



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS TRINDADE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lívia Fonseca Ribeiro

**Metodologia de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas  
em redes de distribuição a partir dos sinais trifásicos de tensão da saída da  
subestação**

Florianópolis  
2020

Lívia Fonseca Ribeiro

**Metodologia de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas em redes de distribuição a partir dos sinais trifásicos de tensão da saída da subestação**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Miguel Moreto, Dr.

Florianópolis  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ribeiro, Lívia Fonseca Ribeiro

Metodologia de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas em redes de distribuição a partir dos sinais trifásicos de tensão da saída da subestação / Lívia Fonseca Ribeiro Ribeiro ; orientador, Miguel Moreto Moreto, 2020.

118 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Proteção de Sistemas Elétricos. 3. Sistemas de Distribuição de Energia. 4. Detecção de faltas. 5. Descargas atmosféricas. I. Moreto, Miguel Moreto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Lívia Fonseca Ribeiro

**Metodologia de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas em redes de distribuição a partir dos sinais trifásicos de tensão da saída da subestação**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Fernando Buzzulini Prioste, Dr.  
Universidade do Estado de Santa Catarina - Joinville

Prof. Antônio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

---

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.  
Coordenador do Programa

---

Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 29 de maio de 2020.



Aos meus amados pais, Helena e Dirceu.

## **AGRADECIMENTOS**

Rendo a minha sincera gratidão a Deus, por me guiar, cuidar e acolher a todo momento.

Aos meus pais, Helena e Dirceu, aos meus irmãos Ana Luiza e Danilo, e aos demais familiares, pelo apoio e amor incondicional desde o início da minha caminhada.

Ao professor e orientador Miguel Moreto por aceitar essa missão e fazer dela uma parceria enriquecedora, a partir da partilha do seu conhecimento e envolvimento em todas as etapas deste trabalho.

Aos parceiros do projeto CS SIMFAL (P&D ANEEL CELESC nº 05697-0217/2017), Arlan Bettiol, Douglas Figueiredo, Luciano Brame e Igor Khairalla, pela disponibilidade, comprometimento e confiança no meu trabalho.

A todos os professores e funcionários da UFSC pela contribuição para a minha formação, elaboração desta dissertação e rotina na universidade por meio do exercício de seus ofícios.

As amizades firmadas dentro da universidade na minha passagem pelo Labplan e Labspot, que muito agregaram ao meu cotidiano, principalmente a Janaína Esmeraldo e o Yago Lafourcade, que ingressaram no mestrado no mesmo período, pela parceria que contribuiu grandemente para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

A Paróquia Santíssima Trindade, a Pastoral da Solidariedade, a Juventude Franciscana e a Fazenda da Esperança, que se tornaram minhas 'segundas casas', pela acolhida, reciprocidade e ensinamentos, que cooperaram para que eu permanecesse centrada nos meus objetivos.

*“Irmãos, começemos, pois até agora  
pouco ou nada fizemos.  
(São Francisco de Assis)*

## RESUMO

Este trabalho aborda os efeitos da ocorrência de faltas de alta impedância e a incidência de descargas atmosféricas em sistemas elétricos de distribuição. Estes eventos produzem transitórios no sinal de tensão com características de amplitude e frequência distintas entre si. Essas características impõem desafios aos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente e, de maneira geral, não provocam registros oscilográficos capazes de auxiliar seus estudos. Neste trabalho, são propostas duas modelagens e metodologias de detecção específicas a cada um deles. Ambas as metodologias realizam o processamento dos sinais trifásicos de tensão provenientes do transformador de potencial na saída da subestação. Primeiramente, a transformação de Park e transformada de Wavelet são empregadas a fim de promover a agregação dos sinais das fases e ressaltar as componentes de alta frequência dos transitórios por meio da obtenção dos coeficientes de detalhe das componentes de eixo direto e zero. Na segunda etapa, os sinais são avaliados por um algoritmo adaptativo responsável por identificar a ocorrência de transitórios considerando os possíveis ruídos observados na operação em regime permanente do sistema. Por fim, blocos classificadores com limiares pré-definidos para a detecção de faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas realizam a extração de características específicas que permitem a verificação da ocorrência destes eventos. Os resultados obtidos com as metodologias propostas a partir de dados de simulação indicam a correta detecção de falta de alta impedância e de descargas atmosféricas, distinguindo com precisão os demais transitórios simulados, como as faltas de baixa impedância, abertura e fechamento de banco de capacitores e energização e desenergização de ramal.

