



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**Dissertação de Mestrado**

**Modelagem e Posicionamento de Para-Raios em  
Redes Subterrâneas de Parques Eólicos  
conectadas a Redes Aéreas Utilizando o ATP**

*Lucas Silveira Marroques*  
**Mestrando**

*Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D.*  
**Orientador**

*Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.Sc.*  
**Coorientador**

Uberlândia, fevereiro/2015



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

# **Modelagem e Posicionamento de Para-Raios em Redes Subterrâneas de Parques Eólicos conectadas a Redes Aéreas Utilizando o ATP**

Dissertação de mestrado submetida à  
Universidade Federal de Uberlândia por  
Lucas Silveira Marroques como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do  
título de Mestre em Ciências.

## **Banca Examinadora:**

Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D. (Orientador) – UFU

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.Sc. (Coorientador) – UFU

Adélio José de Moraes Dr.Sc. – UFU

Daniel Araujo Caixeta – Pitágoras

---

Geraldo Caixeta Guimarães

Orientador

---

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

Coorientador

---

Edgard Afonso Lamounier Júnior

Coordenador do Curso de Pós-graduação

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Dorian e Luzia, ao meu irmão Daniel, à minha namorada Camila, que sempre me incentivaram a dar mais um passo, e com eles pude aprender que o passo mais importante é sempre o próximo. E a toda a minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado nessa conquista.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** pela minha vida, pela inteligência e sabedoria, dons indispensáveis para o desenvolvimento desta dissertação, e por tantas graças que **Ele** tem concedido a mim.

Aos meus pais **Doriano** e **Luzia**, ao meu irmão **Daniel**, e demais **familiares**, por sempre torcerem por mim e acreditarem no meu potencial, e que durante todos os momentos, deram total apoio para a realização desta, além da compreensão nas horas de minha ausência.

À minha namorada **Camila** pelo seu companheirismo, carinho, dedicação, e que mesmo a distância, sempre está me apoiando e torcendo por mim.

Ao professor **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** pela confiança, paciência, compreensão, orientação e conhecimentos transmitidos durante todas as etapas deste trabalho.

Ao professor **Geraldo Caixeta Guimarães** por todo apoio, incentivo e tempo a mim dispensado em seus ensinamentos sobre o assunto aqui estudado.

Aos **amigos** por todo apoio, compreensão e carinho durante esses dois anos de mestrado, especialmente àqueles que me incentivaram a seguir em frente, nos momentos de fragilidade e indecisão.

À **Cinara Fagundes P. Mattos**, secretária da pós-graduação, pelas informações e auxílios prestados.

À **CAPES** (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

## RESUMO

# Modelagem e Posicionamento de Para-Raios em Redes Subterrâneas de Parques Eólicos conectadas a Redes Aéreas Utilizando o ATP

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver o modelo da proteção contra o surgimento de sobretensões em sistemas eólicos ligados à rede aérea. Diversas discussões que merecem mérito surgem nesse cenário.

A primeira questão é o levantamento de uma literatura sobre as características e métodos de aplicação dos para-raios. Então, se descrevem as características úteis e define um método de aplicação para fazer essa proteção.

A segunda questão é quanto à modelagem do para-raios. Como se trata de um problema de transitórios eletromagnéticos, a simulação será realizada em um *software* desenvolvido no domínio do tempo, a interface escolhida é o *ATPDraw* do *software ATP*. O modelo do para-raios deve incluir o comportamento dinâmico que ele apresenta frente a surtos rápidos. Tal definição já leva em consideração que a maior sobretensão possível de ocorrer em um sistema advém de uma descarga atmosférica direta.

A terceira questão é quanto à modelagem dos demais equipamentos do sistema, as quais devem se adequar à simulação de surtos atmosféricos.

Para obter o modelo correto do para-raios primeiramente deve-se definir qual o tipo de ramo não linear a se utilizar entre os existentes no *software ATP*. Em seguida, deve-se encontrar os valores corretos da curva característica do para-raios que define o seu comportamento. Esses valores são obtidos através do uso de um modelo variável com a frequência. Os principais modelos são comparados para decidir qual o mais apropriado para a operação.

Definido o modelo, um caso base é simulado para aplicar o modelo de para-raios próprio para surtos rápidos. A proteção é alocada corretamente garantindo um nível adequado de sobretensão para os equipamentos do sistema, os cabos, os transformadores e os geradores.

Finalmente, são descritos os pontos principais do trabalho destacando as contribuições feitas e aspectos de interesse para trabalho futuros.

### Palavras chave:

ATP, descarga atmosférica, geração eólica, modelagem de para-raios, sobretensões.

## **ABSTRACT**

# **Modeling and Positioning of Surge Arresters at Underground Networks of Wind Farms connected to Overhead Networks Using the ATP**

The main objective of this work is to analyze the protection against the occurrence of overvoltages in a wind system connected to the overhead network. Several discussions that deserve merit arise at this scenario.

The first point is the literature on the characteristics and methods of application of the surge arrester. Once done, the useful features and an implementation method for this protection can be defined.

The second point is regards to the modeling of the arrester. Since this is a problem of electromagnetic transient, the simulation will be realized in a software developed at time domain, the chosen interface is the ATPDraw, from ATP. The model of the arrester must include dynamic behavior for rapid surge. This definition already takes into account that the greatest possible overvoltage that occurs on a system arises from a direct lightning stroke.

The third point is concerned to the modeling of the remaining system equipments which must conform to the simulation of lightning.

To get the correct model for arresters, firstly it must be defined what type of non-linear branch to be used within existing ATP models. Then, the correct values that define the operation of the arrester has to be found. This is accomplished through the use of a model varying with frequency. The main models are compared to decide the most suitable for the operation.

After the model was defined, a base case is simulated to apply the appropriate arrester model for fast surges. Protection is correctly allocated to ensure an adequate overvoltage for the system equipment, cables, transformers and generators.

Finally, the key points of the work are described and highlighted the contributions and the interesting aspects for future works.

### **Keywords:**

ATP, lightning, wind generation, modeling of surge arresters, overvoltages.

# SUMÁRIO

<b>Capítulo I</b> .....	1
<b>Introdução</b> .....	1
1.1 – Considerações Iniciais.....	1
1.2 – Objetivos e Metas.....	10
1.3 – Contextualização do Tema e Estabelecimento de Diretrizes.....	11
1.4 – Contribuições oferecidas por esta Dissertação.....	11
1.5 – Estrutura da Dissertação.....	12
<b>Capítulo II</b> .....	16
<b>Principais características de para-raios para proteção contra sobretensões atmosféricas</b> .....	16
2.1 – Considerações Iniciais .....	16
2.2 - Características gerais dos para-raios .....	18
2.2.1 – Classe de para-raios.....	19
2.2.2 – Identificação do para-raios .....	19
2.2.3 – Tipos construtivos de para-raios de óxido metálico .....	20
2.2.3.1 – Para-raios sem centelhadores .....	20
2.2.3.2 – Para-raios com centelhadores em paralelo .....	21
2.2.3.3 – Para-raios com centelhadores em série .....	22
2.3 – Sobretensões.....	23
2.4 – Classificações De Tensões .....	24
2.5 – Testes .....	25
2.6 – Capacidade De Absorção De Energia E Sobretensões Temporárias.....	30
2.7 – Determinando A Classe De Para - Raios.....	34
2.8 – Considerações finais .....	34
<b>Capítulo III</b> .....	36
<b>Modelos de para-raios para plataformas computacionais</b> .....	36
3.1- Considerações Iniciais .....	36
3.2 - Modelo para simulação proposto pelo <i>IEEE</i> .....	37
3.2.1 - Modelo para simulação proposto por <i>Pinceti</i> .....	39
3.2.2 - Modelo para simulação proposto por <i>Fernández</i> .....	41
3.3- Modelos de resistores não Lineares Disponíveis no ATP.....	45
3.3.1 - Modelo Pseudo Não Linear Tipo 99 No ATP.....	45
3.3.2 - Modelo Verdadeiro não linear interpolação exponencial tipo 92 -5555 .....	46
3.3.3 - Modelo Verdadeiro não linear interpolação linear.....	49
Tipo 92 – 4444 .....	49
3.3.4 - A Diferença Entre Os Ramos, Verdadeiro Não Linear E O Pseudo Não Linear .....	50
3.4 – Modelo de fonte de Impulso Atmosférico.....	51
3.5 – Os modelos de fontes de corrente para representar a descarga atmosférica .....	54

3.6 – Comparação dos tipos de ramos existentes .....	59
3.7 – Comparação dos modelos de representação de para-raios .....	64
3.8 – A obtenção da curva característica de um para-raios para surtos rápidos a partir do modelo Fernández ....	69
3.9 – Considerações finais .....	70
<b>Capítulo IV</b> .....	<b>73</b>
<b>A utilização de simulações digitais como solução para o estudo de posicionamento de para-raios</b> .....	<b>73</b>
4.1 – Considerações Iniciais.....	73
4.2 – As Descargas Atmosféricas.....	74
4.3 – As Linhas de Transmissão .....	76
4.4 – Os Transformadores .....	77
4.4 – Os Aerogeradores.....	81
4.5 – A rede subterrânea .....	83
4.6 – Subestação de 34,5 kV (SE).....	86
4.7 – Os Para-Raios.....	86
4.8 – Considerações finais .....	88
<b>Capítulo V</b> .....	<b>90</b>
<b>Análise da alocação de para-raios na conexão de um parque eólico à rede básica</b> .....	<b>90</b>
5.1 – Considerações Iniciais.....	90
5.2 – A descrição de um parque eólico para o caso base .....	91
5.3 – Representação de todo o sistema elétrico no ATPDraw com o posicionamento dos para-raios .....	93
5.4 – O estudo de caso .....	94
5.4.1 – Descarga Atmosférica na Linha Aérea no Ponto 2 .....	95
5.4.2 – Descarga Atmosférica na Linha Aérea no Ponto 4 .....	107
5.5 – Considerações Finais.....	113
<b>Capítulo VI</b> .....	<b>116</b>
<b>Conclusões e sugestões para trabalhos futuros</b> .....	<b>116</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>121</b>
<b>Anexo</b> .....	<b>124</b>
<b>Módulos Implementados no ATP</b> .....	<b>124</b>
I – Módulo Implementado para Representar Aerogerador no ATPDraw.....	124
II – Módulo Implementado para Representar Linha de Transmissão no ATPDraw .....	125
III – Módulo Implementado para Representar Cabo Subterrâneo no ATPDraw .....	126
IV – Módulo Implementado para Representar Para-Raios de 36kV no ATPDraw .....	127
V – Módulo Implementado para Representar Para-Raios de 42kV no ATPDraw .....	127



# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil. ..	3
Figura 1.2: Mapa do potencial eólico da região Norte. ....	4
Figura 1.3: Mapa do potencial eólico da região Nordeste. ....	5
Figura 1.4: Mapa do potencial eólico da região Centro-Oeste. ....	5
Figura 1.5: Mapa do potencial eólico da região Sudeste. ....	6
Figura 1.6: Mapa do potencial eólico da região Sul. ....	7
Figura 1.7: Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7 m/s. ....	8
Figura 2.1: Característica típica de material de óxido metálico em formato de disco com diâmetro de 80 mm e altura de 20 mm. ....	18
Figura 2.2: (a) Modelo construtivo de para-raios sem centelhadores. (b) Curva característica de tensão <i>versus</i> corrente do material. ....	21
Figura 2.3: (a) Modelo construtivo de para-raios com centelhadores em paralelo. (b) Curva característica de tensão <i>versus</i> corrente do material. ....	22
Figura 2.4: (a) Modelo construtivo de para-raios com centelhadores em série. (b) Curva característica de tensão <i>versus</i> corrente do material. ....	22
Figura 2.5: Exemplo de curva de capacidade de TOV para para-raios de subestações. ....	30
Figura 2.6: Curva mínima de capacidade de TOV para para-raios de distribuição. ....	30
Figura 3.1: Modelo de dependência com a frequência recomendado pelo <i>IEEE</i> . ....	37
Figura 3.2: Modelo <i>Pinceti</i> de dependência com a frequência. ....	39
Figura 3.3: Característica não linear dos resistores variáveis, a tensão é dada em p.u. ....	40
Figura 3.4: Modelo Fernández de dependência com a frequência. ....	41
Figura 3.5: Modelo Fernández de dependência com a frequência. ....	42
Figura 3.6: Aumento da tensão residual de um para-raios por tempo de frente de onda. ....	43
Figura 3.7: Cartão de entrada de dados do primeiro grupo do tipo 99. ....	45
Figura 3.8: Cartão de entrada de dados dos pontos de tensão e corrente. ....	46
Figura 3.9: Cartão de entrada de dados do primeiro grupo do tipo 92 “5555”. ....	47
Figura 3.10: Cartão de entrada de dados do segundo grupo do tipo 92 “5555”. ....	48
Figura 3.11: Cartão de entrada de dados do terceiro grupo do tipo 92 “5555”. ....	48
Figura 3.12: Cartão de entrada de dados do primeiro grupo do tipo 92 “4444”. ....	49
Figura 3.13: Cartão de entrada de dados do segundo grupo tipo 92 “4444”. ....	50
Figura 3.14: Impulso de corrente exponencial. ....	51
Figura 3.15: Forma de onda padrão do surto de tensão (1,2/50µs). ....	52
Figura 3.16: Forma de onda padrão do surto de corrente (8/20µs). ....	53
Figura 3.17: Formas de onda de surtos de corrente (1,2/50µs). ....	57
Figura 3.18: Formas de onda de surtos de corrente (8/20µs). ....	58
Figura 3.19: Circuito com modelo de para-raios tipo MOV. ....	61
Figura 3.20 - Circuito com modelo de para-raios tipo 92 verdadeiro não linear. ....	61
Figura 3.21: Circuito com modelo de para-raios tipo 99. ....	61
Figura 3.22: Resultados para uma descarga de 20kA da forma 8/20 µs. ....	61
Figura 3.23: Pico de tensão positiva para o surto do tipo 8/20µs. ....	62
Figura 3.24: Pico de tensão negativa para o surto do tipo 8/20µs. ....	62
Figura 3.25: Resultados para uma descarga de 20kA da forma 1,2/50µs. ....	63

Figura 3.26: Pico de tensão positiva do modelo convencional para o surto do tipo 1,2/50µs.....	63
Figura 3.27: Pico de tensão negativa do modelo convencional para o surto do tipo 1,2/50µs. ....	64
Figura 3.28: Representação do modelo Convencional. ....	65
Figura 3.29: Representação do modelo <i>IEEE</i> . ....	65
Figura 3.30: Representação do modelo <i>Pinceti</i> . ....	65
Figura 3.31: Representação do modelo Fernández. ....	66
Figura 3.32: Tensão residual dos modelos para uma descarga de 10kA da forma 8/20 µs. ....	66
Figura 3.33: Tensão residual dos modelos variáveis com a frequência para uma descarga de 5kA da forma 8/20 µs.....	67
Figura 3.34: Tensão residual dos modelos variáveis com a frequência para uma descarga de 20kA da forma 8/20 µs.....	67
Figura 3.35: Tensão residual dos modelos variáveis com a frequência para uma descarga de 10kA da forma 1,2/50 µs.....	68
Figura 4.1: Descarga atmosférica. ....	74
Figura 4.2: Onda de surto. ....	75
Figura 4.3: Modelo de fonte de surto do tipo 15 Hidler. ....	75
Figura 4.4: Modelo da Linha de transmissão. ....	77
Figura 4.5: Circuito equivalente de um transformador de 3 enrolamentos. ....	78
Figura 4.6: Circuito equivalente de um transformador de trifásico $\Delta$ . ....	80
Figura 4.7: Circuito equivalente do aerogerador. ....	82
Figura 4.8: Representação de um aerogerador no ATPDraw. ....	83
Figura 4.9: Configuração de sistema coletor e de conexão. ....	84
Figura 4.10: Circuito equivalente dos cabos de média tensão. ....	84
Figura 4.11: Representação dos cabos subterrâneos. ....	86
Figura 4.12: Representação do para-raios. ....	87
Figura 5.1: Representação do parque eólico do caso base. ....	92
Figura 5.2: Circuito equivalente ao bloco de descrição. ....	93
Figura 5.3: Modelagem do sistema elétrico no ATPDraw. ....	94
Figura 5.4: Sobretensão na fase A do ponto – 3.....	96
Figura 5.5: Sobretensão na fase A do ponto – 5.....	96
Figura 5.6: Sobretensão na fase A do ponto – 6.....	96
Figura 5.7: Sistema Elétrico com para-raios na Linha Aérea.....	98
Figura 5.8: Sobretensão na fase A do ponto – 3.....	98
Figura 5.9: Sobretensão na fase A do ponto – 5.....	99
Figura 5.10: Sobretensão na fase A do ponto – 6.....	99
Figura 5.11: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR01, TR02 e TR03.....	99
Figura 5.12: Sobretensão na fase A do ponto de derivação - TR03 .....	100
Figura 5.13: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 1 .....	100
Figura 5.14: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 3 .....	101
Figura 5.15: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 5 .....	101
Figura 5.16: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 6 .....	101
Figura 5.17: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR01, TR02 e TR03.....	103
Figura 5.18: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR02 .....	103
Figura 5.19: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR01 .....	103

Figura 5.20: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR03 .....	104
Figura 5.21: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR01, TR02 e TR03.....	105
Figura 5.22: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR01 .....	105
Figura 5.23: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR01 .....	106
Figura 5.24: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR02 .....	106
Figura 5.25: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR03 .....	106
Figura 5.26: Sobretensão na fase A do ponto – 3.....	107
Figura 5.27: Sobretensão na fase A do ponto – 5.....	108
Figura 5.28: Sobretensão na fase A do ponto – 6.....	108
Figura 5.29: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR04, TR05 e TR06.....	109
Figura 5.30: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR04 .....	109
Figura 5.31: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR04 a TR10.....	110
Figura 5.32: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR11 e TR12.....	110
Figura 5.33: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR05 .....	111
Figura 5.34: Energia dissipada pelos para-raios da fase A dos pontos de transição.....	111
Figura 5.35: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do primeiro e terceiro ramal .....	112
Figura 5.36: Sistema Elétrico com todos os para-raios posicionados. ....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes e especificações mínimas dos para-raios.....	19
Tabela 2.2: Valores de MCOV.....	24
Tabela 2.3: Sumário de Exigências de Durabilidade e Capacidade .....	26
Tabela 2.4: Classes de Correntes de Impulsos Atmosféricos.....	26
Tabela 2.5: Correntes de teste para verificação de funcionamento normal de operação para para-raios de Subestação e Intermediários.....	27
Tabela 2.6: Características de Durabilidade e Capacidade para Para-raios de Subestação .....	28
Tabela 2.7: Características de Capacidade para Para-raios Intermediários .....	28
Tabela 2.8: Características de Durabilidade e Capacidade para Para-raios de Distribuição .....	29
Tabela 3.1: Características do elemento não linear.....	38
Tabela 3.2: Características do elemento não linear .....	42
Tabela 3.3: Características do fabricante. ....	44
Tabela 3.4: Características dos elementos não lineares A0 e A1. ....	44
Tabela 3.5: Impulsos exponenciais padrões segundo a norma IEC 60060-1 .....	53
Tabela 3.6: Impulsos exponenciais padrões segundo a norma IEC 60099-4 .....	54
Tabela 3.7: Valores da curva VxI do para-raios.....	60
Tabela 3.8: Siemens 3EK7 300-4AH4 – Dados para simulação.....	65
Tabela 3.9: Resultados da simulação .....	68
Tabela 3.10: Valores da curva VxI do para-raios.....	69
Tabela 4.1: Dados do condutor .....	76
Tabela 4.2: Comprimento dos vãos.....	77
Tabela 4.3: Dados do Transformador.....	79
Tabela 4.4: Dados dos cabos.....	85
Tabela 4.5: Seção transversal dos condutores .....	85
Tabela 4.6: Valores da curva VxI do para-raios de 36kV .....	88
Tabela 4.7: Valores da curva VxI do para-raios de 42kV .....	88

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ATP	Alternative Transient Program
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CBUE	Comitê Brasileiro de Usuários de EMTP
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
EMTP	Electromagnetic Transient Program
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MCOV	Maximum Continuous Operating Voltage
MME	Ministério de Minas e Energia
MOV	Metal Oxide Varistor
NBI	Nível Básico de Isolamento
SE	Subestação de Energia
TOV	Transient Overvoltage
TOVC	Transient Overvoltage Capacity
XLPE	Transient Overvoltage

# CAPÍTULO I

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em atendimento aos objetivos estratégicos nacionais, com a finalidade de garantir a redução de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e gerar emprego e renda, o incentivo às fontes renováveis de energia surge como uma solução.

Um bom exemplo de políticas de incentivo ao uso de fontes de energia renováveis são as implantadas na Europa. Na Espanha as opções escolhidas foram a energia eólica e solar fotovoltaica, já no Reino Unido, foram também a eólica e a advinda das ondas e marés. Na Itália, optou-se por explorar a energia geotérmica e na Finlândia a biomassa [1].

Para a inserção da geração eólica no Brasil alguns aspectos devem ser considerados. Primeiramente, deve ser feito um levantamento do potencial energético desse tipo de aproveitamento. Depois, é necessária a aquisição de conhecimento sobre a tecnologia, que irá crescer juntamente com a quantidade de projetos concebidos e sua expansão.

Mesmo com a redução dos custos de implantação da geração eólica, resultantes do aumento de escala das capacidades e da produção dos

equipamentos difundida internacionalmente, o custo da energia eólica não possui uma grande competitividade frente a outras fontes de energia no Brasil.

Para que essa fonte se torne mais competitiva deve haver uma promoção de sua inclusão na matriz energética. Essa inserção deve ser sustentada a partir, do estabelecimento da indústria eólica nacional de fornecimento de componentes e montagem, da adequação da normatização vigente, da participação da iniciativa privada nos empreendimentos, e de estudos que abordem a interação dessa fonte no sistema elétrico [1].

Esse último aspecto visa solucionar os diversos problemas que possam surgir durante esse processo, e ainda possibilitar o aumento das vantagens da tecnologia.

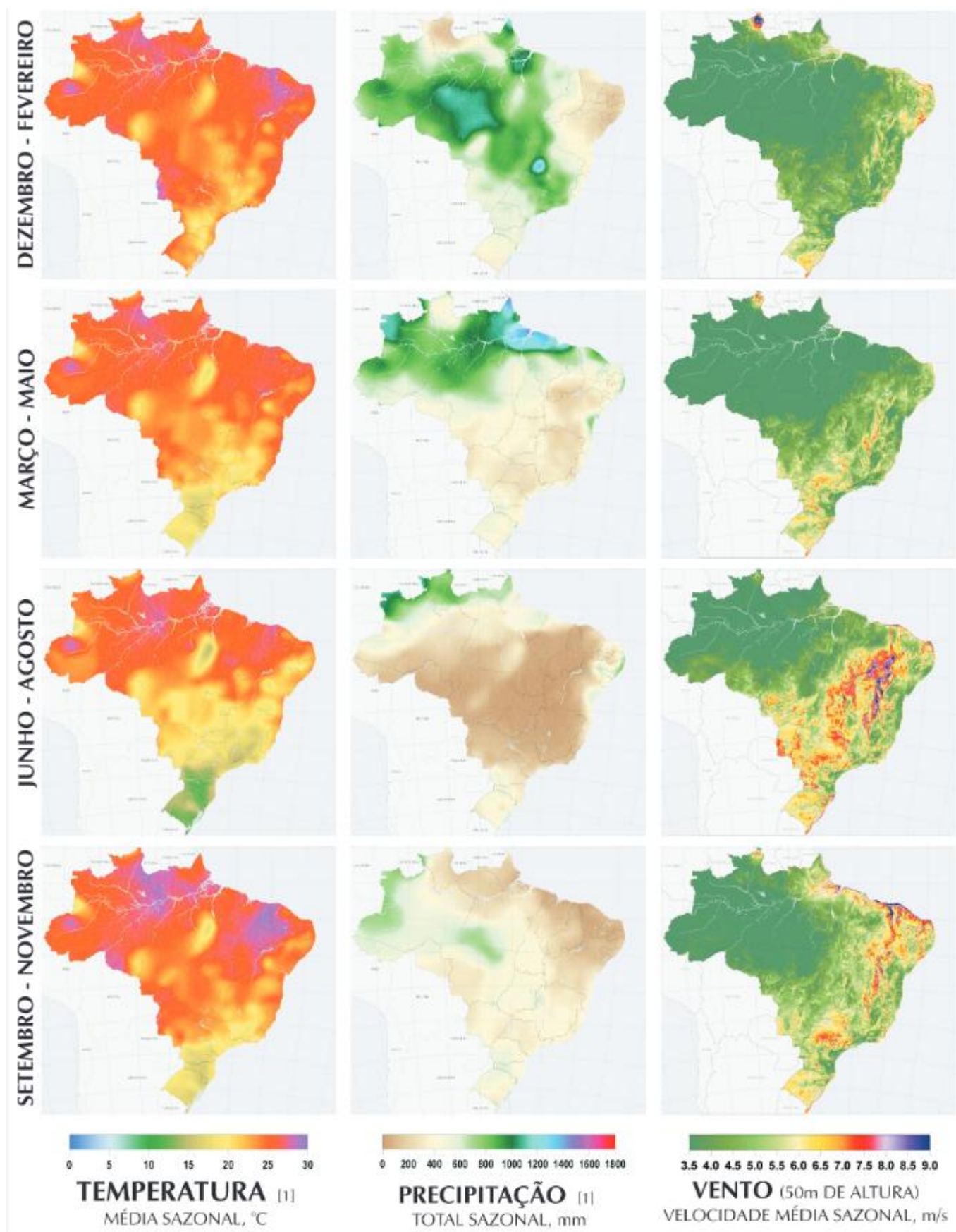
A energia eólica tem ganhado cada vez mais espaço no mundo como uma alternativa renovável e limpa. Esse tipo de energia é muito utilizada como um complemento da matriz energética de diversos países. É uma possibilidade de conciliar o crescimento da indústria de uma forma sustentável.

O Brasil é o quinto país em área territorial do mundo e o maior da América Latina, com 8.514.215 km<sup>2</sup>. Possui uma pequena parte do seu território no hemisfério norte e a maior parte no hemisfério sul [1].

Em função dessa grande área, os recursos energéticos são diversos por todo o território brasileiro e ao longo do ano. A figura 1.1 mostra essas diferenças de temperatura, precipitação e velocidade de vento.

É possível perceber que durante o período de estiagem, de março a novembro, o volume de precipitações é baixo e a velocidade dos ventos é maior que os demais meses do ano. Isso reforça a ideia de que os parques eólicos são complementares às usinas hidrelétricas.

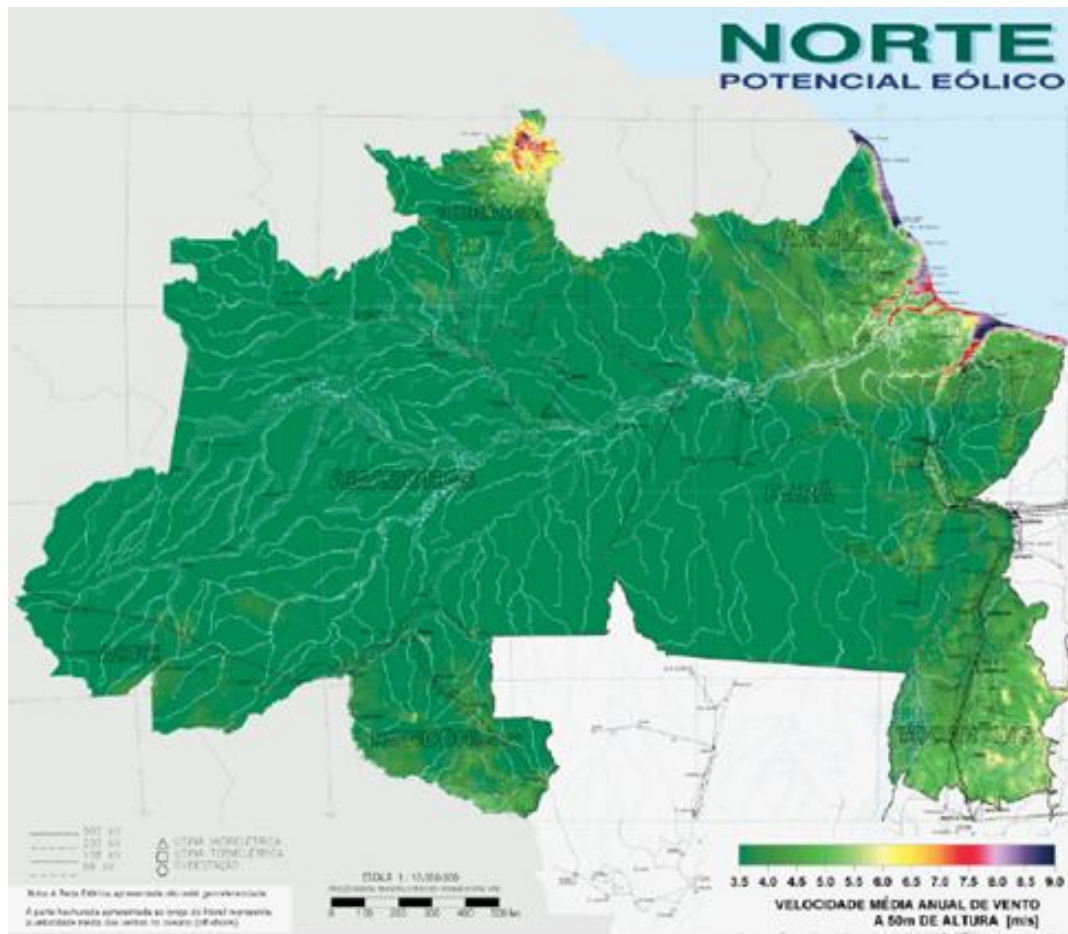
Um mapa eólico das médias anuais das velocidades dos ventos representa a possibilidade de produção desse tipo de fonte energética. As velocidades dos ventos na superfície terrestre podem ser identificadas através de uma escala de cores. A figura 1.2 representa o potencial eólico na região norte.



*Figura 1.1: Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil.*

Fonte: referência 23





**Figura 1.2: Mapa do potencial eólico da região Norte.**

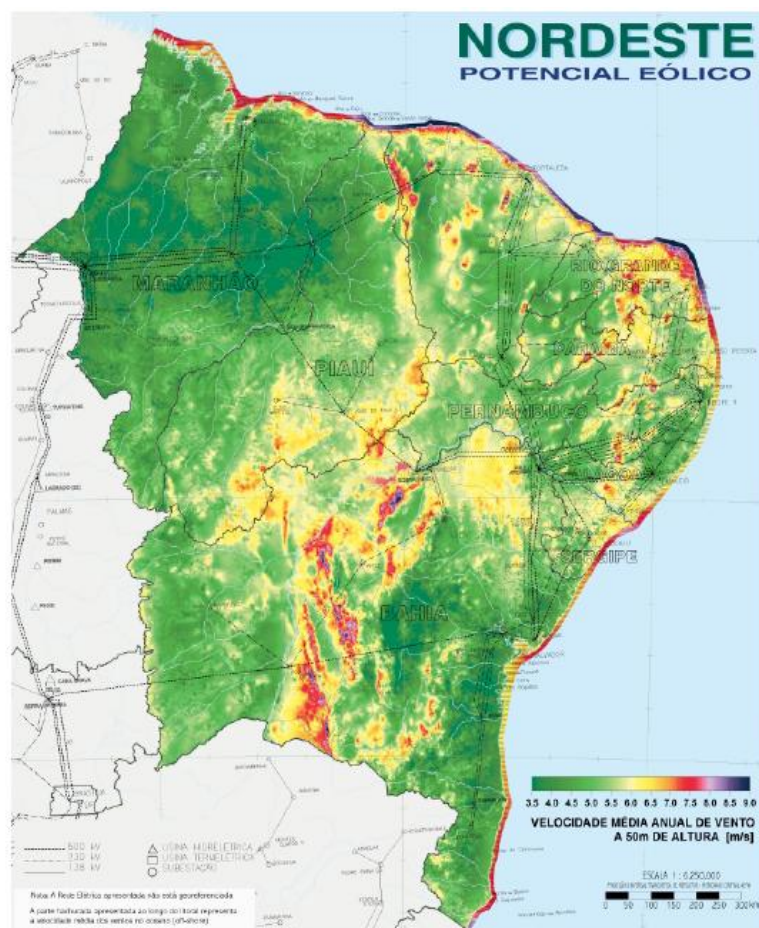
Fonte: referência 23

É possível de se ver que existe uma pequena área de ventos fortes no litoral dos estados do Pará e Amapá, além de uma área de destaque no norte de Roraima, onde se concentrariam os parques.

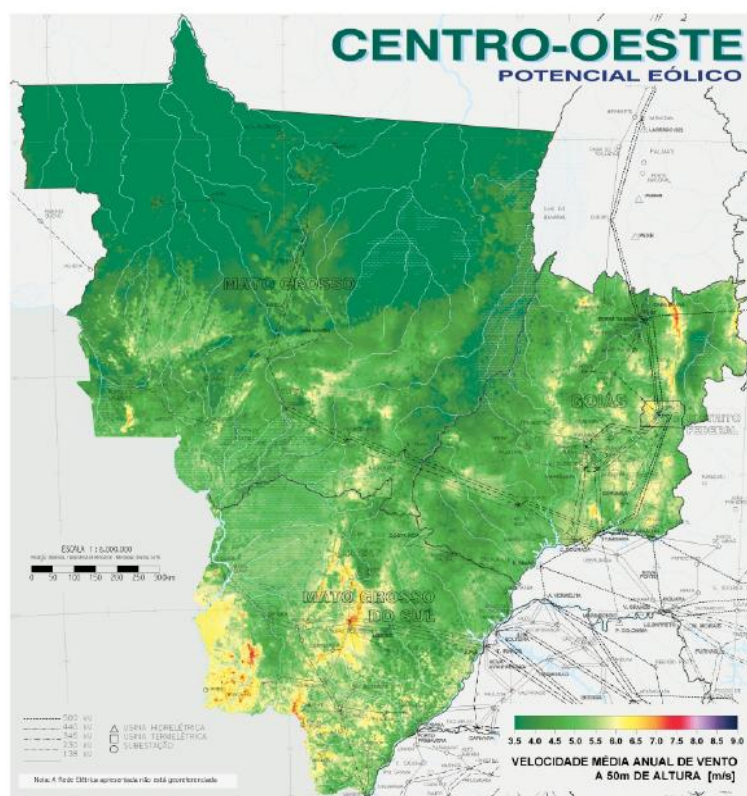
A figura 1.3 representa a fonte de energia eólica da região nordeste, a qual apresenta a maior fonte do território nacional.

Três estados se destacam nas velocidades dos ventos pelo litoral, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. O estado da Bahia possui em seu interior uma área conhecida como altiplanos baianos, que são foco de alguns investimentos para explorar essa atividade.

O baixo potencial do centro-oeste é mostrado na figura 1.4, onde se verifica o menor potencial do Brasil.



**Figura 1.3: Mapa do potencial eólico da região Nordeste.**  
Fonte: referência 23

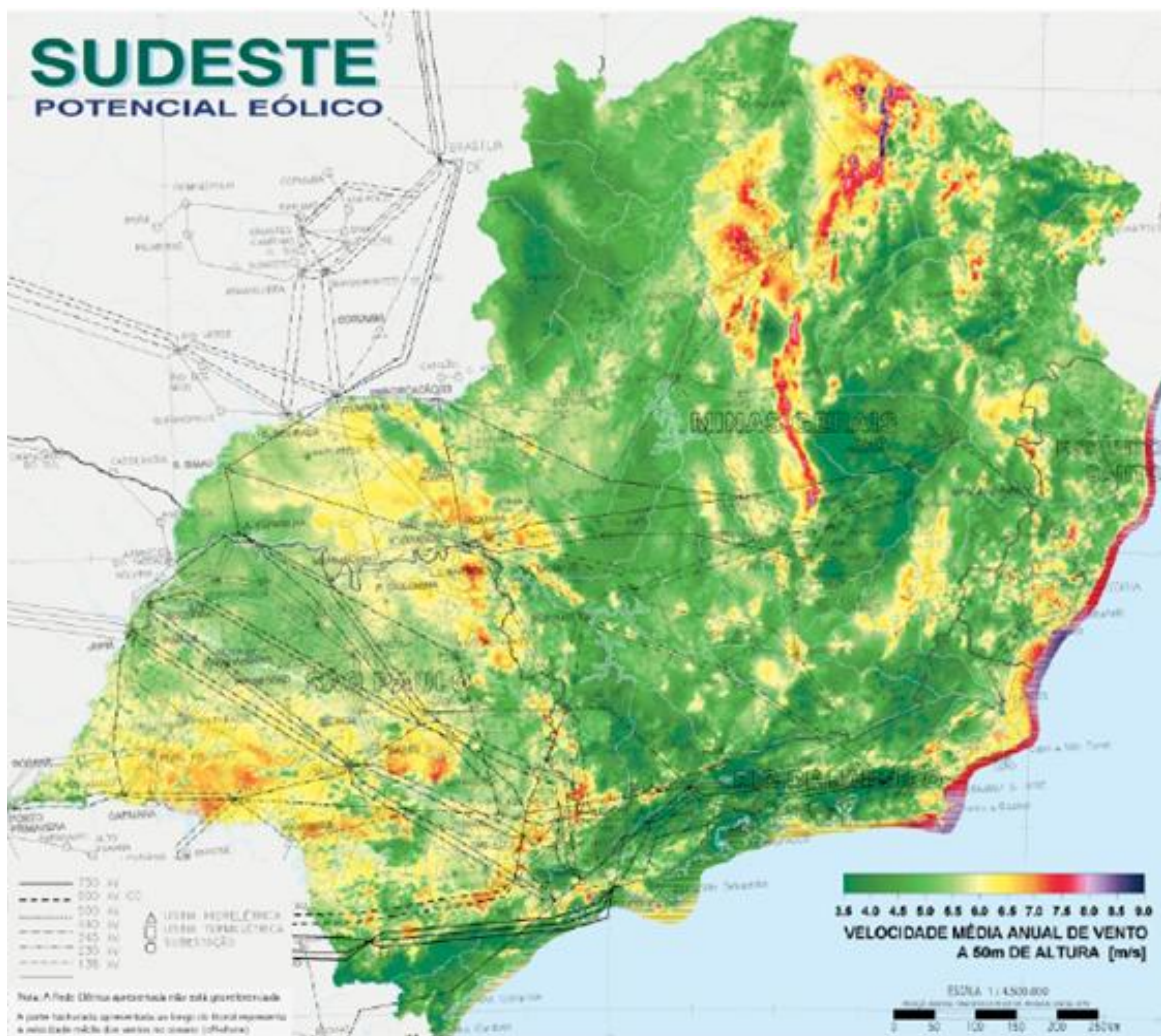


**Figura 1.4: Mapa do potencial eólico da região Centro-Oeste.**  
Fonte: referência 23



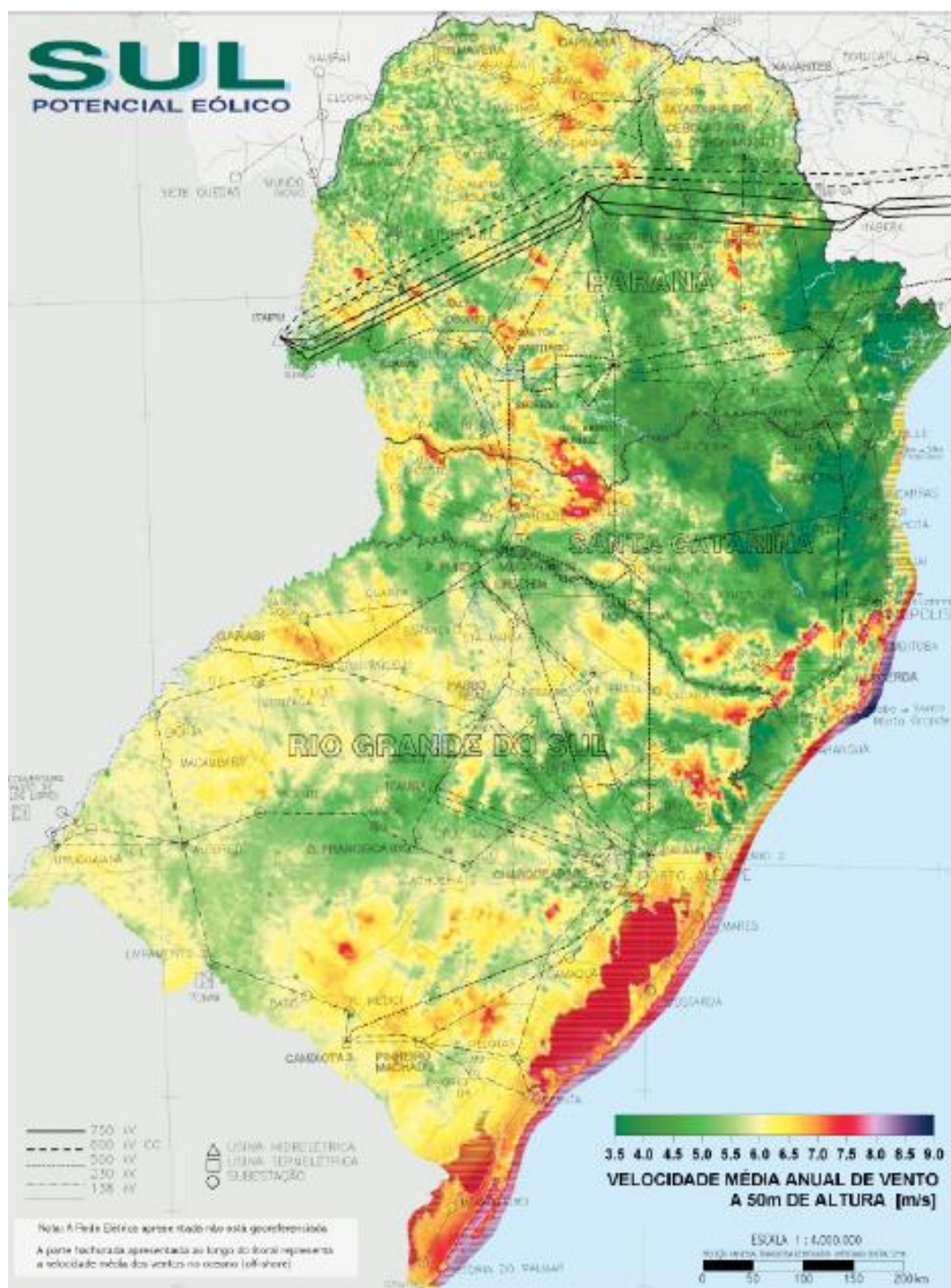
Como as velocidades médias são baixas e as áreas que apresentam ventos razoáveis para a produção elétrica são pequenas, essa região não é um grande atrativo para esses investimentos.

