoperante

As Figs. 41 e 42 mostram os resultados, em que as figuras de índice (b) mostram resultados dos sistemas que o UBW está na posição ótima.

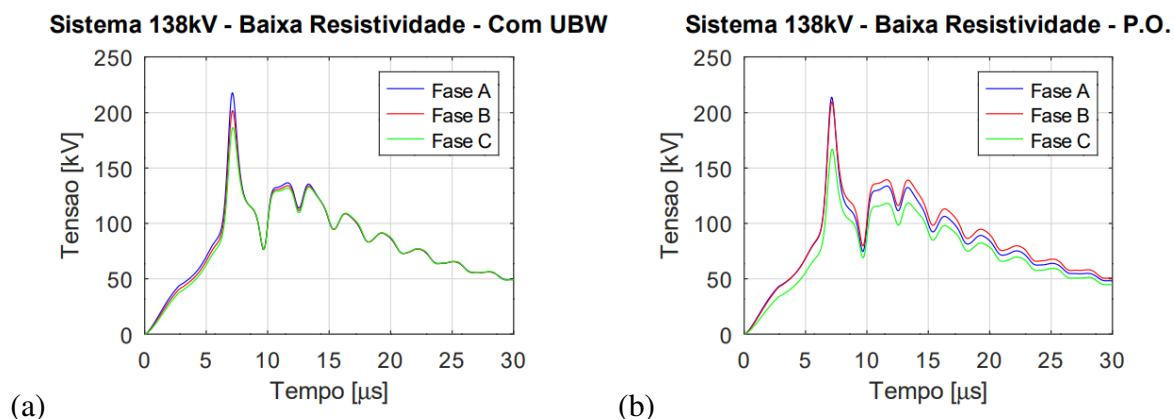


Figura 41 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

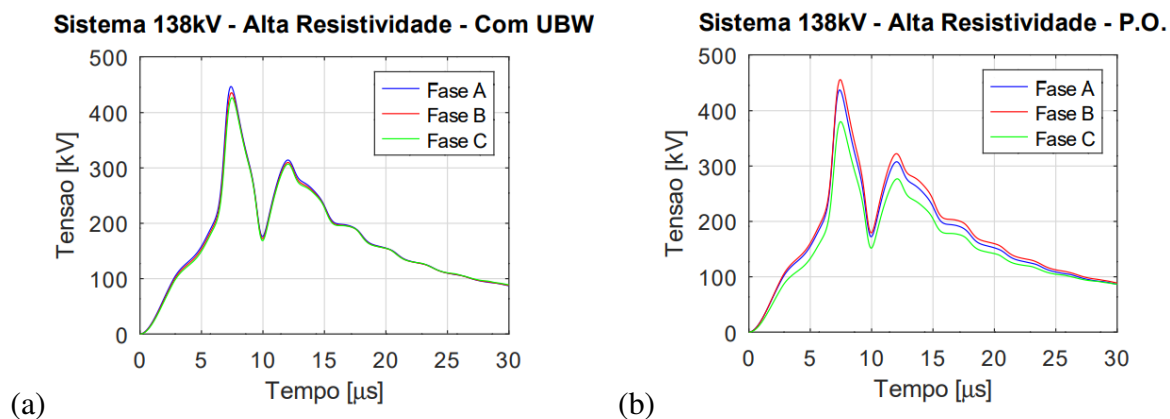


Figura 42 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

Em primeira análise, observa-se que ocorre uma separação nas sobretensões, em que a sobretensão na fase C é reduzida. Por se tratar de um estudo de otimização, tem-se como contrapartida a diminuição da sobretensão na fase C o aumento na fase B. Por meio da Tabela 26, constata-se a redução nas fases A e C; por consequência do processo de otimização, ocorre uma elevação na fase B.



Tabela 26 – Picos de sobretensão (kV) na LT inoperante de AT

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\text{Max}( V_A )$ (kV)			$\text{Max}( V_B )$ (kV)			$\text{Max}( V_C )$ (kV)		
	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)
300	217,95	213,96	-1,83	201,89	209,7	+3,86	186,61	167,04	-10,48
4.000	447,08	437,46	-2,15	435,87	455,23	+4,44	426,72	380,12	-10,92

### 5.6.2 Sobretensões com a LT em operação

As Figs. 43 e 44 retratam as sobretensões quando a linha está conectada à rede para os casos do UBW na posição ótima ou não.