**Palavras-chave:** Sistemas de distribuição de energia. Detecção de faltas de alta impedância. Detecção de descargas atmosféricas. Transformação de Park. Transformada Wavelet.

## ABSTRACT

This work approaches the effects of high impedance faults occurrence and the incidence of lightning strikes in electrical distribution systems. These events produce transients in the voltage signal with different amplitude and frequency characteristics. These characteristics impose challenges to conventional protection systems based on overcurrent and, in general, do not cause oscillographic records capable of assisting their studies. In this work, two modeling and detection methodologies specific to each one are proposed. Both methodologies perform the processing of three-phase voltage signals from the potential transformer at the substation output. First of all, the Park and Wavelet transforms are used in order to promote the aggregation of the phases signals and to highlight the high-frequency components of the transients by obtaining the detail coefficients of the direct and zero axis components. In the second stage, the signals are evaluated by an adaptive algorithm responsible for identifying the occurrence of transients considering the possible noise observed in the system's steady-state operation. Finally, classifier blocks with pre-defined thresholds for detecting high impedance faults and lightning strikes perform the extraction of specific characteristics that allow the verification of the occurrence of these events. The results obtained with the proposed methodologies from simulation data indicate the correct detection of high impedance faults and lightning discharges, accurately distinguishing the other simulated transients, such as low impedance faults, opening, and closing capacitor banks and energizing and de-energizing of a branch.

**Keywords:** Electric power distribution systems. High impedance fault detection. Lightning strikes detection. Park's transform. Wavelet's Transform.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Característica teórica de tensão-corrente de um falta de alta impedância. . . . .	20
Figura 2 – Comportamento da forma de onda de corrente de uma falta de alta impedância. . . . .	21
Figura 3 – Característica $V_{xl}$ do arco elétrico obtida experimentalmente. . . . .	21
Figura 4 – Forma de onda de corrente de uma FAI experimentada. . . . .	22
Figura 5 – Modelo de faltas de alta impedância por meio diodos antiparalelos. . . . .	24
Figura 6 – Corrente harmônica de arco; (a) corrente de segunda harmônica; (b) corrente de terceira harmônica. . . . .	24
Figura 7 – Modelo de faltas de alta impedância por meio de resistências séries controladas. . . . .	25
Figura 8 – Modelo de faltas de alta impedância de múltiplos arcos elétricos. . . . .	26
Figura 9 – Tipos de descargas atmosféricas quanto a origem e destino do canal ionizado. . . . .	34
Figura 10 – Mapa brasileiro de densidade de descargas atmosféricas. . . . .	35
Figura 11 – Representação da dinâmica de ocorrência de uma descarga atmosférica nuvem-solo. . . . .	36
Figura 12 – Classificação das descargas atmosféricas. . . . .	37
Figura 13 – Forma de onda típica de uma descarga atmosférica de retorno negativa. . . . .	38
Figura 14 – Característica $V \times I$ dos varistores SiC e ZnO. . . . .	41
Figura 15 – Modelo de protetor anti-surto do IEEE W. G. 3.4.11. . . . .	42
Figura 16 – Modelo de Pinceti . . . . .	45
Figura 17 – Modelo de Fernandez . . . . .	46
Figura 18 – Curvas para seleção da indutância para a) válvula de bloqueio de 5 kA e b) válvula de bloqueio de 10 kA. valve block. . . . .	47
Figura 19 – Espectro de frequência do campo elétrico das descargas atmosféricas. . . . .	48
Figura 20 – Diagrama de blocos do sistema de detecção proposto por (BERNARDI <i>et al.</i> , 2007). . . . .	51
Figura 21 – Circuito elétrico do bloco de detecção de evento. . . . .	51
Figura 22 – Diagrama esquemático do alimentador teste IEEE 34 barras. . . . .	55
Figura 23 – Parte do alimentador de distribuição simulado em ATPDraw. . . . .	56
Figura 24 – Forma de onda da corrente da falta de alta impedância simulada. . . . .	57
Figura 25 – Curva V-I da falta de alta impedância simulada. . . . .	58
Figura 26 – Bloco do modelo de linha da rotina LCC. . . . .	58
Figura 27 – Parametrização do modelo da rotina LCC. . . . .	59
Figura 28 – Modelo de representação do sistema de aterramento. . . . .	61