Os ventos do sudeste são mostrados na figura 1.5. As costas do Rio de Janeiro e Espírito Santo possuem bons ventos para produção de energia elétrica. O Estado de São Paulo possui algumas áreas com velocidades maiores, e uma média um pouco menor por uma boa parte da área do estado. O norte de Minas Gerais se assemelha ao estado da Bahia, possui em seu interior uma parte do relevo propícia a essa atividade.



**Figura 1.5: Mapa do potencial eólico da região Sudeste.**

Fonte: referência 23



**Figura 1.6: Mapa do potencial eólico da região Sul.**

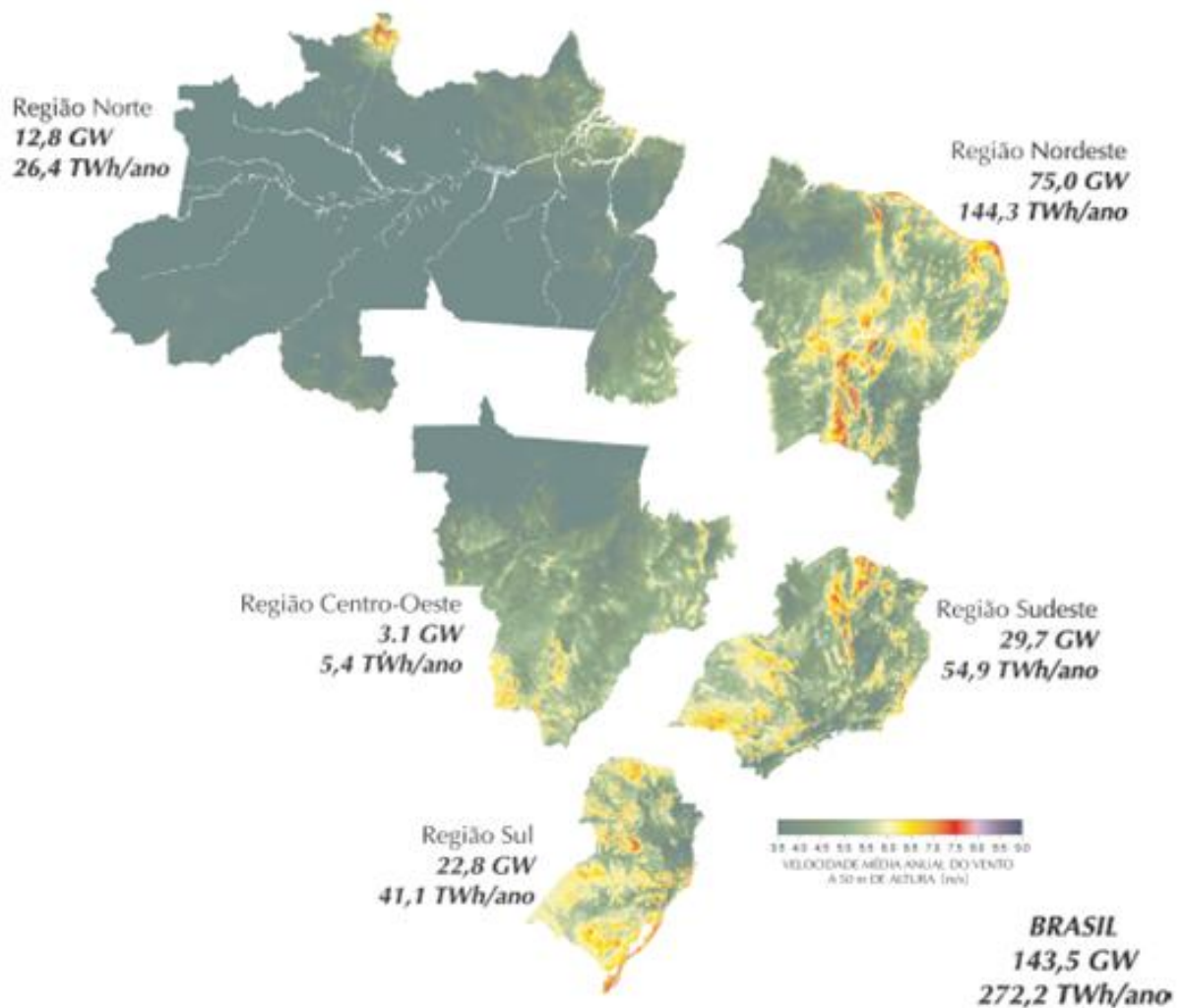
Fonte: referência 23

A figura 1.6 apresenta o mapa da região sul do Brasil.

O estado do Rio Grande do Sul é detentor de uma grande área capaz de uma grande produção de energia próxima à costa e na própria costa. O Paraná só possui uma região de possível exploração no interior do estado, e Santa Catarina possui além de parte da costa, uma área atrativa em seu interior. A figura 1.7



mostra a potência em GW que pode ser produzida em cada uma das regiões do Brasil, explorando-se ventos com velocidade maior que 7 m/s.



*Figura 1.7: Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7 m/s.*

Fonte: referência 23

Os valores de potência e de energia por ano que podem ser produzidos são grandes. A maior usina no Brasil, a Itaipu Binacional, produziu no ano de 2013 98,63 TWh [1]. Como pode ser visto na figura 1.7, esse valor é menor do que a possibilidade da produção da região Nordeste, que é de 144,3 TWh/ano.

Muitos aspectos negativos da ligação da geração eólica ao sistema interligado nacional (SIN) foram desenvolvidos. Por exemplo, a utilização de aerogeradores de frequência variável e conversores de corrente contínua, que

podem controlar as potências ativa e reativa das máquinas, possibilitam a ligação desses parques à barras de baixa potência de curto-circuito.

Devido à diferença de impedância entre os cabos e as linhas aéreas o posicionamento de para-raios nesses sistemas é complexo, e será objeto de estudo desse trabalho.

Sistemas compostos por apenas redes subterrâneas não são suscetíveis a descargas atmosféricas, pois tal fenômeno atinge apenas instalações externas. Mas quando tais sistemas são interligados a redes aéreas os surtos chegam até as redes subterrâneas, como os surtos são tratados como ondas viajantes, os pontos de ligação entre esses dois tipos de redes são pontos de reflexão, que fazem surgir sobretensões perigosas

Em sistemas compostos somente por linhas aéreas, que não possuem pontos de interligação, o comportamento das ondas viajantes já é conhecido, e na literatura de equipamentos da rede elétrica existem procedimentos para dimensionar e posicionar para-raios nesses sistemas.

Como o assunto se refere a uma questão de transitórios eletromagnéticos, toda a abordagem deve ser feita dentro de um *software* no domínio do tempo, não há como realizar as simulações do trabalho no domínio da frequência. O *software* escolhido para as simulações é o ATP (*Alternative Transient Program*), um programa já consolidado dentro do meio científico como ambiente para solução de diversos problemas de engenharia elétrica dentro do domínio do tempo.

As descargas atmosféricas estão dentro de uma gama de fenômenos de transitórios eletromagnéticos, elas provocam grandes variações súbitas de tensão ou corrente. Os principais objetivos de estudos com esse programa são a especificação da proteção de equipamentos do sistema elétrico, e a determinação dos motivos provocadores de certas perturbações.

O ATP é um programa computacional, uma versão do programa EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*) adaptado para a utilização em

microcomputadores, gratuito, distribuído no Brasil pelo Comitê Brasileiro de Usuários de EMTP (CBUE) com sede em Furnas Centrais Elétricas S.A. no Rio de Janeiro. O programa utiliza a matriz de admitância de barras para simular redes polifásicas, com formulação matemática baseada no método de *Bergeron* para elementos com parâmetros distribuídos, e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados, utilizando na solução técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

Nesse capítulo será elaborado um caso base para verificar a alocação e o dimensionamento da ligação entre a rede do sistema e a geração eólica, onde são encontrados cabos e linhas, partes do sistema que possuem uma diferença de impedância grande.

## 1.2 – OBJETIVOS E METAS

Diante da problemática apresentada, este trabalho tem como objetivo desenvolver a modelagem e o posicionamento de para-raios em redes subterrâneas de parques eólicos conectadas com redes aéreas, utilizando, para isso, a simulação digital de um sistema eólico empregando o *software ATP e sua interface ATPDraw*. Sendo assim, algumas metas devem ser cumpridas para atingir este objetivo, a saber:

- Analisar do potencial da fonte de energia eólica no Brasil;
- Levantar as principais premissas da proteção contra sobretensões atmosféricas;
- Discriminar as principais características de para-raios;
- Mostrar e avaliar os tipos de modelagem de para-raios para se utilizar nos estudos realizados nesta dissertação;

- Estudar um caso base utilizando o modelo escolhido de para-raios, observando a alocação da proteção.

### **1.3 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTABELECIMENTO DE DIRETRIZES**

A energia eólica é uma fonte limpa e renovável para geração de energia elétrica. A modelagem e o posicionamento de para-raios em redes subterrâneas de parques eólicos conectadas com redes aéreas é um aspecto, dentro desse tema, que merece destaque.

Nesse ponto aparece uma discussão sobre a modelagem mais apropriada para a representação do para-raios. Para isso, são necessárias comparações para escolher o modelo mais adequado para tal ação.

Ao fim do trabalho é possível se identificar uma conclusão sobre como é a melhor alocação de para-raios para um caso base e a melhor modelagem para a sua operação. São então destacadas as premissas e os cuidados a serem tomados para alcançar resultados satisfatórios nas simulações.

### **1.4 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO**

Dentro do contexto apresentado, esta dissertação irá contribuir nos seguintes aspectos:

- A análise comparativa do desempenho dos tipos de modelos de ramo de resistência variável existentes no *software* ATP para a representação do comportamento de um para-raios, definindo as vantagens e desvantagens de cada um, mostrando seu funcionamento, e ainda propondo uma utilização nova, de um ramo



que não era considerado para representação desse tipo de equipamento;

- Implementação computacional dos modelos de para-raios variáveis com a frequência no *software ATP* em sua interface *ATPDraw*, fornecendo exemplos de aplicação, e mostrando para cada modelo um passo a passo de como implementá-lo;
- Como os surtos rápidos são capazes de provocar os maiores níveis de sobretensão na rede elétrica, uma análise do desempenho dos principais modelos de para-raios variáveis com a frequência mediante surtos atmosféricos de frente de onda rápida é interessante, pois define o melhor modelo;
- Um método para implementar um modelo de para-raios convencional para descargas de frente de onda rápida, que proporciona um modelo simples e com capacidade de resposta para surtos de frente de onda rápida, possível de ser utilizado em diversos estudos que consideram os para-raios;
- Um procedimento para posicionar adequadamente a proteção contra sobretensões em um sistema de redes subterrâneas de parques eólicos conectados a redes aéreas. Visto a excepcionalidade da configuração desse tipo de sistema, o posicionamento e o dimensionamento da sua proteção contra sobretensões é de interesse para sua expansão na matriz energética nacional.

## 1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A fim de alcançar os objetivos aqui propostos, além do presente capítulo, esta dissertação será estruturada conforme apresentado na sequência:

## **Capítulo II - As principais características e conceitos da proteção contra sobretensões**

Este capítulo destina-se a analisar a normatização existente sobre para-raios de óxido metálico. São abordados os testes, os valores mínimos e as principais características dos equipamentos de proteção contra sobretensões.

Três tipos construtivos de para-raios são mostrados na dissertação. São também tratadas as principais literaturas sobre sobretensões, e definidos dois assuntos de grande importância. Um é a capacidade de absorção de energia do para-raios, que demarca o tempo de vida útil do equipamento de proteção. E o outro é o nível de proteção, que é o valor máximo de tensão que aparecerá nos terminais do para-raios. Neste assunto surgem dois termos, a sobretensão temporária ou TOV (*transient overvoltage*) e a máxima tensão de operação contínua ou MCOV (*maximum continuous operating voltage*).

## **Capítulo III - Os principais modelos elétricos de para-raios para plataformas computacionais**

Esta parte do trabalho aborda alguns tipos de modelagens existentes para para-raios, suas principais diferenças, e as ideologias que fundamentam cada tipo.

A aplicação de cada modelo é mostrada. A forma de obtenção de cada parâmetro, as equações necessárias, e os valores típicos desses parâmetros também. É explicado no que implica cada variável e a justificativa das configurações das modelagens.

É feito ainda um exemplo para o modelo do tipo *Férrandez*, que é o modelo mais recente e com resultados mais próximos dos encontrados nas práticas em laboratórios.

No ATP, existem três tipos de ramos de resistores não lineares que podem ser usados nas simulações. As características de cada um são mostradas nesse

capítulo. É apreciada a inserção de parâmetros para cada tipo de ramo no *software*, e também as diferenças do método de solução para cada, que é a principal diferença entre os mesmos.

Também é retratado o impulso atmosférico, principal fonte de sobretensões para o sistema. É importante ressaltar as variáveis de definição das curvas características para os impulsos de corrente e de tensão, e seus valores, que irão definir os tipos de surtos atmosféricos existentes.

As formas de onda desses surtos são fundamentais para qualquer simulação com o objetivo de apreciar as sobretensões surgidas no sistema para um surto atmosférico.

#### **Capítulo IV - A utilização de simulações digitais como solução para o estudo de alocação de para-raios**

Nesse capítulo são apresentadas as modelagens de cada equipamento do sistema, ou seja, os seus modelos elétricos, para que sejam inseridos na simulação. Também é apresentado o modelo elétrico do surto atmosférico e a forma de obtenção de seus parâmetros.

São elaboradas simulações para escolher o ramo não linear existente no ATP que melhor se adéqua ao trabalho em questão.

As duas principais ideologias de modelagem de para-raios, a convencional e a modelagem com variação de acordo com a frequência do surto, são utilizadas para produzir o confronto dos modelos existentes. Esse confronto é feito através de simulações com diversas formas de onda de surto, para que seja possível observar quem produz os melhores resultados.

Surge então, uma conclusão sobre qual seria a melhor modelagem para a verificação da correta alocação e dimensionamento para o surto imposto, que são os objetivos desse trabalho.

## **Capítulo V - Uma Análise Da Alocação de Para-Raios Na Conexão De Um Parque Eólico à Rede Básica**

Este capítulo contempla um panorama da geração eólica no Brasil, mostrando sua possibilidade de crescimento e explicitando suas principais características.

É mostrado um sistema hipotético de um sistema eólico com ligação ao sistema interligado como estudo de caso. Esse sistema possui alguns aerogeradores com cabos subterrâneos, ligados a linhas aéreas, além de transformadores de potência.

Todos os equipamentos desse sistema são implementados considerando-se suas características de fabricação. Os para-raios são alocados e a verificação dos níveis de tensão frente às descargas de sobretensão é feita.

## **Capítulo VI - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros**

O capítulo final é uma síntese das conclusões feitas ao longo de todo o trabalho. As principais ideias de cada capítulo são recordadas, e é obtida uma conclusão final, apontando as contribuições, as ressalvas e as sugestões para os trabalhos futuros.

Destacam-se os objetivos alcançados e a importância da proposta mostrada para a modelagem e para o método de alocação de proteção contra sobretensão nos tipos de sistema em questão.

As sugestões para trabalhos futuros são temas de grande interesse para o desenvolvimento do assunto e de possibilidade de surgimento de novas ideologias para a modelagem de para-raios e para a alocação e dimensionamento desses. Além de garantir maior competitividade à geração de energia elétrica por meio da fonte eólica.

# **CAPÍTULO II**

---

## **PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE PARA-RAIOS PARA PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS**

### **2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Para o melhor entendimento acerca de um para-raios, que é um equipamento que proporciona a proteção contra sobretensões em um sistema elétrico, é interessante discriminar uma série de características do mesmo.

Existem outros equipamentos utilizados na proteção contra sobretensão, são os chamados dispositivos de proteção contra surto, ou DPS, que são formados de um material resistivo não linear, com um comportamento igual ao do para-raios, mas são utilizados em instalações industriais ou residências, ou seja, protegem equipamentos específicos ou circuitos terminais, não sendo instalados em redes de distribuição ou transmissão de energia.

Dessa forma, o presente capítulo tem o objetivo de apresentar algumas características interessantes sobre esse equipamento de proteção e trazer algumas definições, no sentido de elucidar o assunto do trabalho.

O resistor não linear de óxido metálico é a parte do para-raios que devido à sua característica peculiar de tensão *versus* corrente funciona como uma baixa

resistência para sobretensões, e como uma alta resistência para tensões normais de operação do sistema.

Para-raios de óxido metálico sem centelhadores são equipamentos compostos por resistores não lineares desse material, ligados em série ou paralelo sem centelhadores integrados.

Entende-se por impulso uma onda unidirecional de tensão ou corrente que atinge o seu valor máximo rapidamente, e possui um decrescimento lento. Os parâmetros que definem um impulso de tensão ou corrente são o valor de pico, o tempo de frente de onda e o tempo de cauda. Define-se como tempo de frente de onda aquele necessário para que o impulso alcance o valor de pico. E o tempo de cauda é o necessário para ter-se metade do valor de pico, no decréscimo do impulso.

A corrente nominal de descarga é o valor de pico do impulso atmosférico de corrente. O valor de pico de tensão que aparece entre os terminais do para-raios durante a passagem da descarga de corrente é chamado de tensão residual. As tensões residuais, para impulso íngreme de corrente, para impulso de chaveamento e para impulso atmosférico, são as características de proteção de um para-raios.

A característica tensão *versus* tempo de um para-raios descreve a máxima duração de tempo que certa tensão pode ser aplicada nos terminais de um para-raios sem causar nenhum dano ao equipamento.

A avalanche térmica de um para-raios descreve a situação em que a perda continuada de um para-raios excede a capacidade térmica de dissipação, conduzindo para um crescimento cumulativo da temperatura dos elementos resistivos. A estabilidade térmica de um para-raios existe quando após uma operação que causa aumento de temperatura, tal variável decresce normalmente com o tempo, assim que o para-raios é energizado com a tensão de operação contínua e em condições ambientais adequadas, ou seja, o equipamento está em condições normais de funcionamento.

## 2.2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PARA-RAIOS

A principal característica de um para-raios é a curva tensão *versus* corrente, que evidencia o seu comportamento não linear, essa curva pode ser dividida em três regiões, que variam de acordo com o valor das tensões. A primeira é a região de MCOV, onde o valor de corrente é menor do que 1mA, a segunda é a de TOV, e de surto de chaveamento, onde os valores de corrente são entre 1mA e 1000 ou 2000A, já a terceira é a região de descargas, onde as correntes são de 1 a 100kA [2].

Para grandes valores de correntes a característica tensão *versus* corrente se mantém linear. Conforme o aumento de temperatura do dispositivo, a resistência do material aumenta e também a dissipação de calor. Caso essa energia na forma de calor não se dissipe poderá ocorrer instabilidade térmica.

A curva da figura 2.1 representa essa característica desse equipamento de proteção.

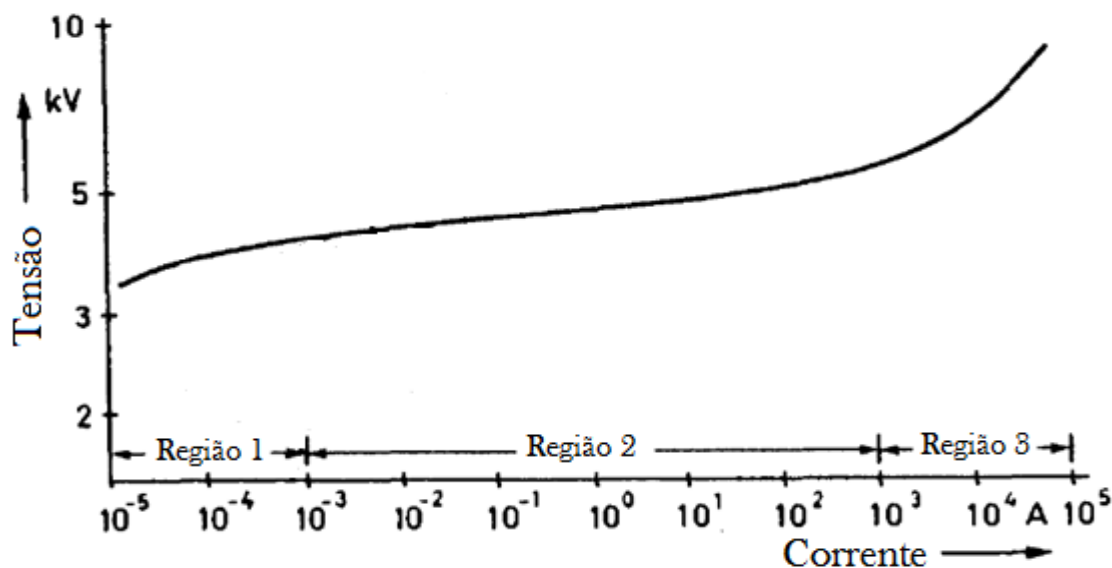


Figura 2.1: Característica típica de material de óxido metálico em formato de disco com diâmetro de 80 mm e altura de 20 mm.

Fonte: referência 2

### 2.2.1 – CLASSE DE PARA-RAIOS

Os para-raios são divididos basicamente em três classes em função de suas capacidade e durabilidade.

A primeira classe é a designada por subestações, onde o nível de tensão é alto ou extra-alto. A segunda classe é a intermediária. E a terceira é a classe de distribuição que é subdividida em três outras classes, a de uso pesado, normal e leve.

A tabela 2.1 traz as classes e suas especificações mínimas.

*Tabela 2.1: Classes e especificações mínimas dos para-raios.*

Classe	Tensão nominal (kV)		Corrente de Impulso Atmosférico (kA)	Corrente de Impulso de Chaveamento (A)	Corrente Alta de Curta Duração (kA)	Corrente Baixa de Longa Duração (A, µs)
	De Operação	MCOV				
Subestação	3-48	2,55-39	10	500	65	-
	54-312	42-245	10	500-1000	65	-
	396-564	318-448	15	2000	65	-
	576-612	462-485	20	2000	65	-
Intermediário	3-144	2,55-115	5	500	65	-
Distribuição	3-36	2,55-29	10	-	100	250,2000
	3-36	2,55-29	5	-	65	75,2000
	3-36	2,55-29	5	-	40	75,2000

Fonte: referência 3

### 2.2.2 – IDENTIFICAÇÃO DO PARA-RAIOS

Para-raios de óxido metálico devem ser identificados segundo as informações mínimas abaixo, que devem estar em sua placa de identificação.

- Máxima tensão de operação contínua (MCOV);
- Tensão nominal;
- Frequência nominal;
- Corrente nominal de descarga em kA;
- Nome do fabricante, nome da marca, tipo ;



- Identificação de posição para para-raios compostos por múltiplas unidades;
- Ano de fabricação;
- Número de série.

### **2.2.3 – TIPOS CONSTRUTIVOS DE PARA-RAIOS DE ÓXIDO METÁLICO**

Considerando-se o aspecto construtivo, existem três modelos básicos desse tipo de para-raios, que se diferenciam quanto à presença de centelhadores e como eles aparecem no desenho do para-raios. Tem-se para-raios de óxido metálico sem centelhadores, com centelhadores em paralelo e com centelhadores em série.

A utilização de centelhadores ocorreu principalmente nas primeiras versões desses para-raios, se justificando pela necessidade de prevenção de instabilidade térmica. Durante a atuação normal do equipamento, com tensão próxima à nominal, todo o material está ativado normalmente. Durante uma descarga ou chaveamento, os centelhadores são rompidos e a tensão no para-raios decresce amenizando o efeito de sobretensão.

#### **2.2.3.1 – PARA-RAIOS SEM CENTELHADORES**

Esses tipos de equipamentos são formados por uma ou mais colunas em paralelo de elementos de óxido metálico. Possuem uma curva característica de tensão *versus* corrente que evidencia o comportamento dos mesmos. Acima do joelho dessa curva, esse comportamento se mostra muito não linear.

A descarga nominal de um para-raios está ligada diretamente ao tamanho da pilha de elementos, e levemente relacionada com a tensão nominal do mesmo.

O MCOV é tipicamente de 75 a 85% do valor padrão da tensão do sistema. Nesse trecho da curva a corrente no para-raios não é maior que 10 mA. A figura 2.2 representa um esquema construtivo desse para-raios, e a curva característica do modelo [2].

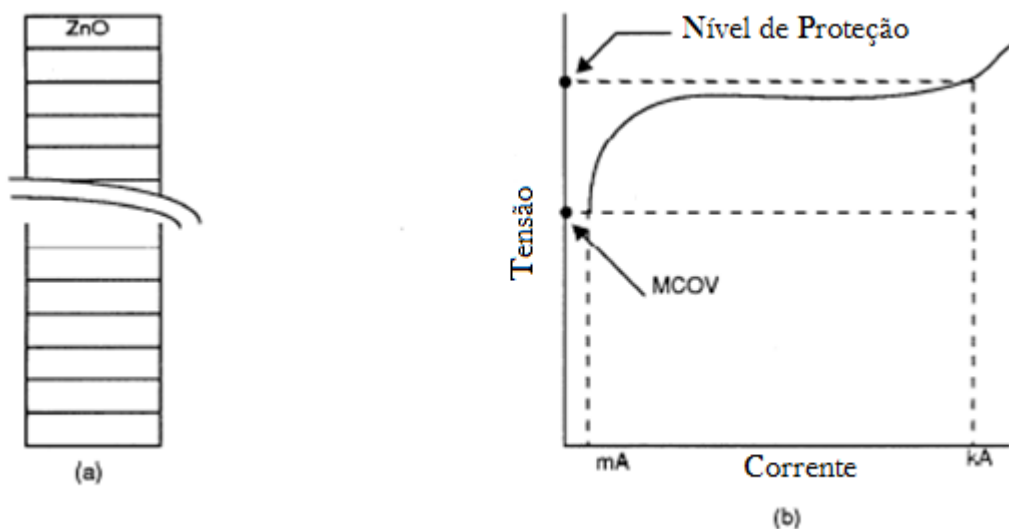


Figura 2.2: (a) Modelo construtivo de para-raios sem centelhadores. (b) Curva característica de tensão versus corrente do material.

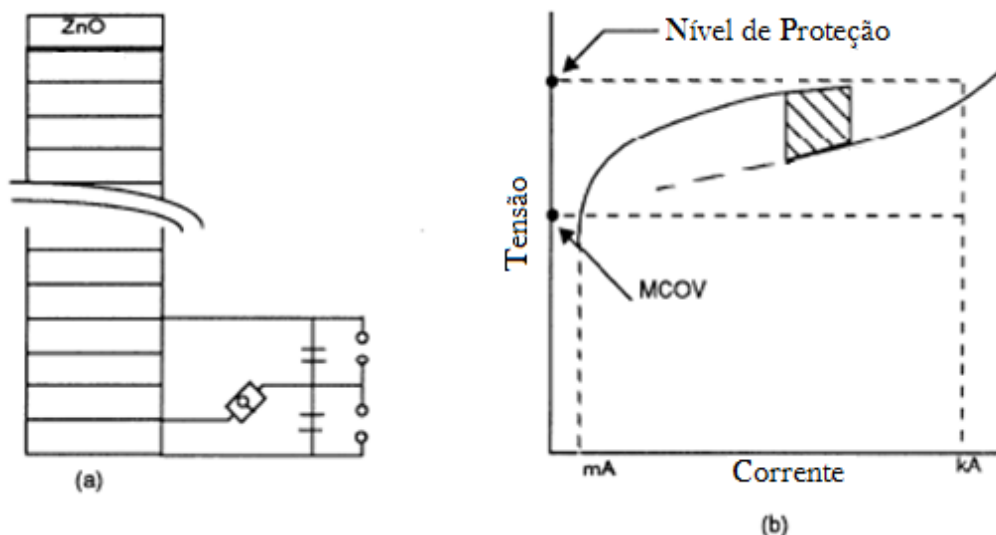
Fonte: referência 2

### 2.2.3.2 – PARA-RAIOS COM CENTELHADORES EM PARALELO

A tensão entre os terminais do para-raios pode ser reduzida colocando-se parte da pilha de elementos de óxido metálico em paralelo, diminuindo-se assim o valor da resistência resultante.

Na figura 2.3 há um gráfico representando uma curva típica da característica tensão *versus* corrente e um desenho esquemático do para-raios.

Inicialmente, esse tipo de dispositivo se comporta igualmente ao anterior até um valor de corrente entre 250 e 500 A. A partir desse limite, a rigidez dielétrica dos centelhadores é rompida, e os elementos em paralelo ficam em curto. Tal ação resulta em uma tensão menor entre os terminais do dispositivo.



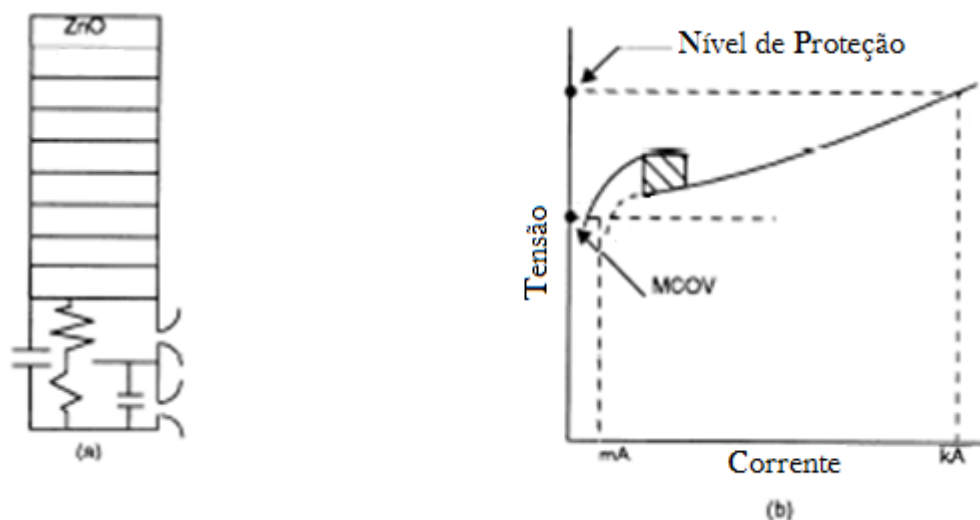
**Figura 2.3:** (a) Modelo construtivo de para-raios com centelhadores em paralelo. (b) Curva característica de tensão versus corrente do material.

Fonte: referência 2

### 2.2.3.3 – PARA-RAIOS COM CENTELHADORES EM SÉRIE

Outro método para uma diminuição na tensão do sistema durante a passagem de uma corrente de descarga pelo para-raios é utilizar um menor número de elementos de óxido metálico, com centelhadores em série.

A figura 2.4 mostra um desenho esquemático e a característica tensão *versus* corrente desse tipo de para-raios. Quando a rigidez dielétrica dos centelhadores é rompida, um resistor presente dentro do para-raios fica em curto circuito, e com um valor menor de resistência.



**Figura 2.4:** (a) Modelo construtivo de para-raios com centelhadores em série. (b) Curva característica de tensão versus corrente do material.

Fonte: referência 2

## 2.3 – SOBRETENSÕES

Sobretensões em sistemas de potência podem ser geradas por eventos externos como descargas atmosféricas, ou internos, como faltas, chaveamentos, ferro-ressonância, rejeição de carga, perda do condutor de terra, ou uma possível combinação desses eventos.

Uma descarga pode ocorrer de várias formas. Uma delas é a ocorrência da descarga diretamente no cabo da rede elétrica, chamada de descarga direta. Outra é a descarga que incide na estrutura ou no cabo guarda da rede. E por último, a descarga indireta, que cai nas proximidades da instalação e consegue induzir uma corrente nos condutores próximos. As intensidades das sobretensões causadas por essas descargas são muito diferentes, sendo que as maiores serão para uma descarga direta.

A forma e a intensidade da sobretensão na linha são funções da magnitude, polaridade e forma da descarga atmosférica, das impedâncias da torre, da linha e de passo da torre. Já a taxa de elevação do distúrbio depende da distância entre o equipamento e o local de ocorrência do raio.

Durante a operação de um disjuntor ou durante a ocorrência de uma falta, aparece em qualquer sistema sobretensões de chaveamento. Esse caso torna-se mais preocupante em sistemas acima de 115 kV e com uma impedância do sistema baixa [20].

As sobretensões temporárias são basicamente valores de tensão que se diferem da tensão nominal em algumas oscilações levemente amortecidas, com a presença de harmônicas. Elas surgem no sistema devido a diversas causas, com falta fase-terra, ferro-ressonância, rejeição de carga, perda do condutor de terra, efeito ferranti de longas linhas de transmissão em vazio, ressonância de acoplamento de linhas e *inrush* de transformadores.

Um desses exemplos, muito comum, e que pode ser mensurado pelo coeficiente de aterramento, é a falta fase-terra. Se o aterramento do sistema é eficiente, as magnitudes das sobretensões não são grandes, porém em sistemas

aterrados através de impedância ou sistemas não aterrados, tais casos tornam-se preocupantes.

## **2.4 – CLASSIFICAÇÕES DE TENSÕES**

Existem dois parâmetros de tensão do para-raios de óxido metálico, O primeiro é o MCOV e o segundo é a tensão nominal de operação. Para os antigos para-raios de carboneto de silício, apenas o segundo parâmetro era necessário. Já para os para-raios de óxido de zinco o MCOV é o parâmetro mais importante, definindo as características daquele que será alocado no sistema. A tensão só é utilizada para manter-se uma relação com os antigos para-raios de carboneto de silício [3,5].

A tabela 2.2 mostra os valores de MCOV dos para-raios considerando-se o valor de tensão nominal do sistema.

***Tabela 2.2: Valores de MCOV***

Tensão Nominal (kV rms)	MCOV (kV rms)	Tensão Nominal (kV rms)	MCOV (kV rms)
3	2,55	144	115
6	5,10	168	131
9	7,65	172	140
10	8,40	180	144
12	10,20	192	152
15	12,70	228	180
18	15,30	240	190
21	17,00	258	209
24	19,50	264	212
27	22,00	276	220
30	24,40	288	230
36	29,00	294	235
39	31,50	312	245
45	36,50	396	318
48	39,00	420	335
54	42,00	444	353
60	48,00	468	372
72	57,00	492	392
90	70,00	540	428
96	76,00	564	448
108	84,00	576	462
120	98,00	588	470
132	106,00	612	485

Fonte: referência 3

## **2.5 – TESTES**

Para-raios devem suportar a condições normais de serviço, em que a temperatura ambiente deve estar situada entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$ , a altitude não superior a 1000m e o intervalo de frequência do sistema entre 48 e 62 Hz [3].

As possíveis condições adversas do sistema são aquelas em que o valor da frequência está fora do intervalo descrito anteriormente, e os casos em que o valor de tensão de fase do sistema, ultrapassa o limite do para-raios. Essas condições são consequências da perda de neutro em um circuito normalmente aterrado, do excesso de velocidade do gerador, da ressonância após perda de grande parte da geração, da instabilidade do sistema, da rejeição de carga, ou da ocorrência de falta fase-terra caso a proteção de atuação seja lenta [4].

Os testes de inspeção e funcionamento em fábrica são especificados para os diferentes valores de tensão e classes de para-raios, os testes iniciais são de verificação de resistência à descarga e ao ciclo de operação, utilizados para averiguação da durabilidade ou capacidade do para-raios. Esses testes são chamados de teste de resistência a altas correntes por baixo intervalo de tempo, teste de resistência a baixas correntes por alto intervalo de tempo, teste de ciclo de operação, teste de falha de curto circuito ou alívio de pressão, teste de contaminação, teste de capacidade de sobretensão transitória e teste de chaveamento.

No teste de alta corrente de curta duração dois impulsos de corrente da forma  $4/10\mu\text{s}$  e com pico de 65 kA devem ser aplicados aos para-raios de subestação, intermediários e de distribuição com operação normal. Para para-raios de distribuição de operação pesada o pico de corrente deve ser de 100 kA e de 40 kA para para-raios de distribuição de uso leve [6].

Para para-raios de subestação e intermediários, o teste de baixa corrente de longa duração é feito energizando-se a linha de transmissão com uma tensão maior que a nominal, de acordo com a tabela 2.1. São necessárias 20 ações em uma linha do tipo  $\pi$ , separadas em três grupos de seis operações e um grupo de

duas, respeitando-se o intervalo de um minuto entre os grupos. A duração de cada ação é calculada através da equação 2.1.

$$T = \frac{2D_L}{0,3} \quad (2.1)$$

Onde  $D_L$  é o tamanho da linha em km, 0,3 é a velocidade da luz em km/μs, o tempo é dado em μs [5].

Já para para-raios de distribuição é utilizada uma onda quadrada de corrente de 2000μs, passando através do para-raios num total de 20 vezes. Essas especificações são descritas na tabela 2.3.

**Tabela 2.3: Sumário de Exigências de Durabilidade e Capacidade**

Classe	Faixa de Tensão do sistema (kV)	Dados da Linha de Transmissão			Corrente de Onda Quadrada 2000 μs (kA)	Corrente de Onda Exponencial 4/10μs (kA)
		Tensão (p.u.)	Distância da linha (km)	Tempo de duração (μs)		
Subestação	601-900	2,0	320	2100	-	65
	401-600	2,0	320	2100	-	65
	326-400	2,6	320	2100	-	65
	151-325	2,6	280	1900	-	65
	3-150	2,6	240	1600	-	65
Intermediário	Todos	2,6	160	1100	-	65
Distribuição	Todos	-	-		250	100
	Todos	-	-		75	65
	Todos	-	-		75	40

Fonte: referência 3

No teste de ciclo de operação o para-raios é energizado com tensão nominal, e são aplicados 20 impulsos atmosféricos da forma 8/20, cada um por minuto. Os valores de pico dos impulsos de corrente são descritos na tabela 2.4. Depois desse teste dois impulsos de corrente são aplicados no para-raios sem que o mesmo esteja energizado pela tensão nominal.

**Tabela 2.4: Classes de Correntes de Impulsos Atmosféricos**

Classes	Máxima Tensão do sistema (kV)	Pico de Corrente (kA)
Subestação	800	20
	550	15
	<550	10
Intermediária	Todas	5
Distribuição de Operação Pesada	Todas	10
Distribuição de Operação Normal	Todas	5
Distribuição de Operação Leve	Todas	5

Fonte: referência 3

O teste de alívio de pressão ou falha de curto circuito é obrigatório para as classes de subestação e intermediária, ocorrendo a fim de garantir que a falha do equipamento não cause maiores problemas. Os valores de corrente para o teste são mostrados na tabela 2.5. Tal teste não é exigido para para-raios de distribuição desde que não se tenha um grande nível de curto a ser considerado, do contrário, o teste torna-se necessário.

***Tabela 2.5: Correntes de teste para verificação de funcionamento normal de operação para para-raios de Subestação e Intermediários.***

Classe	Corrente simétrica (A)	
	Alta corrente (kA)	Baixa corrente
Subestação	40-65	600±200
Intermediária	16	600±200

Fonte: referência 3

Para garantir-se que o para-raios possa ser alocado em áreas contaminadas é necessário que seja feito o teste de contaminação. É colocada sobre o para-raios uma lama de bentonita com água salobra, e então o equipamento é energizado por 1 hora com uma tensão igual ao MCOV.

A capacidade de energia de um impulso de chaveamento é importante na seleção da classe do para-raios. Normalmente essa capacidade é fornecida pelo fabricante em termos de kJ/kV. Não existe uma normatização específica de como essas informações devem ser apresentadas.

Alguns fabricantes se baseiam no fato de que a energia de uma única operação não pode exceder 85% da classe de energia do para-raios. Outros dizem que para equipamentos com MCOV entre 2,55 e 39 kV, as correntes devem ser menores que 750 A. Já aqueles com MCOV entre 42 e 245 kV, as correntes devem ser menores que 1200 A. E existem outros que diferenciam apenas nos valores dessas correntes. As correntes devem ser menores que 1000 A, para MCOV entre 2,55 e 39 kV, e menores que 1500 A para MCOV entre 42 e 245 kV [5,7].