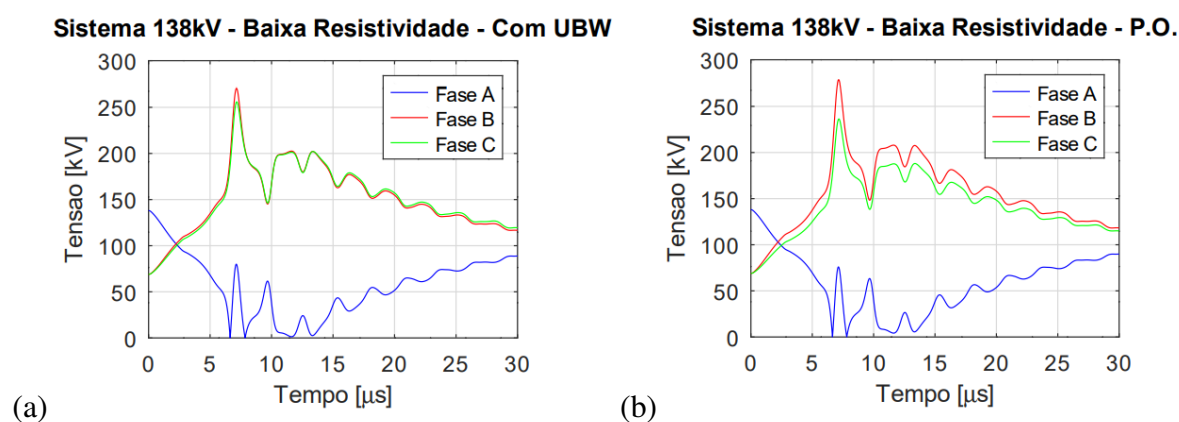


Figura 43 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

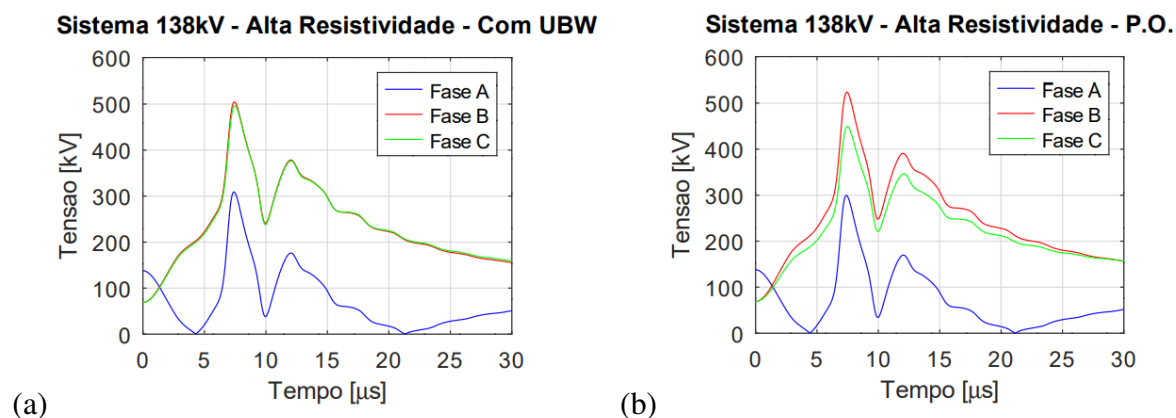


Figura 44 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

Observa-se novamente, através da análise gráfica, que posicionando o UBW em sua posição ótima, tem-se uma diminuição da sobretensão na fase C e há um leve aumento na fase B. Pela

Tabela 27 é possível confirmar que, quando a LT está em operação, o resultado se mantém.

Até então, é possível concluir que o processo de otimização do UBW mostrou-se indiferente às variações de resistividade do solo e se há ou não tensão de operação. Pode-se afirmar isso pois as fases A e B permaneceram ou reduziram seu pico de sobretensão enquanto a fase B tem um aumento relativamente menor da sobretensão. Logo, em todas as situações é observado o mesmo efeito.

Tabela 27 – Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT com LT em operação

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Max( $ V_A $ ) (kV)			Max( $ V_B $ ) (kV)			Max( $ V_C $ ) (kV)		
	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)
300	138,02	138,02	0,00	270,58	278,38	+2,88	255,93	236,36	-7,64
4.000	309,07	299,45	-3,11	504,54	523,90	+3,83	496,06	449,46	-9,39

### 5.6.3 Sobretensões nos para-raios

As Figs. 45 e 46 mostram as sobretensões nos para-raios das três fases para os casos em que o UBW está ou não no ponto ótimo.