Figura 29 – Modelo do transformador abaixador. . . . .	62
Figura 30 – Modelo de transformador de potencial para transitórios causados por descargas atmosféricas. . . . .	62
Figura 31 – Modelo de protetor anti-surto simulado. . . . .	63
Figura 32 – Atributos do protetor anti-surto. . . . .	64
Figura 33 – Modelo do isolador. . . . .	65
Figura 34 – Atributos da chave controlada por tensão do modelo de isoladores. . . . .	66
Figura 35 – Modelo elétrico do poste, conexão e aterramento. . . . .	67
Figura 36 – Modelo de descargas atmosféricas. . . . .	68
Figura 37 – Curva de corrente $1,2 \times 50\mu s$ da fonte Heidler. . . . .	68
Figura 38 – Configuração da fonte Heidler para forma de onda de corrente de $1,2 \times 50\mu s$ com amplitude de 10 kA. . . . .	69
Figura 39 – Fluxograma dos esquemas de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas. . . . .	71
Figura 40 – Arquitetura da transformada wavelet discreta a partir da decomposição multiresolução. . . . .	74
Figura 41 – Formas de onda das Wavelets da família Daubechies. . . . .	75
Figura 42 – Diagrama do alimentador teste IEEE 34 barras com representação dos cenários simulados. . . . .	80
Figura 43 – Comparativo da energia das componentes de eixo direto e zero dos cenários de falta simulados. . . . .	83
Figura 44 – Tensões trifásicas medidas na simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848. . . . .	84
Figura 45 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848. . . . .	85
Figura 46 – Coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero da simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848. . . . .	86
Figura 47 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero das tensões e energia da simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848. . . . .	86
Figura 48 – Tensões trifásicas medidas na simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848. . . . .	87
Figura 49 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848. . . . .	88
Figura 50 – Coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero da simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848. . . . .	89

Figura 51 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero das tensões e energia da simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848. . . . .	89
Figura 52 – Tensões trifásicas medidas na simulação da energização do ramal 818. . . . .	90
Figura 53 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da energização do ramal 818.	91
Figura 54 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da energização do ramal 818. . . . .	91
Figura 55 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da energização do ramal 818. . . . .	92
Figura 56 – Tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização do ramal 818. . . . .	93
Figura 57 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização do ramal 818. . . . .	94
Figura 58 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização do ramal 818. . . . .	94
Figura 59 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização do ramal 818. . . . .	95
Figura 60 – Tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores. . . . .	96
Figura 61 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores. . . . .	97
Figura 62 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores. . . . .	98
Figura 63 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores. . .	99
Figura 64 – Tensões trifásicas medidas na simulação do energização de banco de capacitores. . . . .	100