O teste de sobretensões temporárias resulta na curva de capacidade de TOV em função do tempo, com valores de 0,02s até 1000s. E a curva é normalmente desenhada dentro do intervalo de tempo entre 0,01s e 10000s. Para



para-raios de subestações duas curvas devem ser desenhadas, uma levando-se em consideração que ocorreu uma absorção de energia anterior ao teste, e outra sem esse detalhe [8].

A equação 2.2 fundamenta tal curva.

$$\frac{TOV_C}{MCOV} = AT^{-B} \quad (2.2)$$

Em que  $TOV_C$  é a capacidade de TOV, A e B são constantes e T é o tempo em segundos. Tal curva é dividida em duas partes, a primeira abrange o intervalo de 0,01 a 100 segundos e a segunda de mais de 100 a 10000 segundos.

As constantes  $A_1$  e  $B_1$  são as mesmas A e B, mas fazem referência à primeira parte da curva, e  $A_2$  e  $B_2$  fazem referência à segunda parte da curva. As características de durabilidade e capacidade para os para-raios de diversos tipos de utilização são mostradas nas tabelas 2.6, 2.7 e 2.8.

**Tabela 2.6: Características de Durabilidade e Capacidade para Para-raios de Subestação**

Fabricante	Modelo	Corrente (kA)	MCOV (kV)	Energia (kJ/MCOV)	A1	B1	A2	B2	$TOV_{10}/MCOV$
OB	VLA	10	2,55-22	4,9	1,458	0,021	1,407	0,013	1,326
	VL	65	2,55-39	4,9	1,458	0,021	1,407	0,013	1,326
	VN	93	42-245	8,9	1,458	0,021	1,407	0,013	1,326
GE	XE	65	2,2-39	4,9	1,445	0,020	1,463	0,023	1,311
	XE	65	44-292	8,9	1,445	0,020	1,463	0,023	1,311
Cooper	ATZ	65	2,55-24,4	4,9	1,487	0,018	1,497	0,020	1,364
	ATZ	40	29-31,5	4,9	1,487	0,018	1,497	0,020	1,364
	ATZ	80	34-245	8,9	1,487	0,018	1,497	0,020	1,364
	ATZ	80	34-245	8,9	1,487	0,018	1,497	0,020	1,364
Joslyn	ZS	80	2,55-1,90	6,3	1,617	0,026	1,533	0,015	1,456
	ZSH	80	209-372	9,0	1,617	0,026	1,533	0,015	1,456
ABB	EXL-Q	65	2,55-39	4,5	1,491	0,022	1,514	0,026	1,348
	EXL-P	80	42-288	7,0	1,491	0,022	1,514	0,026	1,348

Fonte: referência 3

**Tabela 2.7: Características de Capacidade para Para-raios Intermediários**

Fabricante	Modelo	Corrente (kA)	MCOV (kV)	Energia (kJ/MCOV)	A1	B1	A2	B2	$TOV_{10}/MCOV$
OB	PVI	25	2,55-84	3,4	1,458	0,021	1,407	0,013	1,326
OB	VIA	25	2,55-98	3,4	1,458	0,021	1,407	0,013	1,326
GE	XE	NA	2,2-98	NA	1,436	0,020	1,454	0,023	1,303
Cooper	AZF	NA	2,55-98	NA	1,454	0,021	1,375	0,006	1,315
Joslyn	ZIP	40	2,55-98	3,6	1,436	0,021	1,450	0,019	1,327
Joslyn	ZI	40	2,55-115	4,3	1,617	0,026	1,533	0,015	1,456
ABB	IMX	40	2,55-98	2,6	1,565	0,021	1,590	0,025	1,432

Fonte: referência 3

***Tabela 2.8: Características de Durabilidade e Capacidade para Para-raios de Distribuição***

Fabricante	Modelo	Corrente (kA)	MCOV (kV)	Energia (kJ/MCOV)	A1	B1	A2	B2	TOV <sub>10</sub> /MCOV
OB	PDV100	20	2,55-29	2,2	1,567	0,021	1,608	0,284	1,463
	PDV65	10	2,55-24,4	1,4	1,567	0,021	1,608	0,284	1,463
	PVR	20	2,55-29	3,4	1,458	0,021	1,407	0,013	1,326
GE	XE	NA	2,55-22	NA	1,548	0,020	1,567	0,023	1,405
	UDIIA	NA	7,65-22	NA	1,408	0,020	1,425	0,023	1,278
	UD-XE	NA	7,65-22	NA	1,436	0,020	1,454	0,023	1,303
Cooper	AZL	NA	2,55-29	NA	1,605	0,023	1,500	0,007	1,445
	AZLP	20	2,55-24,4	NA	1,605	0,023	1,500	0,007	1,445
	AZS	NA	2,55-29	NA	1,605	0,043	1,541	0,034	1,379
	AZSP	NA	2,55-24,4	NA	1,605	0,043	1,541	0,034	1,379
	AZR	NA	7,65-24,4	NA	1,454	0,021	1,375	0,006	1,315
	AZRP	NA	7,7-22	NA	1,454	0,021	1,375	0,006	1,315
Joslyn	ZQ	NA	2,55-22	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	ZQP	13	2,55-24,4	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	ZR	NA	7,65-22	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	ZJ	NA	7,65-22	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	ZJP	13	2,55-24,4	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	ZE	NA	2,5-22	1,2	1,617	0,265	1,533	0,157	1,456

Fonte: referência 3

Para tempos maiores que 100 segundos a capacidade de TOV depende da capacidade de transferência de calor para o meio do dispositivo. A figura 2.5 apresenta um exemplo de curva de TOV de um para-raios de subestação, representando seu comportamento com e sem prévia energia.

Quando da falta de informações do fabricante, podem ser usados os seguintes valores [5]:

$$A_1 = 1,45$$

$$B_1 = 0,0338$$

$$A_2 = 1,30$$

$$B_2 = 0,0106$$

$$TOV_{10} / MCOV = 1,24, \text{ e uma razão de } 0,95.$$

Essa razão é o valor de TOV com energia anterior para o valor de TOV sem energia anterior.

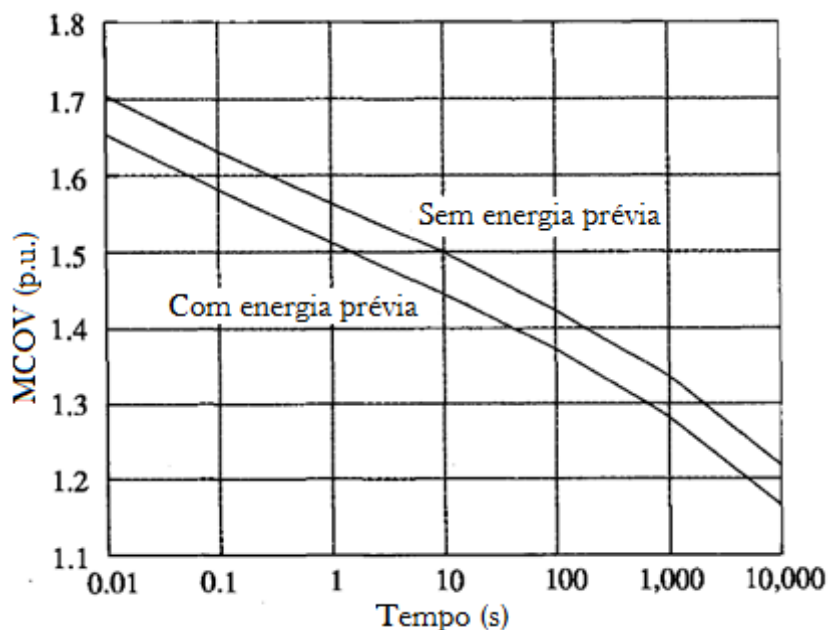


Figura 2.5: Exemplo de curva de capacidade de TOV para para-raios de subestações.  
Fonte: referência 5

A figura 2.6 apresenta a capacidade mínima exigida de TOV de para-raios de distribuição.

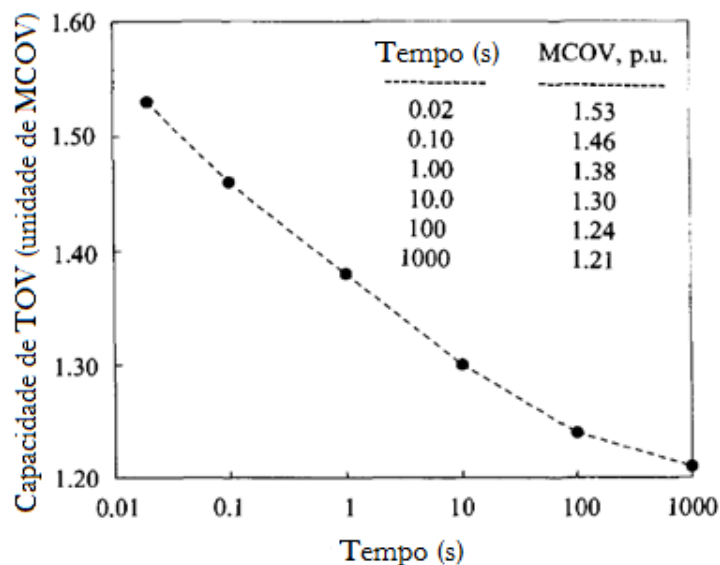


Figura 2.6: Curva mínima de capacidade de TOV de para-raios de distribuição.  
Fonte: referência 5

## 2.6 – CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA E SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS

Sobretensões temporárias ocorrem entre fase e terra ou entre fases, são eventos oscilatórios com valores de frequência muito variados, próximos e

distantes da frequência industrial. Sua duração varia de poucos ciclos até muitas horas em função do tipo de aterramento do neutro do sistema e da velocidade de resposta dos dispositivos de detecção e proteção dessas anomalias.

Sabe-se que as sobretensões temporárias são produzidas principalmente por faltas, rejeições de carga, energização de linhas sem carga e ressonância.

Elas são importantes na definição da tensão nominal dos para-raios, pois estes devem suportar tais sobretensões por um determinado período de tempo sem qualquer falha por instabilidade térmica ou alteração na característica “tensão *versus* corrente”.

É necessário se conhecer as situações anormais do sistema em questão para quantificar as sobretensões temporárias, e então promover uma proteção adequada. Caso o contrário, pode-se utilizar para-raios de maior tensão nominal ou maior capacidade de absorção de energia.

Quanto maior a tensão nominal de um para-raios para um dado sistema, menor é a probabilidade de falha por instabilidade térmica, e também é menor a margem de proteção para os equipamentos.

Uma elevação de temperatura dos elementos do para-raios, causada por sobretensões temporárias existentes no sistema, pode modificar a característica “tensão *versus* corrente”, degradar o para-raios, e até levar a falha por instabilidade térmica.

A capacidade do para-raios de absorver uma quantidade de energia oriunda de uma sobretensão temporária é traduzida na curva característica “suportabilidade a tensão de frequência industrial *versus* tempo”. Nesta é mostrado o tempo máximo que um para-raios suporta uma dada sobretensão. Para-raios podem ser construídos para requerimentos diferentes quanto às sobretensões temporárias, apresentando curvas diferentes [9].

Como as constantes de tempo de transferência de calor são longas, o resfriamento do para-raios é desprezível para pequenos intervalos de tempo.

Logo se pode considerar a energia constante e passível de ser obtida pelas equações de 2.3 a 2.5 [9].

$$E_{TOV} = K \cdot U_{TOV} \cdot I_{PR} \cdot T_{TOV} \quad (2.3)$$

$$E_{TOV} = K \cdot U_{TOV} \cdot K_{PR} \cdot U_{TOV}^{\alpha} \cdot T_{TOV} \quad (2.4)$$

$$E_{TOV} = K \cdot K_{PR} \cdot U_{TOV}^{(1+\alpha)} \cdot T_{TOV} \quad (2.5)$$

Onde  $E_{TOV}$  é a energia absorvida pelo para-raios durante a sobretensão temporária,  $U_{TOV}$  a amplitude da sobretensão temporária,  $I_{PR}$  a corrente fluindo pelo para-raios durante a ocorrência da sobretensão temporária,  $T_{TOV}$  a duração da sobretensão temporária,  $\alpha$  o coeficiente de não linearidade do para-raios e  $K$  e  $K_{PR}$  constantes do dispositivo.

Pode-se estimar a tensão suportável de um para-raios, para tempos entre 0,1s e 100s, com base na tensão para o tempo de 10s, e vice-versa, utilizando-se das equações de 2.6 a 2.10 de energia constante [9].

$$E_{10} = K \cdot K_{PR} \cdot U_{10}^{(1+\alpha)} \cdot T_{10} \quad (2.6)$$

$$E_{TOV} = K \cdot K_{PR} \cdot U_{TOV}^{(1+\alpha)} \cdot T_{TOV} \quad (2.7)$$

$$\frac{E_{10}}{E_{TOV}} = \frac{K \cdot K_{PR} \cdot U_{10}^{(1+\alpha)} \cdot T_{10}}{K \cdot K_{PR} \cdot U_{TOV}^{(1+\alpha)} \cdot T_{TOV}} \quad (2.8)$$

$$\frac{U_{10}^{(1+\alpha)} \cdot T_{10}}{U_{TOV}^{(1+\alpha)} \cdot T_{TOV}} = 1 \quad (2.9)$$

$$U_{10} = U_{TOV} \cdot \left( \frac{T_{TOV}}{10} \right)^{\frac{1}{(1+\alpha)}} \quad (2.10)$$

Onde  $U_{10}$  corresponde ao valor de tensão suportável do para-raios para o tempo de 10 s.

A tensão nominal do para-raios a ser escolhido para uma proteção adequada deve ser igual ou superior ao valor da sobretensão que pode ocorrer no sistema para o intervalo de 10 segundos.

Aumentando-se o valor de  $\alpha$  tem-se valores de tensão menores para os pontos da curva com duração até 10 segundos e maiores para os demais. Alfa pode ser obtido pela equação 2.11 [9].

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_{ref}}\right)}{\ln\left(\frac{U_{res}}{U_{ref}}\right)} \quad (2.11)$$

Sendo  $I_n$  a corrente de descarga nominal,  $I_{REF}$  a corrente de referência definida pelo fabricante,  $U_{RES}$  é a tensão residual do para-raios à corrente  $I_n$  com forma 8/20  $\mu$ s e  $U_{REF}$  é tensão de referência.

As curvas de suportabilidade dos para-raios fornecidas pelos fabricantes, chamadas de curvas “tensão suportável de frequência industrial *versus* tempo” devem ser construídas na faixa de tempo de 0,1 a 1000 ou 10000s [6].

A capacidade de absorção de energia é a principal característica térmica de um para-raios de  $Z_nO$ . Durante o regime permanente do sistema, circula uma corrente de fuga pelos blocos varistores do para-raios que produz, devido ao efeito Joule, um pequeno aquecimento no mesmo. O equipamento deve possuir uma capacidade mínima para suportar tal efeito e dissipar esse valor para o meio externo sem qualquer dano físico.

Já na ocorrência de surtos ou sobretensões temporárias, a corrente que percorre o para-raios tende a aumentar, elevando as perdas ôhmicas e consequentemente, aumentando a temperatura interna do para-raios. Dependendo da quantidade de energia que seja injetada no para-raios, é possível que ele consiga suportá-la e dissipá-la para o meio externo, ou então, pode ser que o para-raios entre em um processo contínuo de elevação de temperatura e corrente de fuga, denominado avalanche térmica, que pode causar a sua destruição. Tal ocorrência dependerá da capacidade nominal de absorção de energia do projeto do para-raios em questão.

Um para-raios corretamente projetado e especificado possui maiores chances de funcionar em equilíbrio térmico mantendo, portanto, sua estabilidade térmica, a qual existe quando:

- após a ocorrência de um surto, o para-raios retorna as suas condições normais, isto é, às condições nas quais ele se encontrava anteriormente;
- consegue manter sua capacidade de dissipação de calor durante o regime de operação contínua sem apresentar aquecimento excessivo.

## **2.7 – DETERMINANDO A CLASSE DE PARA - RAIOS**

Para se determinar a classe de para-raios corretamente, o primeiro passo é escolher o valor correto de MCOV, que deve ser igual ou maior ao valor máximo de tensão fase-terra do sistema. O segundo passo é identificar a classe de capacidade de energia para um surto de chaveamento. O terceiro é encontrar um valor de capacidade de TOV superior ao qual o sistema é submetido. Salienta-se que a temperatura ambiente deve ser menor que 40°C, e a transitória não maior que 105°C. O limite de altitude é de 1800 m, e a corrente de alívio de pressão deve ser maior ou igual à corrente de falta do local [10].

Ou seja, são importantes os valores de MCOV disponíveis, as características de durabilidade, as condições anormais do sistema em relação a tensão e a importância da parte do sistema a ser protegida.

## **2.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo, inicialmente, foram destacadas as características que definem um para-raios, os modelos construtivos existentes, e as suas classificações. O modelo construtivo mais utilizado para esses equipamentos é o de para-raios sem centelhadores e o principal material de sua fabricação é o óxido de zinco.

As classificações evidenciam os diferentes sistemas de energia em que esses equipamentos são utilizados, a grande variedade de tensões é devida aos

vários tipos de arranjos no sistema elétrico e a quantidade de equipamentos, que apresentam diferentes necessidades de proteção. Tem-se classes de tensão, cuja unidade usual é o kV, e classes de corrente, dadas em kA.

Também foram apresentados nesse capítulo os parâmetros a serem especificados da proteção contra sobretensões para uma rede elétrica. Para isso se tem definidos o MCOV, que é a máxima tensão de operação contínua, o maior valor de tensão suportável pelo para-raios quando em regime permanente. Esse valor é por volta de 80% do valor da tensão nominal. E também deve ser definido o  $TOV_{10}$ , que é a máxima sobretensão suportável com duração de no mínimo dez segundos.

A curva característica de tensão *versus* corrente representa o comportamento do para-raios, os valores de tensão que serão permitidos para diversos valores de corrente tendo como base uma corrente da forma de onda 8/20  $\mu$ s. A curva de tensão *versus* tempo reproduz as tensões, na frequência industrial, suportáveis por determinados intervalos de tempo. Ambas as curvas devem ser consideradas na escolha do para-raios. O valor de sobretensão possível de ocorrer em um sistema protegido não deve danificar o isolamento de nenhum equipamento.

O valor da tensão nominal do para-raios será igual ao valor de sobretensão temporária do sistema para o intervalo mínimo de dez segundos. Na falta desse dado específico, pode-se estimar um valor a partir de outro dado de sobretensão temporária do sistema.

Foi abordada a capacidade de absorção de energia do para-raios, quando essa característica é insuficiente para suportar as descargas ocorrentes o para-raios irá apresentar uma instabilidade térmica, podendo chegar a defeito de alguma parte do equipamento. Essa característica é descrita como a máxima energia absorvida durante uma descarga e é dada em kV/kJ.



# CAPÍTULO III

---

## MODELOS DE PARA-RAIOS PARA PLATAFORMAS COMPUTACIONAIS

### 3.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Muitos aspectos importantes surgem na utilização de para-raios para proteção contra sobretensões. Para se produzir um correto nível de proteção por meio de simulações, a primeira preocupação é a modelagem adequada desse dispositivo. Existem no ATP (*Alternative Transient Program*) três modelos de ramos não lineares para esse fim, que são usados no modelo convencional de um para-raios. Além desse modelo há outros, que são os modelos variáveis com a frequência. Cujas teorias mais aceitas por pesquisadores dessa área de estudo tem em seu embasamento o fato de que os para-raios possuem um comportamento dinâmico, dependente da frequência do surto que atinge a instalação [11].

Tal fenômeno tem explicação. Quando ocorre um surto de corrente na rede elétrica, seu tempo de frente de onda é inversamente proporcional à tensão que aparece nos terminais do para-raios. Quanto mais rápido o surto, maior a tensão.

### 3.2 - MODELO PARA SIMULAÇÃO PROPOSTO PELO *IEEE*

O grupo de estudos do *IEEE* produziu uma modelagem de para-raios a partir de informações de características de varistores de óxido de zinco. As informações acerca das características e faixas de operação do equipamento devem ser obtidas no catálogo do fabricante [12].

Esse modelo possui dois resistores não lineares A0 e A1, separados por um filtro R-L. Além de outro filtro R-L e uma capacitância, mostrado na figura 3.1. Quando ocorre um surto padrão, o filtro apresenta certa impedância que causará uma distribuição de correntes pelos ramos resistivos, já quando da ocorrência de um surto de frente de onda rápida, a impedância do filtro se torna maior, causando uma distribuição de correntes diferente, fazendo passar pelo ramo A0, com maior resistência, uma parcela maior de corrente, o que resulta numa tensão residual maior no para-raios [13].

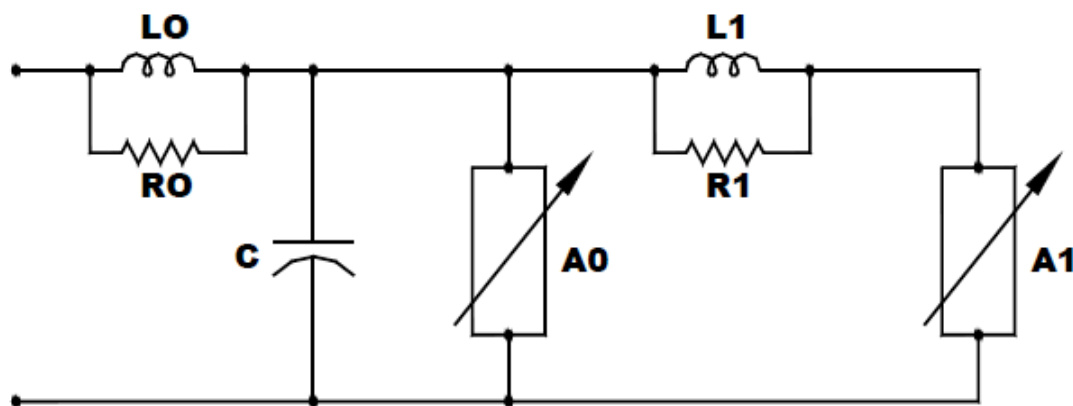


Figura 3.1: Modelo de dependência com a frequência recomendado pelo *IEEE*.

Fonte: referência 12

Os parâmetros são baseados nas dimensões do para-raios e no número de colunas de materiais de óxido de zinco. Os resistores dos filtros R-L têm a tarefa de evitar o erro numérico devido ao método de solução adotado pelo *software*. Já L0 representa os campos magnéticos existentes na vizinhança do para-raios e

C a capacitância entre os terminais do para-raios. A seguir é mostrada a forma de obtenção desses parâmetros [12].

$$L_1 = 15 \, d/n \, \mu H$$

$$R_1 = 65 \, d/n \, \Omega$$

$$L_0 = 0,2 \, d/n \, \mu H$$

$$R_0 = 100 \, d/n \, \mu H$$

$$C = 100 \, n/d \, pF$$

Onde, d é a altura do para-raios em metros e n é o número de colunas paralelas de material óxido metálico.

A tabela 3.1 apresenta a característica não linear do para-raios.

**Tabela 3.1: Características do elemento não linear**

Corrente(kA)	Tensão A0 (pu)	Tensão A1 (pu)
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

Fonte: referência 12

A indutância  $L_1$  é responsável por representar, no modelo, a resposta dinâmica em função da frequência que o para-raios apresenta.

Através de alguns estudos com a utilização do modelo *IEEE* foram descobertas algumas relações que evidenciam o aumento de tensão em relação ao modelo convencional. Por exemplo, o aumento de tensão para a diminuição

do tempo de frente de onda do surto de corrente de  $8\mu\text{s}$  para  $1,3\mu\text{s}$ , é de aproximadamente 6%.

### 3.2.1 - MODELO PARA SIMULAÇÃO PROPOSTO POR *PINCETI*

Esse modelo surgiu para facilitar a obtenção dos parâmetros, com todos os dados necessários informados pelos fabricantes no catálogo, e não sendo necessário se utilizar de processos iterativos a fim de corrigir os parâmetros como no modelo *IEEE*. A figura 3.2 representa o modelo *Pinceti*.

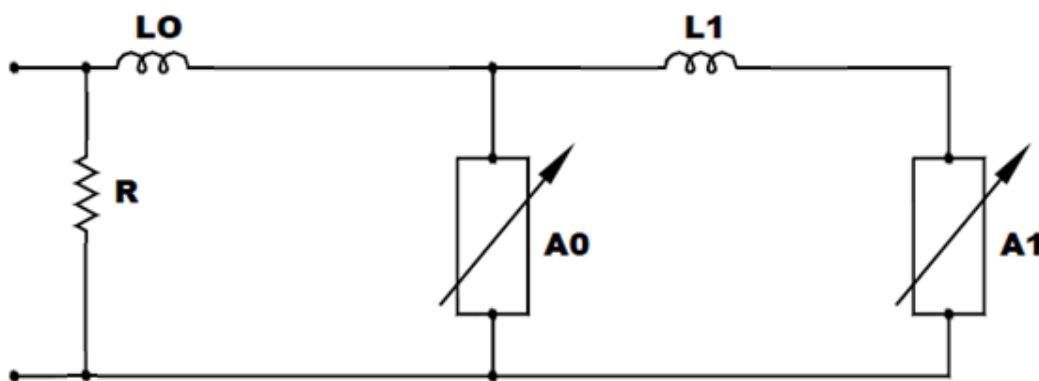


Figura 3.2: Modelo *Pinceti* de dependência com a frequência.

Fonte: referência 14

O princípio de operação do modelo em relação à frequência do surto é muito próximo do modelo *IEEE* [14].

Os erros obtidos por esse método entre os valores de tensão residual, das simulações com base no modelo e das medições experimentais são menores que 4,5% para correntes de descarga com tempos de subida entre 1 e  $30\mu\text{s}$  [15].

A característica não linear dos resistores é obtida em curvas. Os valores de tensão são em p.u., tendo como base o valor de pico de tensão residual medida durante um teste de descarga com uma corrente de 10kA da forma  $8/20\mu\text{s}$  [14].

As curvas são mostradas na figura 3.3.

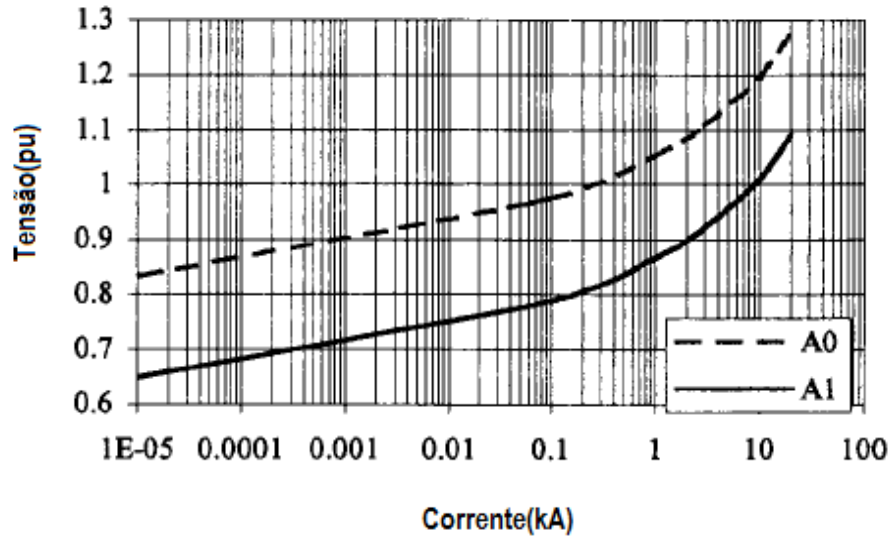


Figura 3.3: Característica não linear dos resistores variáveis

Fonte: referência 14

Para se encontrar os valores das indutâncias em  $\mu\text{H}$  devem-se usar as equações 3.1 e 3.2.

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \quad (3.1)$$

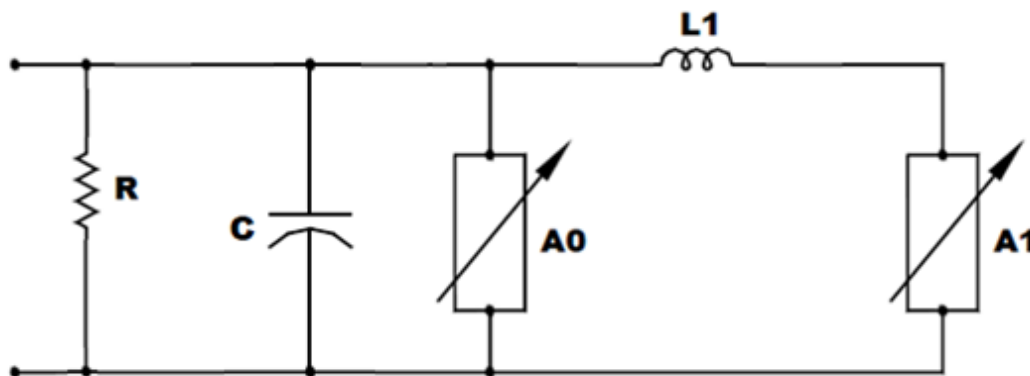
$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \quad (3.2)$$

Onde  $V_n$  é a tensão nominal do para-raios,  $V_{r1/T2}$  é a tensão residual para uma descarga de 10kA da forma r1/T2  $\mu\text{s}$ , e  $V_{r8/20}$  é a tensão residual para uma descarga de 10 kA da forma 8/20  $\mu\text{s}$  [14].

Não são utilizados dados físicos externos do para-raios para implementação do modelo, somente dados elétricos, essa é a principal diferença entre esse modelo e o anterior. Para implementar o modelo é necessária uma tensão residual para uma frente de onda rápida, disponibilizada pelo fabricante em seu catálogo.

### 3.2.2 - MODELO PARA SIMULAÇÃO PROPOSTO POR FERNÁNDEZ

Outro modelo baseado no modelo *IEEE*, que propõe simplificações para o cálculo dos parâmetros é de Fernández, mostrado na figura 3.4 [16].



*Figura 3.4: Modelo Fernández de dependência com a frequência.*

Fonte: referência 16

A indutância  $L1$  está em série com a resistência não linear  $A1$ , e essas estão em paralelo com a resistência  $A0$ . Ou seja, quando o para-raios é submetido a uma descarga atmosférica as resistências não irão experimentar o mesmo valor de tensão, devido a existência de uma queda de tensão na indutância  $L1$ . Sabe-se ainda que a reatância indutiva aumenta proporcionalmente com a frequência, ou seja, conforme o tempo de frente de onda diminui a reatância indutiva aumenta.

A ideologia que define o modelo é que existe uma razão entre as correntes  $I_0$  e  $I_1$ , que são as correntes que atravessam os ramos resistivos. Essa razão se mantém para todos os pontos da curva características dos ramos.

Essas correntes são mostradas na figura 3.5. A razão entre  $I_0$  e  $I_1$ , para um surto da forma  $8/20\mu s$ , é de 0,02, e entre  $I_1$  e  $I$  é de 0,98 [16].

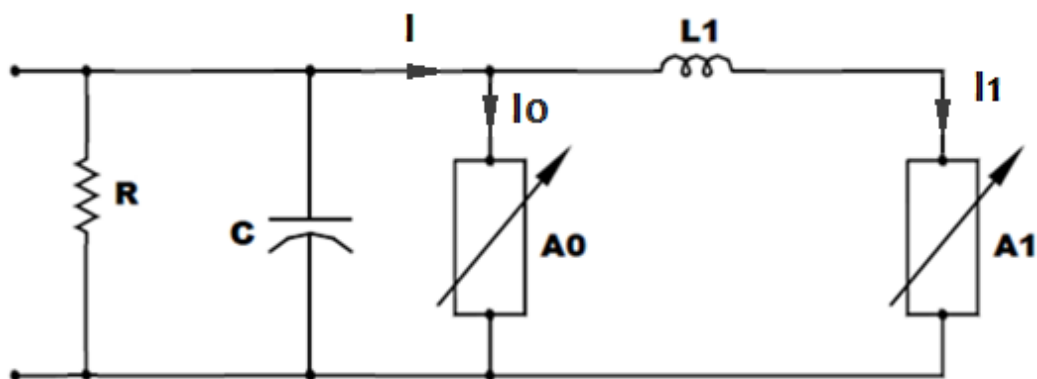


Figura 3.5: Modelo Fernández de dependência com a frequência.

Fonte: referência 16

Um exemplo com valores dessas correntes pode ser mostrado na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características do elemento não linear

Tensão Residual por bloco de 1kV (kV) Para blocos de 5kA	Tensão Residual por bloco de 1kV (kV) Para blocos de 10kA	Corrente I (A)	Corrente $I_0$ (A)	Corrente $I_1$ (A)
2,87	2,73	1500	30	1470
3,07	2,90	3000	60	2940
3,27	3,07	5000	100	4900
3,60	3,33	10000	200	9800
4,27	3,77	20000	400	19600
5,30	4,53	40000	800	39200

Fonte: referência 16

Ou seja, mesmo que em operação os resistores não apresentem as mesmas tensões, a definição da sua característica não linear é feita de alguns valores de corrente para uma mesma tensão.

O aumento da tensão residual depende do valor de L e do tempo de frente de onda do surto. O procedimento para se adquirir os valores do modelo está descrito resumidamente a seguir. Os dados necessários são obtidos facilmente junto ao fabricante, não sendo necessário qualquer cálculo iterativo e para surtos com tempo de subida entre  $1\mu\text{s}$  e  $8\mu\text{s}$ , o erro apresentado pelo método é de no máximo 1,7% no valor da tensão residual [17].

As curvas da figura 3.6 mostram o aumento de tensão residual obtido para o tempo de frente de onda de uma descarga. Cada curva representa uma indutância diferente. Como pode ser visto, quanto maior o valor de indutância, maior será o aumento percentual da tensão, para o mesmo tempo de frente de onda.

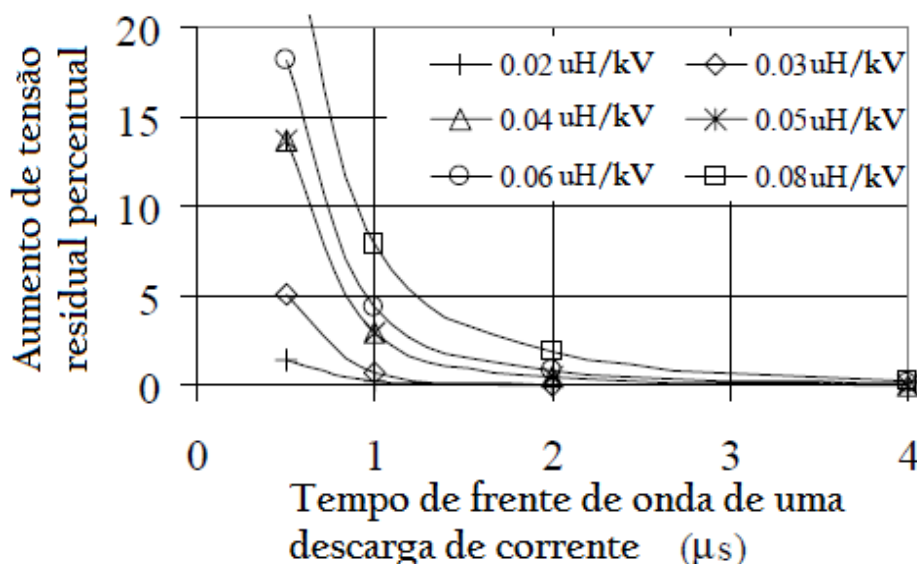


Figura 3.6: Aumento da tensão residual de um para-raios por tempo de frente de onda.

Fonte: referência 16

Quando se utiliza uma descarga com um determinado tempo de frente de onda, e se observa o valor do aumento da tensão residual para a mesma, em comparação à descarga com frente de onda 8/20μs, determina-se um ponto no gráfico. Tal ponto estará mais próximo de uma determinada curva, definida pelo valor da indutância. Deve-se observar que esse é o valor de indutância por kV da tensão nominal do para-raios.

A seguir será feito um exemplo de aplicação do método que foi apresentado pelo criador do modelo. O para-raios é de 20kV e 10kA. Os dados do fabricante são 20kV de tensão nominal, a tensão residual para uma descarga de frente de onda rápida, da forma 1/5μs é de 55kV. Os valores de tensão e corrente para um surto da descarga da forma 8/20μs são mostrados na tabela 3.3.



**Tabela 3.3: Características do fabricante.**

$U_{8/20}$ (kV)	$I_{8/20}$ (A)
48,0	5000
51,0	10000
57,0	20000

A partir de tais dados podem-se definir as características não lineares dos elementos A0 e A1. Elas são mostradas na tabela 3.4.

**Tabela 3.4: Características dos elementos não lineares A0 e A1.**

$U_{8/20}$ (kV)	$I_{8/20}$ (A)	$I_0$ (A)	$I_1$ (A)
48,0	5000	100	4900
51,0	10000	200	9800
57,0	20000	400	19600

O aumento de tensão residual pode ser calculado pela equação 3.3.

$$\Delta U_{res} = \frac{U_{In,T1} - U_{In,8/20}}{U_{In,8/20}} \cdot 100 \% = \frac{55,0 - 51,0}{51,0} \cdot 100 \% = 7,84\% \quad (3.3)$$

O valor de indutância pode ser retirado da curva apresentada na figura 3.6, para o tempo de frente de onda igual a 1 $\mu$ s, e um aumento de 7,84%, o valor de indutância é 0,082 $\mu$ H/kV. Como a tensão do para-raios é de 20kV, a indutância total é 1,64 $\mu$ H.

A altura do para-raios é de 0,438 m, e será usada para calcular a capacitância do modelo, como na equação 3.4.

$$C = \frac{100}{d} = \frac{100}{0,438} = 228,3 \text{ pF} \quad (3.4)$$

E a resistência de R é de 1M $\Omega$ , usada apenas para impedir erros numéricos.

Dessa forma, fica exemplificado o modelo Fernández, utilizado para elucidar as características do mesmo.

### 3.3- MODELOS DE RESISTORES NÃO LINEARES DISPONÍVEIS NO ATP

#### 3.3.1 - MODELO PSEUDO NÃO LINEAR TIPO 99 NO ATP

Essa resistência é definida por um grupo de cartões de dados. Um cartão ramo tipo 99 é utilizado com os parâmetros VFLASH, TDELAY, JUMP e VSEAL, todos relacionados com o *flashover* no *gap* interno do elemento e com a interrupção de passagem de corrente por zero. Esse cartão é mostrado na figura 3.7 [18].

Tipo	1		2		3		4		5		6		7		8		S A Í D A
	Nome dos Ns		Ns de Referncia		VFLASH	TDELAY	JUMP	VSEAL									
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4													
99	A6	A6	A6	A6	E6.0	E6.0	E6.0	E6.0									k

Figura 3.7: Cartão de entrada de dados do primeiro grupo do tipo 99.

Fonte: referência 18

VFLASH é a tensão de *flashover*. O ramo tipo 99 é um circuito aberto até que a tensão em seus terminais, em valor absoluto, exceda esse valor de VFLASH. Desse momento em diante, torna-se um ramo fechado até que a corrente que passa pelo ramo chegue à zero. TDELAY é o intervalo de tempo para o qual o ramo fica fechado, dada à ocorrência de um *flashover*. O ramo voltará a ser aberto quando a corrente passar por zero após o tempo TDELAY. JUMP é a marca do início da operação. VSEAL é uma grandeza usada como alternativa para abertura do ramo, ao invés da corrente se igualar a zero, o *gap* ficará aberto quando a tensão entre os terminais do ramo chegar a um valor absoluto, esta estratégia evita o erro de operação desse elemento [18].

A característica não linear  $V \times I$  é específica do ponto a ponto. Ela informa a corrente no elemento em ordem crescente, sempre por um par ordenado de

tensão e corrente, isso através de um cartão. A origem é o ponto (0,0), um ponto implícito, que o usuário deve saltar. Como essa característica deve ser simétrica, não se podem utilizar valores negativos, e deve-se respeitar o mínimo de dois pontos, já que um único ponto caracteriza um comportamento linear, como pode ser visto na figura 3.8.

1	2	3	4	5	6	7	8
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890	123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
CORRENTE	TENSÃO						
E16.0	E16.0						

*Figura 3.8: Cartão de entrada de dados dos pontos de tensão e corrente.*

Fonte: referência 18

O pressuposto de que quando o número de segmentos da característica se aproxima de infinito, a precisão da modelagem também se aproxima é errôneo para essa modelagem. Um número grande de segmentos significa que a operação pode ocorrer no segmento errado, levando ao erro.

### 3.3.2 - MODELO VERDADEIRO NÃO LINEAR INTERPOLAÇÃO EXPONENCIAL TIPO 92 -5555

Esse modelo é adequado para representar para-raios de óxido de zinco nos quais a interpolação entre dois pontos da curva  $V \times I$  é baseada em uma equação exponencial, a equação 3.5, em que se admite que ele seja restritamente resistivo e altamente não linear [18].

$$i = p \cdot \left( \frac{V}{V_{ref}} \right)^q \quad (3.5)$$

Onde  $i$  é a corrente no para-raios,  $V$  é a tensão,  $p$ ,  $V_{ref}$  e  $q$  são constantes que definem o dispositivo.