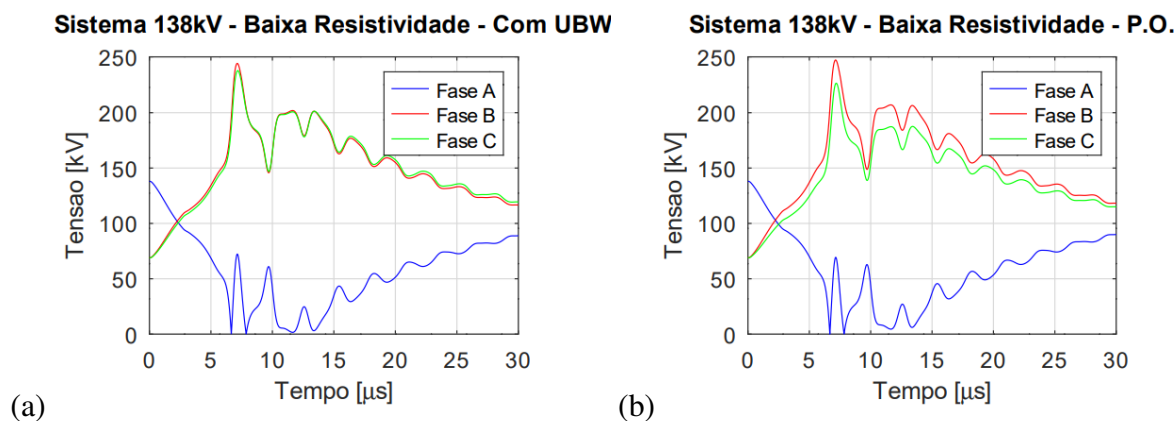


Figura 45 – Sobretensão nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

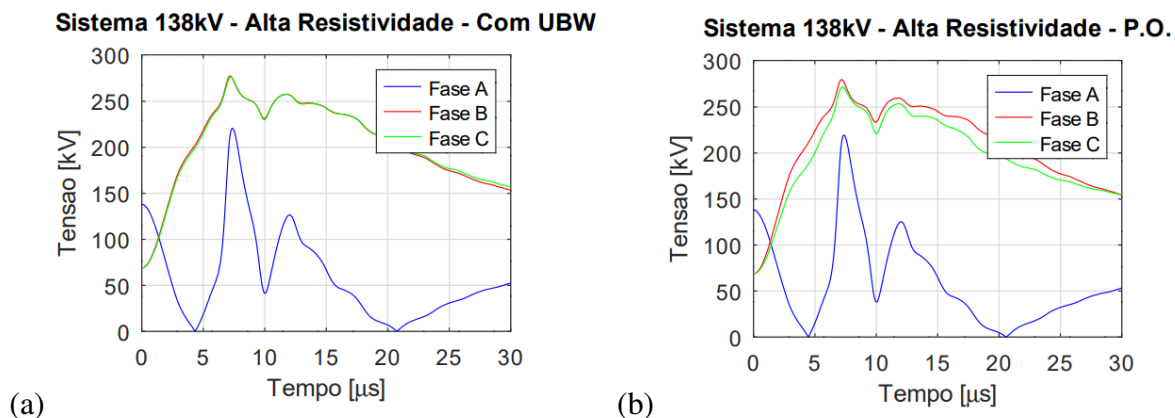


Figura 46 – Sobretensão nas cadeias de isoladores da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

Em acordo com as observações gráficas feitas nesta seção, há uma diminuição na sobretensão na fase C quando o UBW está no ponto ótimo. Com os dados da Tabela 28 vê-se que, mesmo com a presença dos três elementos para-raios, o resultado se igualam com os obtidos anteriormente. Isto é, mesmo com a inserção dos elementos para-raios, a otimização da posição do UBW teve resultados benéficos às fases A e C, e uma piora na fase B.

Tabela 28 – Picos de sobretensão (kV) no sistema de AT equipado com três para-raios

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\text{Max}( V_A )$ (kV)			$\text{Max}( V_B )$ (kV)			$\text{Max}( V_C )$ (kV)		
	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)
300	138,01	138,01	0,00	244,08	247,14	+1,25	237,59	226,63	-4,61
4.000	220,06	219,44	-0,28	276,96	279,17	+0,79	275,94	271,92	-1,45

#### 5.6.4 Correntes nos para-raios

Como primeira análise nos elementos para-raios, compara-se os níveis de corrente para as situações desenvolvidas nesta seção mediante Figs. 47 e 48.