Figura 65 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação do energização de banco de capacitores. . . . .	101
Figura 66 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação do energização de banco de capacitores. . . . .	101
Figura 67 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação do energização de banco de capacitores. . . . .	102
Figura 68 – Tensões trifásicas medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848. . . . .	102
Figura 69 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848. . . . .	103
Figura 70 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848. . . . .	104
Figura 71 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848. . . . .	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do modelo de múltiplos arcos elétricos para cinco estados de faltas de alta impedância. . . . .	27
Tabela 2 – Distribuição estatística da corrente de descargas atmosféricas no Brasil. . . . .	37
Tabela 3 – Descrição dos parâmetros da forma de onda de corrente apresentada na Figura 13. . . . .	38
Tabela 4 – Relação entre tensão e corrente de modelo dependente da frequência de para-raios. . . . .	44
Tabela 5 – Radiações associadas às descargas atmosféricas. . . . .	49
Tabela 6 – Características das redes terrestres de detecção de descargas atmosféricas. . . . .	49
Tabela 7 – Parâmetros das configurações de linha . . . . .	59
Tabela 8 – Seguintos das linhas de distribuição. . . . .	60
Tabela 9 – Dados do transformador abaixador. . . . .	61
Tabela 10 – Característica $V \times I$ dos varistores de óxido metálico. . . . .	65
Tabela 11 – Sumário dos cenários de teste simulados. . . . .	81
Tabela 12 – Sumário dos resultados das metodologias de detecção. . . . .	105

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>17</b>
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
<b>2</b>	<b>FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA</b>	<b>18</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	19
2.2	MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	22
<b>2.2.1</b>	<b>Diodos antiparalelos</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Resistências séries controladas</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Modelo de múltiplos arcos elétricos</b>	<b>25</b>
2.3	METODOLOGIAS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	27
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
<b>3</b>	<b>DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>33</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	34
3.2	MODELOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	39
<b>3.2.1</b>	<b>Surge</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Heidler</b>	<b>40</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Standler</b>	<b>40</b>
3.3	CARACTERÍSTICAS DOS PROTETORES ANTI-SURTOS	40
3.4	MODELOS DE PROTETORES ANTI-SURTOS	42
<b>3.4.1</b>	<b>Modelo IEEE W. G. 3.4.11</b>	<b>42</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Modelo de Pinceti e Giannettoni</b>	<b>44</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Modelo de Fernández-Díaz</b>	<b>45</b>
3.5	METODOLOGIAS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	47
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DOS SISTEMAS DE TESTE</b>	<b>54</b>
4.1	ESTUDO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	54
4.2	MODELO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	55
4.3	ESTUDO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	56
<b>4.3.1</b>	<b>Linha de distribuição</b>	<b>56</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Aterramento</b>	<b>60</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Transformadores</b>	<b>61</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Protetor anti-surto</b>	<b>63</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Isoladores</b>	<b>65</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Postes</b>	<b>66</b>
4.4	MODELO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	68

4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	69
<b>5</b>	<b>METODOLOGIAS DE DETECÇÃO PROPOSTAS . . . . .</b>	<b>71</b>
5.1	FILTRAGEM . . . . .	71
<b>5.1.1</b>	<b>Transformação de Park . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Transformada Wavelet Discreta . . . . .</b>	<b>72</b>
5.2	DETECÇÃO DE TRANSITÓRIO . . . . .	76
<b>5.2.1</b>	<b>Cálculo da Energia . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Limite adaptativo . . . . .</b>	<b>76</b>
5.3	CLASSIFICAÇÃO DO TRANSITÓRIO . . . . .	77
<b>5.3.1</b>	<b>Classificação de faltas de alta impedância . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Classificação de descargas atmosféricas . . . . .</b>	<b>78</b>
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	79
<b>6</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>80</b>
6.1	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA . . . . .	84
6.2	FALTAS DE BAIXA IMPEDÂNCIA . . . . .	87
6.3	ENERGIZAÇÃO DE RAMAL . . . . .	90
6.4	DESENERGIZAÇÃO DE RAMAL . . . . .	93
6.5	DESENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES . . . . .	96
6.6	ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES . . . . .	98
6.7	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS . . . . .	100
6.8	SUMÁRIO DOS RESULTADOS . . . . .	105
6.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	106
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>107</b>
7.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	108
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil são grandiosos, tendo em vista que o país tem dimensões continentais e o acesso da população a eletricidade é quase universal. Além disso, esses sistemas são na sua maioria aéreos. Esse conjunto de características resultam em maior vulnerabilidade dessas redes a diversos tipos de faltas e ocorrências que podem gerar interrupções no fornecimento de energia. Essas faltas e ocorrências são causadas principalmente por fenômenos naturais, como ventos, tempestades e descargas atmosféricas, como também por surtos de manobras, curtos-circuitos, contato com árvores ou animais, atos de vandalismo, dentre outras.