O valor da tensão de referência usual é o dobro do valor da tensão nominal do para-raios, ou outro valor próximo. Esse parâmetro serve para normalizar a equação e sugere um ponto flutuante numérico durante a exponenciação, ou seja, as constantes inerentes do para-raios são  $p$  e  $q$ .

A característica intrínseca dos para-raios que deve ser mantida em uma modelagem é a não linearidade  $V \times I$ . Ela pode ser aproximada por um número de segmentos exponenciais.

Nessa representação podem ser incluídos para-raios do tipo com *gaps*, em série ou paralelo, que necessitam de dois conjuntos de segmentos exponenciais, e do tipo sem *gaps*, que necessitam de um conjunto de segmentos exponenciais. Existe um programa especial o “ $Z_nO$  Fitter”, que faz a escolha das exponenciais adequadas [2].

Existem casos em que os valores de tensão são menores que a tensão de referência. Nesses casos, os valores de corrente que passam pelo dispositivo são muito pequenos, e para evitar-se problemas numéricos usa-se o modelo linear nessas simulações.

No primeiro grupo de cartões, tem-se um cartão de ramo tipo 92 com identificação de “5555”, o que designa um para-raios tipo  $Z_nO$ . Algumas colunas são utilizadas para dar nome aos nós, e outras como nós de referência, como pode ser visto na figura 3.9.

																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				</									
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$V_{\text{flash}}$  é a tensão necessária para ocorrer um *flashover* no *gap*. Se o para-raios for do tipo sem *gap*, qualquer número negativo deve ser colocado neste campo.  $V_{\text{zero}}$  é a tensão inicial do para-raios na mesma unidade de  $V_{\text{ref}}$ . Na maioria dos casos é deixado em branco e, dessa forma, a iteração de Newton, que é o método de solução empregado para o acoplamento de equações, inicia-se com corrente zero. COL é o número de colunas paralelas da característica. Caso esse campo fique em branco ou for digitado zero ou unidade no mesmo, então uma coluna é considerada e, a característica será utilizada sem modificação. Para COL positivo, a constante  $p$  para todos os cartões seguintes será multiplicada por COL durante a entrada de dados, antes da armazenagem e posterior utilização, conforme figura 3.10.

1	2	3	4	5	6	7	8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890							
Vref		Vflash		Vzero		COL	
E25.0		E25.0		E25.0		E5.0	

**Figura 3.10: Cartão de entrada de dados do segundo grupo do tipo 92 “5555”.**

Fonte: referência 18

No terceiro grupo de cartões, os segmentos exponenciais que caracterizam o para-raios são especificados. Todas as características devem finalizar com o cartão especial “9999”, nas colunas de 22 a 25, de acordo com a figura 3.11.

1	2	3	4	5	6	7	8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890							
COEF		EXPON		VMIN			
E25.0		E25.0		E25.0			

**Figura 3.11: Cartão de entrada de dados do terceiro grupo do tipo 92 “5555”.**

Fonte: referência 18

COEF é o coeficiente p da equação para modelagem, sua unidade é amperes. EXPON é o expoente q da equação, é adimensional. VMIN é a tensão mínima para a utilização da característica preestabelecida, em por unidade da tensão tendo como base a  $V_{ref}$ .

Os cartões dos segmentos exponenciais são colocados em ordem crescente de corrente. Se existirem hastes centelhadoras no para-raios, devem aparecer as características de pré e pós *flashover*.

### 3.3.3 - MODELO VERDADEIRO NÃO LINEAR INTERPOLAÇÃO LINEAR

**Tipo 92-4444**

O método de solução utilizado nesse caso é o método iterativo de Newton, em que é feita a solução para um sistema de equações. A diferença entre esse modelo e o anterior é que a curva característica não linear é composta por um conjunto de trechos lineares e não exponenciais.

A especificação do elemento tipo 92, “4444” obedece a formatação dos cartões de dados apresentados na figura 3.12.

[illegible]

**Figura 3.12: Cartão de entrada de dados do primeiro grupo do tipo 92 “4444”.**

Fonte: referência 18

Os parâmetros de Nól ao Nól4, são os mesmos já definidos anteriormente. NFLASH é um controle do *gap* interno do elemento, com valor +1 é para a ocorrência de *flashover* e abertura do *gap* somente uma vez, com valor 0 é para considerar a ocorrência de *flashover* e abertura do *gap* tantas vezes quantas forem requeridas pelas condições do circuito, com valor -1 é para considerar a



integração anterior para determinar o elemento pseudo não linear e o mantém constante no passo de integração atual, o que pode ser perfeitamente aceitável em alguns casos.

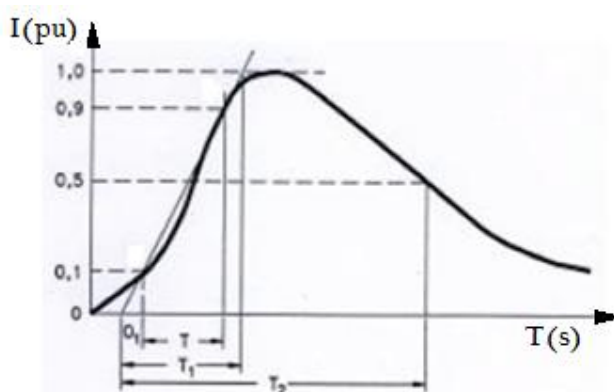
A decisão de se usar um ramo pseudo não linear ou um verdadeiro não linear deve ser baseada em duas variáveis, uma é a velocidade da operação e a outra é a possibilidade de não convergência do método. O nível de precisão do resultado final com os dois modelos pode ser equiparado com um passo de integração adequado.

### 3.4 – MODELO DE FONTE DE IMPULSO ATMOSFÉRICO

Sabe-se que o evento que traz o maior nível de sobretensão em uma rede elétrica é a descarga atmosférica direta. Esse fato faz com que em um estudo de coordenação de isolamento, considerar a descarga atmosférica direta para verificar os corretos dimensionamento e posicionamento dos para-raios seja uma boa prática.

Normalmente um surto atmosférico é representado por uma fonte de surto de corrente, que é definida por um impulso. Existem dois tipos de impulsos, o impulso exponencial e o impulso retangular, e ainda dentro do impulso exponencial, existe um tipo especial, o impulso atmosférico.

A figura 3.14 representa um surto de corrente exponencial e suas variáveis.



**Figura 3.14: Impulso de corrente exponencial.**

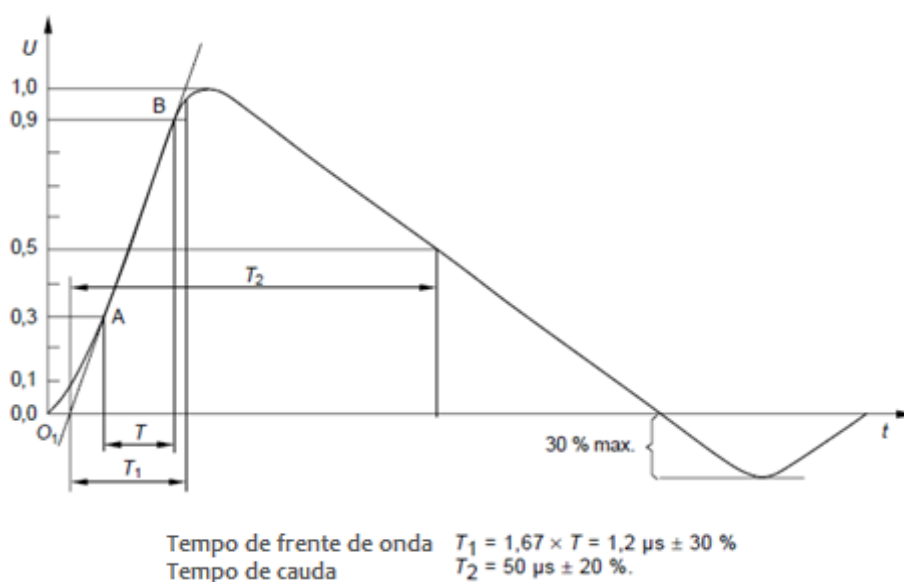
Fonte: referência 5



De acordo com a norma IEC 60060-1, para uma onda de tensão, a origem virtual  $O_1$  é o ponto que a linha imaginária que atravessa os pontos de 30 e 90% do valor de pico alcança o eixo do tempo. Para uma onda de corrente, a linha imaginária atravessa os pontos de 10 e 90% do valor de pico e no cruzamento com o eixo do tempo tem-se a origem virtual.

Ainda de acordo com essa norma, o tempo de frente de onda  $T_1$  é, para um surto de tensão, definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo entre os instantes de 30 e 90% do valor de pico. E para um surto de corrente, é definido como 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes de 10 e 90% do valor de pico [19].

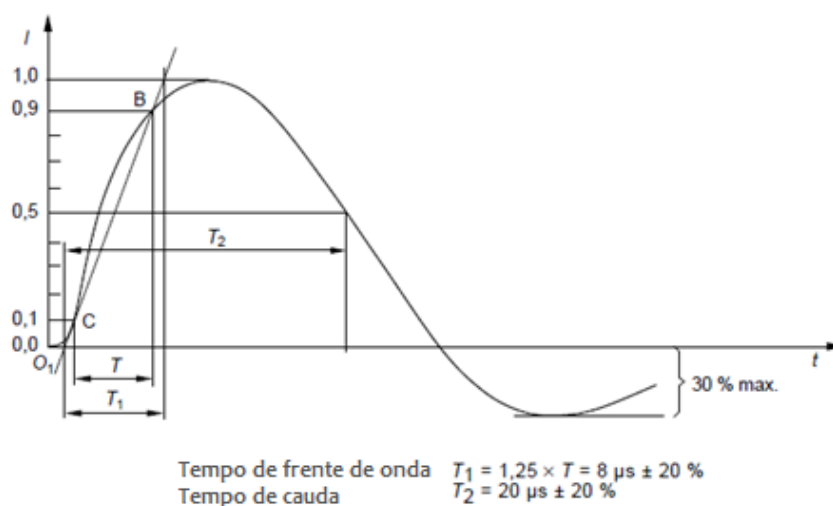
O tempo de cauda,  $T_2$ , é o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante em que os valores de tensão ou corrente chegarem à metade do valor de pico. O tempo de frente padrão para uma onda de tensão é de  $1,2\mu\text{s}$ , e o tempo de cauda é de  $50\mu\text{s}$ . As formas de onda padrão para impulsos atmosféricos seguem a teoria de ondas de surto da forma exponencial, como pode ser visto na figura 3.15.



**Figura 3.15: Forma de onda padrão do surto de tensão (1,2/50 $\mu\text{s}$ ).**

Fonte: referência 19

O tempo de frente de onda de um surto padrão é de  $8\mu\text{s}$ , e o tempo de cauda de  $20\mu\text{s}$ . Como pode ser visto na figura 3.16.



**Figura 3.16: Forma de onda padrão do surto de corrente (8/20µs).**

Fonte: referência 19

Uma série de incertezas é levantada por profissionais da área de coordenação de isolamento sobre as formas de onda padrão dos surtos atmosféricos de tensão e corrente. Sabe-se que os surtos atmosféricos possuem tempos pequenos de frente de onda, e tempos de cauda relativamente curtos. Essa característica é reproduzida nas formas padrões. Mas a maior importância do processo de normatização é que surtos com tais formas de onda podem ser produzidos com facilidade na maioria dos laboratórios.

A normatização define parâmetros para impulsos de corrente exponenciais. Em relação a tempo define-se; valores de pico, polaridade reversa, energia e tolerâncias dos limites. Pode se observar os diferentes valores de forma de onda para os surtos exponenciais. Tais valores são muito interessantes em estudos que abrangem o comportamento de um para-raios quando submetido a tais surtos. As normas IEC 60099-4 e IEC 60060-1 se diferem nos limites de cada variável, o que pode ser observado nas tabelas 3.5 e 3.6.

**Tabela 3.5: Impulsos exponenciais padrões segundo a norma IEC 60060-1**

Forma de Onda	Tempo de Frente	Tempo de Cauda	Valor de Pico	Polaridade Reversa
1/20	$1\mu s \pm 10\%$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%
4/10	$4\mu s \pm 10\%$	$10\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%
8/20	$8\mu s \pm 10\%$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%
30/80	$30\mu s \pm 10\%$	$80\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%

Fonte: referência 19

**Tabela 3.6: Impulsos exponenciais padrões segundo a norma IEC 60099-4**

Forma de Onda	Tempo de Frente	Tempo de Cauda	Valor de Pico	Polaridade Reversa
1/20; 20kA	$0,9\mu s \leq T_1 \leq 1,1\mu s$	20 $\mu s$	$\pm 5\%$	-
4/10; 100kA	$3,5\mu s < T_1 < 4,5\mu s$	$9\mu s < T < 11\mu s$	$\pm 10\%$	20%
8/20; 20kA	$7\mu s \leq T_1 \leq 9\mu s$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	-
30/80; 40kA	$25\mu s < T_1 < 35\mu s$	$70\mu s \leq T \leq 90\mu s$	$\pm 10\%$	20%

Fonte: referência 3

As formas de onda dos surtos são as mesmas para ambas as normas. Já as tolerâncias das duas normas são diferentes. Para os tempos de frente e de cauda, na norma IEC 60060-1 há um valor fixo de 10% para mais ou para menos, na norma IEC 60099-4 o valor não é o mesmo para todas as formas, existem valores que garantem um percentual diferente. E o valor de pico para a forma de onda 1/20 $\mu s$ , é de 10% para mais ou para menos na norma IEC 60060-1, e de 5% para mais ou para menos na norma IEC 60099-4.

As diferenças não são grandes e não representam contrariedades, apenas divergências que não implicam em grandes preocupações para simulações.

### 3.5 – OS MODELOS DE FONTES DE CORRENTE PARA REPRESENTAR A DESCARGA ATMOSFÉRICA

Existem quatro fontes diferentes do tipo 15 no *software* ATP para representar um surto atmosférico. As fontes são a Dupla exponencial, a fonte Heidler, a Stlander e a Cigré, todas podem ser escolhidas como fontes de tensão ou corrente.

Com referência aos parâmetros da curva, a Dupla exponencial não apresenta adequadamente o valor de pico quando os tempos de crista e de cauda são os corretos.

No ATP devem ser inseridos alguns valores para definir a descarga, indicados por  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $A$ . Para se encontrar tais valores devem ser resolvidas algumas equações descritas abaixo.

Como condições iniciais pode se adotar que  $\beta$  é muito maior que  $\alpha$ , logo  $X$  será muito menor do que 1. Logo, deve-se estipular um valor baixo maior que zero para  $X$  [2].

Então se inicia um processo iterativo até se alcançar a resposta desejada para um dado valor de erro. Ao fim desse processo, os valores das variáveis devem ser inseridos no modelo da fonte. Esse modelo depende dos valores de pico da descarga e dos tempos de crista e de cauda.

A função que representa essa fonte é mostrada no equacionamento que se segue [17]:

$$f(t) = A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.6)$$

$$\frac{d(f(t))}{dt} = A(-\alpha e^{-\alpha t_{cr}} + \beta e^{-\beta t_{cr}}) = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{e^{-\beta t_{cr}}}{e^{-\alpha t_{cr}}} = \frac{\alpha}{\beta} = X \quad (3.8)$$

$$\ln(X) = -\beta t_{cr} + X\beta t_{cr} \quad (3.9)$$

$$\beta = \frac{\ln(X)}{(X-1)t_{cr}} \quad (3.10)$$

$$\alpha = \frac{\ln(0,5)}{t_{cr} - t_{cd}} \quad (3.11)$$

$$A = \frac{V_{cr}}{(e^{-\alpha t_{cr}} - e^{-\beta t_{cr}})} \cong \frac{V_{cr}}{e^{-\alpha t_{cr}}} \quad (3.12)$$

Quando a relação entre o tempo de cauda e o tempo de crista é superior a três, os parâmetros encontrados para a curva são precisos e capazes de representá-la adequadamente. Do contrário, tais valores não são precisos, existindo um erro em pelo menos um desses valores. Ou seja, para representar uma onda da forma padrão de corrente, 8/20 $\mu$ s, o uso desse tipo de fonte não é uma boa opção.

A fonte Heidler é descrita através de uma função diferente da Dupla exponencial. Ela possui três parâmetros para sua definição: A, que é o valor de pico da curva;  $T_f$ , que é o tempo de frente de onda, dado em segundos; e  $t$ , que é o tempo em segundos em que a amplitude do surto caiu para 37% do valor de pico, a sua curva é definida pela equação 3.13.

$$f(t) = A \cdot \left( \left( \frac{t}{T_f} \right)^{\frac{n}{1 + \left( \frac{t}{T_f} \right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{T_f}}} \right) \quad (3.13)$$

Como os valores conhecidos de uma descarga são os tempos de frente de onda, de cauda e o pico de corrente ou tensão, dois parâmetros para esse tipo de fonte de surto já estão definidos. O valor de  $t$  não corresponde ao tempo de cauda, já que este é o tempo para que a amplitude da curva seja de metade de seu valor máximo, mas os dois valores são próximos. A forma mais prática de se determinar  $t$ , é fazer simulações sucessivas, tendo como valor inicial o tempo de cauda, até que a forma obtida represente adequadamente a descarga desejada.

Onde  $n$  é um fator de influência de taxa de crescimento da função, que aumento proporcionalmente com declividade da onda do surto.

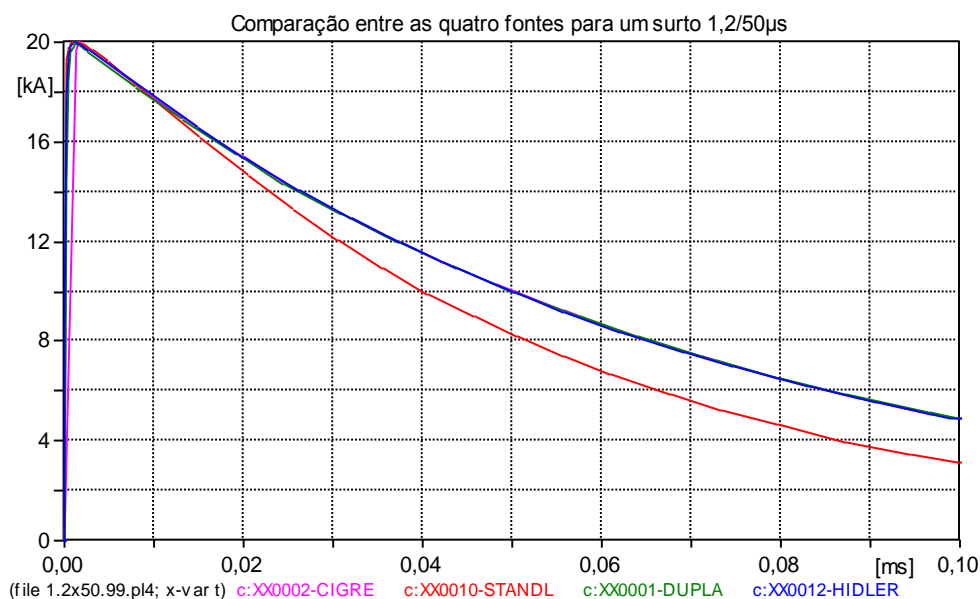
A fonte do tipo Standler é obtida a partir de uma função próxima da fonte anterior, mas as variáveis representam parâmetros diferentes:  $t$ , é o tempo de cauda; Amp é uma constante; e  $n$  é um expoente.

Esse tipo de onda apresenta uma forma de parametrização mais complexa que o tipo Hidler, já que apenas o dado de tempo de cauda é inserido diretamente nesse modelo de fonte.

A fonte do tipo Cigré apresenta como variáveis A, que é sua amplitude,  $T_f$ , que é o tempo de frente de onda,  $T_h$ , que é o tempo de cauda,  $S_{\max}$ , que é a máxima taxa de aumento, amperes por segundo, no caso de uma fonte de corrente, e volts por segundo, no caso de uma fonte de tensão.

Como as variáveis que definem um surto são os valores de pico e os tempos de crista, ou frente de onda, e de cauda, não é comum ter-se a taxa de variação da curva como dado inicial da simulação. Isso faz com que a obtenção dos parâmetros para esse tipo de fonte seja mais complexa.

Para se realizar uma análise comparativa das quatro fontes todas serão parametrizadas para uma onda de surto de  $1,2/50\mu\text{s}$ , e para outra onda de  $8/20\mu\text{s}$ , ambas de  $20\text{kA}$ . Os resultados são mostrados nas figuras 3.17 e 3.18.



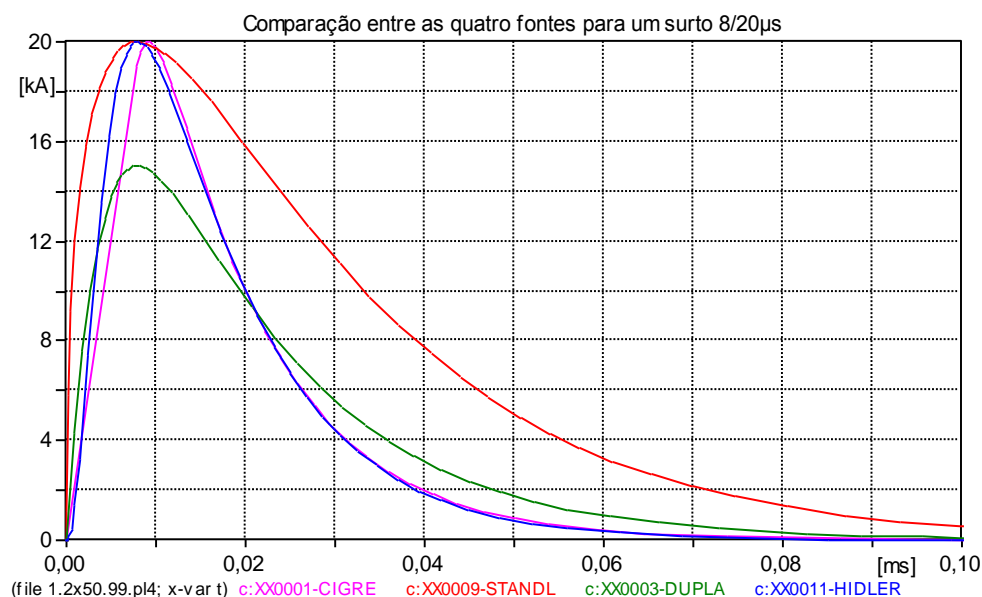
**Figura 3.17: Formas de onda de surtos de corrente ( $1,2/50\mu\text{s}$ ).**

A curva em rosa é da fonte Cigré, a curva em vermelho da fonte Standler, a curva verde da Dupla exponencial e a curva azul da fonte Hidler, as curvas das fontes Cigré, Dupla exponencial e Hidler, são superpostas para esse tipo de surto, sendo visíveis apenas a curva em azul do tipo Hidler, e em vermelho, do tipo Standler.

Na figura 3.17, todas as curvas apresentam um valor de pico muito próximo, a curva Cigré tem um tempo de pico maior que  $1,2\mu\text{s}$ , e a curva Standler tem um tempo de cauda de  $40\mu\text{s}$ , menor do que o estipulado.

Para esse surto, as curvas Dupla exponencial e Hidler são muito próximas e podem ser consideradas adequadas para simulação da descarga.

A figura 3.18 mostra as curvas para um surto da forma  $8/20\mu\text{s}$ .



**Figura 3.18: Formas de onda de surtos de corrente ( $8/20\mu\text{s}$ ).**

O valor de pico só não é respeitado para a fonte Dupla exponencial, já as demais fontes alcançam o valor de 20kA. O tempo de pico para as curvas Hidler e Standler é de  $8\mu\text{s}$ , para a curva Cigré é um pouco maior. O tempo de cauda para a curva Standler é maior que  $20\mu\text{s}$ .

A não ser para surtos cuja relação entre o tempo de cauda e tempo de pico é menor que três, para os quais a fonte Dupla exponencial não é adequada, é possível utilizar-se qualquer uma das fontes. Como os resultados apresentam o mesmo valor de pico, não sendo encontradas diferenças apreciáveis nos valores de sobretensão causados pela descarga.

Até que as curvas alcancem o valor de pico elas apresentam diferenças entre si. Esse intervalo da curva define a quantidade de energia a ser absorvida pelos para-raios. Logo há uma diferença de energia para os tipos de fonte, mas como a descarga atmosférica se trata de um fenômeno da natureza, não há previsão para o seu valor.

Sendo assim, as vantagens existentes entre as fontes são apenas para a inserção dos parâmetros, e para as condições de sua aplicação, visto que para algumas formas de onda não é recomendável o uso da fonte Dupla exponencial.

A fonte Heidler possui as vantagens de obter parâmetros de uma forma mais simples, de não ter restrições quanto ao tipo de forma de onda e de ser capaz de representar adequadamente o surto, logo, esse é a fonte escolhida.

### **3.6 – COMPARAÇÃO DOS TIPOS DE RAMOS EXISTENTES**

A primeira decisão para a modelagem dos para-raios é a escolha de qual o tipo de ramo a se utilizar. Existem três que já foram apresentados nesse trabalho. Os tipos 92, 99 e MOV.

No ramo 99, a curva característica do para-raios é traduzida em um conjunto de segmentos lineares. Possui um método de solução com uma probabilidade de divergência baixa, com algumas restrições quanto ao seu uso. Deve haver um número mínimo de pontos da característica não linear além de um baixo intervalo de tempo para que as aproximações se tornem pequenas, e o erro fique admissível.

Já o ramo 92 possui outro método de solução, oneroso para o computador. Porém a curva do para-raios também é representada por um conjunto de segmentos lineares. E os resultados para essas duas simulações, respeitando os critérios para o uso do modelo pseudo não linear, são praticamente os mesmos.

O MOV, que possui uma curva característica formada por um conjunto de segmentos não lineares, apresenta uma alternativa com uma alta probabilidade de divergência. Deve haver uma escolha criteriosa da característica do para-raios. Pode ser utilizado um número pequeno de pontos da curva, em função dos valores que dela serão utilizados na simulação. Alguns desses pontos podem fazer com que o simulador se perca nos cálculos e não encontre a solução.



A proposta desse trabalho é utilizar o modelo pseudo não linear, seguindo suas premissas de utilização, pois é um método de solução eficaz com resultados eficientes. É a melhor opção quando se trata de facilidade de operação e alta probabilidade de convergência.

Realizou-se uma simulação a fim de comparar os três ramos para confirmar tais características. Os dados de tal simulação são apresentados a seguir.

O para-raios a ser simulado será de 132 kV. Com uma característica não linear descrita pela tabela 3.7.

*Tabela 3.7: Valores da curva  $V \times I$  do para-raios*

Tensão (V)	Corrente (A)
114000	0,001
132000	0,002
242600	100
267500	1000
311000	10000
342100	20000
376300	40000
391900	50000

A linha de transmissão será modelada de acordo com o modelo distribuído e linhas transpostas, com um comprimento de 10 km, e com os parâmetros de:  $R' = 0,05 \, \Omega/\text{km}$ ;  $L' = 1,0 \, \text{mH}/\text{km}$  e  $C' = 11,11 \, \text{nF}/\text{km}$ . A simulação terá um tempo de integração de 1,75 ns, e um tempo máximo de 200  $\mu\text{s}$ . A partir desses valores pode-se chegar a uma impedância característica de  $300 \, \Omega$ .

Os surtos aplicados serão de 1,2/50 $\mu\text{s}$  e 8/20 $\mu\text{s}$ . As figuras 3.19, 3.20 e 3.21 representam os esquemas da simulação no ATP.

Os valores de tensão para a descarga da forma 8/20 $\mu\text{s}$  são mostrados na figura 3.22, nela as curvas de cada ramo são sobrepostas, sendo possível de se notar apenas algumas diferenças, a curva de corrente foi multiplicada por um fator de 20 para uma melhor visualização. A simulação do ramo tipo 99 é a mais rápida.

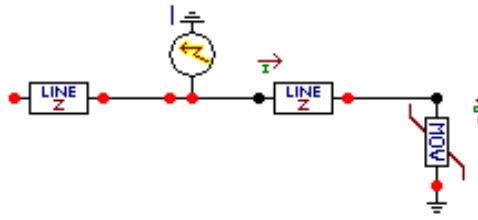


Figura 3.19: Circuito com modelo de para-raios tipo MOV.

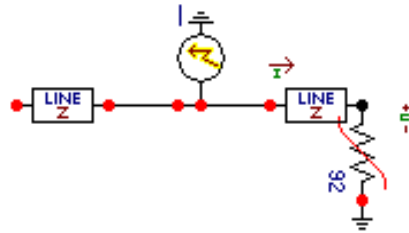


Figura 3.20 - Circuito com modelo de para-raios tipo 92 verdadeiro não linear.

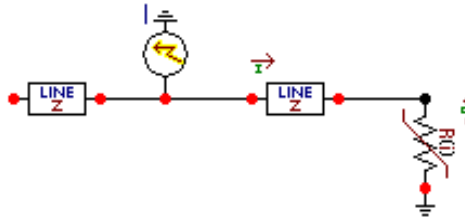


Figura 3.21: Circuito com modelo de para-raios tipo 99.

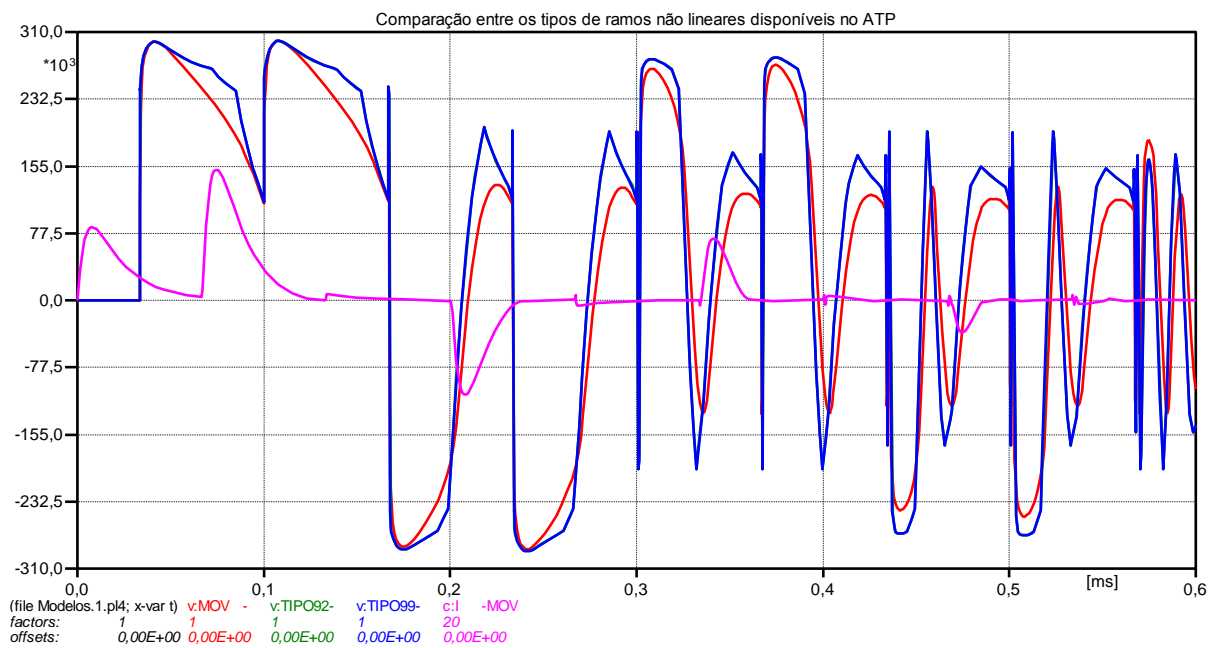
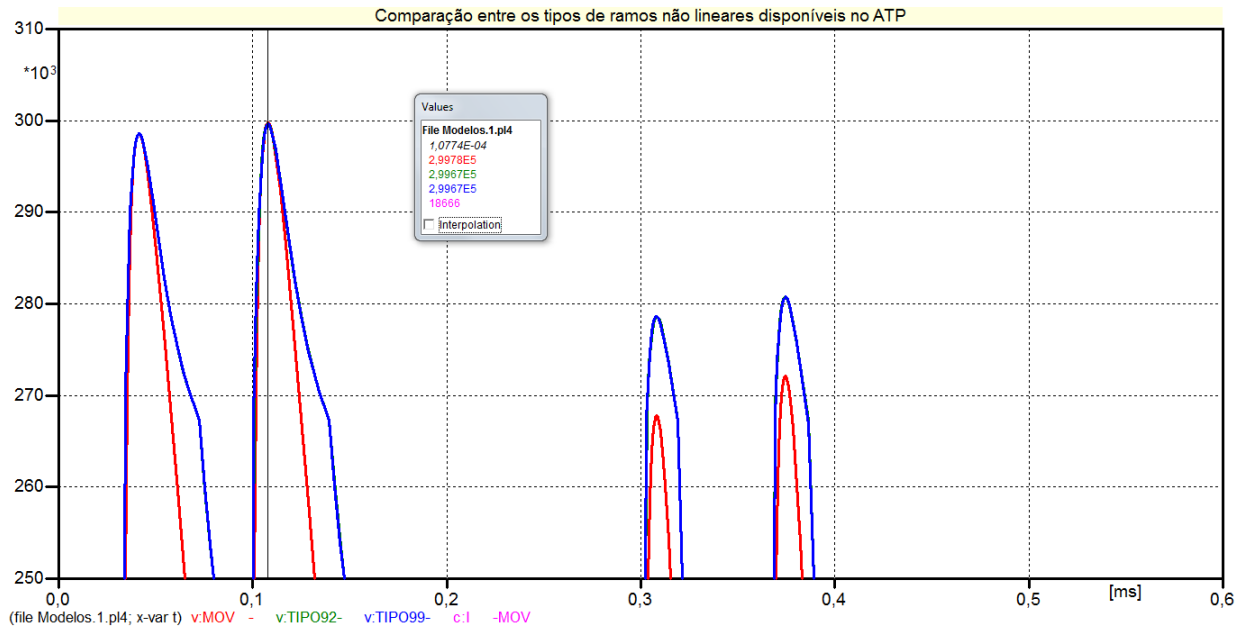


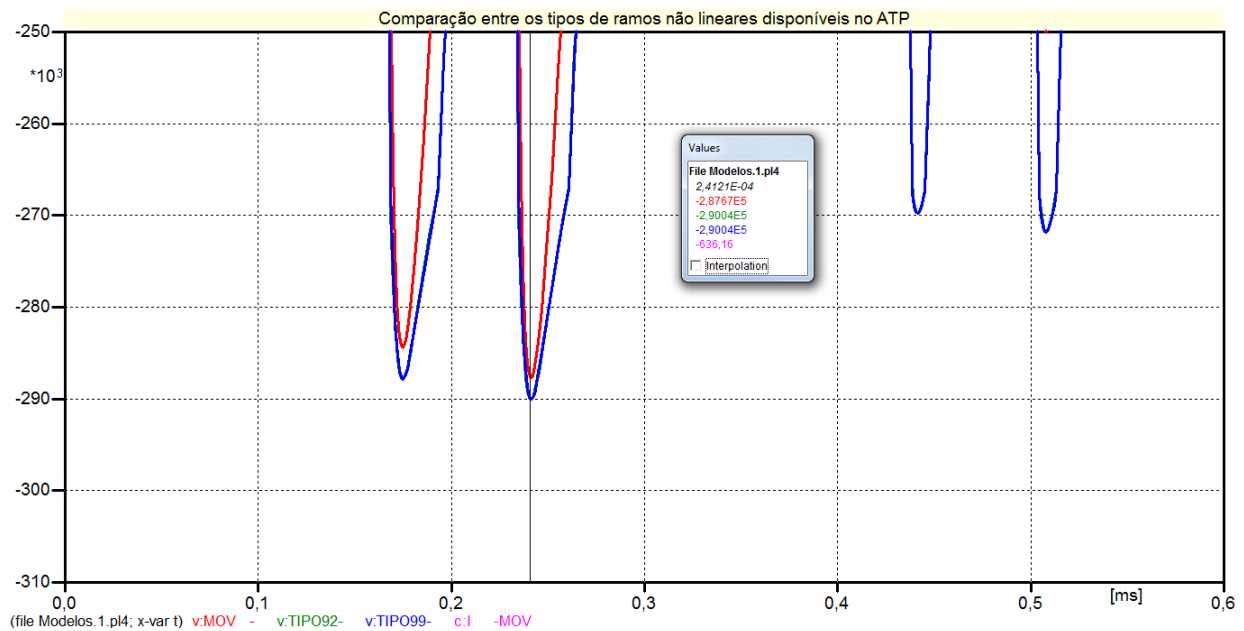
Figura 3.22: Resultados para uma descarga de 20kA da forma 8/20  $\mu$ s.

As curvas são muito próximas, e os picos de tensão são praticamente os mesmos. Nas figuras 3.23 e 3.24 o gráfico é ampliado, destacando os maiores valores de tensão é possível especificar e calcular as diferenças dos picos.



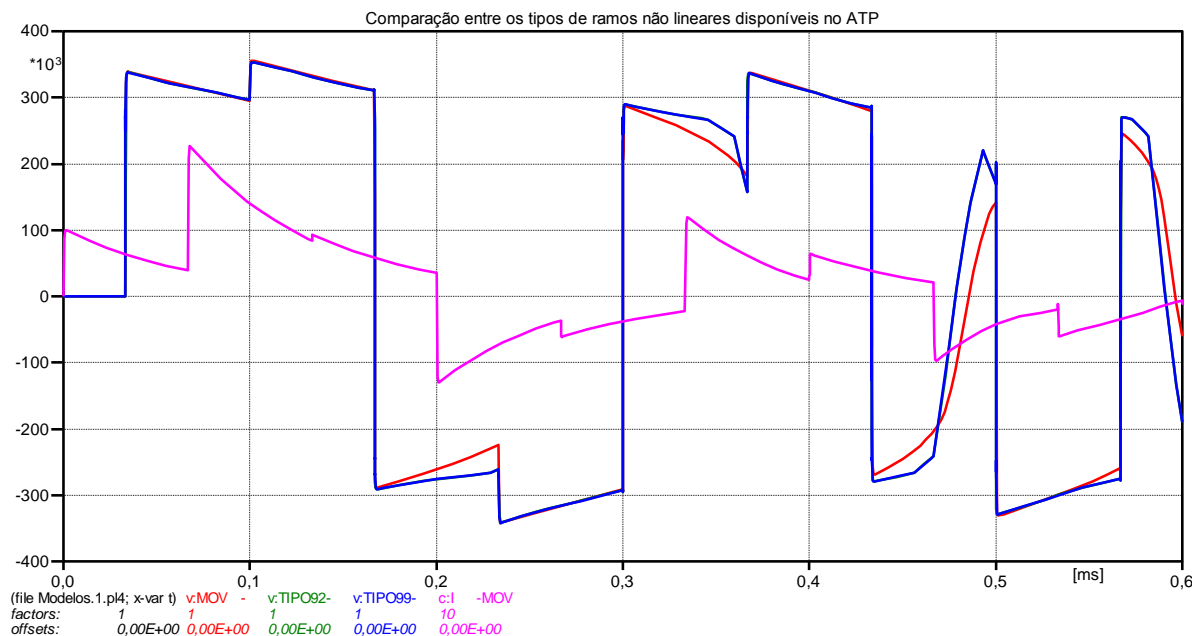
**Figura 3.23: Pico de tensão positiva para o surto do tipo 8/20 $\mu$ s.**

Apresenta uma diferença pequena para o pico positivo, de 2,200 kV e erro de 0,688%.



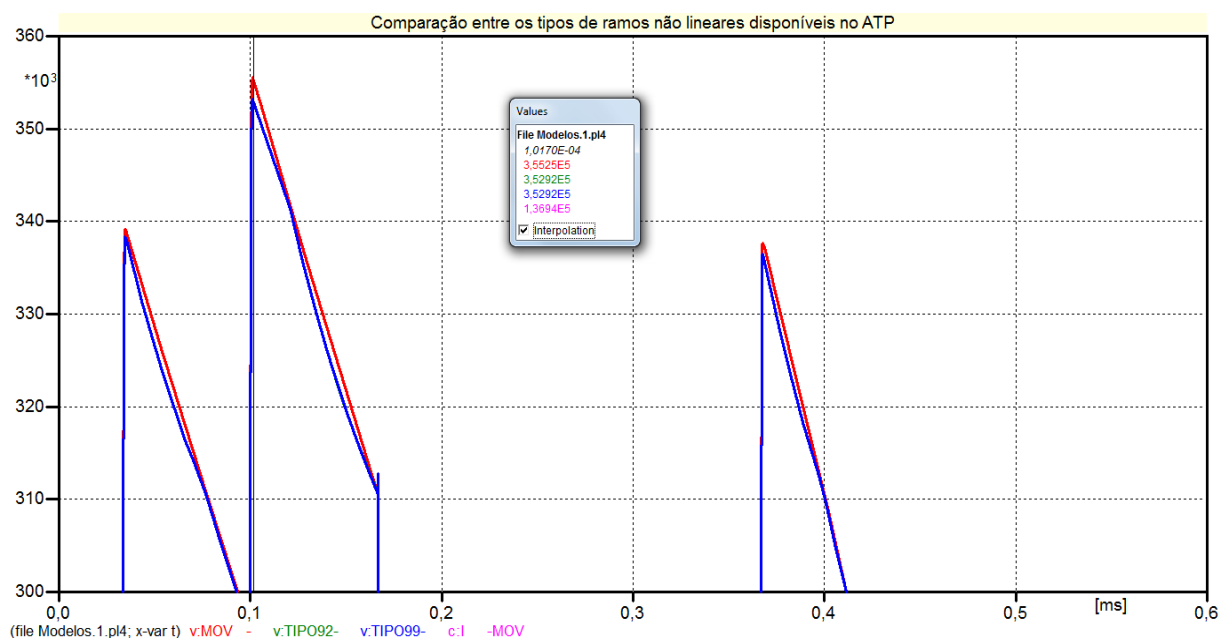
**Figura 3.24: Pico de tensão negativa para o surto do tipo 8/20 $\mu$ s.**

Para os picos negativos, as diferenças entre os ramos é de 10kV, resultando em um erro de 10%. Os próximos resultados são para a descarga da forma 1,2/50 $\mu$ s. Estes são mostrados na figura 3.25. A curva de corrente foi multiplicada por um fator de 10.