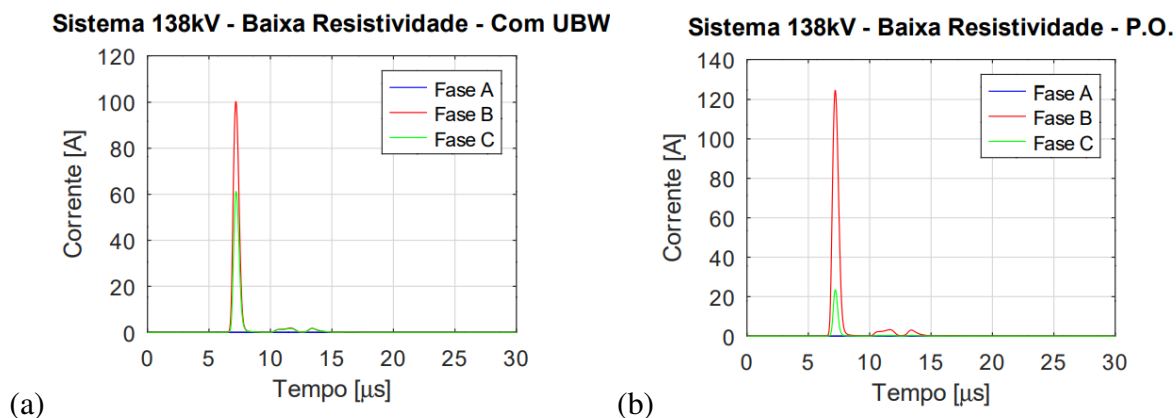


Figura 47 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

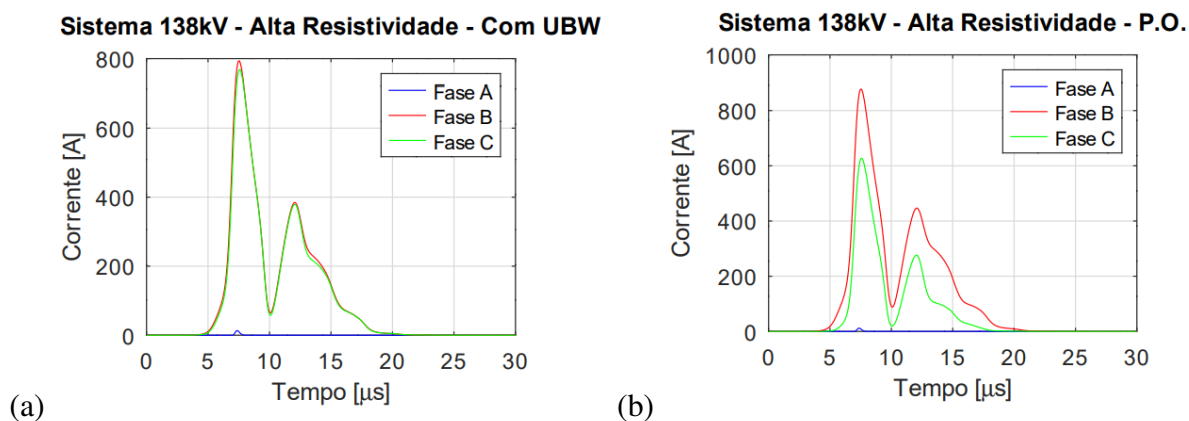


Figura 48 – Correntes nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

Verifica-se na Fig. 47 uma elevação na diferença de 24,22% no pico de corrente do para-raios da fase B enquanto o UBW está no ponto ótimo. Entretanto, destaca-se a redução de 61,68% no pico de corrente na fase C, visto na Tabela 29.

Tabela 29 – Picos de correntes (A) no sistema de AT equipado com três para-raios

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\text{Max}( I_A )$ (A)			$\text{Max}( I_B )$ (A)			$\text{Max}( I_C )$ (A)		
	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)
300	0,00	0,00	0,00	100,3	124,6	+24,22	61,21	23,45	-61,68
4.000	13,16	11,70	-11,09	793,59	877,79	+10,61	768,4	627,04	-18,39

### 5.6.5 Energia nos para-raios

Por fim, são apresentadas as Figs. 49 e 50 que mostram as energias absorvidas pelos para-raios, as quais são indicadores de esforço feito pelos para-raios.

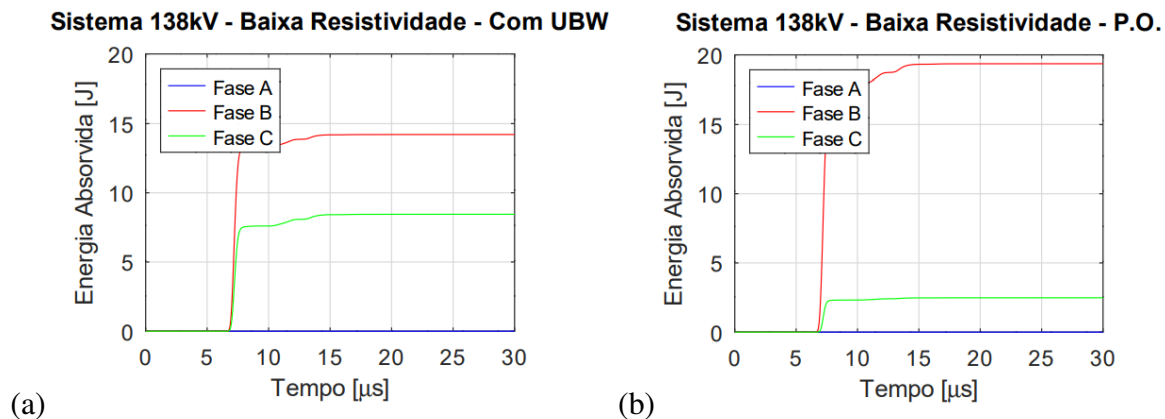


Figura 49 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de baixa resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

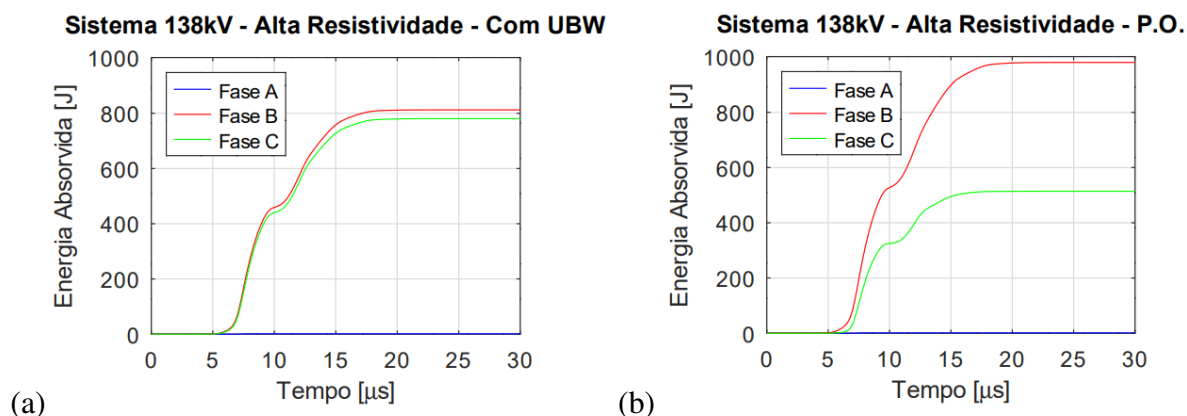


Figura 50 – Energia absorvida nos para-raios da torre do sistema de AT próximo a solos de alta resistividade (a) UBW na posição padrão. (b) UBW na posição ótima