Os sistemas de proteção tem um papel fundamental na operação dos sistemas elétricos de distribuição e na qualidade do fornecimento de energia garantindo a sua confiabilidade e segurança. Em geral, ele é composto por equipamentos convencionais cuja atuação é baseada em fenômenos de sobrecorrente. As características de alguns fenômenos acabam não sensibilizando estes equipamentos, não gerando registros oscilográficos nem a atuação dos dispositivos de proteção e, conseqüentemente, não extinguindo o defeito e constituindo, portanto, um gargalo na proteção de sistemas elétricos.

As faltas de alta impedância e as descargas atmosféricas são exemplos de fenômenos que assolam os sistemas de distribuição e reiteradamente não são detectados pela proteção e nem devidamente identificados pelas concessionárias. Sob o ponto de vista de transitórios eletromagnéticos, suas características podem ser consideradas duais. As faltas de alta impedância possuem transitórios mais lentos, baixa amplitude de corrente e frequência. A sua detecção é dificultada pelo seu perfil de baixa amplitude da corrente de falta. As descargas atmosféricas possuem transitórios extremamente rápidos, sendo o maior dificultador da sua detecção, alta amplitude de corrente e frequência. No entanto, sob o ponto de vista da proteção de sistemas de distribuição, acabam constituindo um problema comum, a ineficiência da detecção.

As descargas atmosféricas por vezes resultam no rompimento de condutores e, como consequência, provocam uma falta de alta impedância, constituindo assim a sua maior causa (PENTEADO NETO, 2005). Ambas podem provocar o desabastecimento dos consumidores, afetar os índices de qualidade de energia, ferir e até levar pessoas e animais a morte e trazer grandes prejuízos financeiros quando acometem os sistemas de distribuição. Portanto, o aprimoramento dos sistemas de proteção para que sejam efetivos na detecção e extinção das consequências que esses fenômenos podem provocar beneficia a sociedade como um todo e ainda permite que as concessionárias pautem as suas justificativas junto aos órgãos de regulação competentes.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento e implementação de metodologias de detecção de faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas em sistemas de distribuição a partir das medições de tensão no secundário do transformador de potencial na saída da subestação.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo principal já descrito, esta dissertação também contemplará a modelagem adequada das faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas, a modelagem de dois sistemas de distribuição de teste para o estudo de cada fenômeno em um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos e a avaliação das metodologias de detecção propostas a partir dos resultados obtidos.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 se destina a contextualização da definição, caracterização, modelagem e detecção de faltas de alta impedância no sistema elétrico de distribuição. As descargas atmosféricas são definidas e caracterizadas no capítulo 3. Além disso, são apresentados os modelos de simulação deste fenômeno e dos protetores anti-surto, bem como um referencial teórico da detecção deste evento em sistemas de distribuição. O capítulo 4 dedica-se a apresentação dos sistemas de teste modelados para a simulação das faltas de alta impedância e das descargas atmosféricas. O capítulo 5 expõe as metodologias de detecção propostas para cada tipo de falta. O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos da aplicação dos algoritmos de detecção desenvolvidos para os sinais extraídos da simulação dos sistemas de teste modelados. Por fim, o capítulo 7 discorre sobre as conclusões do trabalho, bem como as proposições para trabalhos futuros.

## 2 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As Faltas de Alta Impedância (FAI), no âmbito das redes de distribuição de energia, são o resultado do contato de um condutor energizado e uma superfície de alta resistividade presente nos seus arredores, sendo exemplos dessas superfícies: galhos de árvores, asfalto, grama, cascalho, dentre outros. Geralmente, o contato se dá em função do rompimento de um ou mais condutores. No Brasil, as causas principais de rompimento de condutores são as descargas atmosféricas, a corrosão atmosférica e o contato com árvores, enumeradas na ordem de maior incidência (PENTEADO NETO, 2005).