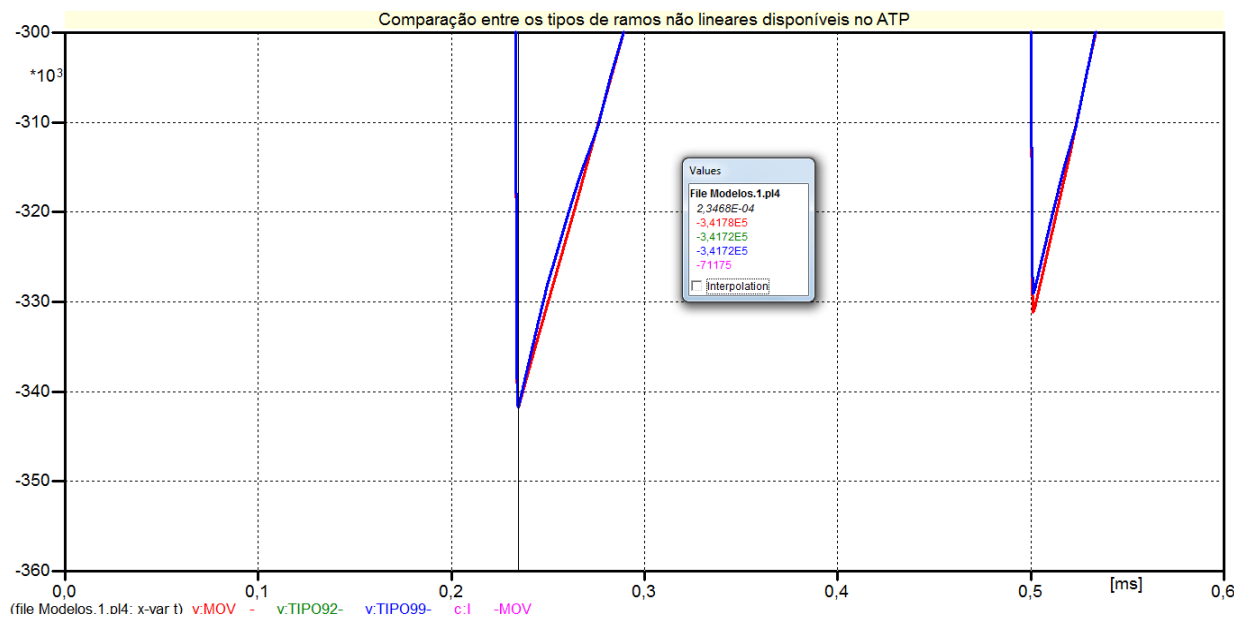


**Figura 3.25: Resultados para uma descarga de 20kA da forma 1,2/50 $\mu$ s.**

As curvas são muito próximas, e os picos de tensão são praticamente os mesmos. Ampliando-se o gráfico nas figuras 3.26 e 3.27, destacando os maiores valores de tensão é possível especificar e calcular as diferenças dos picos.



**Figura 3.26: Pico de tensão positiva do modelo convencional para o surto do tipo 1,2/50 $\mu$ s.**



**Figura 3.27:** Pico de tensão negativa do modelo convencional para o surto do tipo 1,2/50 $\mu$ s.

A diferença observada é de 0,200 kV entre os dois resultados, ou seja, 0,056% de erro.

Os resultados das simulações solidificam a escolha do tipo 99 para a simulação quando o objetivo é a alocação de para-raios e a verificação do nível adequado de proteção para sobretensões de um sistema, que resulta em uma simulação leve e com alta possibilidade de convergência.

### 3.7 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE REPRESENTAÇÃO DE PARA-RAIOS

Simulações podem definir qual o melhor tipo de modelagem. Existem quatro tipos possíveis, o modelo convencional, o modelo *IEEE*, o *Pinceti* e o *Férrandez*.

Os modelos serão comparados e avaliados, tendo como objetivo da modelagem reproduzir o comportamento descrito pelo fabricante. Para isso é necessário o uso de dados do fabricante de um para-raios. O equipamento escolhido é o para-raios da empresa Siemens, modelo 3EK7 300-4AH4.

Construído com material de óxido de zinco e material polimérico de revestimento. Seus dados constam na tabela 3.8 [22].

**Tabela 3.8: Siemens 3EK7 300-4AH4 – Dados para simulação**

Tensão Nominal (kV)	Corrente Nominal (kA)	Altura da coluna (mm)	Tensão nominal máxima (kV pico)			
			Corrente 8x20 $\mu$ s			Corrente 1,2x50 $\mu$ s 10kA
			5kA	10kA	20kA	
30	10	400	74,1	79,7	91,7	87,7

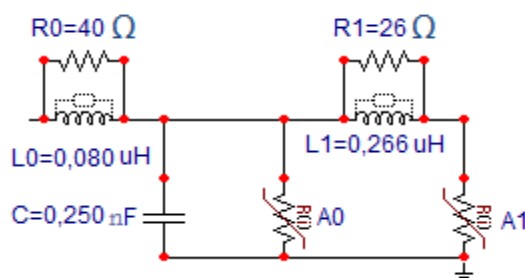
Fonte: referência 22

Nesse momento é possível elaborar-se os modelos de simulação, fazendo uso da teoria que já foi descrita nesse trabalho.

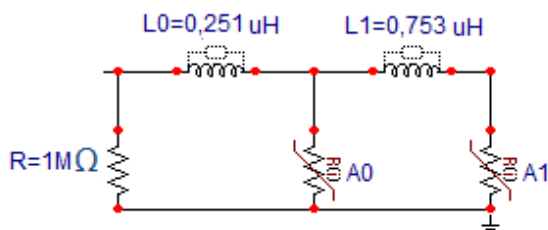
As figuras 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31 representam os modelos já com os valores de cada componente segundo os dados do fabricante.



**Figura 3.28: Representação do modelo Convencional.**



**Figura 3.29: Representação do modelo IEEE.**



**Figura 3.30: Representação do modelo Pinceti.**

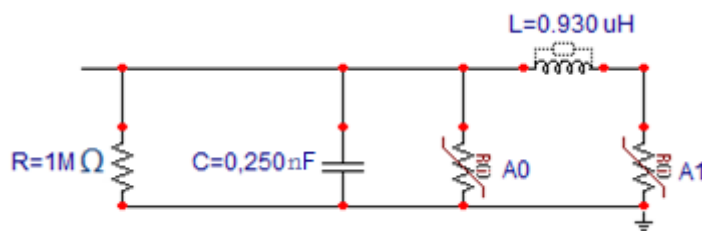


Figura 3.31: Representação do modelo Fernández.

Os gráficos das simulações, que representam os valores das tensões residuais para cada modelo, são apresentados nas figuras 3.32 e 3.33.

O primeiro surto experimentado foi o da forma 8/20 $\mu$ s, com uma amplitude de 10kA. Esse é o surto padrão para o para-raios. A figura 3.32 mostra a forma de onda de corrente para o surto, aumentada em 7 vezes, representada pela curva de cor marrom. Também são mostradas as tensões residuais para os quatro modelos. Em vermelho é representada a curva de tensão para o modelo convencional, em verde o modelo *IEEE*, em azul o modelo *Pinceti*, e em rosa o modelo *Fernandez*.

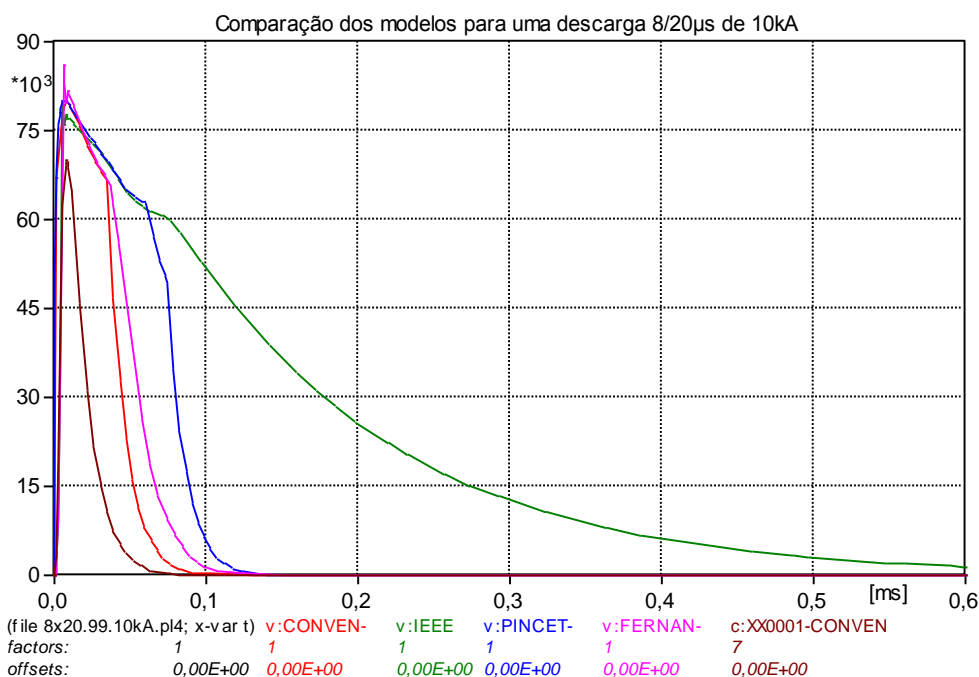
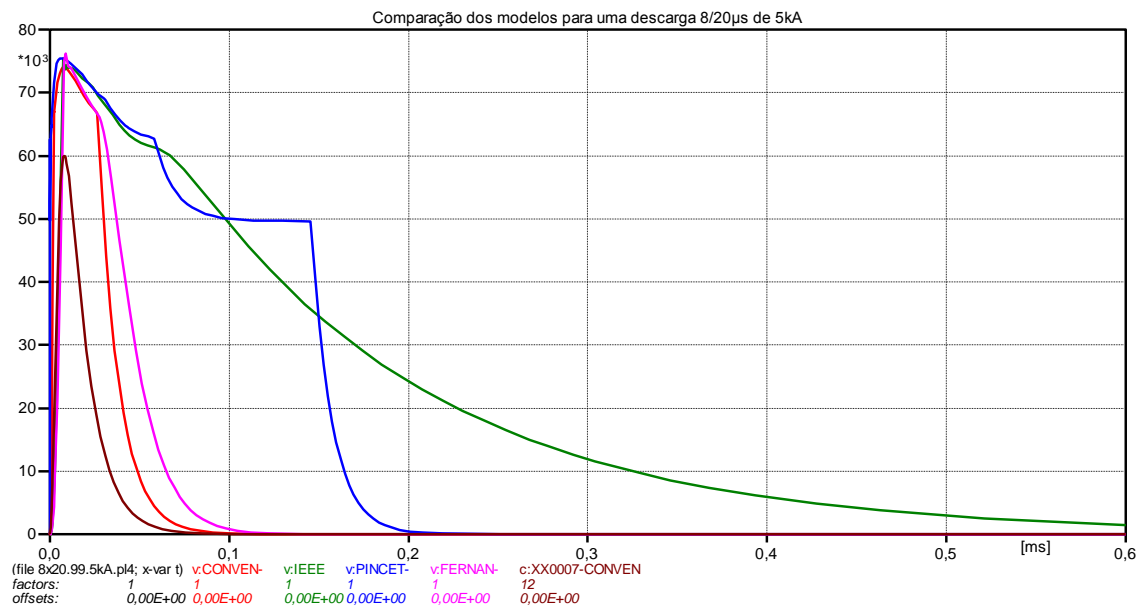


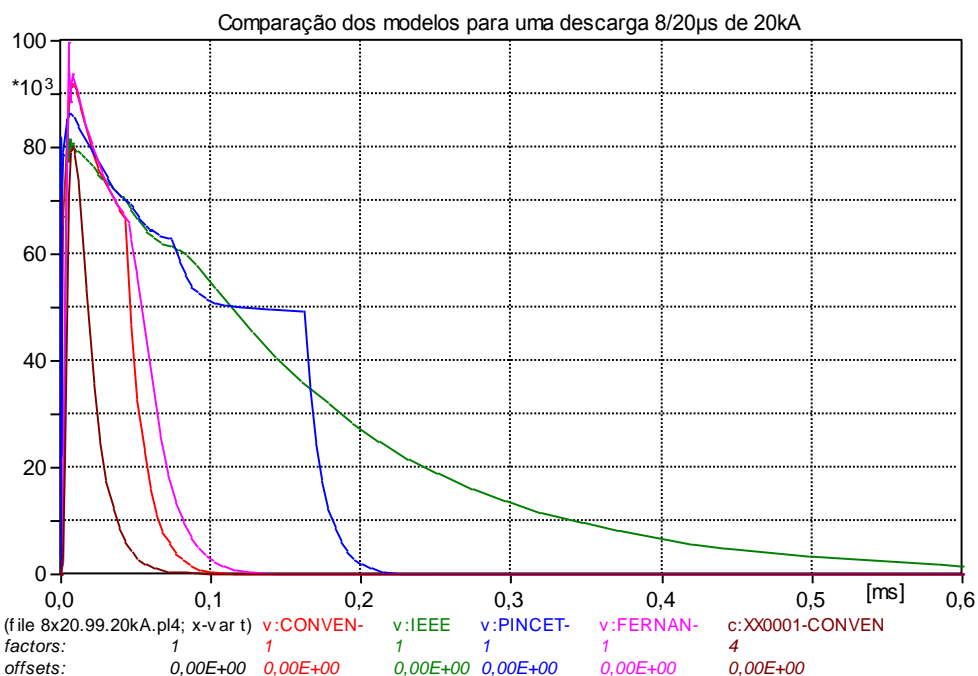
Figura 3.32: Tensão residual dos modelos para uma descarga de 10kA da forma 8/20  $\mu$ s.

O surto seguinte também é da forma 8/20 $\mu$ s, e com uma corrente de 5kA. O gráfico da figura 3.33 mostra a forma de onda de corrente para o surto, aumentada em 12 vezes.



**Figura 3.33:** Tensão residual dos modelos variáveis com a frequência para uma descarga de 5kA da forma 8/20 µs.

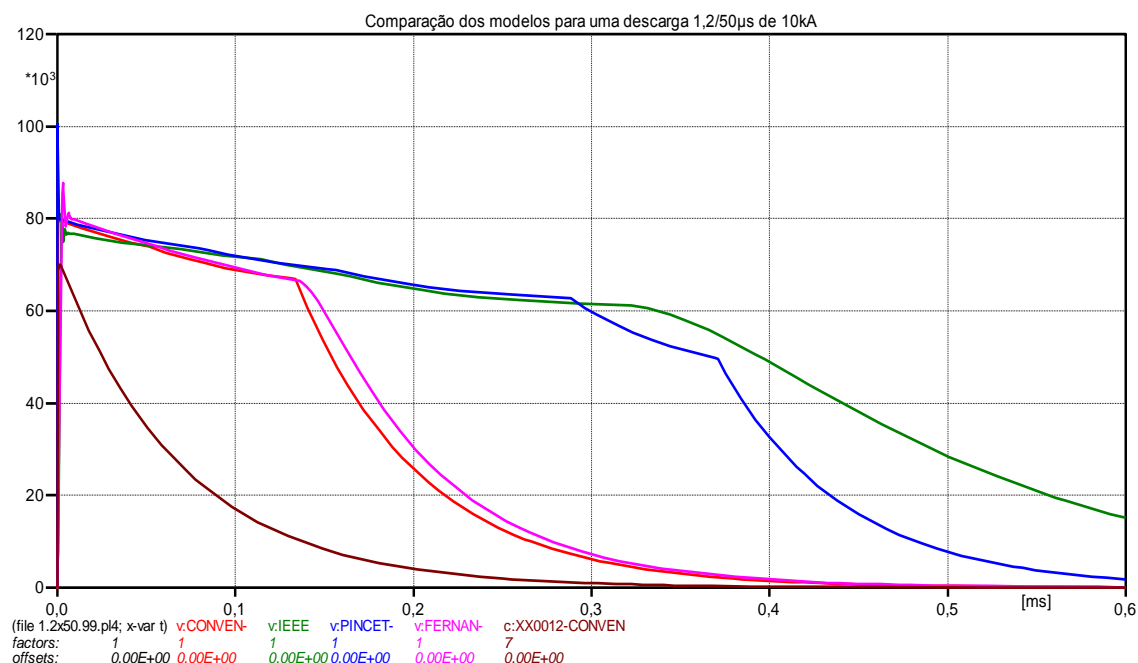
Todas as formas de ondas da tensão residual apresentaram picos de tensão próximos. Utilizando o mesmo surto, com a mesma forma, mas com uma amplitude de 20kA. A corrente será aumentada de 4 vezes para uma melhor visualização na figura 3.34.



**Figura 3.34:** Tensão residual dos modelos variáveis com a frequência para uma descarga de 20kA da forma 8/20 µs.



E por último a descarga de frente rápida, de  $1,2/50\mu\text{s}$ , e com uma corrente de 10kA. A forma de corrente é aumentada em 7 vezes na figura 3.35.



**Figura 3.35:** Tensão residual dos modelos variáveis com a frequência para uma descarga de 10kA da forma  $1,2/50\mu\text{s}$ .

Em resumo, os valores de erro podem ser analisados na tabela 3.9, tendo-se como referência os valores do fabricante.

**Tabela 3.9:** Resultados da simulação

Modelo	8x20µs-5kA		8x20µs-10kA		8x20µs-20kA		1,2x50µs-10kA	
	Tensão(kV)	Erro(%)	Tensão(kV)	Erro(%)	Tensão(kV)	Erro(%)	Tensão(kV)	Erro(%)
Convencional	74,100	0,00	79,700	0,00	91,700	0,00	79,700	-10,037
IEEE	75,383	1,702	79,757	0,071	85,201	-7,627	81,028	-8,234
Pinceti	75,464	1,807	80,058	0,447	86,202	-6,378	100,35	12,606
Fernandez	76,253	2,823	86,164	7,502	99,494	7,834	87,716	0,018

O maior erro encontrado foi de 12,606%, para uma descarga de 10kA da forma  $1,2/50\mu\text{s}$ , do modelo *Pinceti*. E o menor foi de 0,018% para a mesma descarga, para o modelo *Fernandez*, desconsiderando-se os erros nulos para o modelo convencional quando submetido aos surtos da forma  $8/20\mu\text{s}$ .

Ou seja, o modelo *Fernandez* fornece os melhores com a frequência no estudo de caso. Pois, em sua concepção, todo modelo variável necessita de dois ramos resistivos não lineares, o que aumenta o esforço computacional de uma simulação.

Esse trabalho propõe a utilização do modelo convencional para representação de para-raios, mas com uma curva característica própria para surtos de frente rápida, que apresentam valores de tensão superiores quando submetidos a tais surtos. Esses dados não são disponibilizados pelos fabricantes, mas podem ser obtidos através do uso de um modelo variável com a frequência, como é apresentado na sequência do trabalho.

### **3.8 – A OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PARA-RAIOS PARA SURTOS RÁPIDOS A PARTIR DO MODELO FERNÁNDEZ**

Através do uso do modelo *Férnandez*, pode-se obter os valores da curva que define o comportamento do para-raios, e inserir tais valores no modelo convencional a fim de obter um modelo capaz de oferecer respostas para surtos rápidos.

Tendo-se o modelo *Férnandez* completo, com todos os parâmetros definidos, deve-se proceder submetendo-o a surtos da forma  $1,2/50\mu s$ , que é o tipo de descarga rápida contemplada no estudo, com diversos valores de corrente. Para cada nível de tensão nominal dos para-raios deve-se repetir esse procedimento. A tabela 3.10 mostra os valores de tensão e corrente que resultam da simulação.

***Tabela 3.10: Valores da curva  $V \times I$  do para-raios***

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>
56554	125
60599	500
71879	1500
76357	3000
80833	5000
87678	10000
93471	15000
99264	20000
104270	25000

É interessante ressaltar que o para-raios obtido desse procedimento pode ser usado apenas para uma forma de surto, no caso de  $1,2/50\mu s$ .

### 3.9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao fim desse capítulo pode-se concluir que os ramos resistivos existentes no *software* ATP apresentam diferenças tanto na forma de cálculo de solução, como na formação da curva característica do para-raios.

O ramo pseudo não linear é aquele que apresenta, para esse trabalho, uma solução com baixo esforço computacional e com baixa possibilidade de divergência, sendo que é necessário seguir-se apenas algumas premissas para que o erro intrínseco de cada integração seja pequeno a fim de tornar os resultados finais aceitáveis.

O ramo do tipo MOV, já apresenta uma solução para o trabalho com uma probabilidade de divergência alta, deve-se ter um grande cuidado na escolha dos parâmetros que definem a curva característica. Já os resultados finais desse modelo são aceitáveis para diversos tipos de estudo.

O ramo do tipo 92 “4444” também é do tipo verdadeiro não linear assim como o MOV, a diferença entre os dois é a formação da curva características, no MOV ela é formada por segmentos exponenciais, e no tipo “4444” é formada por segmentos lineares.

Nesse trabalho a opção escolhida foi de utilizar o ramo pseudo não linear para a representação, já que esse tipo de ramo oferece um esforço computacional e uma possibilidade de não convergência, menores que dos outros. Enquanto que, para o desenvolvimento do trabalho, os outros dois modelos não apresentam vantagens maiores.

A forma de onda de um impulso atmosférico possui parâmetros que a definem, como formas padrões para os surtos exponenciais de tensão e corrente, os tempos de frente e de onda e de cauda são definidos em norma. Existem além

dos padrões outras formas de onda que na verdade são tentativas de representar os diversos fenômenos que ocorrem no sistema elétrico.

Entre os quatro tipos de fontes de surto existentes no *software* ATP, a fonte escolhida para o estudo de caso é a fonte do tipo Heidler. Todas as fontes apresentam resultados satisfatórios para representação de um surto, apresentando apenas pequenas diferenças entre as ondas. Isso leva a uma diferença da quantidade de energia absorvida pelo para-raios.

Pelo fato da descarga atmosférica se tratar de um fenômeno da natureza, não é possível atribuir certeza de seus valores, ou seja, os valores da corrente, de energia e potência e de forma de onda. Pode-se, no entanto, atribuir valores mais severos para cada parâmetro. Visto isso, não há vantagem entre os tipos de fonte de surto quanto aos resultados oferecidos, mas sim quanto à forma de definição dos parâmetros.

A fonte do tipo Heidler se mostra como a mais simples de definição, e não apresenta restrições quanto ao tipo de forma de onda a ser utilizada, como é caso do tipo Dupla exponencial, que não representa adequadamente formas de onda em que o tempo de cauda é menor que três vezes o tempo de crista.

O modelo convencional é a representação de um para-raios através da utilização de um ramo resistivo não linear, que possui em sua característica uma curva característica de tensão *versus* corrente, que não é representada por uma reta. Ou seja, os valores de resistência são diferentes ao longo da curva.

Os modelos variáveis com a frequência se diferem na composição do modelo, mas todos apresentam dois ramos resistivos não lineares separados por uma reatância indutância. O valor da reatância é dependente da frequência, isso faz com que o equipamento tenha seu comportamento definido também pelo tempo da forma de onda do surto.

O primeiro modelo surgido que considerava o aumento de tensão em função da diminuição do tempo de frente de onda do surto foi o modelo do

“grupo *IEEE*”, a partir do qual surgiram outros modelos, dentre esses estão os modelos *Pinceti* e *Férrandez*.

Os três modelos são considerados pelos estudiosos do tema como os principais modelos para simulação digital de para-raios. A forma de implementação de cada um foi mostrada em artigos publicados por seus respectivos inventores.

O modelo que melhor representa o para-raios se submetido a um surto de frente de onda rápida é o modelo *Férrandez*, o modelo Convencional apresenta as mesmas tensões residuais para surtos rápidos ou padrões. Isso era esperado já que ele não possui em sua concepção a vantagem de representar o comportamento dinâmico do para-raios.

Para os surtos da forma padrão, os erros do modelo Convencional são nulos, pois os dados inseridos para a curva característica do para-raios são da forma  $8/20\mu s$ . Ou seja, o modelo Convencional se adequa para uma frequência, e responde adequadamente desde que os valores inseridos sejam os corretos para tal frequência e que exista um número mínimo pontos em sua curva característica.

A definição no trabalho é de se usar o modelo convencional, mas com valores para a curva característica referentes a surtos de frente de onda rápida. Tais dados foram obtidos utilizando-se o modelo *Férrandez* variável com a frequência. O modelo foi submetido a surtos de diferentes valores de corrente, e os resultados extraídos foram os valores de sobretensão. Com esses valores pode-se definir uma curva característica do para-raios e inseri-la no modelo convencional.

A justificativa dessa representação se baseia no próprio fato de que o modelo convencional não apresenta erros, já que os pontos que definem sua curva são os próprios pontos fornecidos pelo fabricante. Sendo suas respostas aceitáveis para surtos de apenas uma frequência.

Como os pontos da curva do para-raios para um surto rápido não são fornecidos, foi feito esse método para sua obtenção.

# **CAPÍTULO IV**

---

## **A UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES DIGITAIS COMO SOLUÇÃO PARA O ESTUDO DE POSICIONAMENTO DE PARA-RAIOS**

### **4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Para se verificar o correto funcionamento de um equipamento em um sistema é conveniente que se faça simulações do seu desempenho.

Dentre as opções de como proceder à simulação, a primeira é a utilização de um modelo reduzido, através da concepção de miniaturas. Essa solução é muito utilizada em estudos mecânicos de estruturas. Ela apresenta um limite no seu uso em função das dificuldades de obtenção dessas miniaturas

A segunda opção é a produção de um modelo equivalente, amplamente difundida dentro do meio elétrico para obtenção de estudos de sistemas e equipamentos. A equivalência elétrica também auxilia em estudos mecânicos através de analogia entre indutância, capacitância e resistência, com massa, suspensão e atrito respectivamente. Essa opção também é conhecida como simulação analógica.

A terceira opção na que esse trabalho faz referência, é a simulação digital, que surgiu com a finalidade de proporcionar um modelo de baixo custo e de grande eficiência. Tal eficiência depende de uma representação fiel dos equipamentos e dos sistemas. Isso compreende modelos capazes de reproduzir certos comportamentos durante diferentes situações e uma correta obtenção de parâmetros, e para isso não existem grandes barreiras.

O aumento da capacidade de memória e da velocidade de processamento dos computadores contribui para a ampliação do uso desse tipo de simulação. Mas existe também uma tendência em estudos envolvendo as simulações digitais e analógicas em conjunto. Isso que promove uma solução interessante e precisa para diversos estudos.

Tendo em vista tal propósito, este capítulo tem o objetivo de apresentar alguns procedimentos e técnicas adotadas para se fazer uma simulação computacional para alocação de para-raios de forma eficiente.

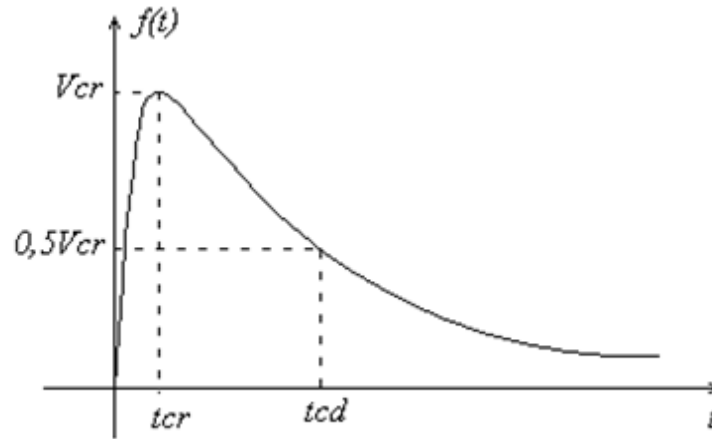
## 4.2 – AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Esses fenômenos sempre chamaram a atenção do homem, causando admiração tanto pela capacidade destrutiva quanto pelos efeitos luminosos, como na figura 4.1. As descargas atmosféricas são responsáveis por grande parte das interrupções do fornecimento de energia elétrica, normalmente após produzirem um curto-circuito no sistema. De forma mais rara, mas não menos trágica, provoca a morte de pessoas.



*Figura 4.1: Descarga atmosférica.*

As descargas atmosféricas são representadas no ATP por uma fonte de surto do tipo 15. Primeiramente deve ser definida a forma de onda do surto, para isso são necessárias algumas variáveis. A partir desses valores a onda pode ser desenhada em um gráfico em função do tempo, como pode ser visto na figura 4.2.



*Figura 4.2: Onda de surto.*

Onde  $V_{cr}$  é o valor de crista,  $t_{cr}$  é o tempo de crista e  $t_{cd}$  é o tempo de cauda.

Normalmente as descargas atmosféricas são dimensionadas com valores de corrente, ou seja, em kA. Portanto, para representá-la deve-se utilizar uma fonte de surto de corrente do tipo Hidler, visto suas vantagens perante as demais fontes, que já foram abrangidas nesse trabalho. A figura 4.3 representa essa fonte.



*Figura 4.3: Modelo de fonte de surto do tipo 15 Hidler.*

A forma de onda da descarga é do tipo 1,2/50 $\mu$ s, ou seja, uma onda com frente rápida, e uma amplitude de 20kA de crista.

Os valores serão  $A = 20000A$ ,  $T_f = 1,2\mu s$  e  $t = 69,535\mu s$ .



### 4.3 – AS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A quantidade de elementos da cadeia para representar uma linha no ATP depende do quanto a solução deve ser minuciosa e, dos fenômenos envolvidos no estudo. Em função da experiência prática deve-se utilizar usualmente um modelo a cada 15 ou 30 km de linha.

Verifica-se que representar todos os vãos entre os postes não é uma alternativa capaz de assegurar melhores resultados, visto que as semelhanças elétricas e geométricas entre os postes são grandes. E ainda traz um aumento no esforço computacional.

Ao se considerar a incerteza da magnitude da descarga, o modelo de parâmetros distribuídos de Bergeron é o mais apropriado para a representação da linha. Assim, o efeito da variação dos parâmetros da linha aérea com a frequência é desprezado e as sobretensões não são devidamente amortecidas.

O condutor usado nas linhas aéreas, adotados nesta figura, é de alumínio com aço redondo normal, TEMPERA H19, apresenta uma resistência de 0,0897  $\Omega/\text{km}$ .

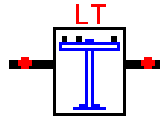
As demais características são mostradas na tabela 4.1.

**Tabela 4.1: Dados do condutor**

Características	Condutor	Parte de alumínio	Parte da Alma de aço
Seção (mm <sup>2</sup> )	347,33	321,84	52,49
Diâmetro (mm)	25,15	3,97	3,09
Massa (kg/km)	1297,60	887,30	410,30

Para que esse modelo possa ser representado no ATPDraw foi necessário criar-se um ícone da extensão “.SUP”, que carrega um outro arquivo da extensão “.LIB”, este descreve as funções exigidas para representação de uma linha de transmissão.

A figura 4.4 representa o modelo da linha aérea no ATPDraw.



*Figura 4.4: Modelo da Linha de transmissão.*

Esse modelo não possui dados de entrada, deve-se apenas definir o valor do comprimento da linha em km. Possui quatro terminais, uma entrada e uma saída trifásicas para o circuito 1 e uma entrada e uma saída trifásica para o circuito 2.

No estudo de caso, a linha de transmissão será subdividida, objetivando destacar os pontos de transição da linha com os cabos subterrâneos, como será visto no próximo capítulo.

Como o único valor para inserir no modelo é o comprimento de cada trecho, a tabela 4.2 apresenta esses dados para o sistema hipotético, base do estudo a ser desenvolvido no próximo capítulo.

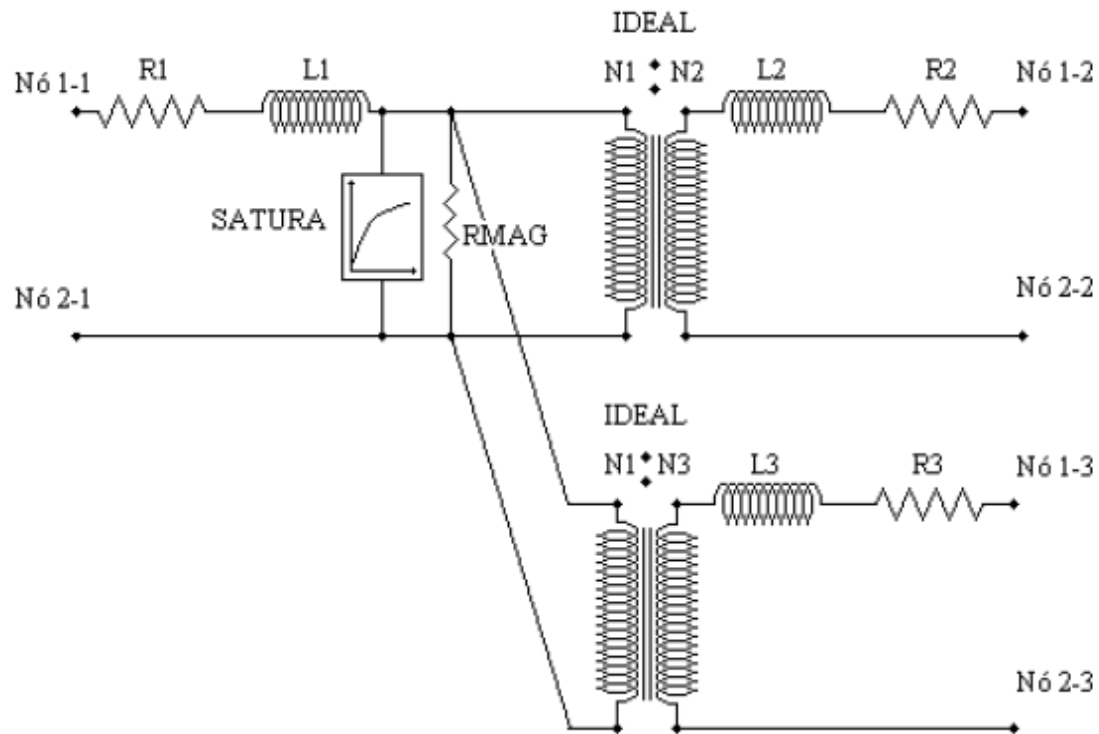
*Tabela 4.2: Comprimento dos vãos*

Trecho	Comprimento (m)
1 - 2	1199
2 - 3	1142
3 - 4	601
4 - 5	466
5 - 6	1076

## 4.4 – OS TRANSFORMADORES

Na representação de um transformador de potência no ATP é necessária a presença do ramo magnetizante com efeito de saturação, das perdas no núcleo, da relação de transformação entre enrolamentos, e das impedâncias de dispersão de cada enrolamento.

A figura 4.5 mostra uma possibilidade dessa representação.



*Figura 4.5: Circuito equivalente de um transformador de 3 enrolamentos.*

Para a obtenção de um transformador trifásico, três transformadores monofásicos podem ser conectados, respeitando as ligações de cada enrolamento.

Existem outras possibilidades para a modelagem. Uma delas só válida para as terminações de linha, é a solução do cálculo dos parâmetros de sequência positiva e zero incluindo as reatâncias do transformador e do gerador ou seu equivalente, transformando-as em componentes de fase. Outra opção é a representação por uma matriz de impedâncias, pela utilização do acoplamento magnético entre fases para representar a relação de transformação em enrolamentos.

Os transformadores trifásicos são representados a partir do uso da modelagem de transformadores saturáveis, baseada em um banco de transformadores monofásicos.

Como a geração adotada é do nível de 0,69kV e a transmissão usada nesse estudo é de 34,5kV, essa será a relação de transformação dos transformadores. Cada um será representado por três unidades monofásicas de 600kVA cada uma.

Os dados do transformador são mostrados na tabela 4.3.

**Tabela 4.3: Dados do Transformador**

Potência	1800kVA
Tensão	0,69/34,5kV
Impedância	5,75%
Perda Total	23,4kW
Isolamento	Primário – 36,2kV
	Secundário -1,2kV
Tensão de Impulso	170-30kV (Onda Plena)
	187-33kV (Onda Cortada)
Tensão Aplicada	70-10kV
Tensão Induzida	2xVn
Perda em vazio	3,4kW
Corrente de Excitação	1,8%

Deve-se fazer os cálculos para os parâmetros de cada unidade monofásica de 600kVA, conforme indicados a seguir:

Para o primário do transformador:

$$I_n = \frac{S_n}{V} = \frac{600}{0,69/\sqrt{3}} = 1506,131A \quad (4.1)$$

$$Z_{b1} = \frac{(0,69/\sqrt{3})^2}{0,600} = 0,2645\Omega \quad (4.2)$$

$$Z_1 = \frac{5,75}{100} \cdot 0,2645 \cdot \frac{1}{2} = 0,0076\Omega \quad (4.3)$$

$$\Delta P_{cc} = \Delta P_t - \Delta P_0 = 23,4 - 3,4 = 20kW \quad (4.4)$$

$$\Delta P_{cc}\% = \frac{20}{1800} \cdot 100 = 1,1111\% \quad (4.5)$$

$$R_1 = \frac{1,1111}{100} \cdot 0,2645 \cdot \frac{1}{2} = 0,0015\Omega \quad (4.6)$$

$$X_1 = \sqrt{0,0076^2 - 0,0015^2} = 0,0075\Omega \quad (4.7)$$

$$L_1 = \frac{0,0075}{0,377} = 0,0199mH \quad (4.8)$$

Para o secundário do transformador:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{34,5}{0,69/\sqrt{3}} = 86,6025 \quad (4.9)$$

$$L_2 = 0,0199 \cdot 86,6025^2 = 149,25mH \quad (4.10)$$

$$R_2 = 0,0015 \cdot 86,6025^2 = 11,25\Omega \quad (4.11)$$

Para o ramo de magnetização:

$$I_0 = \frac{1,8}{100} \cdot 1506,131 = 27,1104A \quad (4.12)$$

O valor de pico para a corrente de magnetização é então:

$$I_0 = \sqrt{2} \cdot 27,1104 = 38,3398A \quad (4.13)$$

$$\Lambda_0 = \frac{690}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 60} = 1,495wb \quad (4.14)$$

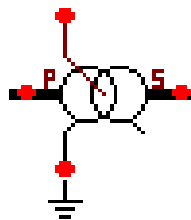
$$R_m = \frac{(690)^2}{3400} = 140,0294\Omega \quad (4.15)$$

$$I_{RM} = \frac{690}{\sqrt{3} \cdot 140,0294} = 2,845A \quad (4.16)$$

$$I_{XM} = \sqrt{I_0^2 - I_{RM}^2} = \sqrt{27,1104^2 - 2,845^2} = 26,9607A \quad (4.17)$$

$$I_{XM(crista)} = \sqrt{2} \cdot 26,9607 = 38,1282A \quad (4.18)$$

A figura 4.6 simboliza o ícone do modelo do transformador trifásico YΔ no ATPDraw.



**Figura 4.6: Circuito equivalente de um transformador de trifásico YΔ.**

## 4.4 – OS AEROGERADORES

Existem no ATP basicamente quatro tipos de aerogeradores que se diferem devido ao seu controle e desempenho. Já as turbinas eólicas são muito parecidas, todas possuem um controle lento de alinhamento de sua base com o vento e um controle do ângulo das pás.

Mas como os estudos desse trabalho não incluem os transitórios eletromecânicos, para os quais seria necessária uma modelagem completa das máquinas, pode-se representar os aerogeradores por fontes de tensão com uma impedância em série, já que os estudos são de transitórios eletromagnéticos, não é necessário também incluir os sistemas de controle dinâmico.

A representação dos aerogeradores para um estudo de descargas atmosféricas é mais simples. Este é obtido com o uso de uma fonte de tensão em série com a impedância síncrona da máquina. As condições de potências ativa e reativa geradas são definidas pela amplitude e pelo ângulo de fase da fonte de tensão.

Nesse estudo considera-se a produção de cada gerador de 1200 kW de potência ativa e 900 kVAR de potência reativa. Essa condição apresenta uma potência aparente de 1500kVA e fator de potência 0,80, com um carregamento de 83,33% para os transformadores.

Os geradores são de polos lisos com tensão nominal de 0,69kV, potência aparente de 2000kVA, impedância síncrona de 0,80pu, com um fator de potência de operação de 0,80.