Nas Figs. 49 (a) e (b) vê-se um aumento na energia absorvida pelo para-raios da fase B e uma redução na fase C, que já era esperado. Nas Figs. 50 (a) e (b), por meio de uma análise gráfica, identifica-se que houve um aumento na energia absorvida pelo fase B mas, novamente, uma redução na fase C. Pelos valores da Tabela 30 consolida-se a ideia de que a posição ótima do UBW aumentou a eficiência da sua implementação, pois os valores negativos presentes na tabela são sempre maiores que os positivos, que independem do tipo de solo.

Tabela 30 – Energia total absorvida (J) pelos para-raios no sistema de AT

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$E_A$ (J)			$E_B$ (J)			$E_C$ (J)		
	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)	Padrão	Ótima	Diff(%)
300	0,00	0,00	0,00	14,21	19,36	+36.24	8,44	2,48	-70.61
4.000	1,24	1,08	-12.9	812,35	979	+20.51	780,67	514,1	-34.14

## 5.7 Síntese do capítulo

O capítulo de resultados desempenha um papel principal na justificativa da investigação do tema, em que é possível confirmar as exposições feitas anteriormente. Em primeira análise, os resultados gráficos trouxeram uma visão panorâmica de como o sistema reage frente a uma descarga atmosférica. Em paralelo são comparadas as figuras que representam o sistema com o UBW. Essas comparações são feitas em situações diversas: i) para sistemas de AT e EAT; ii) solos de baixa e alta resistividade; iii) considerando ou não a tensão de operação da linha; iv) e a presença de para-raios.

A partir dessas comparações, admite-se que a adição do condutor UBW foi, em todas as situações, benéfico ao reduzir a sobretensão nas cadeias de isoladores das linhas.

Uma segunda análise é dirigida à posição ótima do UBW, a qual resultou em uma otimização da posição, que beneficiou o sistema de AT de forma global, isto é, a soma dos valores absolutos dos picos de sobretensão foi de fato reduzido. Ao levar a posição ótima para simulação, notou-se que para alcançar esse resultado a fase B era prejudicada, aumentando a sobretensão nessa fase.

Como última observação, no estudo de otimização os resultados se estenderam para todas as situações. Ou seja, tanto para solos de baixa quanto alta resistividade a otimização é observada. Também são compreendidos os sistemas que possuem para-raios, em que todos os resultados foram compatíveis com o esperado, apresentando uma melhora nos dados referentes às fases A e C e uma piora na fase B.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Síntese da Dissertação e Principais Resultados

Esta dissertação tem como objetivo principal quantificar objetivamente a influência do UBW em sistemas elétricos de AT e EAT. Os modelos dos sistemas foram desenvolvidos considerando a geometria das torres e os estudos de coordenação de isolamento. O ambiente de simulação, baseado no software ATP, permitiu analisar a incidência de DAs nos sistemas, considerando diferentes cenários.

### 6.2 Principais Resultados

#### 1. Efeito do UBW em LTs Inoperantes:

- Observou-se uma considerável redução nos picos de sobretensão quando o UBW foi introduzido nos sistemas, tanto em AT quanto em EAT.
- A eficiência do UBW foi maior no sistema de AT, com uma diminuição de até 35,76%. No sistema de EAT, a redução máxima foi de 25,33%.
- Em solos de alta resistividade, o UBW contribuiu para uma redução adicional nos picos de sobretensão em ambos os sistemas.

#### 2. Análise do UBW em LTs em Operação:

- Ao considerar a tensão de operação da linha, a influência do UBW foi reduzida para linhas de EAT, enquanto em linhas de AT, houve uma redução ainda maior, alcançando até 37,87%.
- Em linhas de EAT, a eficácia do UBW foi atenuada pela tensão de operação, enquanto em linhas de AT, o UBW mostrou-se mais eficiente.

#### 3. UBW em Conjunto com Para-Raios:

- Quando o UBW foi utilizado como um método complementar de proteção, em paralelo a um conjunto de três para-raios, observou-se uma redução na sua influência.

- Embora a presença do UBW tenha resultado em diferenças menores do que 10%, a análise detalhada da corrente nos para-raios revelou uma redução significativa na energia absorvida, contribuindo para uma menor frequência de manutenções e aumento da vida útil dos para-raios.

#### **4. Estudo de Otimização da Posição do UBW:**

- A otimização da posição do UBW demonstrou ser uma estratégia eficaz para reduzir os picos de sobretensão nas fases A e C em LT de AT.
- Apesar de uma elevação na sobretensão na fase B, houve uma redução geral no pico de sobretensão total no sistema.
- Avaliando o ganho em termos de esforço dos para-raios, a posição ótima do UBW resultou em uma redução de 100 J na energia total do sistema de AT, especialmente em solos de alta resistividade.