A principal característica das FAI é a baixa magnitude da corrente. Deste modo, a corrente de uma falta de alta impedância acaba apresentando um comportamento similar ao de oscilações transitórias corriqueiras do sistema, como as provocadas pela inserção e retirada de cargas, chaveamento de banco de capacitores ou se confunde com desbalanceamento natural do sistema. Devido a esse fato, o sistema convencional de proteção, constituído basicamente por relés de sobrecorrente, relés de corrente de neutro e fusíveis, pode não ser sensibilizado. Assim, os equipamentos de proteção não são capazes de detectar este tipo de falta e, conseqüentemente, o evento não é extinto e nem registrado (SANTOS; SOUZA *et al.*, 2013).

As FAI acabam permanecendo no sistema devido a não atuação do sistema de proteção. Essa situação pode provocar o desabastecimento de consumidores por um longo período e, por conseqüência, afetar negativamente os indicadores de continuidade do sistema elétrico. Além disso, a permanência das FAI constituem um cenário de potencial elevado para a morte humana ou animal por meio de choque elétrico e/ou incêndio. As FAI são recorrentemente uma das maiores causas de óbito por eletricidade no Brasil (ABRACOPEL, 2018). Verifica-se, portanto, a necessidade de associar técnicas alternativas de proteção ao sistema existente que sejam capazes de realizar a detecção deste tipo de falta e possibilitar a sua extinção de maneira mais rápida e eficiente.

Ao longo dos anos, pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de caracterizar as FAI e propor metodologias eficazes de identificação deste fenômeno. Para isso, é de extrema importância que as metodologias sejam desenvolvidas com base em um modelo de falta de alta impedância que represente fielmente a assinatura da corrente de falta, garantindo a precisão e confiabilidade do método. As concessionárias de energia são as maiores interessadas nestas pesquisas, bem como a população em geral que também se beneficia com a solução do problema.

## 2.1 CARACTERÍSTICAS DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As FAI apresentam características complexas decorrentes do arco elétrico observado no ponto de falta entre o condutor energizado e a superfície de contato. Essas devem ser levadas em conta na modelagem do evento, contudo, as formas de onda de tensão e corrente das FAI são raramente registradas pelo sistema de proteção convencional. Sendo assim, muitos estudos foram desenvolvidos a partir de experimentos conduzidos em campo e em laboratório para simular a ocorrência das FAI e realizar a identificação das suas características. Dentre eles, destacam-se os estudos de Jeerings e Linders (1989), Emanuel *et al.* (1990), Sultan, Swift e Fedirchuk (1994) e Nam *et al.* (2001).

No trabalho de Jeerings e Linders (1989) discute-se a não linearidade da resistência do solo como uma nova abordagem de grande utilidade para o estudo de FAI. Para isso, o estudo apresenta uma análise detalhada do contato de um condutor energizado e o solo. Nessa análise mostra-se que, assim como o arco formado pela FAI, o solo também possui característica não-linear. Os resultados apresentados pelo estudo mostram que há o surgimento de harmônicas na corrente de falta. Além disso, as diferenças das características dos arcos elétricos em sistemas de transmissão e distribuição são discutidas. Conclui-se que, os arcos têm maiores dimensões e possuem correntes elevadas nos sistemas de transmissão, o que causa alta vaporização do condutor e contribui para que a resistência de arco seja baixa. Já em sistemas de distribuição, mais propício para a ocorrência de FAI, o contrário acontece, os arcos são menores, bem como as correntes de falta, havendo baixa vaporização e, conseqüentemente, o arco possui maior caráter resistivo.