Para definir o valor da impedância síncrona deve-se fazer alguns cálculos, apresentando a seguir.

$$Z_{base} = \frac{0,69^2}{2,0} = 0,2381\Omega \quad (4.19)$$

$$X_d = 0,80 \cdot 0,2381 = 0,19044\Omega \quad (4.20)$$

$$L_g = \frac{X_d}{0,377} = 0,5051mH \quad (4.21)$$

$$\tan \delta = \frac{P_G}{\left(Q_G + \frac{V^2}{X_d}\right)} = \frac{1,2}{\left(0,9 + \frac{0,69^2}{0,19044}\right)} = 0,3529 \quad (4.22)$$

$$\delta = \tan^{-1}(0,3529) = 19,4400^\circ \quad (4.23)$$

$$E_g = \frac{P.X_d}{V.\sin \delta} = \frac{1,2 . 0,19044}{0,69 . 0,3328} = 0,9951kV \quad (4.24)$$

$$E_{g/fase} = \frac{0,9951.\sqrt{2}}{\sqrt{3}} . 1000 = 812,5234V/fase \quad (4.25)$$

A figura 4.7 representa o circuito elétrico equivalente do aerogerador.

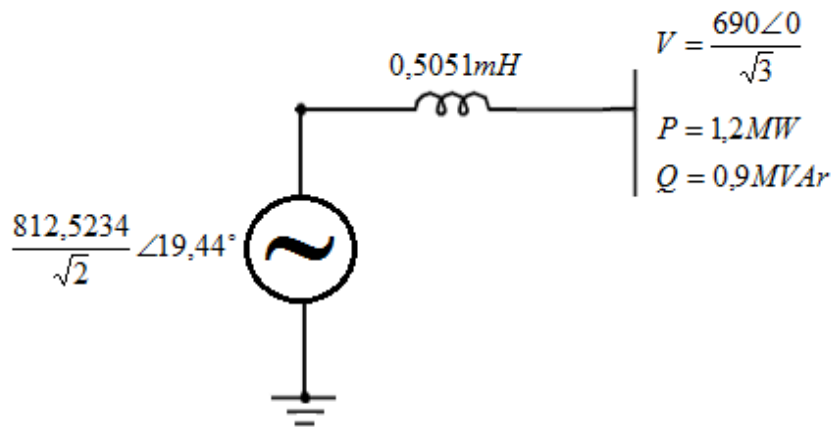


Figura 4.7: Circuito equivalente do aerogerador.

Como no sistema teste utilizado há um ramal de saída entre o aerogerador e o transformador com extensão de 45 metros, os valores desse cabo serão inseridos no modelo do aerogerador. Adotou-se para esse ramal um cabo trifásico 3x400 mm<sup>2</sup>, que possui uma resistência de 0,06Ω/km e uma reatância indutiva de 0,10Ω/km.

Como a capacitância do cabo de cobre 5x3x400mm<sup>2</sup> de baixa tensão não traz diferenças apreciáveis para os resultados do estudo ela será desprezada, sendo o cabo representado por um circuito RL. A estimativa para o comprimento do cabo é de 45m dada sua instalação.

Os valores de R e L são calculados em seguida.

$$R = 5.0,060 \cdot 0,045 = 0,54m\Omega \quad (4.26)$$

$$L = \frac{0,020}{0,377} \cdot 0,045 = 0,0024mH \quad (4.27)$$

Assim como a Linha de Transmissão, o gerador possui um ícone da extensão “.SUP”, que carrega um outro arquivo da extensão “.LIB”, capaz de descrever as funções exigidas para a sua representação.

A figura 4.8 representa o modelo do aerogerador no ATPDraw.



*Figura 4.8: Representação de um aerogerador no ATPDraw.*

Nesse modelo existem três fontes de tensão alternada do tipo 14, em que deve ser especificada a amplitude de pico de tensão e o ângulo de cada. Logo, essas serão as entradas desse modelo.

Na saída de cada fonte há uma indutância referente à indutância da máquina que foi definida, e em série com essa indutância há um ramo RL que representa o cabo do ramal de saída, cujos valores também foram definidos.

## **4.5 – A REDE SUBTERRÂNEA**

No sistema teste utilizado, os aerogeradores são interligados com a rede básica através de uma rede subterrânea de cabos. Todo essa composição é chamada de sistema coletor que interliga os secundários dos transformadores elevadores em nível médio de tensão, 34,5kV ou 13,8kV. Normalmente, o transformador da subestação coletora é munido de comutador de tapes, permitindo uma regulação da tensão do sistema. A figura 4.9 é um exemplo de um parque eólico, composto pelos aerogeradores, e o sistema coletor, os cabos



de média tensão, com seu dimensionamento e sua extensão, e o transformador com tapes [21].

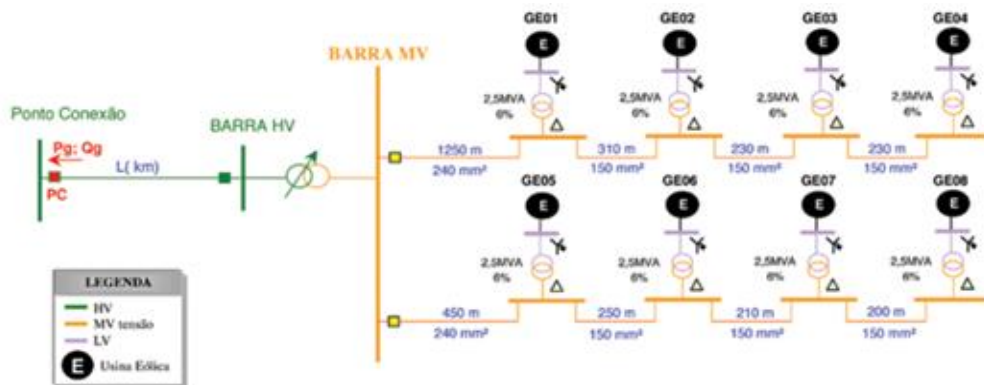


Figura 4.9: Configuração de sistema coletor e de conexão.

Os cabos de média tensão, que no caso base serão de uma linha de 34,5kV, podem ser representados por parâmetros concentrados, em que há uma cadeia de circuitos  $\pi$  ou por parâmetros distribuídos. A utilização do modelo  $\pi$  e não do modelo T se deve ao fato de que o primeiro apresenta uma equação a menos que o segundo, fazendo com que a simulação fique mais leve, já que é preciso solucionar um número menor de equações.

Os cabos empregados no estudo de caso são de alumínio, e serão modelados por um circuito  $\pi$ , de acordo com os dados do fabricante. A figura 4.10 representa o circuito equivalente dos cabos, e como os parâmetros R, L e C são inseridos.

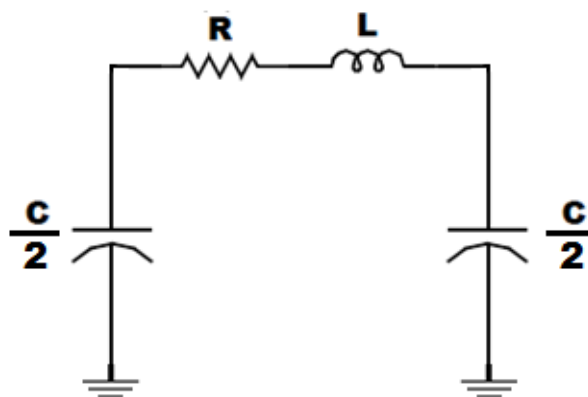


Figura 4.10: Circuito equivalente dos cabos de média tensão.

O nível básico de isolamento dos cabos subterrâneos de alumínio é 200kV. Suas características elétricas são descritas na tabela 4.4.

**Tabela 4.4: Dados dos cabos**

Seção (mm <sup>2</sup> )	R <sub>cc</sub> (20°C) Ω/km	R <sub>ca</sub> (90°C-60Hz) Ω/km	X <sub>l</sub> Ω/km	X <sub>c</sub> Ω.km	R <sub>0</sub> Ω/km	X <sub>0</sub> Ω/km	C μF/km	In A
95	0,320	0,411	0,1618	20670	1,5216	1,6446	0,1283	170
150	0,206	0,265	0,1506	15809	1,3656	1,6390	0,1678	216

Após cada transformador há um ramal de saída de cabos subterrâneos de 45 metros de extensão. Além desses pequenos trechos de cabo, existem outros trechos no caso base.

Os valores interessantes de se obter a partir das informações de cada trecho, seção e distância, e dos dados do fabricante do cabo, são a resistência, a indutância e a capacitância, todos mostrados na tabela 4.5.

**Tabela 4.5: Seção transversal dos condutores**

Trecho	Seção (mm <sup>2</sup> )	Distância (m)	R (Ω)	L (mH)	C/2 (μF)
3 - A1	95	295	0,1233	0,1266	0,0189
A1 - A2	95	280	0,1170	0,1202	0,0180
A2 - A3	95	298	0,1162	0,1193	0,0178
5 - A6	95	268	0,1120	0,1150	0,0172
A6 - A5	95	254	0,1062	0,1090	0,0163
A5 - A4	95	274	0,1145	0,1176	0,0176
5 - 7	150	303	0,0803	0,1210	0,0254
A7 - A8	95	285	0,1191	0,1223	0,0183
A8 - A9	95	286	0,1195	0,1227	0,0183
A9 - A10	95	273	0,1141	0,1172	0,0175
6 - A11	95	52	0,0217	0,0223	0,0033
A11 - A12	95	303	0,1267	0,1300	0,0194

Para obter-se o modelo dos cabos no ATPDraw também foi necessário criar um arquivo “.SUP” e um arquivo “.LIB”. O modelo representativo dos cabos é mostrado na figura 4.11.



*Figura 4.11: Representação dos cabos subterrâneos.*

Os dados de entrada são a resistência, a indutância e a capacitância do trecho de cabo, o modelo é baseado no circuito  $\pi$  equivalente.

#### **4.6 – SUBESTAÇÃO DE 34,5 kV (SE)**

A função da subestação nesse estudo é estabelecer a condição de carregamento dos aerogeradores. Para os demais objetivos do trabalho não há interferência nos resultados o tipo de modelo adotado para a subestação.

Portanto a modelagem será um uma fonte infinita de tensão trifásica. Tal modelo é obtido por meio do uso de uma impedância nula. Para essa fonte será adotada o ângulo de fase nulo para a fase A, a qual será a referência. O valor de onda de tensão imposto no modelo é de 28168,132 V e ângulo de fase 0°.

#### **4.7 – OS PARA-RAIOS**

Os para-raios a serem usados para a proteção contra sobretensão no caso base são do fabricante SIEMENS, do modelo de média tensão tipo 3EK7, em conformidade com a norma IEC 60099-4. As características desse modelo incluem o uso de varistores de óxido metálico revestido com capa vitrificada, revestido com invólucro de borracha de silicone, hastes em fibra de vidro e encaixes terminais em alumínio.

A corrente nominal é de 10kA, e a capacidade de absorção de energia é de 4,5 kJ/kV. Os valores nominais de tensão são de 36 e 42kV. Os valores de MCOV são respectivamente de 28,8 e 33,6kV [22].

Para que esses modelos possam ser implementados e utilizados no caso base deve-se obter a curva característica tensão *versus* corrente para surtos de frente rápida, como foi apresentado no capítulo anterior.

Os valores de tensão e corrente já foram definidos para o para-raios de 30kV. Deve-se agora definir os valores da curva para os para-raios de tensão 36 e 42kV. Como já foi dito, para se obter tais informações deve-se fazer uso de um modelo de para-raios Fernández. Foi escolhido como ramo resistivo não linear o tipo 99, pseudo não linear, devido às suas vantagens sobre os demais ramos.

Para que os valores das curvas obtidos sejam adequados, deve-se inserir dois pontos nas curvas de cada um dos ramos não lineares do modelo Fernández, correspondentes a valores baixos de corrente. É necessário fazer isso ao se utilizar o resistor pseudo não linear, devido ao fato de que a curva é composta de segmentos lineares, e, sem esses pontos para valores de corrente da ordem de 125 e 500 ampéres, a característica fica prejudicada, pois o início da curva não representa adequadamente o modelo, sendo que essa parte da curva define a capacidade de absorção de energia.

Sendo assim, deve-se prosseguir para encontrar as duas tabelas que definem as características dos para-raios de 36 e 42kV. Após os dois modelos serem concebidos, são feitas as simulações para se definir os valores das curvas dos para-raios convencionais.



*Figura 4.12: Representação do para-raios.*

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os valores de tensão e corrente, para os para-raios de 36 e 42kV. A figura 4.12 identifica o ícone obtido por um arquivo da extensão “.SUP”, que representa o modelo do para-raios no ATPDraw, que

carrega um arquivo de extensão “.LIB”, com a característica da curva não linear do equipamento.

**Tabela 4.6: Valores da curva  $V \times I$  do para-raios de 36kV**

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>
67919	125
72799	500
86048	1500
91408	3000
96766	5000
104960	10000
111900	15000
118830	20000
124820	25000

**Tabela 4.7: Valores da curva  $V \times I$  do para-raios de 42kV**

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>
79348	125
85099	500
100870	1500
107150	3000
113440	5000
123040	10000
131170	15000
139300	20000
146320	25000

## **4.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Todos os modelos dos equipamentos constituintes do sistema foram abordados, e seus parâmetros definidos. Alguns equipamentos necessitam que seja elaborado um arquivo representado por um ícone, a fim de mostrar adequadamente seu funcionamento.

A descarga atmosférica deve ser representada por uma fonte de surto tipo 15 Hidler, devido às suas vantagens quanto à parametrização do surto, se comparada às demais fontes. Os Transformadores são representados pelo modelo de transformador trifásico saturável com dois enrolamentos, existente no ATPDraw, que não é uma rotina de suporte, devendo ser usado em simulações de sistemas reais, sendo preenchido com as variáveis do transformador.

Não há um modelo pré-estabelecido no ATPDraw para a linha de transmissão, foi elaborado um que possui todas as características necessárias. O modelo do aerogerador, também desenvolvido no trabalho, são utilizadas fontes senoidais do tipo 14, com uma reatância indutiva em série, lembrando que o ramal de saída, o cabo de cobre, é inserido nesse modelo.

Assim também foi com os cabos subterrâneos, que seguem o modelo  $\pi$ , em que há um ramo linear entre dois capacitores. Essa modelagem é preferencial à modelagem T em função de apresentar um número menor de pontos, resultando em um número menor de equações a serem resolvidas.

A subestação é representada por uma barra infinita, de tensão e frequência constantes, a qual todo o sistema eólico é interligado. Isso é feito pelo uso de uma fonte alternada com uma impedância nula em série.

A modelagem do para-raios, cujo ícone representa um ramo pseudo não linear tipo 99, é a de maior importância no trabalho. Os pontos que compõem a sua curva característica não linear são obtidos pelo uso de um para-raios do tipo Fernández. O comportamento do para-raios é descrito por um arquivo “.LIB” carregado na simulação através do ícone. Para-raios de diferentes classes de tensão possuem uma curva diferente.

Com o uso de diferentes para-raios é possível obter uma proteção adequada ao sistema, observando o nível de proteção para sobretensões e a capacidade de absorção de energia.

# **CAPÍTULO V**

---

## **ANÁLISE DA ALOCAÇÃO DE PARA-RAIOS NA CONEXÃO DE UM PARQUE EÓLICO À REDE BÁSICA**

### **5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Esse capítulo é dedicado a um estudo de caso de um parque eólico em que sua rede subterrânea é ligada a uma rede aérea. Será observado o comportamento da proteção para um surto de frente de onda rápida, da forma  $1,2/50\mu\text{s}$  e de 20kA de intensidade, por se tratar de um fenômeno capaz de fornecer ao sistema as condições mais desfavoráveis de sobretensões.

Como os fabricantes apresentam vários pontos da curva característica do equipamento para o surto  $8/20\mu\text{s}$ , e apenas um ponto para o surto rápido, é possível implementar um modelo variável com a frequência e dele retirar a característica necessária, que são os pontos da curva para serem inseridos na características do modelo final.

O ramo utilizado será o pseudo não linear, já que possui respostas adequadas ao estudo respeitando-se algumas premissas que já foram ditas.

O posicionamento dos para-raios será feito por etapas, efetuando-se simulações e observando os valores de sobretensão nos pontos de interligação e nos pontos dos conjuntos gerador e transformador. Sempre que surgir um ponto no sistema em que as sobretensões ultrapassem o limite de isolamento dos equipamentos será posicionado um para-raios no local.

## **5.2 – A DESCRIÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO PARA O CASO BASE**

O sistema eólico em estudo é composto de doze aerogeradores distribuídos ao longo de três ramais subterrâneos. Cada aerogerador é ligado a um transformador elevador de tensão por meio de cabos de cobre com seção transversal de 400mm<sup>2</sup> para os cabos fases e de 120mm<sup>2</sup> para o cabo de neutro.

Ramais subterrâneos em média tensão fazem a interligação dos transformadores com a rede aérea, que por sua vez é ligada a uma subestação que representa a barra de referência.

Os aerogeradores são idênticos, tendo cada um a capacidade de gerar uma potência de 2 MVA, à tensão de 690V, com um fator de potência de 0,8. A reatância de cada máquina é de 0,80 pu.

Os transformadores de potência também são idênticos, todos trifásicos com uma potência de 1800kVA. Sua função é de elevar a tensão do nível de 0,69kV para a tensão de 34,5kV. As perdas em vazio de cada um são de 3,4kW. O nível de isolamento do Transformador é 170 kV.

Os cabos da rede subterrânea são cabos trifásicos fabricados em material de alumínio e com uma seção transversal de 95mm<sup>2</sup>. O material de isolamento utilizado é o XLPE, a tensão de isolamento do mesmo é 20/35kV. Há um pequeno trecho desse cabo que liga o transformador a um dos três ramais da rede aérea. O nível de isolamento dos cabos subterrâneos é 200 kV

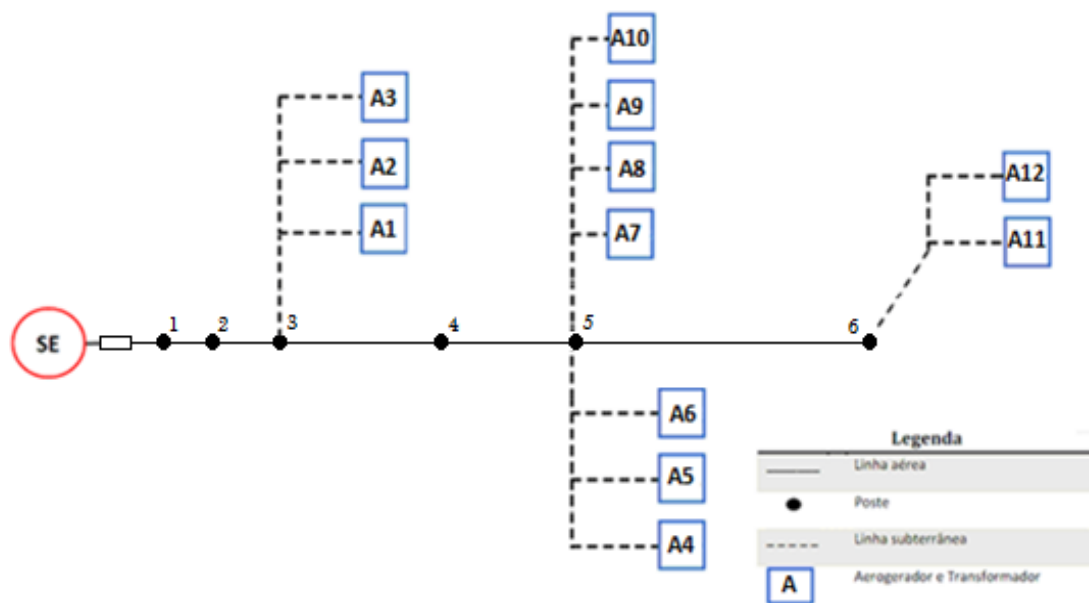


A linha aérea pode ser representada por parâmetros concentrados, sendo dividida apenas para apresentar os pontos de interligação com os ramais subterrâneos.

A subestação SE é importante para definir a condição de carregamento dos geradores, sendo por isso escolhida como barra de referência, com ângulo de fase nulo para a fase A. É representada por uma fonte de tensão trifásica infinita, com uma impedância nula. Sua tensão é de 34,5kV, não necessitando então de um transformador entre a linha e a mesma.

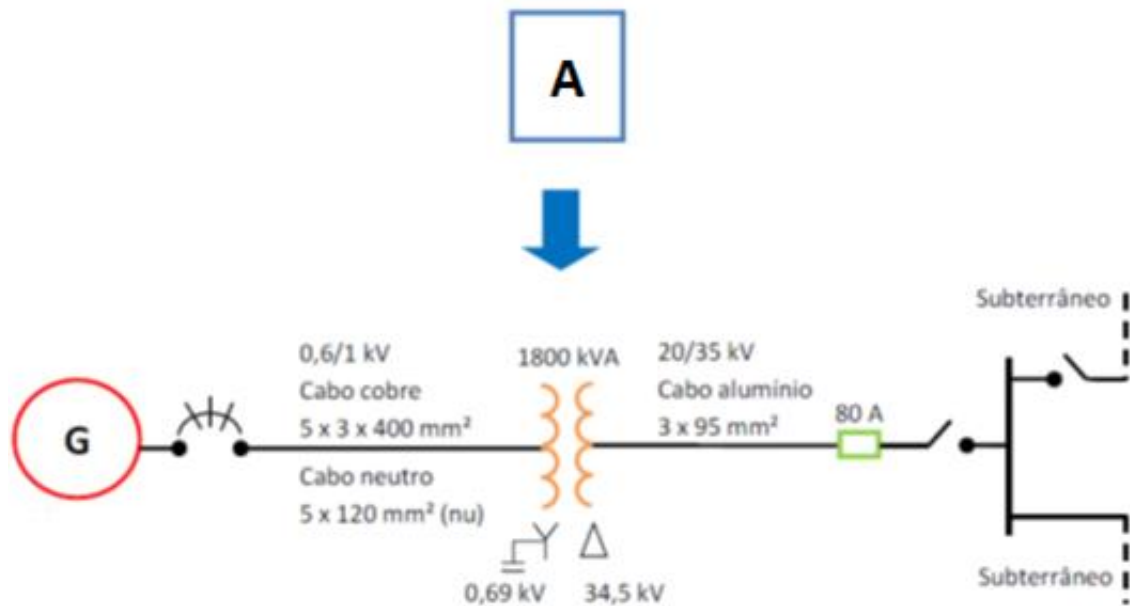
Cada aerogerador é representado por uma fonte de tensão infinita, em série com a reatância de eixo direto, com tensão de excitação e ângulo de fase tal que o possibilita atuar na condição nominal.

A figura 5.1 é uma representação esquemática do caso base para o estudo.



**Figura 5.1: Representação do parque eólico do caso base.**

Cada bloco representa uma unidade aerogeradora, o transformador e os cabos de interligação entre esses equipamentos, como pode ser visto na figura 5.2.



*Figura 5.2: Circuito equivalente ao bloco de descrição.*

### 5.3 – REPRESENTAÇÃO DE TODO O SISTEMA ELÉTRICO NO ATPDRAW COM O POSICIONAMENTO DOS PARA-RAIOS

Com base na descrição do sistema e nos dados dos equipamentos foi feita a modelagem. Foram utilizados os ícones apresentados no capítulo anterior, utilizando as especificações mostradas. Basicamente o sistema é composto de aerogeradores, transformadores, cabos subterrâneos, linha aéreas, uma subestação e as descargas atmosféricas.

A figura 5.3 representa a implementação no ATPDraw do sistema descrito. Destaca-se os pontos de interesse, 3, 5 e 6, são os pontos de encontro da linha aérea com as linhas subterrâneas. Destaca-se também as estações aerogeradoras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11 e A12. É interessante ressaltar que no momento da descarga o sistema está carregado.

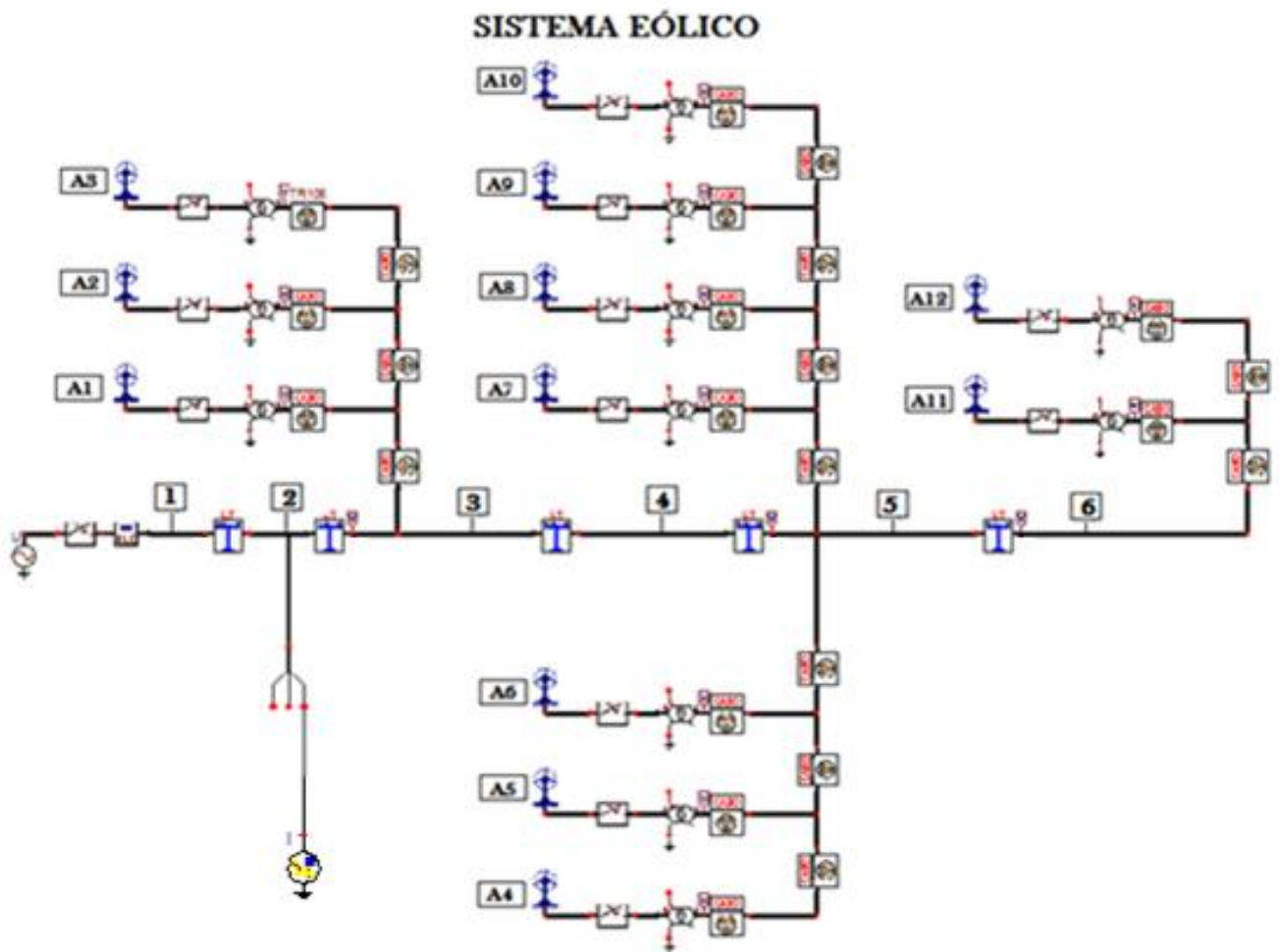


Figura 5.3: Modelagem do sistema elétrico no ATPDraw.

A partir dessa modelagem do sistema, pode-se fazer as simulações necessárias para a definição do correto posicionamento dos para-raios, e valores de sobretensão nos pontos de interesse do sistema.

## 5.4 – O ESTUDO DE CASO

Serão representadas no trabalho duas simulações diferentes para representar duas situações de interesse. Esses casos se diferem apenas no local onde é aplicado o surto atmosférico, possibilitando a ocorrência de reflexão de ondas, garantido que será representada a situação mais desfavorável para o

sistema, sendo os amortecimentos desconsiderados. Durante a descarga o sistema está carregado, com seu funcionamento normal.

Os dois pontos diferentes do sistema, em que incide a descarga, são os pontos 2 e 4.

Para se obter a situação mais crítica, o surto foi aplicado no instante inicial ( $t=0$ ), em que a tensão na fase A, onde é aplicado o surto, chega no seu valor máximo.

#### **5.4.1 – DESCARGA ATMOSFÉRICA NA LINHA AÉREA NO PONTO 2**

Nesse caso, é aplicado no ponto 2 uma descarga da forma e intensidade anteriormente definidas. São analisadas as sobretensões nos pontos de interseção da linha aérea com os cabos subterrâneos e nos pontos adjacentes aos transformadores.

Para que o estudo possa contemplar a pior situação para o surgimento de sobretensões, não foram consideradas as capacitâncias nos transformadores e nem descargas parciais (“*flashover*”) entre fases e o aterramento.

As figuras 5.4, 5.5 e 5.6 representam as sobretensões transitórias na fase A, àquela em que foi aplicado o surto atmosférico.

Primeiramente, são mostradas as sobretensões para os pontos 3, 5 e 6, que são os pontos de conexão entre a linha aérea e a linha subterrânea. É desconsiderada qualquer proteção contra sobretensão, ou seja, os resultados servem para evidenciar o potencial de uma descarga atmosférica, mostrando até que valores pode chegar a tensão no sistema, se o mesmo não foi protegido.

Os valores próximos às curvas das figuras são os valores máximos em destaque.

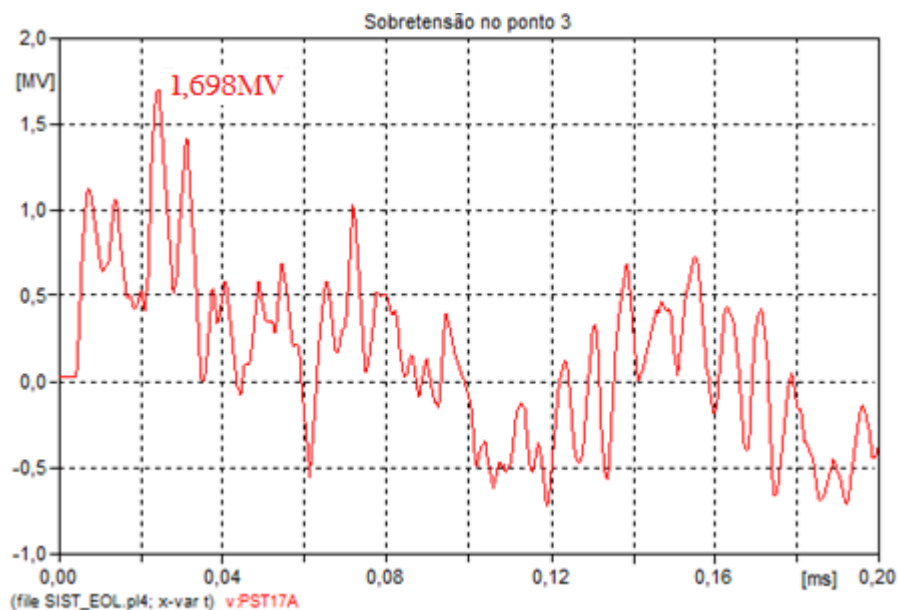


Figura 5.4: Sobretensão na fase A do ponto – 3

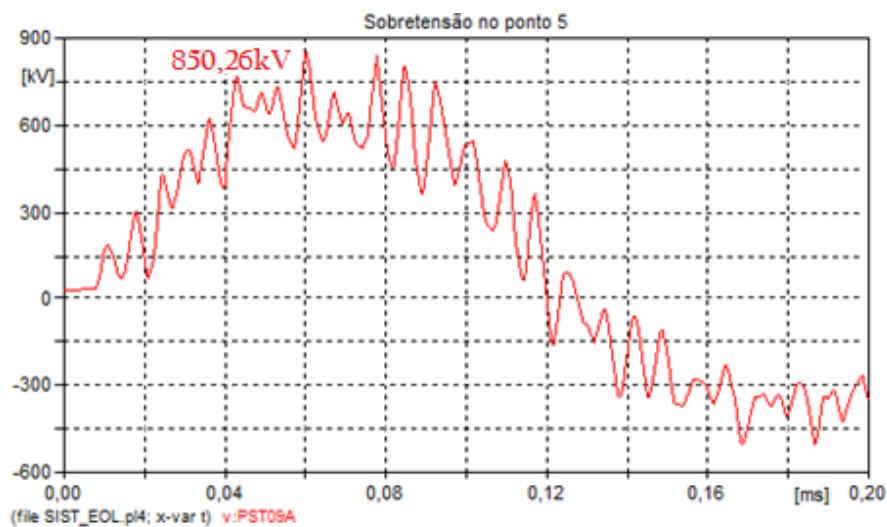


Figura 5.5: Sobretensão na fase A do ponto – 5

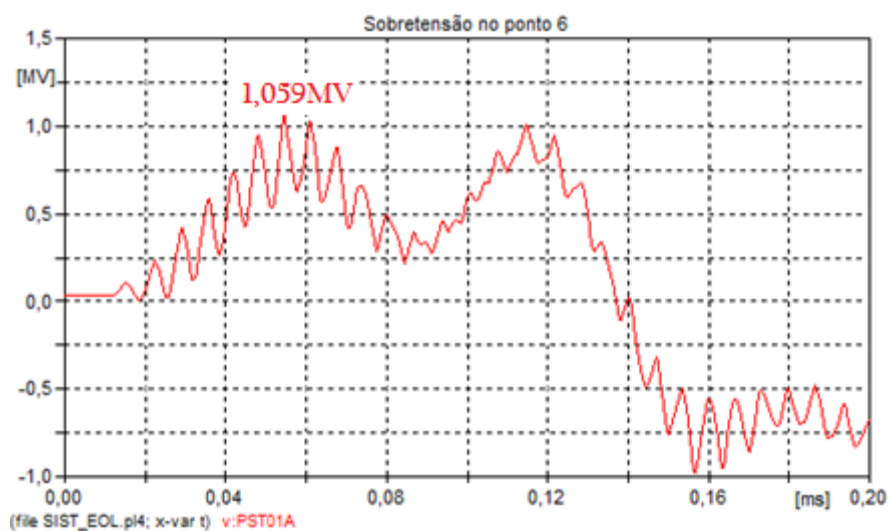


Figura 5.6: Sobretensão na fase A do ponto – 6

É possível observar que ocorrem valores elevados de tensão que resultariam em danos aos equipamentos. É visível a necessidade de fazer a proteção do sistema contra esses efeitos das descargas atmosféricas.

Será promovida uma primeira proteção contra sobretensões; serão posicionados para-raios somente nos pontos de interligação das linhas aéreas com os cabos subterrâneos e da interseção da subestação com a linha aérea.

O para-raios deverá possuir uma tensão nominal tal que o valor máximo da tensão de regime permanente (MCOV) seja maior que o valor da sobretensão de regime admissível, suportada pelo sistema e, uma sobretensão temporária definida pela característica de sobretensão suportável em frequência industrial. Considerando estes aspectos e que no caso de uma falha fase-terra o sistema de proteção atue em menos de 1 seg, o valor de tensão nominal mínimo para os para-raios é de 36 kV. Devido ao fato de estarem bem próximo à entrada de surtos no sistema, é interessante que a tensão nominal desse para-raios seja mais elevada, elevando-se assim a capacidade de absorção de energia desses equipamentos.

Sendo assim, o valor de tensão escolhido para esses para-raios será de 42kV. A figura 5.7 evidencia esse posicionamento inicial da proteção.

Deve ser feita a verificação do posicionamento e do dimensionamento dos para-raios, olhando-se os valores de sobretensão e de energia dissipada em alguns pontos do sistema.

Inicia-se pelos pontos de interseção das linhas, e pela verificação dos valores de tensão. As figuras 5.8, 5.9 e 5.10 mostram tais tensões.

A redução nos valores de tensão é muito alta e evidencia a eficácia dos para-raios na proteção desses sistemas. No ponto 3 a sobretensão caiu de 1698,4kV para 135,65kV, uma redução de mais de 92%.

As sobretensões mais críticas que ocorrem nos pontos adjacentes dos transformadores são apresentadas na figura 5.11. Devido ao local da descarga,

os valores mais severos surgem no primeiro ramal subterrâneo, que é o mais próximo do ponto da descarga, as sobretensões ultrapassa 200kV.

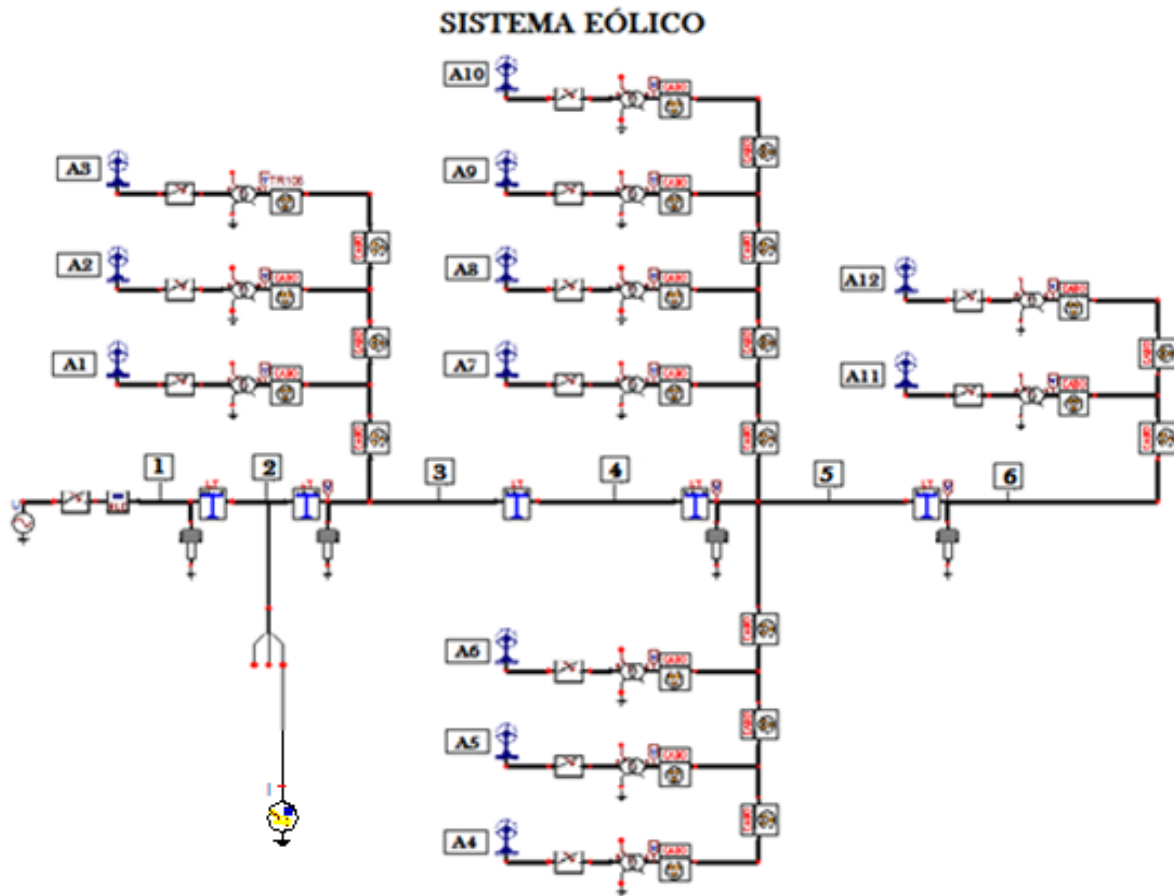


Figura 5.7: Sistema Elétrico com para-raios na Linha Aérea.