### **6.3 Propostas de Trabalhos Futuros**

1. Realizar um estudo probabilístico considerando as correlações estatísticas propostas em [14], explorando a probabilidade de interrupção em diferentes situações.
2. Avaliar a viabilidade econômica de substituir dois para-raios (fases A e C) pelo UBW quando posicionado na posição ótima, considerando o desempenho da linha.
3. Investigar a aplicação do UBW em diferentes sistemas, variando torres e tensões de operação.
4. Realizar o estudo de desempenho alternando a fase da tensão de operação para garantir uma avaliação robusta do pior caso.
5. Estender o estudo de otimização da posição do UBW na torre de 230 kV, considerando a simetria da torre com a introdução de um segundo UBW.



## **6.4 Considerações Finais**

Tem-se a expectativa de que esta dissertação ofereça uma contribuição significativa para a compreensão do impacto do UBW em sistemas elétricos de AT e EAT. Os resultados obtidos fornecem caminhos sobre como o UBW pode ser uma estratégia eficaz para mitigar sobretensões e reduzir o esforço dos para-raios, com implicações práticas para a operação e manutenção desses sistemas. As propostas de trabalhos futuros delineiam caminhos para a expansão e aprofundamento desses estudos, explorando novas facetas do problema e considerando diferentes abordagens analíticas e práticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*. 1st Edition, Boca Raton , 1999. <https://doi.org/10.1201/9781420052015>.
- [2] M. A. O. Schroeder, R. A. R. Moura, A. C. Tavares, M. A. M. Boya, M. V. C. Neto, and M. R. Oliveira, “Desempenho de linha de alta tensão frente a descargas atmosféricas: Estudo de caso de uma linha de 69 kv,” in *XXIV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e transmissão de Energia Elétrica, Curitiba*, 2017.
- [3] B. N. Giarola, “Análise da influência de para-raios nas sobretensões atmosféricas por descarga direta em linhas de transmissão considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência..” Programa de Pós-graduação em engenharia Elétrica PPGEL - UFSJ/CEFET-MG, 2016.
- [4] P. C. Marcelino, “Avaliações de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão.” Programa de Pós-graduação em engenharia Elétrica PPGEL - UFSJ/CEFET-MG, 2021.
- [5] S. Visacro, F. H. Silveira, and A. De Conti, “The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines.,” *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 27, pp. 205-213., 2012. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2168546.
- [6] T. Takuma, T. Kawamoto, M. Yasui, M. Murooka, and J. Katoh, “Analysis of effect of shield wires on electrostatic induction by ac transmission lines,” in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 9, pp. 2612-2618, Sept. 1985, doi: 10.1109/TPAS.1985.319027.
- [7] S. Visacro, F. H. Silveira, M. H. V. Vale, and G. D. Pomar, “Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures,” *Electric Power Systems Research*, 2020/21, doi:10.1016/j.epsr.2021.107134.
- [8] ATP-EMTP, *Rule Book*. Canadian-American EMTP Users Group, 1997.
- [9] A. T. Diefenthaler, “Modelagem matemática de linhas de transmissão baseada em dados reais da rede de distribuição primária de energia elétrica.” Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Unijuí, 2019.
- [10] J. R. Marti, “Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations.,” in *Trans. On Power App. Syst.*, pp. Vol. 101, No. 1, pp. (147–155), IEEE, 1982.
- [11] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, and M. Schroeder, “Revision, extension, and validation of jordan’s formula to calculate the surge impedance of vertical conductors,” *IEEE*

- Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 3, pp. 530–536, 2006, doi: 10.1109/TEMC.2006.879345.
- [12] G. C. P. Silva, “Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas considerando como fatores de sensibilidade as modelagens das torres e correlações estatísticas entre parâmetros das ondas de corrente.” Trabalho Final de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei. 2023.
- [13] T. Hara and O. Yamamoto, “Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis,” 1996. Volume 143, Issue 3, May 1996, p. 283 – 289, DOI: 10.1049/ip-gtd:19960289.
- [14] A. J. Oliveira, “Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas sob uma perspectiva probabilística..” Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica PPGEL - UFSJ/CEFET-MG, 2018.
- [15] M. A. O. Schroeder, “Parâmetros de descargas atmosféricas no estado de minas gerais: Caracterização e processamento de dados a partir da estação do morro do cachimbo..” Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, 1999.
- [16] F. Heidler, “Analytische blitzstromfunktion zur lemp-berechnung..” 18th Int. Conf. Lightn. Protec. Munich, Germany, p. 63–66, 1985.
- [17] A. De Conti and S. Visacro, “Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms..” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, p. 448–451, 2007, doi: 10.1109/TEMC.2007.897153.
- [18] R. Jones, P. Clifton, G. Grotz, M. Lat, F. Lembo, D. Melvold, D. Nigol, J. Skivtas, A. Sweetana, D. Goodwin, and et al., “Modeling of metal-oxide surge arresters,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 302–309, 1992.
- [19] M. A. O. Schroeder, A. S. Junior, and S. F. Visacro, “An interactive computational code for simulation of transient behavior of electric system components for lightning currents,” In: ICLP - International Conference on Lightning Protection, 2002, Cracow. 26th ICLP - International Conference on Lightning Protection, 2002.
- [20] M. A. O. Schroeder, M. T. C. de Barros, A. C. S. Lima, M. M. Afonso, and R. A. R. Moura, “Evaluation of the impact of different frequency dependent soil models on lightning overvoltages, electric power systems research,” in *Electric Power Systems Research, Volume 159*, 2018, doi:10.1016/j.epsr.2017.09.020.
- [21] R. A. R. Moura, “Tags. transients analysis of grounding systems..” Disponível em: <<https://github.com/rdfribeiro/TAGS>>. Acesso em: 19, setembro e 2023.