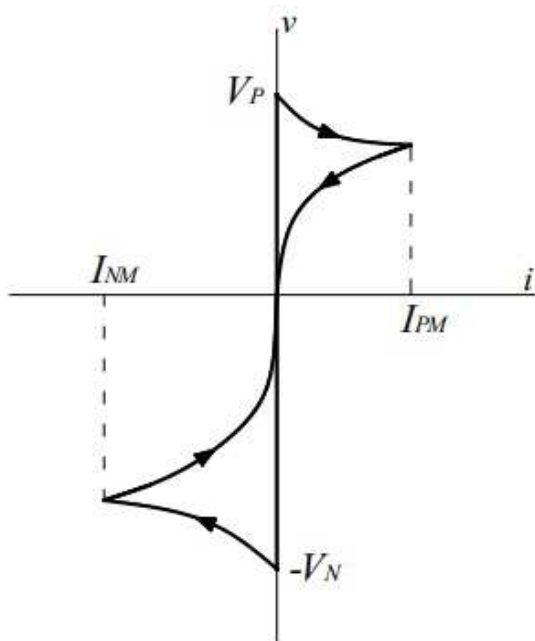
No estudo conduzido por Emanuel *et al.* (1990) busca-se compreender, através da análise espectral da corrente de falta, as características do arco elétrico formado em decorrência de uma FAI em um alimentador. O objetivo do trabalho é identificar se a análise do espectro de frequência do sinal de corrente propicia a detecção de FAI em que há a presença de arco elétrico. Para isso, as correntes de neutro e linha do sistema sob condição normal e sob falta são medidas e comparadas. As harmônicas de segunda e terceira ordem apresentam características interessantes. No entanto, os resultados mostram que o monitoramento da segunda harmônica na corrente de neutro possibilita a detecção de arcos de menores amplitudes.

A característica tensão-corrente teórica de uma FAI, apresentada por Emanuel *et al.* (1990) conforme Figura 1, ressalta a não linearidade existente entre elas. Observa-se que há tensões de rupturas no ciclo positivo e negativo, a partir das quais a corrente começa a fluir. Além disso, nota-se que ambas passam por zero ao mesmo tempo, demonstrando o caráter resistivo das FAI.

Os dados de corrente de uma FAI experimental conduzida em situação controlada em um laboratório são coletados e analisados no trabalho de Sultan, Swift



Figura 1 – Característica teórica de tensão-corrente de uma falta de alta impedância.



Fonte – Emanuel *et al.* (1990).

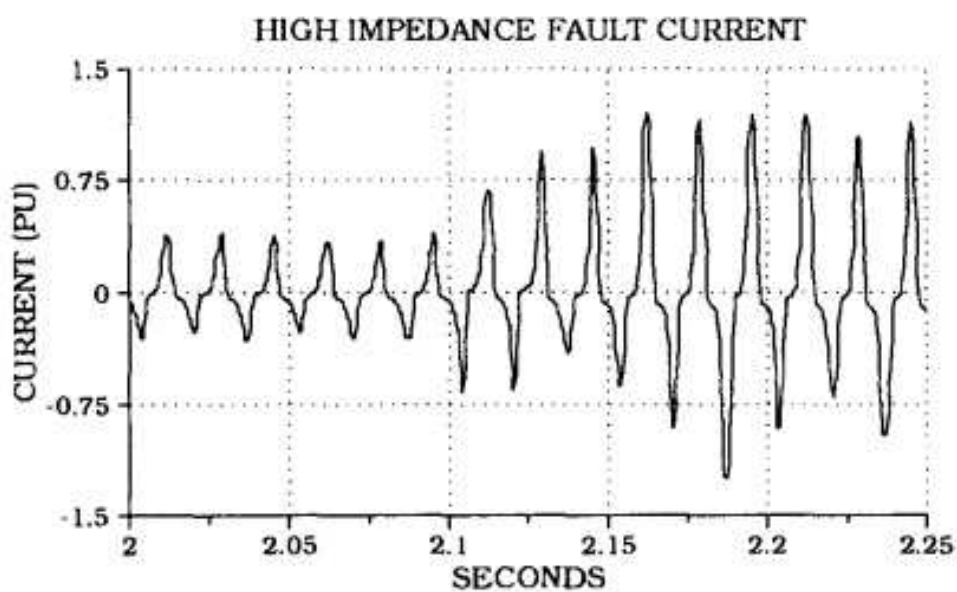
e Fedirchuk (1994), cujo objetivo é o desenvolvimento de um algoritmo de detecção de FAI condutor/solo mostrando que o comportamento da corrente de uma FAI é dependente das características da superfície em contato com o condutor, de modo que solos secos contribuem para uma assimetria mais acentuada da corrente de falta se comparado aos solos úmidos. A forma de onda da corrente de falta de um condutor caído em solo seco apresentou forte assimetria, uma vez que, os semiciclos positivo e negativo tiveram comportamentos bastante distintos entre si, conforme mostrado na Figura 2.