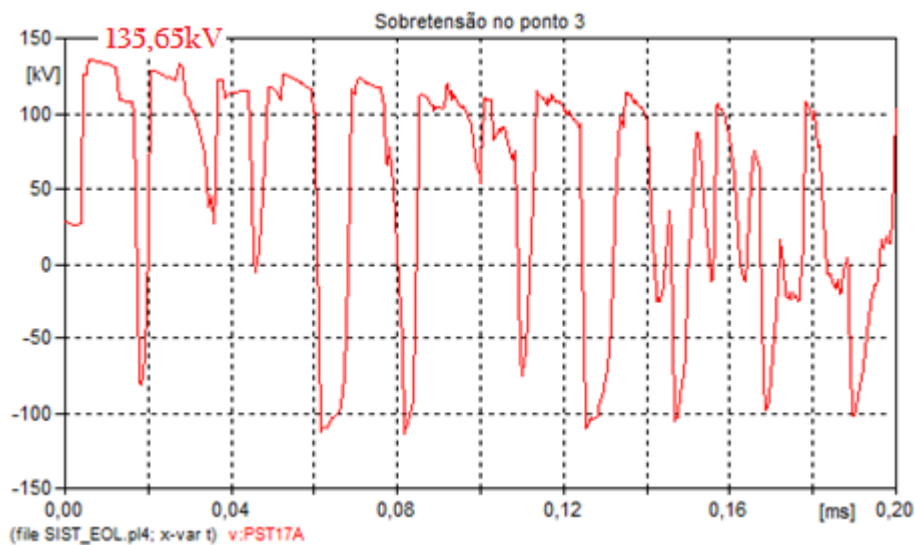
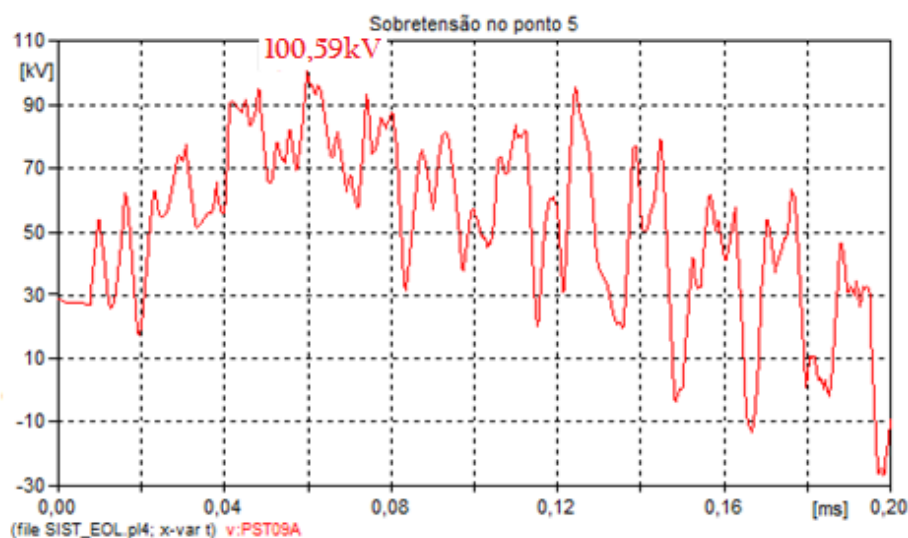
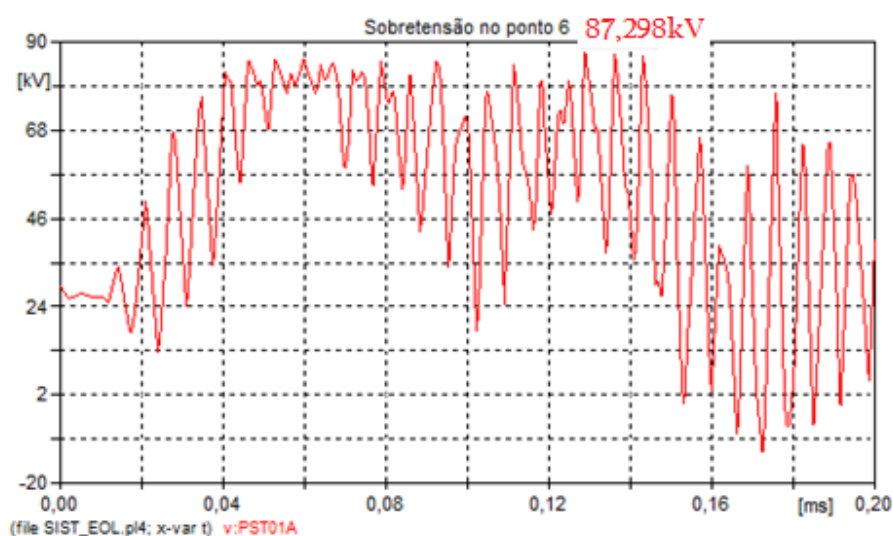


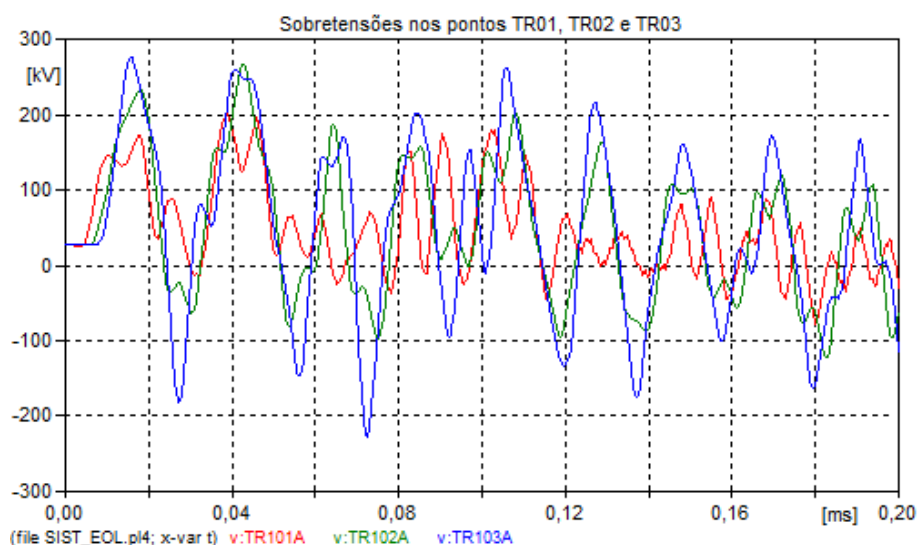
Figura 5.8: Sobretensão na fase A do ponto – 3



**Figura 5.9: Sobretensão na fase A do ponto – 5**



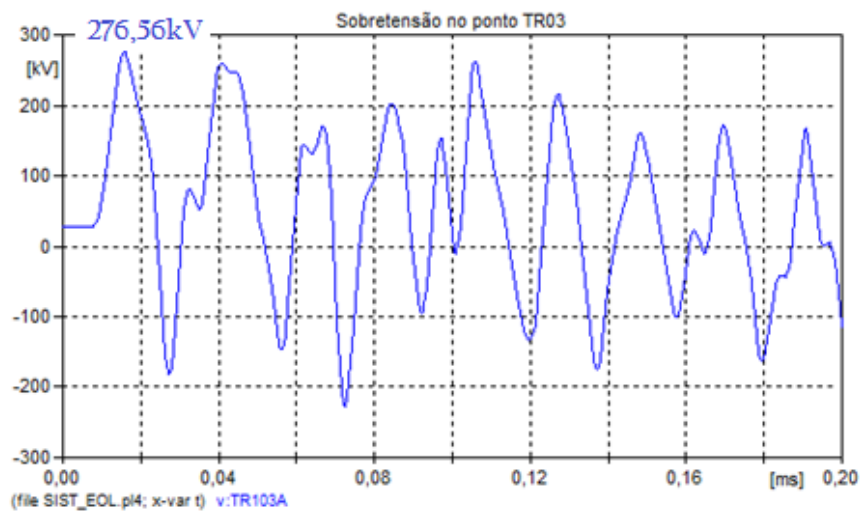
**Figura 5.10: Sobretensão na fase A do ponto – 6**



**Figura 5.11: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR01, TR02 e TR03**



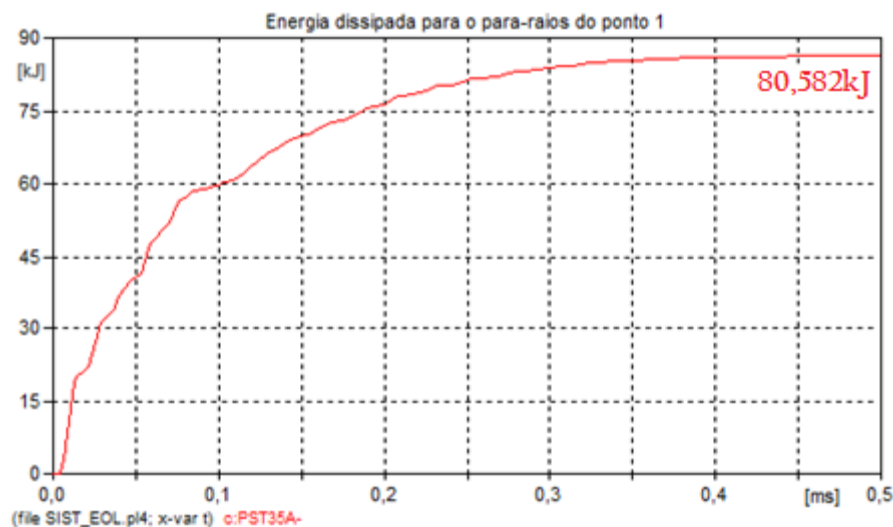
A maior sobretensão nos transformadores é representada na figura 5.12, é referente ao transformador TR03, de 276,56kV.



**Figura 5.12: Sobretensão na fase A do ponto de derivação - TR03**

O isolamento dos transformadores foi ultrapassado pelos níveis de sobretensão, logo, devem ser inseridos para-raios próximos aos mesmos.

Agora serão identificadas nas figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 as energias dissipadas durante a descarga, para cada para-raios. Visto que o nível de tensão nas interligações está adequado mediante a influência de surtos atmosféricos, deve-se verificar um comportamento adequado da capacidade de absorção de energia dessa proteção.



**Figura 5.13: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 1**

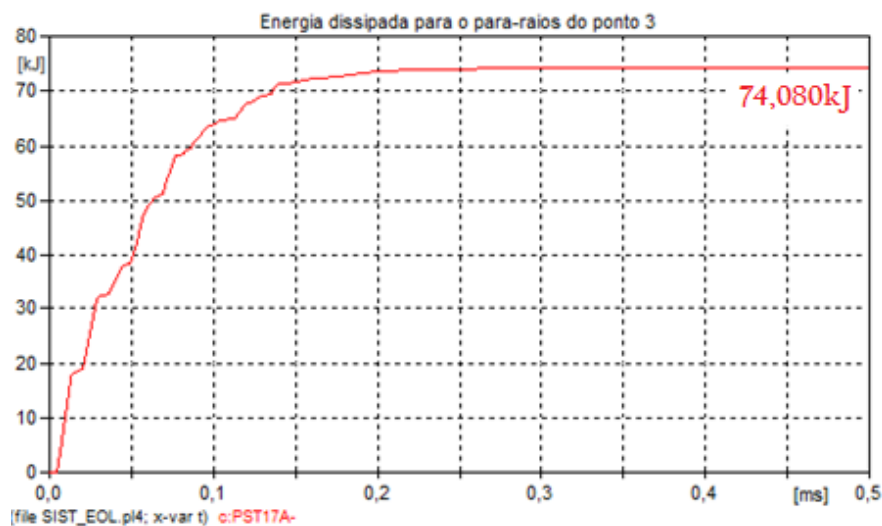


Figura 5.14: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 3

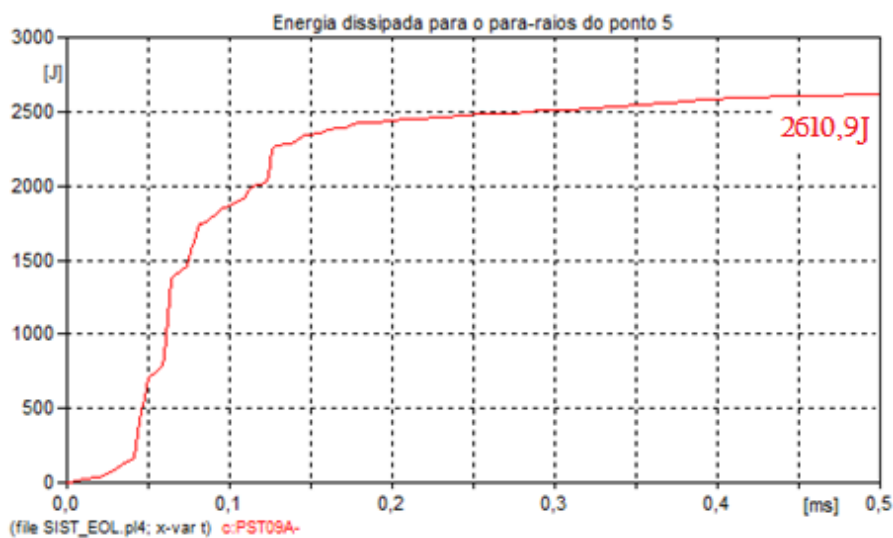


Figura 5.15: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 5

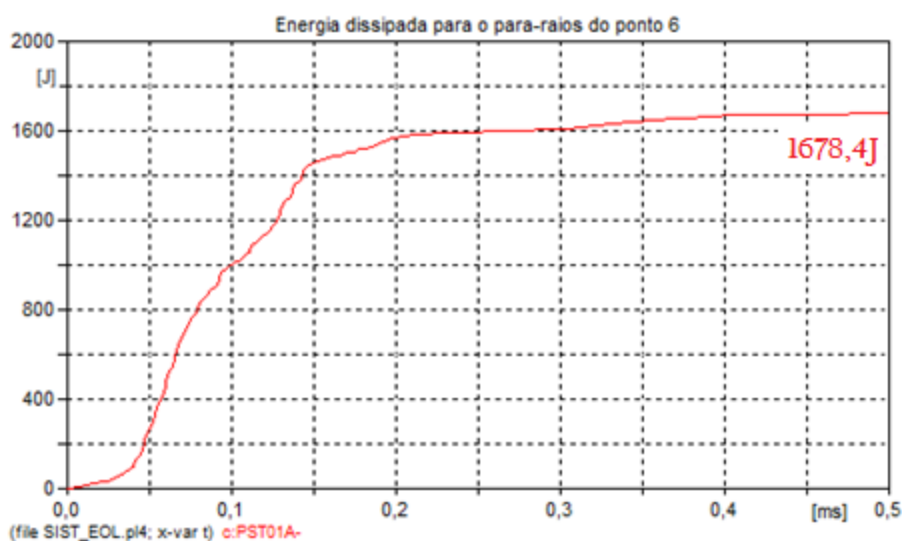


Figura 5.16: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto 6

A capacidade dissipativa de energia dos para-raios é proporcional ao valor de tensão nominal. De acordo com os gráficos mostrados, as curvas de energia dissipada estabilizam, o que mostra que os equipamentos possuem estabilidade térmica e não apresentarão danos, ou seja, após a operação da proteção o para-raios estará nas mesmas condições de uso apresentadas anteriormente ao surto.

Os valores de energia para os para-raios dos pontos 1 e 3 são muito maiores devido a sua proximidade com o local em que a descarga atinge o sistema, sendo no ponto 1 de 80,582kJ e de 74,080kJ no ponto 3, e nos pontos 5 e 6, de 26,109kJ e 1,678kJ, respectivamente. A energia dissipada no ponto tende a um valor constante, logo, a classe para os para-raios escolhida é adequada para o seu local de posicionamento.

Porém, é necessário que sejam colocados para-raios próximos aos transformadores. Como os locais de maior sobretensão foram os pontos próximos aos transformadores do primeiro ramal, será instalada uma proteção em cada ponto. A classe de tensão desses novos para-raios será de 36kV, devido ao fator econômico, sabendo-se que o preço desse equipamentos aumenta de acordo com o aumento de tensão nominal, e que a quantidade de energia dissipada nesses pontos será menor do que aquela nos pontos de interligação, não necessitando assim de uma capacidade de dissipação igual a dos para-raios de 42kV.

Será inserida uma proteção no início e no fim do primeiro ramal e repete-se a operação, a fim de verificar se a proteção está correta. São mostrados nas figuras 5.17 e 5.18 os valores de sobretensão próximo aos transformadores, valores não maiores que 110kV. A maior sobretensão nos transformadores é de 109,75kV, e é representada na figura 5.18, é referente ao transformador TR02.

Deve-se também verificar a dissipação de energia nesses pontos, como é evidenciado nas figuras 5.19 e 5.20.

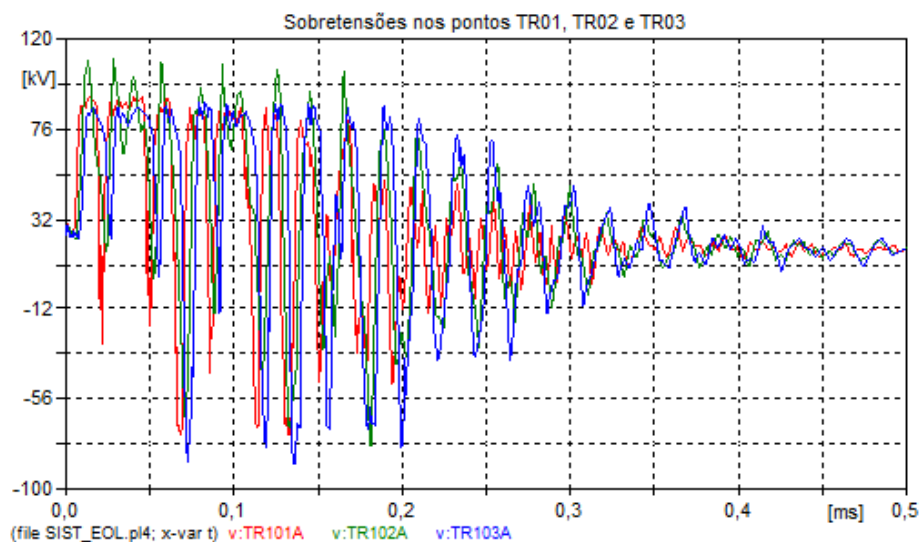


Figura 5.17: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR01, TR02 e TR03

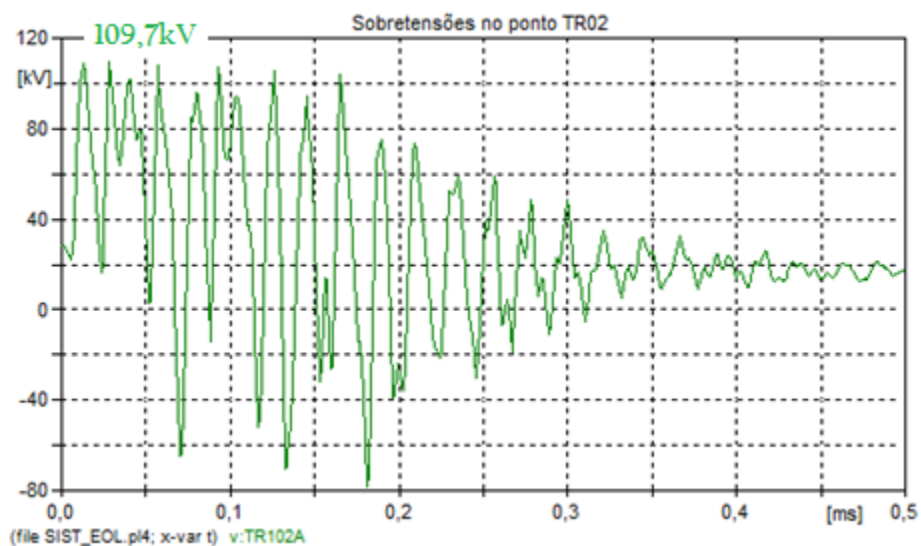


Figura 5.18: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR02

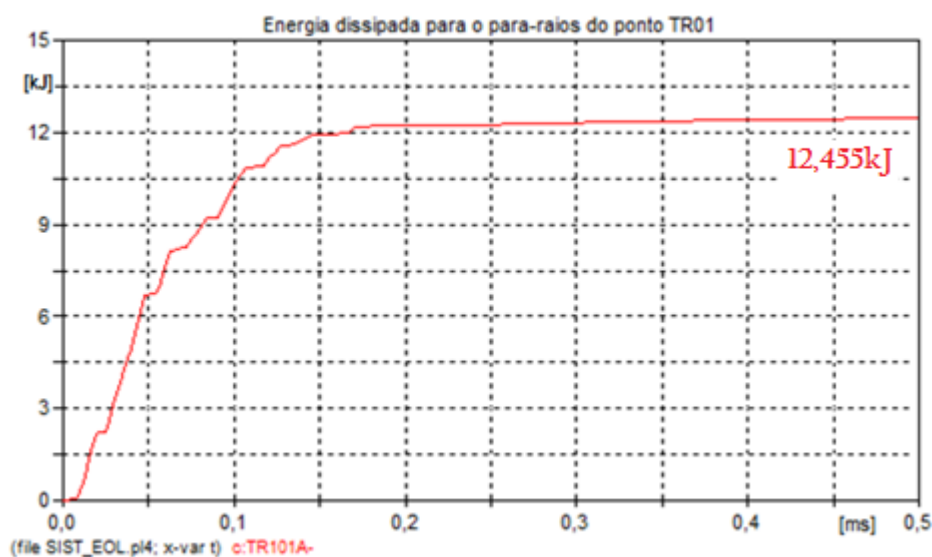
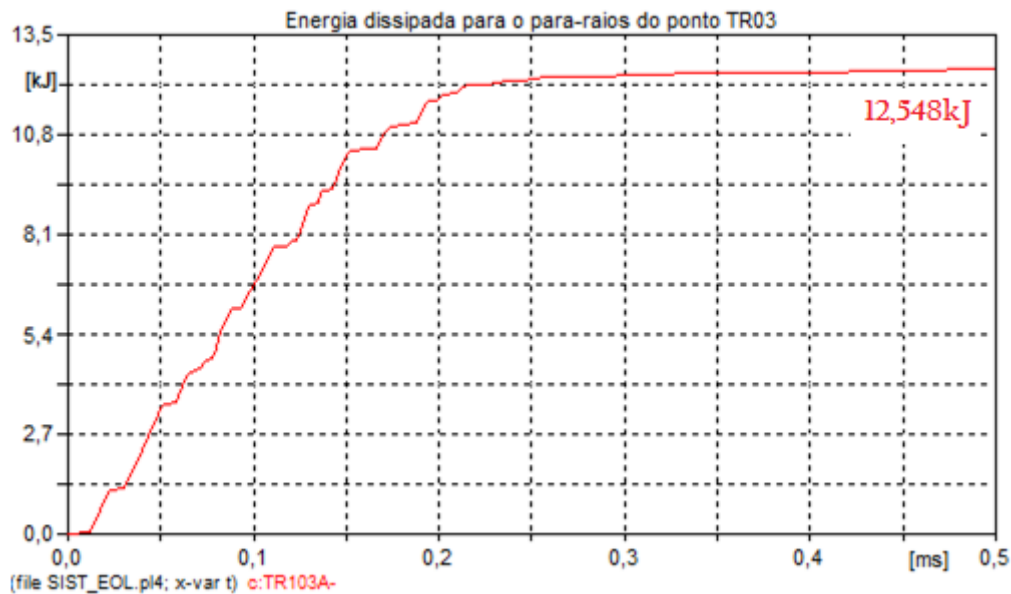


Figura 5.19: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR01



**Figura 5.20: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR03**

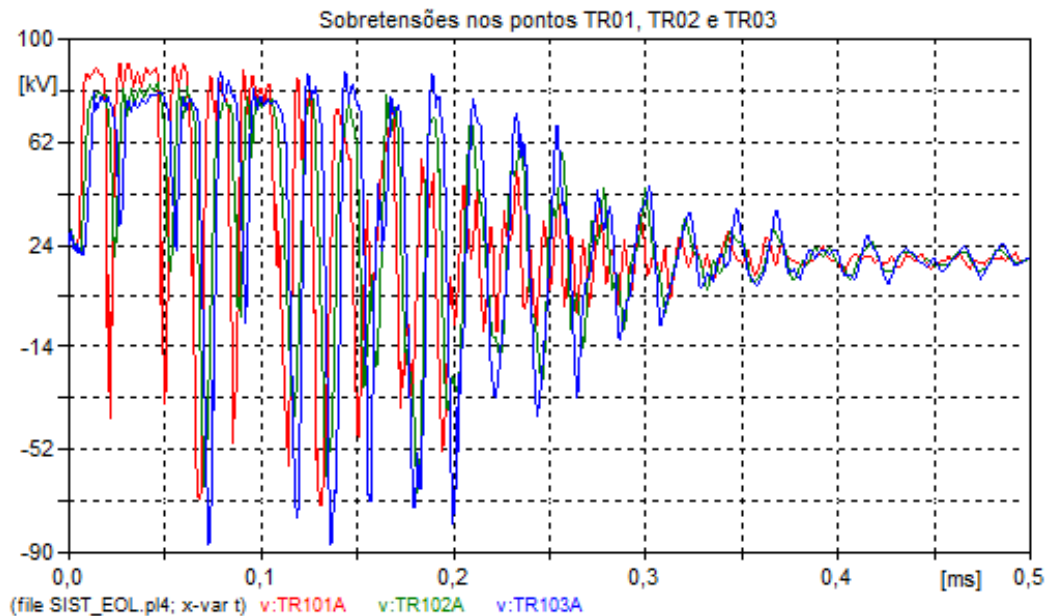
Como o maior valor de sobretensão é de 109,75kV, a margem de segurança para o isolamento dos equipamentos garante a proteção do sistema, por exemplo, o nível de isolamento dos cabos subterrâneos é de 200kV, logo, não há necessidade de diminuir-se a tensão do para-raios. As curvas de energia dissipada apresentam uma estabilização, em 12,455kJ no poto TR01 e em 12,548kJ no ponto TR03, devido à correta absorção da energia pelos para-raios, logo, não há necessidade de aumentar-se a tensão do para-raios.

A seguir são mostradas as sobretensões próximas aos transformadores na figura 5.21, em que é considerado um para-raios no ponto TR02, próximo ao transformador do segundo aerogerador, que não foi contemplado anteriormente, para se encontrar as diferenças desse acréscimo de proteção, as maiores sobretensões são pouco maiores que 90kV.

A maior sobretensão nos transformadores é representada na figura 5.22, é referente ao transformador TR01, e é de 91,054kV.

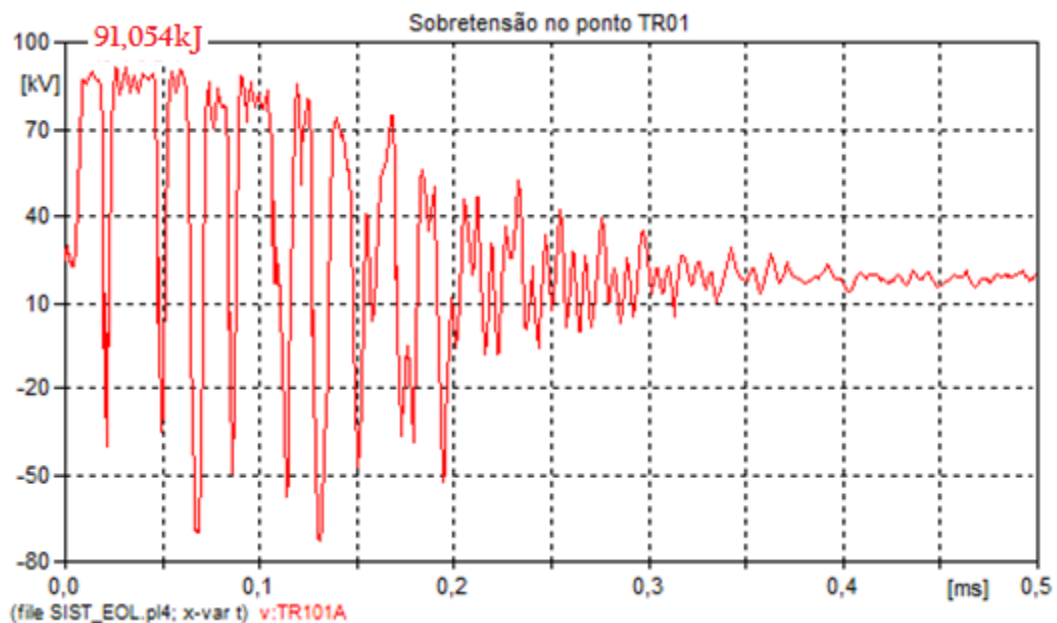
A diferença entre as sobretensões é de 18,646kV, uma diferença que não é significativa visto que a margem de segurança do isolamento aumentou em um pequena parcela. E tal diminuição no valor de sobretensão não é necessária, pois

os valores alcançados com a configuração de proteção anterior já são suficientes. Deve-se destacar ainda o aspecto financeiro, o qual indica que essa configuração utilizaria um para-raios a mais, o que gera aumento dos custos.



**Figura 5.21: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR01, TR02 e TR03**

A seguir serão mostradas as energias dissipadas em um tempo aceitável de acordo com as figuras 5.23, 5.24 e 5.25.



**Figura 5.22: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR01**

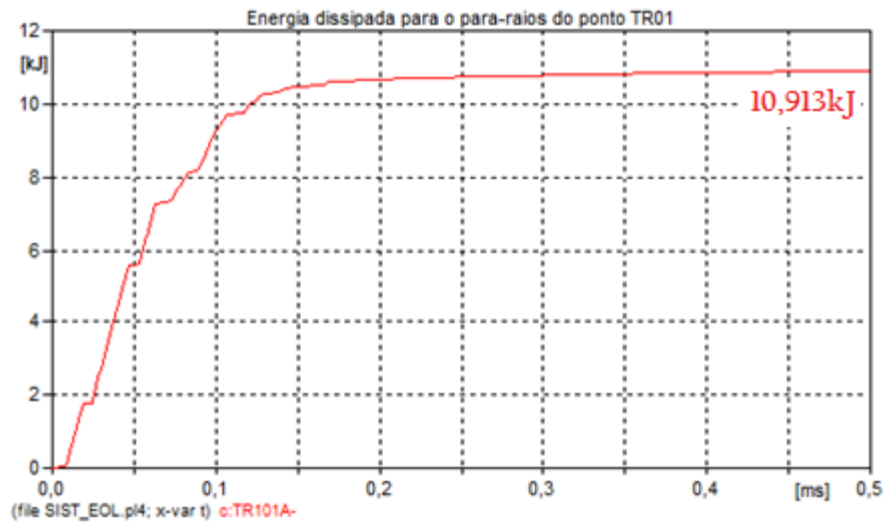


Figura 5.23: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR01

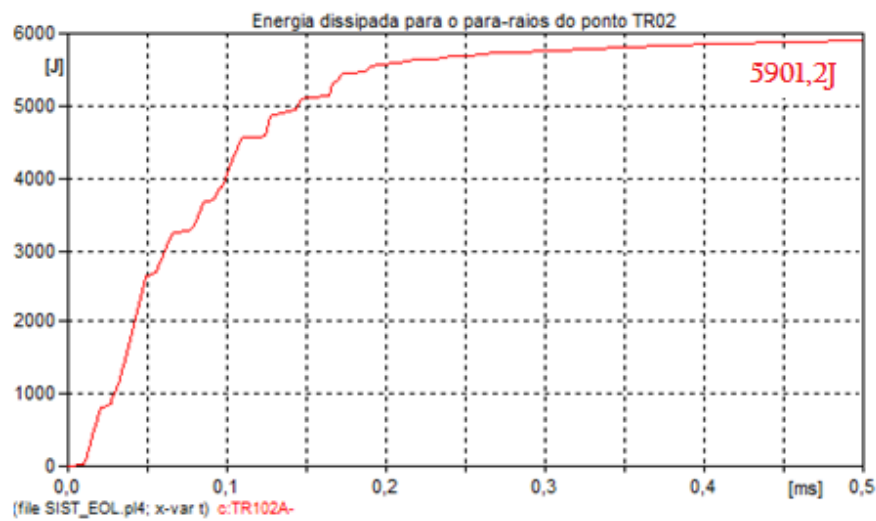


Figura 5.24: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR02

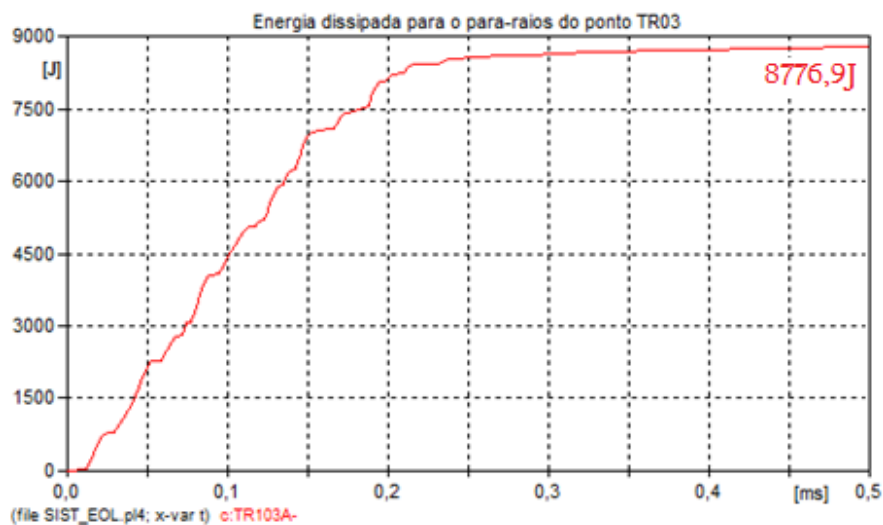


Figura 5.25: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ponto TR03



Observando-se as curvas conclui-se que não há melhorias significativas e nem necessárias que justifiquem a utilização de um para-raios no ponto intermediário no ramal. A maior diminuição de energia dissipada foi para o para-raios do ponto TR01, de 1,542kJ, lembrando que a capacidade dos para-raios é de 4,5kJ/kV, ou seja para um para-raios de 36kV a capacidade total é de 162kJ. O melhor posicionamento de para-raios é aquele em que se utiliza o menor número possível desses equipamentos garantindo confiabilidade na proteção efetuada. E essa confiabilidade é garantida sem a utilização de uma proteção no ponto TR02.

#### 5.4.2 – DESCARGA ATMOSFÉRICA NA LINHA AÉREA NO PONTO 4

A segunda simulação, que considera uma descarga no ponto 4, é feita considerando-se para-raios no início e no fim do primeiro ramal subterrâneo. Da mesma maneira, primeiramente serão apresentadas as sobretensões para os pontos de interseção e depois para os transformadores.

As sobretensões para os pontos de interseção são mostradas nas figuras 5.26, 5.27 e 5.28.

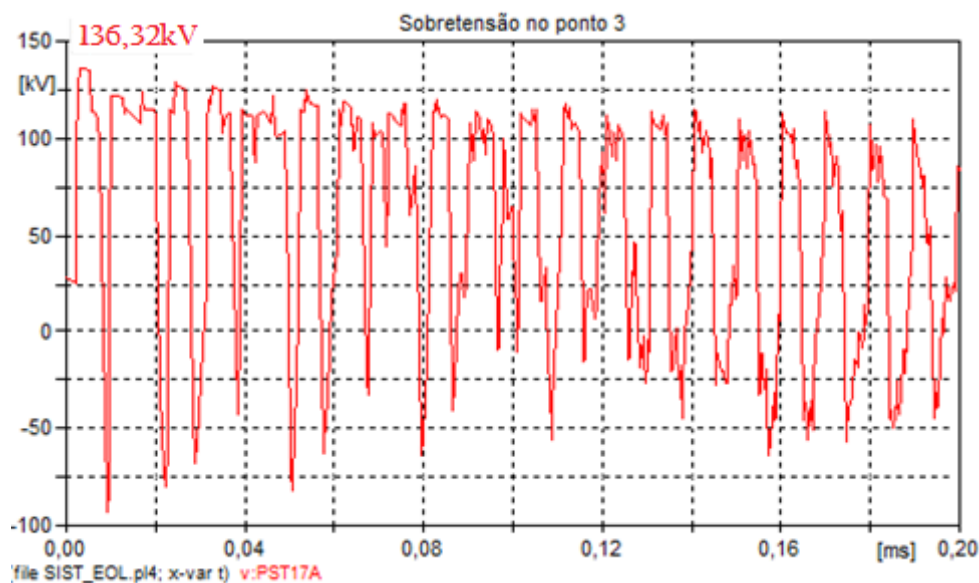
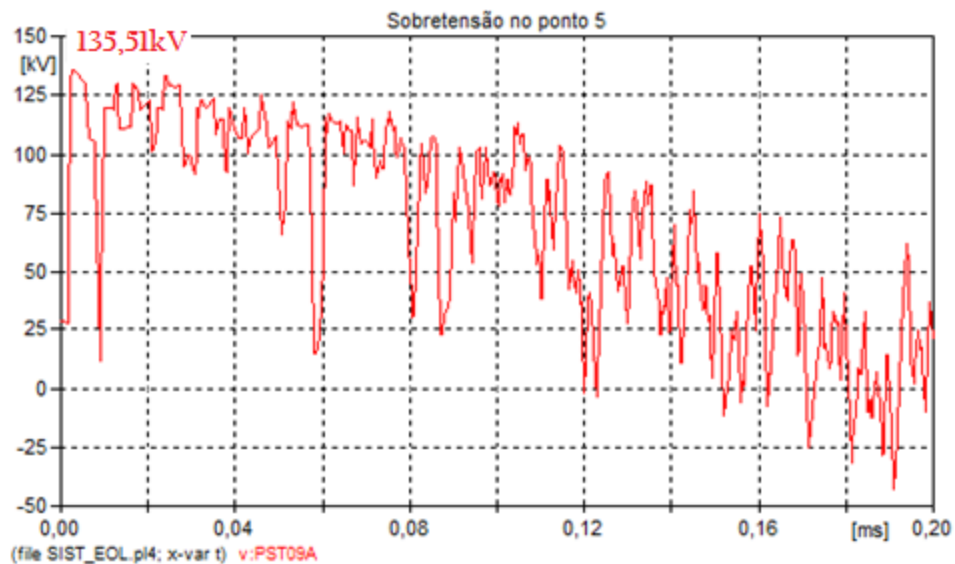
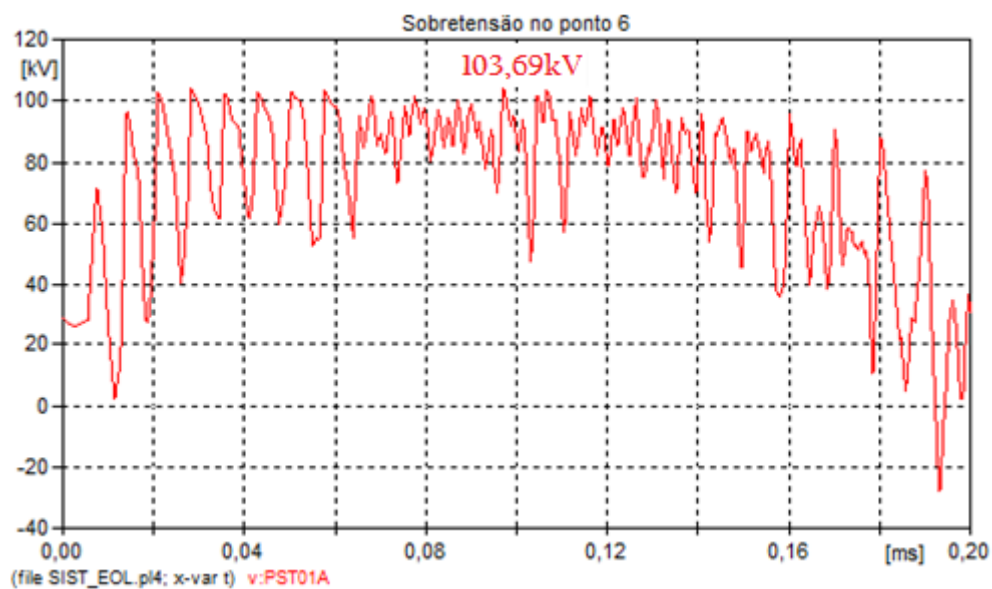


Figura 5.26: Sobretensão na fase A do ponto – 3



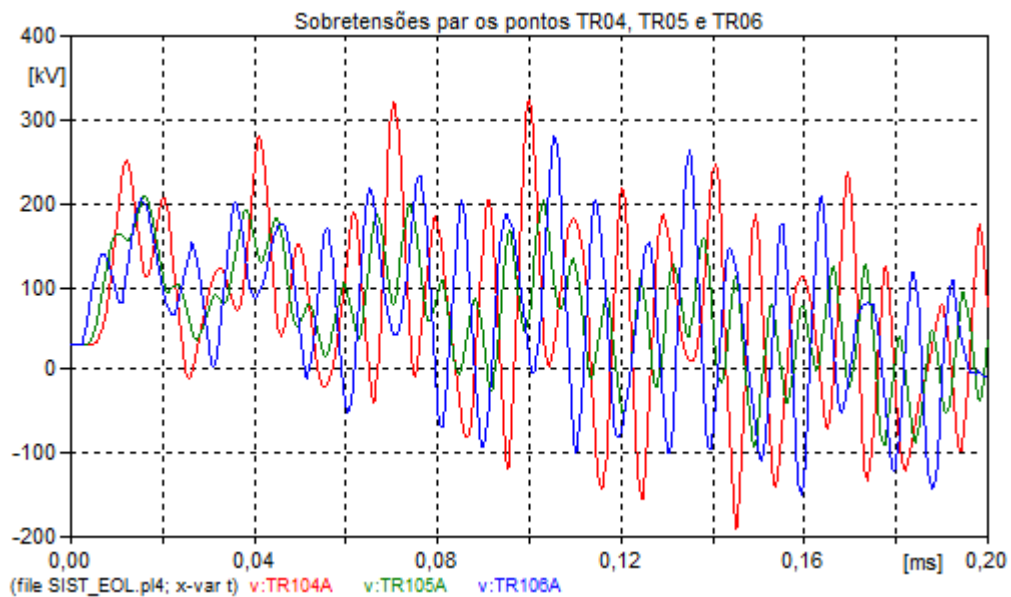


*Figura 5.27: Sobretensão na fase A do ponto – 5*



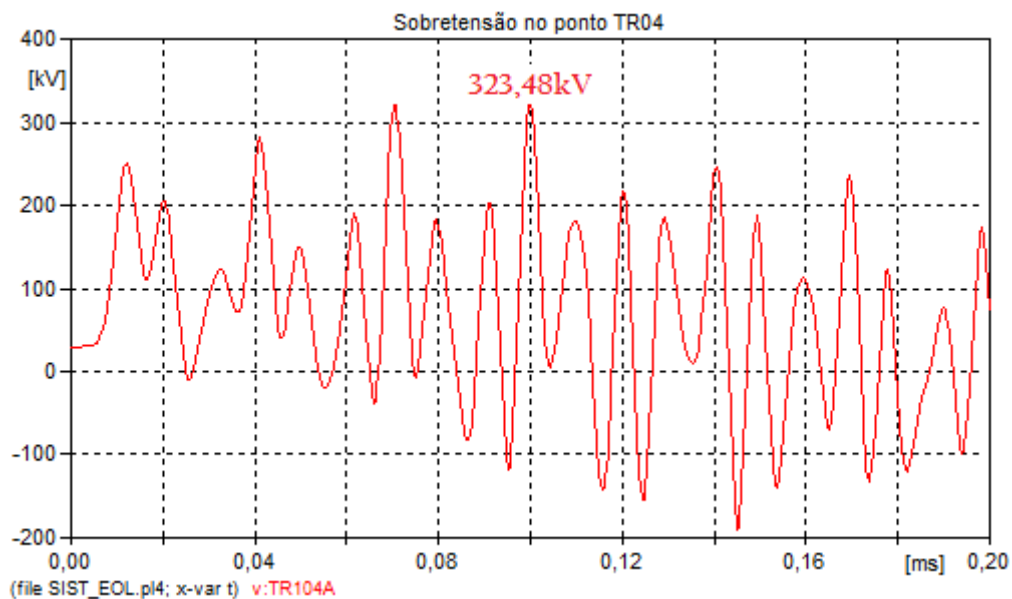
*Figura 5.28: Sobretensão na fase A do ponto – 6*

Como esperado os valores estão dentro do permitido, a maior tensão foi de 136,32kV, abaixo de 170kV, que é o nível de isolamento dos transformadores. Mas para os transformadores do segundo ramal as sobretensões foram maiores que a suportabilidade dos equipamentos, da ordem de 300kV, como pode ser observado nas próximas figuras 5.29 e 5.30.