- [22] B. Gustavsen and A. Semlyen, “Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, 1999, doi: 10.1109/61.772353.
- [23] B. Alsberg, “Toolbox - matlab. matlab central file exchange. [online].” Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/175-htmltool>>. Acesso em 20, setembro e 2023.
- [24] L. Paris and R. Cortina, “Switching and lightning impulse discharge characteristics of large air gaps and long insulator strings,” *IEEE Trans. on PAS*, Apr. 1968 pp. 947-957. doi: 10.1109/TPAS.1968.292069.
- [25] H. H. Farr, *Transmission Line Design Manual*. University of Michigan Library, 1980.
- [26] Balestro, “Isoladores poliméricos para ancoragem ou suspensão de alta tensão,” Tipo IBP.
- [27] M. Darveniza, “The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard wave shapes-a theoretical basis,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 373–381, 1988, doi:10.1109/14.2377.
- [28] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of ICNN’95-international conference on neural networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, IEEE, 1995, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.

## 7 APÊNDICE

Com propósito de ilustrar o sistema por completo que é simulado no *ATPDraw*, são apresentada as Figs. 51 e 52. Nestas figuras são observados dois sistemas, que mostram as 7 torres, o ponto de incidência da DA no condutor de proteção, os para-raios conectados às três fases da torre 4 e em paralelo a cadeia de isoladores. A cadeia de isolador e a DA são representadas por *MODELS*, enquanto os sistemas de aterramentos por *Libraries*. Os para-raios são sistemas reduzidos, os quais se expandidos apresentam circuitos iguais aos da Fig. 8. As LTs são LCC's, blocos do *ATPDraw* que empregam o modelo J.Marti. As torres são conectadas ao circuito assim como apresentadas nas Figs. 7 (a) e (b). Nota-se que o UBW está conectado no quarto segmento, conforme supracitado na seção 2.3.5.