**Figura 5.29: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR04, TR05 e TR06**

A figura 5.30 mostra a maior sobretensão experimentada, de 323,48kV, que é para o transformador do gerador A4.



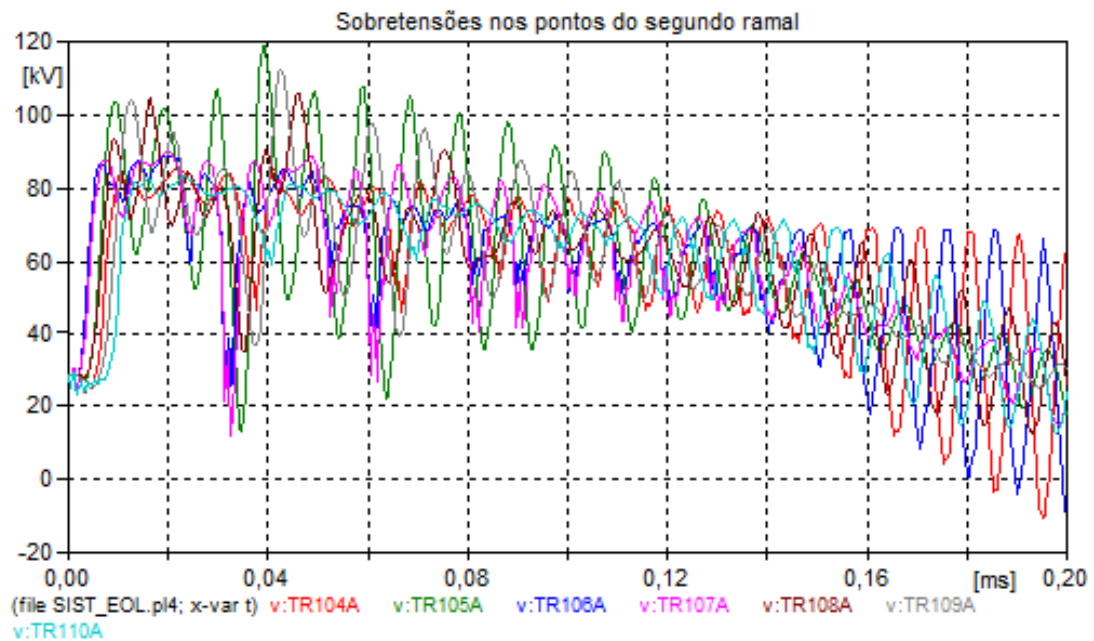
**Figura 5.30: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR04**

Mediante os grandes valores de tensão encontrados para os geradores e transformadores do segundo e terceiro ramal do sistema, deve haver uma proteção contra sobretensão nesses ramais também.

Fazendo-se o posicionamento de para-raios nos transformadores do segundo e terceiro ramal, nas extremidades de cada ramal, aparecem

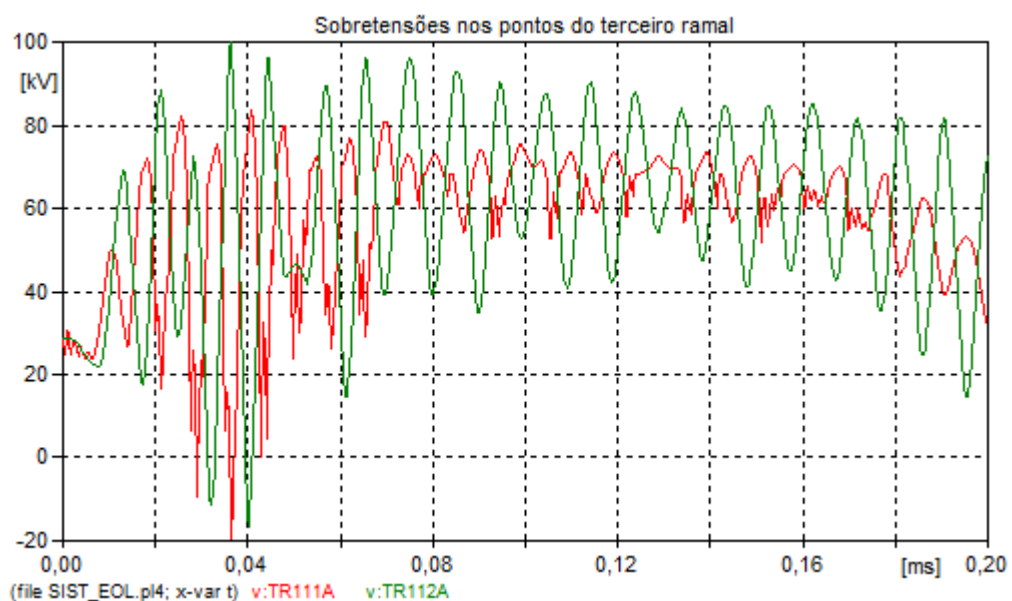
sobretensões diferentes. A definição da classe de tensão dos para-raios deve seguir a mesma que foi adotada no primeiro ramal, de 36kV.

A figura 5.31 mostra as sobretensões para o segundo ramal subterrâneo, as sobretensões mais elevadas foram menores que 120kV.



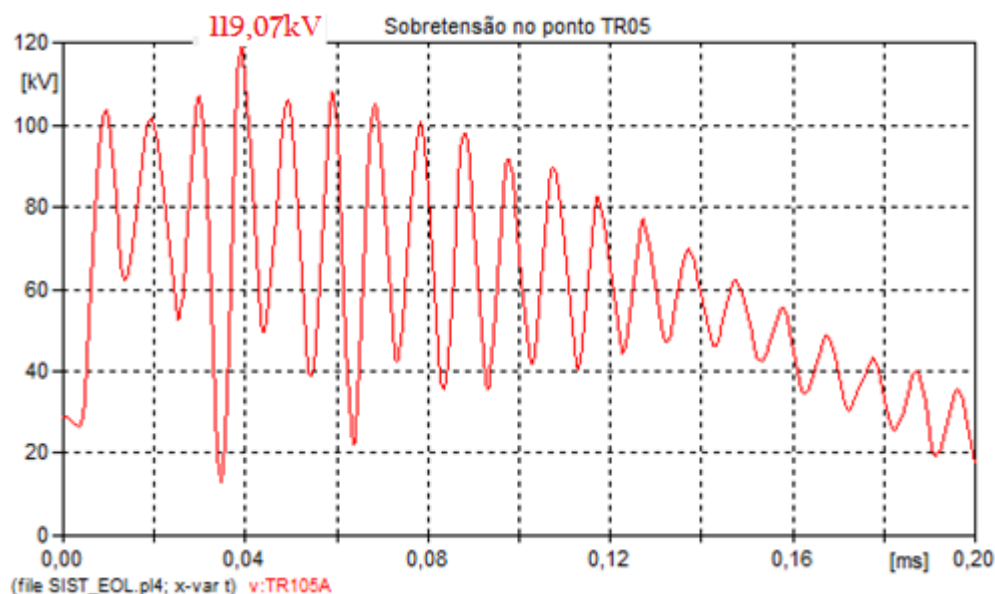
*Figura 5.31: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR04 a TR10*

E os valores de sobretensão para o terceiro ramal são mostrados na figura 5.32. A maior sobretensão não superou 100kV.



*Figura 5.32: Sobretensão na fase A dos pontos de derivação – TR11 e TR12*

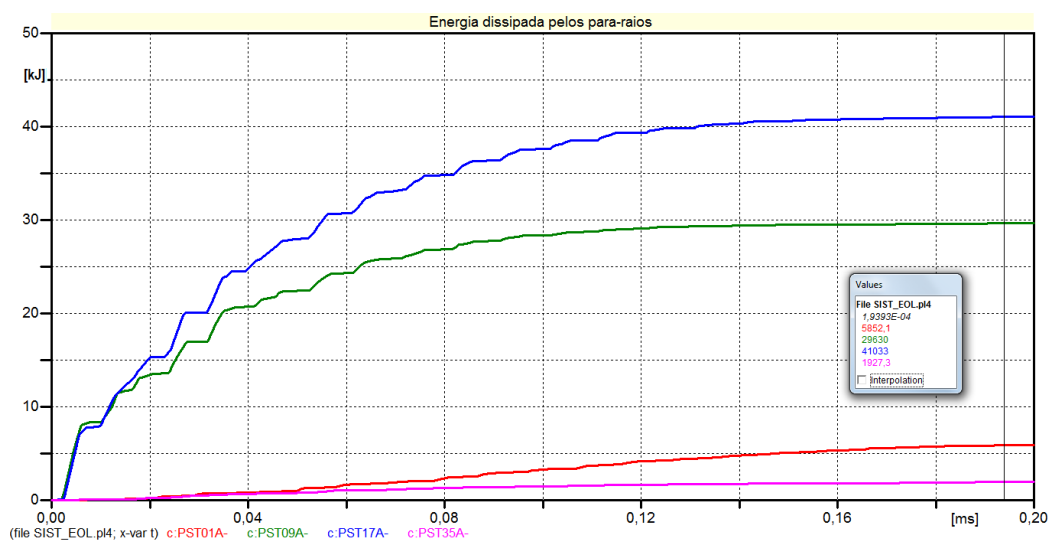
A condição mais desfavorável, para os equipamentos do segundo e terceiro ramais, é de 119,075kV, no ponto TR05, e é mostrada na figura 5.33.



**Figura 5.33: Sobretensão na fase A do ponto de derivação – TR05**

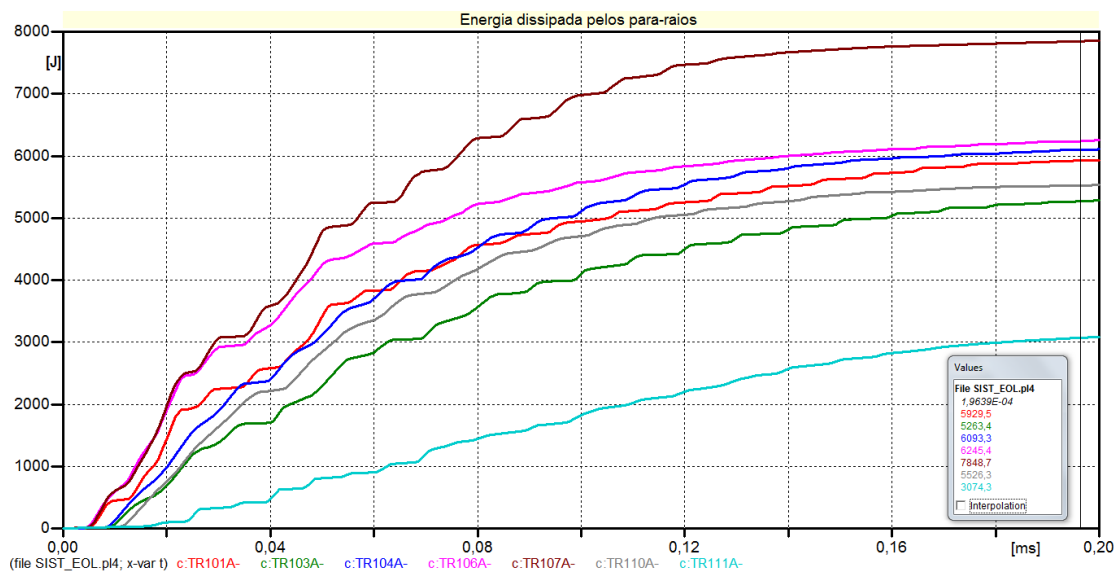
Já que a configuração da proteção possibilitou um corte adequado no nível de tensão para a ocorrência de surtos, deve ser verificada a capacidade de absorção de energia dos para-raios, observando-se os gráficos de energia dissipada para os para-raios do sistema.

A figura 5.34 representa a energia dissipada nos para-raios instalados nos pontos de interseção entre as linhas subterrâneas e a linha aérea.



**Figura 5.34: Energia dissipada pelos para-raios da fase A dos pontos de transição**

As energias para os para-raios dos ramais subterrâneos são mostradas na figura 5.35.

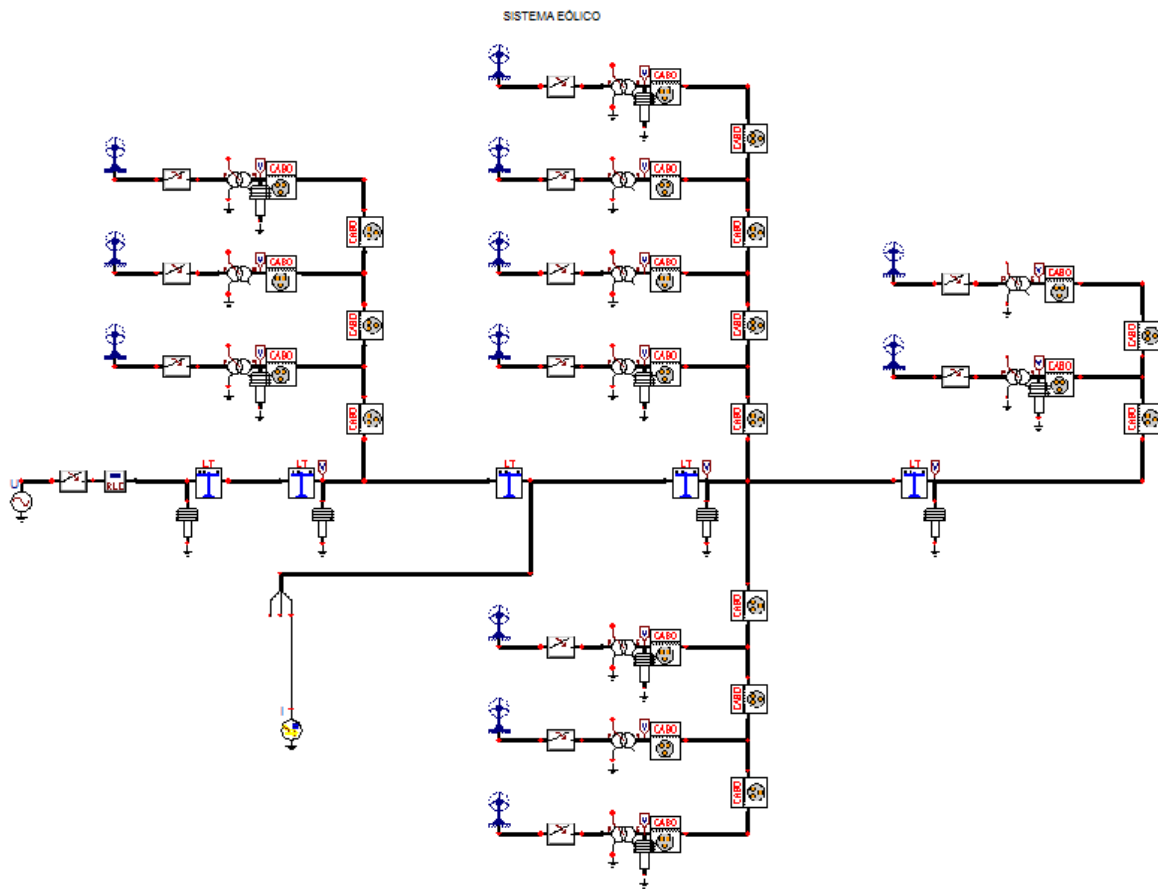


**Figura 5.35: Energia dissipada pelo para-raios da fase A do ramal subterrâneo**

Esse posicionamento da proteção contra sobretensão se mostrou eficaz, não apresentando instabilidade térmica, sendo capaz de dissipar a energia proveniente do surto, o que pode ser visto pela estabilização da mesma nas simulações e possibilitou ainda uma limitação dos níveis de sobretensão adequada para os equipamentos instalados,.

Não há necessidade de elevação das tensões dos para-raios, já que o critério de absorção de energia foi respeitado, o maior valor de energia foi de 41,033kJ do para-raios do ponto 5, distante do limite de energia do para-raios, e também não se deve abaixá-las, pois o critério do valor de MCOV fixa o valor mínimo de tensão nominal em 36kV, e com esse para-raios a margem de segurança oferecida ficou adequada, as sobretensões transitórias são menores que o nível de isolamento dos equipamentos componentes do sistema. Por exemplo, a maior tensão a qual os transformadores são submetidos é de 119,07kV, há uma margem de proteção de 29,96% .

A figura 5.36 mostra o sistema eólico com o posicionamento final de todos os para-raios.



*Figura 5.36: Sistema Elétrico com todos os para-raios posicionados.*

## 5.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das análises apresentadas verificou-se que os valores de sobretensão que surgem no sistema sem a proteção são grandes o suficiente para ultrapassar a suportabilidade técnica dos equipamentos e então promover a perda de funcionalidade dos mesmos.

Para elucidar a necessidade de proteção contra sobretensões, o sistema totalmente desprotegido foi submetido a um surto, os valores de tensão que surgem são altos e capazes de produzir grandes danos ao sistema. O maior pico de tensão é de 1698,4 kV, deve-se lembrar que a tensão nominal de linha é de 34,5kV.

Primeiramente, foram posicionados para-raios nos pontos de interseção, a tensão nominal para esses para-raios é de 42kV, valor que oferece um nível de sobretensão abaixo do nível de isolamento dos equipamentos, e também oferece uma possibilidade de dissipação de energia estável para a descarga aplicada. Mas os geradores, os transformadores e os cabos próximos experimentam sobretensões perigosas, que podem levar à sua danificação.

Deve-se portanto, fazer o uso de mais para-raios para garantir uma proteção adequada para o sistema. Posicionando-se essa proteção nos transformadores do início e do fim de cada ramal, é possível garantir a ocorrência de sobretensões que atendem ao limite estabelecido pelos equipamentos integrantes do sistema. Não haverá problemas de perda de estabilidade térmica dos para-raios, todos são capazes de dissipar energia em uma proporção adequada a sua utilização.

Além dos para-raios de 42 kV nos pontos de encontro da linha aérea com a rede subterrânea, devem ser previstos para-raios de 36kV no primeiro e no último transformador de cada ramal subterrâneo para garantir-se uma adequada proteção do sistema. Além de ser tecnicamente adequada, essa opção mostrou-se viável economicamente.

O modelo de para-raios mostrou-se eficiente visto que a ação resultou em uma simulação leve, em que o computador não apresentou dificuldade de concluir, e não houveram divergências, que eram objetivos da decisão de se utilizar o ramo resistivo pseudo não linear do tipo 99.

As curvas de cada para-raios se comportaram como o previsto, tanto para o nível de tensão que surge quando da ocorrência do surto, quanto para a quantidade de energia dissipada.

Sem que ocorra qualquer alteração na característica “tensão *versus* corrente”, ou falha dos para-raios por instabilidade térmica, esses equipamentos devem suportar por um intervalo de tempo, as sobretensões possíveis de ocorrer

no sistema. A capacidade de absorção de energia é o critério que irá estabelecer o limite mínimo de tensão nominal do para-raios. Na falta do estudo de dissipação de energia, muitos usuários especificam para-raios de tensão nominal maior que o necessário, que possuirão consequentemente uma grande capacidade de absorção de energia. Além de apresentar um custo maior, essa ação, diminui a margem de proteção oferecida aos equipamentos, podendo até ultrapassá-la, resultando em danos no isolamento dos equipamentos do sistema.

No estudo de caso, o limite inferior para a tensão do para-raios é de 36kV, devido a um fato que já foi esclarecido nesse capítulo. Com as simulações pode-se ver que esse para-raios foi capaz de dissipar a quantidade necessária de energia, ou seja, não é necessário se utilizar nesses pontos para-raios maiores. Para os para-raios de 42kV, também se observou um bom comportamento quanto a energia dissipada.

Paralelamente, a margem de segurança oferecida para o isolamento dos equipamentos está adequada, ou seja, não é necessário diminuir o nível de tensão dos para-raios.

O fato de se utilizar dois tipos de tensão de para-raios para o sistema se justifica com base em aspectos técnicos, já que os maiores estão próximos dos pontos de inserção dos surtos e por isso precisam de uma capacidade de absorção de energia maior, e em aspectos econômicos, pois não há a necessidade de uso de para-raios de 42kV em todos os pontos, já que o custo aumenta proporcionalmente com as tensões nominais dos para-raios, explicando a utilização de para-raios de 36kV nos ramais subterrâneos. Assim foram atendidas todos os critérios de dimensionamento, tanto quanto ao MCOV, devido ao tempo de atuação da proteção de falha a terra, em que o para-raios ficará sujeito à tensão de linha por 1 segundo, quanto ao nível de sobretensão no sistema, trazendo uma margem de segurança para os equipamentos, e quanto à capacidade de dissipação de energia.



# **CAPÍTULO VI**

---

## **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir dos principais resultados e conclusões dessa dissertação é possível estabelecer-se uma visão geral sobre a pesquisa. Agora serão evidenciadas as conclusões finais, que completam aquelas que já foram expressas ao longo desse trabalho.

O Capítulo I foi direcionado a uma contextualização do tema central desta pesquisa. Pode-se concluir que a expansão do aproveitamento da energia eólica é muito importante para a matriz energética nacional. Existem diversos programas que incentivam esse tipo de produção. E o panorama atual é favorável para surgir propostas de melhora para essa exploração.

Uma das dificuldades para essa geração é a proteção contra sobretensões. Existe uma dificuldade em função de sua característica construtiva, a ligação de cabos subterrâneos com linhas aéreas, onde surgirão pontos de reflexão, que são sensíveis ao aparecimento de sobretensões perigosas para o sistema.

Vale ressaltar que os objetivos e metas propostos no início do trabalho foram alcançados.

No Capítulo II foi abordada a normatização e teoria sobre para-raios de óxido metálico, a tecnologia utilizada atualmente para a proteção contra

sobretensões. As características do equipamento são apresentadas junto com suas principais características.

A função do para-raios é garantir que ocorrerá um valor de sobretensão máximo no sistema incapaz de produzir qualquer dano aos equipamentos nele instalados. O valor de corte da tensão oferecido pela proteção deve ser inferior ao nível de isolamento dos equipamentos.

Quando ocorre uma descarga atmosférica, grande parte da energia do fenômeno deve ser dissipada no para-raios. A corrente do surto deverá escorrer dele para a terra, impedindo assim a sobretensão excessiva no sistema.

A tensão nominal do para-raios é definida como o maior valor de sobretensão temporária do sistema por um intervalo de dez segundos, o chamado  $TOV_{10}$ . Esse valor mínimo de tensão nominal garante que o para-raios é capaz de dissipar toda energia necessária sem apresentar instabilidade térmica ou mudança na sua característica não linear. Caso o para-raios tenha uma tensão nominal menor que a adequada, sua vida útil será reduzida, e pode ocorrer a perda do equipamento durante uma operação, ou mesmo um dano em sua estrutura que não permita a sua continuidade de funcionamento.

Quando do superdimensionamento do para-raios, ou seja o nível de tensão maior que o limite, a consequência é que a suportabilidade física dos equipamentos será ultrapassada, existindo danos físicos aos mesmos, desrespeitando o objetivo principal desse tipo de proteção que é garantir a segurança do isolamento dos demais equipamentos. Isso se deve ao fato de que os níveis de corte de tensão do para-raios seriam grandes, permitindo sobretensões perigosas para o sistema.

As normatizações apresentam uma série de testes para comprovar a correta operação do para-raios mediante os desempenhos mínimos exigidos. Não há exigências quanto à definição do número mínimo de pontos da curva característica a serem oferecidos pelo fabricante como informação do produto. Os pontos para as maiores tensões e correntes são fundamentais para a correta

modelagem do equipamento a fim de verificar o corte de tensão oferecido, e os valores para baixa corrente são essenciais para se verificar a capacidade de absorção de energia.

O Capítulo III foi dedicado a explorar as principais modelagens de para-raios existentes. Os ramos não lineares disponíveis no ATP possuem diferenças na forma de descrever a característica não linear e no método de solução. Tais diferenças resultam em desempenhos que tornam a simulação mais ou menos onerosa e com maiores ou menores possibilidades de divergências.

Os ramos do tipo verdadeiro não linear possuem um esforço maior para sua solução quando comparados ao ramo pseudo não linear. Este por sua vez pode apresentar um erro intrínseco em seu método de solução que pode ser diminuído ao ponto de se tornar adequado, diminuindo-se o intervalo de tempo de integração e inserido uma quantidade mínima de pontos na característica do equipamento.

O ramo do tipo MOV apresenta uma possibilidade de ocorrência de divergência grande para o uso em um sistema complexo, com diversos pontos, que é o caso das simulações para verificar a proteção contra sobretensão. Quando o modelo converge para certo caso, uma simples mudança em algum parâmetro do sistema é capaz de levá-lo à divergência.

Os modelos que evidenciam o comportamento variável com a frequência do para-raios se sustentam na teoria de que quando submetidos a uma descarga com uma frente de onda rápida a tensão nos terminais do para-raios é aumentada para o mesmo módulo da corrente de descarga. Dessa forma, a maior sobretensão a qual o sistema será submetido não será aquela promovida por uma descarga da forma padrão. Como os dados dos fabricantes são para a descarga padrão, deve-se incluir esse fato na modelagem do para-raios.

O princípio de funcionamento desses modelos é o uso de dois ramos não lineares separados por uma indutância, que apresentam um comportamento que varia de acordo com a frequência do fenômeno em questão.

Observou-se que é possível se utilizar uma resistência variável pseudo não linear para representar o para-raios. Quando os tipos de resistência foram comparados, os resultados exibiram pequenas diferenças.

Na comparação dos quatro modelos a conclusão foi de que o modelo que apresenta o menor erro para o surto de frente de onda rápida é o modelo *Férrandez*. Os erros apresentados pelo modelo convencional para surtos rápidos são em média de 10%, esse aumento de tensão acontece quando se compara surtos de mesma intensidade, porém com tempos de frente de onda diferentes. Essa diferença justifica a utilização de modelos de para-raios variáveis com a frequência.

O modelo convencional resulta em valores adequados para uma simulação com surto padrão, ele não apresenta um efeito dinâmico com a frequência, ou seja, o modelo só é útil para uma frequência. Como os dados fornecidos pelos fabricantes são para o surto padrão, para obter um conjunto de pontos que representa uma curva característica do para-raios para um surto rápido, deve-se fazer uso do modelo *Férrandez*. Essa é forma de se projetar o modelo de um para-raios para uma simulação no ATP.

No Capítulo IV foram implementados os componentes do sistema elétrico a partir dos cálculos de seus parâmetros.

Já o Capítulo V fez uma verificação do potencial eólico no Brasil, destacando as principais áreas para esse tipo de produção e mostra em valores tais potenciais.

Foi realizado um estudo de caso, em que são representados todos os componentes de um sistema eólico ligado a uma subestação do sistema.

Os para-raios foram posicionados da maneira adequada e os valores de corte de tensão foram mostrados. Quando os níveis de isolamento foram ultrapassados, foram instaladas proteções nos pontos mais críticos, e continuou-se com o processo, obtendo simulações seguidas até que todos os pontos do

sistema apresentassem sobretensões menores que os isolamentos dos equipamentos, fornecendo uma margem de proteção adequada.

O método proposto para a simulação é eficaz, se mostrando rápido, pois não representa um grande esforço para o computador, e livre de divergências, além de apresentar valores satisfatórios.

No posicionamento, é uma boa prática proteger os pontos de interligação entre cabos e linhas aéreas, e proteger o primeiro e o último gerador de cada ramal do sistema, não sendo necessário instalar um para-raios para cada gerador, o que seria uma solução não viável economicamente.

Neste contexto, sugere-se o desenvolvimento de temas de pesquisa que irão contribuir para o avanço dos assuntos discutidos nesta dissertação, conforme abaixo relacionados:

- Outros estudos sobre modelagem e posicionamento de para-raios, em sistemas diferentes daquele abordado, com outros tipos de geração e outros arranjos de linhas;
- Estudos também sobre modelagem e posicionamento na distribuição de energia elétrica, em pontos mais próximos ao consumidor, visto a necessidade surgida mediante o aumento de pedidos de ressarcimento por danos elétricos pelos consumidores das concessionárias de energia;
- A concepção de um novo modelo variável com a frequência, que apresente uma forma mais simples de definição de parâmetros do que os modelos já existentes;
- A análise da capacidade de absorção de energia dos para-raios frente a descargas atmosféricas;
- E a análise da influência da resistência de terra para o sistema quando submetido a surtos atmosféricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministério de Minas e Energia – MME – “*Nota técnica PRE 01/2009 - r0 - Proposta para a Expansão da Geração Eólica no Brasil*”, Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/documents/leil%C3%A3o%20de%20e%C3%B3lica%202009/nt-%20eolica%20epe-pre01-2009-r1.pdf>. Acesso em: 25/01/2014.
- [2] Lira, G. R. S.; – “*Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com base na Medição da Corrente de Fuga Total*”, Tese de Doutorado — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, julho 2012.
- [3] IEC 60099-4 – “*Surge Arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*” – edition 2.2 – 2009-05 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 2009.
- [4] IEC 60099-5 – “*Surge Arresters – Part 5: Selection and application recommendations*” – edition 1.1 – 2009-05 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 1996.
- [5] HILEMAN, A. R.; – “*Insulation Coordination for Power Systems*” – first edition - CRC Editora, 1999.
- [6] IEC 71-1 – “*Insulation Co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*” – seventh edition – 1993-12 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 1993.
- [7] IEC 71-2 – “*Insulation Co-ordination – Part 1: guide for application*” – seventh edition – 1993-12 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 1993.

- [8] *IEEE Std C62-11 – “Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits”* – IEEE Power and Energy Society – New York – 2012.
  
- [9] FRANCO, J. P.; FILHO, J. P.; SILVA, D. A.; BATISTELA, N. J. – *“Análise do comportamento dos para-raios de óxido de zinco sem centelhadores frente às sobretensões temporárias em função da quantidade de energia absorvida”* – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011.
  
- [10] *IEEE Std C62-22 – “Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems”* – IEEE Power and Energy Society – New York – 2009.
  
- [11] BAYADI, A; HARID, N; ZEHR, K; BELKIRAT, S – *“Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients”* - International conference on Power System Transients – IPST 2003 – 28 September – October 2 2003.
  
- [12] *IEEE Working Group 3.4.11 – “Modeling of metal oxide surge arresters”* - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, n° 1, pp. 302-309, 1992.
  
- [13] WANDERLEY, S; MIGUEL, P – *“Comparação dos modelos de para-raios utilizados para simulação no ATP”* – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011.
  
- [14] PINCETI, P; GIANNETTONI, M – *“A simplified model for zinc oxide surge arresters”* - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, n° 2, pp. 393-398, 1999.
  
- [15] MEISTER, A.; - *“Modelagem de varistores de óxido de zinco para estudos de coordenação de isolamento”*, Dissertação de Mestrado — Universidade de Brasília, Brasília, dezembro 2005.

- [16] FERNÁNDEZ, F; DIAZ, R.; – *“Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations”* – International conference on Power System Transients – IPST’01 – 20 – 24 June 2001.
  
- [17] NEIVA, S.; – *“Avaliação do efeito da distância de separação entre para-raios e equipamentos protegidos”* – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011.
  
- [18] RULE BOOK- Alternative Transients Program (ATP) - *“Branch Cards to model single phase nonlinear elements”*, RULE BOOK, RB – 05 A, Capítulo: V – A,E,G, 2002.
  
- [19] Técnicas de teste em alta tensão – IEC 60060-1 – *“High-Voltage test techniques– Part 1: general definitions and test requirements”* – second edition – 1989-11 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 1989.
  
- [20] MOTA, W. S.; FORMIGA, D.; BARROS, L. S.; GUIDO, R.; – *“Estudos elétricos em regime permanente e dinâmico para conexão de centrais eólicas no sistema Saelpa”* – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – VI SBQEE 2005 – 21 a 24 de agosto de 2005.
  
- [21] RAMOS, A. J. P.; TAVARES, C. L.; SENA, D. J. G. – *“Impacto da geração distribuída eólica nos sistemas de distribuição e transmissão”* – Revista O Setor Elétrico – Edição 75, Fontes Renováveis Alternativas, capítulo 3, abril de 2012.
  
- [22] SIMENS AG; Catálogo: *“Para-raios de média tensão tipo 3EK7 com invólucro em silicone”*, Alemanha.
  
- [23] Centro de Pesquisas de Energia elétrica – CEPEL – *“Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”* – 1ª Edição - Cepel Editora, Rio de Janeiro, RJ, 2001.



# ANEXO

## MÓDULOS IMPLEMENTADOS NO ATP

### I – MÓDULO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR AEROGERADOR NO ATPDRAW

KARD 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8 10 10 10 11 11 11 12 12 12

KARG -1 -4 -2 -5 -3 -6 1 -4 1 -5 1 -6 2 3 -1 2 4 -2 2 5 -3

KBEG 3 9 3 9 3 9 9 3 9 3 9 3 11 31 3 11 31 3 11 31 3

KEND 8 14 8 14 8 14 13 8 13 8 13 8 20 40 8 20 40 8 20 40 8

KTEX 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* "AEROGERADOR" \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

\$ERASE

/BRANCH

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

FONTEASIDA A	.5051	0
--------------	-------	---

FONTEBSIDA B	.5051	0
--------------	-------	---

FONTECSIDA C	.5051	0
--------------	-------	---

SAIDAAOUT__A	.00054.00239	0
--------------	--------------	---

SAIDABOUT__B	.00054.00239	0
--------------	--------------	---

```

SAIDACOUT__C      .00054.00239      0

/SOURCE

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14FONTEA 0AMPLITUDE_ 60.FASEA_____ -1. 1.
14FONTEB 0AMPLITUDE_ 60.FASEB_____ -1. 1.
14FONTEC 0AMPLITUDE_ 60.FASEC_____ -1. 1.

$EOF User-supplied header cards follow. 23-Jun-14 17:01:18

ARG OUT__,AMPLITUDE_,FASEA_____,FASEB_____,FASEC_____

NUM AMPLITUDE_,FASEA_____,FASEB_____,FASEC_____

DUM FONTEA,FONTEB,FONTEC,SAIDAA,SAIDAB,SAIDAC

```

## II – MÓDULO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR LINHA DE TRANSMISSÃO NO ATPDRAW

```

KARD 4 4 4 5 5 5 6 6 6
KARG 1 2 3 1 2 3 1 2 3
KBEG 3 9 64 3 9 64 3 9 64
KEND 7 13 74 7 13 74 7 13 74
KTEX 1 1 0 1 1 0 1 1 0

C *****

C ***** Linha de Transmissão *****

C *****

C *****

$ERASE

/BRANCH

$VINTAGE, 1

-1IN__AOUT__A      2.62276E-01 1.06151E+03 2.17461E+05-COMPRIMENTO 1 3
-2IN__BOUT__B      9.09832E-02 2.36412E+02 2.90483E+05-COMPRIMENTO 1 3
-3IN__COUT__C      9.09869E-02 3.13279E+02 2.92609E+05-COMPRIMENTO 1 3

$VINTAGE, 0

```

0.57218012 0.61904011 0.53275563  
 -0.00371301 0.00406642 -0.00472352  
 0.50197553 -0.77083559 0.27195237  
 0.02388431 0.00355695 -0.00404937  
 0.64779911 0.15017374 -0.80134042  
 -0.02006349 0.00452809 -0.00530814

\$EOF User-supplied header cards follow. 24-Jun-14 10:02:00

ARG IN\_\_\_,OUT\_\_\_,COMPRIMENTO

NUM COMPRIMENTO

DUM

### III — MÓDULO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR CABO SUBTERRÂNEO NO ATPDRAW

ARD 4 4 4 4 5 5 5 5 6 6 6 6 7 7 8 8 9 9 10 10 11 11 12 12  
 KARG 1 2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 4 1 5 1 5 1 5 2 5 2 5 2 5  
 KBEG 3 9 32 49 3 9 32 49 3 9 32 49 3 62 3 62 3 62 3 62 3 62 3 62  
 KEND 7 13 42 58 7 13 42 58 7 13 42 58 7 73 7 73 7 73 7 73 7 73 7 73  
 KTEX 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0  
 C \*\*\*\*\*  
 C \*\*\*\*\* "Cabos Subterrâneos" \*\*\*\*\*  
 C \*\*\*\*\* Circuito  $\pi$  \*\*\*\*\*  
 C Modelo para criar módulos  
 C \*\*\*\*\*  
 \$ERASE  
 /BRANCH  
 \$VINTAGE,1  
 C \*\*\*\*\*  
 C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >  
 IN\_\_\_AOUT\_\_\_A RESISTENCIA INDUTANCIA  
 IN\_\_\_BOUT\_\_\_B RESISTENCIA INDUTANCIA  
 IN\_\_\_COUT\_\_\_C RESISTENCIA INDUTANCIA  
 IN\_\_\_A CAPACITANCIA  
 IN\_\_\_B CAPACITANCIA  
 IN\_\_\_C CAPACITANCIA  
 OUT\_\_\_A CAPACITANCIA  
 OUT\_\_\_B CAPACITANCIA  
 OUT\_\_\_C CAPACITANCIA  
 C \*\*\*\*\*  
 \$VINTAGE,0  
 \$EOF User-supplied header cards follow. 22-Jun-14 11:45:43  
 ARG IN\_\_\_,OUT\_\_\_,RESISTENCIA,INDUTANCIA,CAPACITANCIA  
 NUM RESISTENCIA,INDUTANCIA,CAPACITANCIA  
 DUM

## IV – MÓDULO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR PARA-RAIOS DE 36kV NO ATPDRAW

```

KARD 5 5 16 16 16 16 17 17 17 17
KARG 1 2 1 1 2 2 1 1 2 2
KBEG 3 9 3 15 9 21 3 15 9 21
KEND 7 14 7 19 14 26 7 19 14 26
KTEX 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
$ERASE
C Comentarios no módulo
C detalhes de especificação
c *****
C ***** "PARA-RAIOS TIPO 99 36kV" *****
C ***** MODULO TRIFASICO *****
C *****
$ERASE
/BRANCH
99PRIN_APROUT_ 0
125. 67919.
500. 72799.
1500. 86048.
3.E3 91408.
5.E3 96766.
1.E4 104960.
1.5E4 111900.
2.E4 118830.
2.5E4 124820.
9999
99PRIN_BPROUT_PRIN_APROUT_ 0
99PRIN_CPROUT_PRIN_APROUT_ 0
C término da template
$EOF User-supplied header cards follow. 20-Oct-14 01:28:05
ARG PRIN_, PROUT_

```

## V – MÓDULO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR PARA-RAIOS DE 42kV NO ATPDRAW

```

KARD 5 5 16 16 16 16 17 17 17 17
KARG 1 2 1 1 2 2 1 1 2 2
KBEG 3 9 3 15 9 21 3 15 9 21
KEND 7 14 7 19 14 26 7 19 14 26
KTEX 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
$ERASE
C Comentarios no módulo

```

C detalhes de especificação

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\* "PARA-RAIOS TIPO 99 42kV" \*\*\*\*\*

C MODULO TRIFASICO

C \*\*\*\*\*

\$ERASE

/BRANCH

99PRIN\_APROUT\_ 0

125. 79348.

500. 85099.

1500. 100870.

3.E3 107150.

5.E3 113440.

1.E4 123040.

1.5E4 131170.

2.E4 139300.

2.5E4 146320.

9999

99PRIN\_BPROUT\_PRIN\_APROUT\_ 0

99PRIN\_CPROUT\_PRIN\_APROUT\_ 0

C término da template

\$EOF User-supplied header cards follow. 20-Oct-14 01:28:05

ARG PRIN\_, PROUT\_