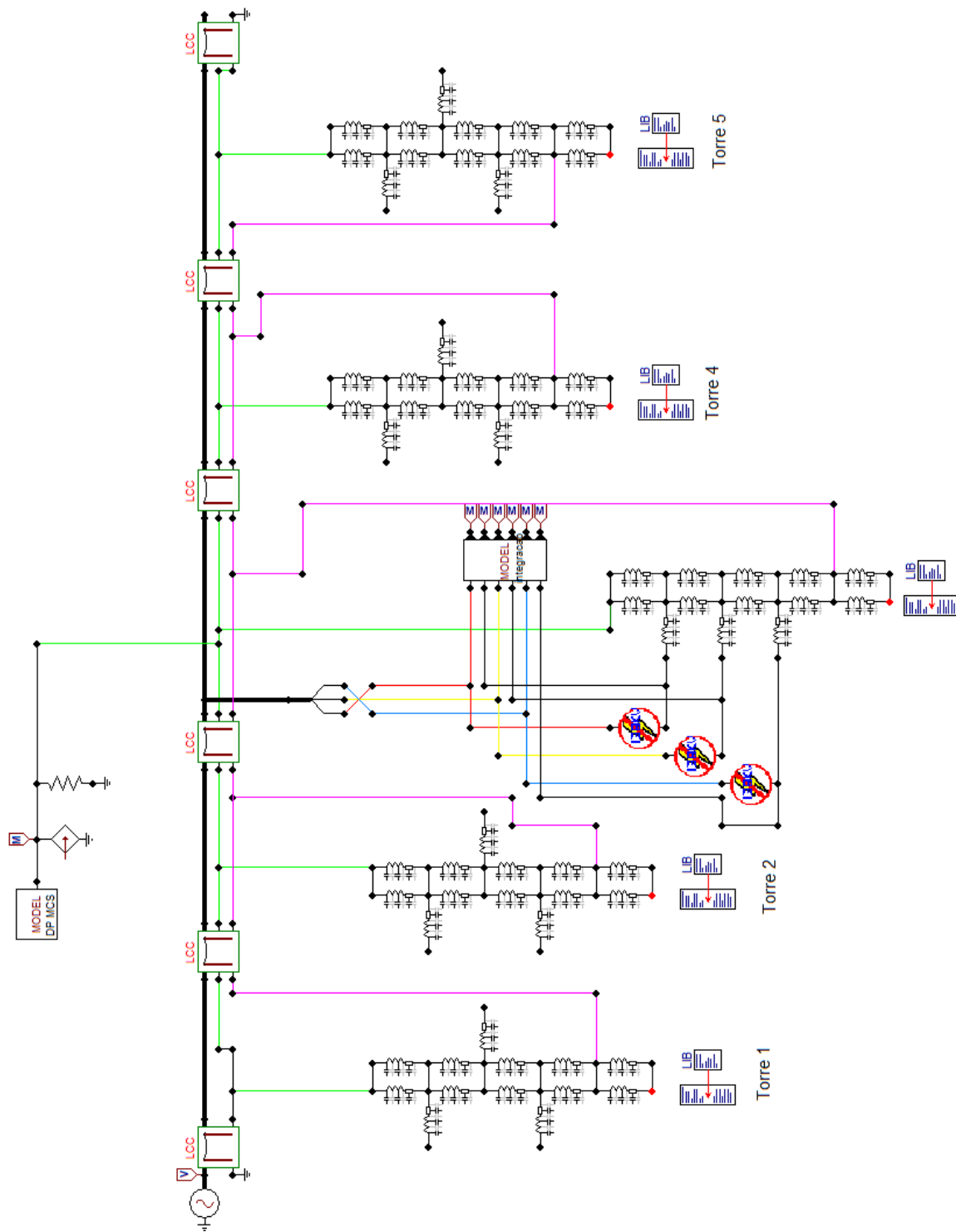


Figura 51 – Representação do caso base no ATPDraw para o sistema de AT

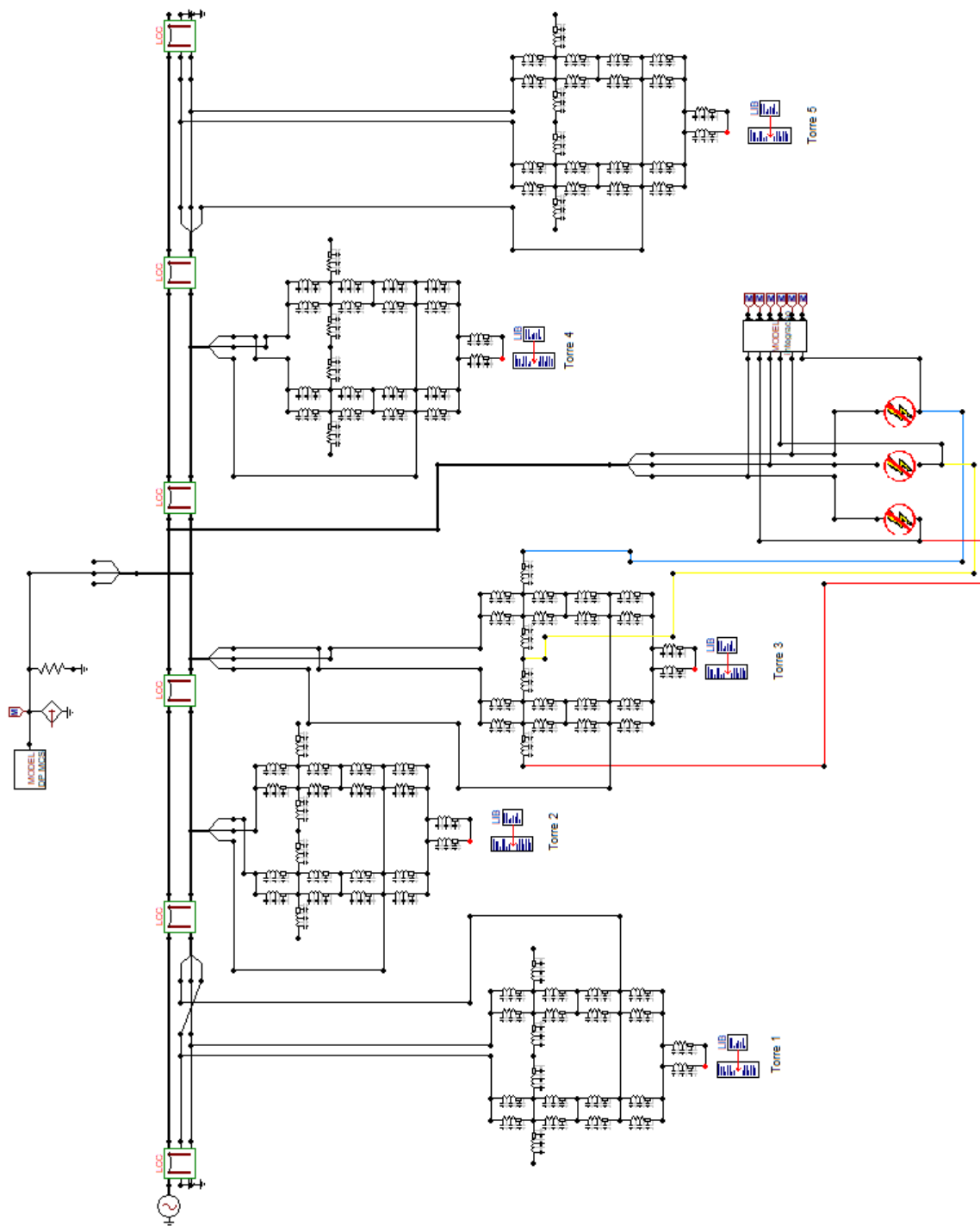


Figura 52 – Representação do caso base no ATPDraw para o sistema de EAT