A característica tensão-corrente do arco formado pela FAI foi constatada como sendo não linear, conforme Figura 3. Os arcos elétricos decorrentes deste tipo de falta possuem comprimento curto, baixa magnitude de corrente e podem apresentar longa duração.

Em Nam *et al.* (2001), o objetivo principal é o desenvolvimento de um modelo para FAI em sistemas de distribuição, para isso são utilizados dados de experimentos realizados pela Korea Electric Power Corporation. As principais características observadas no ponto de falta dos experimentos analisados são:

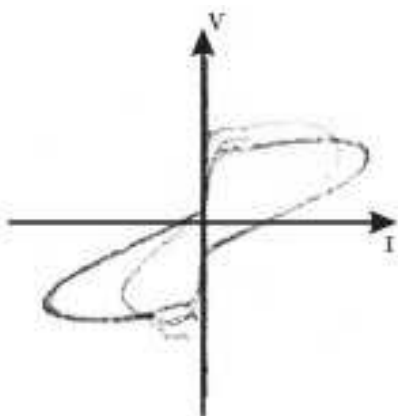
- *Buildup*: crescimento gradual da corrente de falta ao seu valor máximo em algumas dezenas de ciclos.
- *Shoulder*: o *buildup* cessa por alguns ciclos.

Figura 2 – Comportamento da forma de onda de corrente de uma falta de alta impedância.



Fonte – Sultan, Swift e Fedirchuk (1994).

Figura 3 – Característica  $V_{xl}$  do arco elétrico obtida experimentalmente.



Fonte – Sultan, Swift e Fedirchuk (1994).

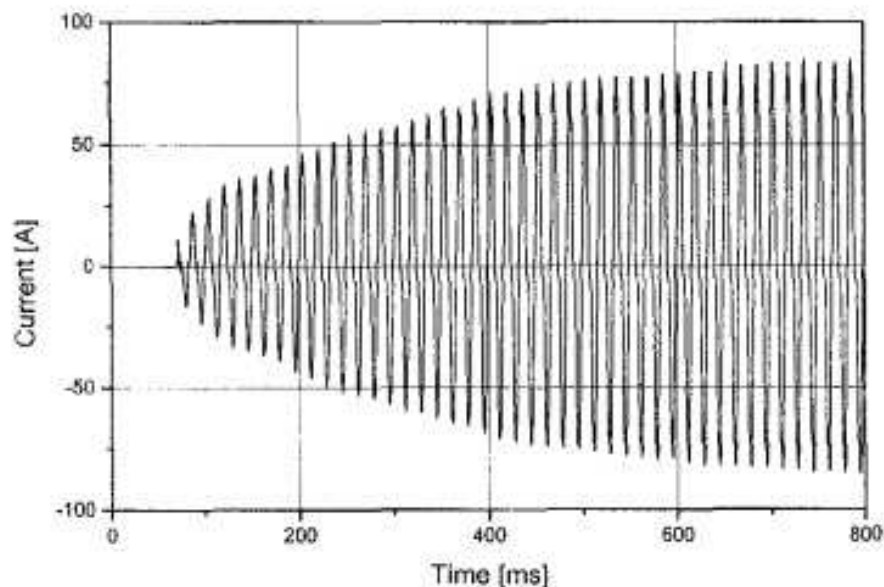
- Não linearidade: a curva característica tensão-corrente da FAI é não linear.
- Assimetria: a forma de onda da corrente de falta é diferente para semiciclos positivos e negativos.

As características citadas podem ser observadas na forma de onda de corrente de uma falta de alta impedância decorrente da queda de um condutor em seixos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pedra de pequenas dimensões, utilizada no empedramento de obras, cascalho.

apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Forma de onda de corrente de uma FAI experimentada.



Fonte – Nam *et al.* (2001).

## 2.2 MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As modelagens de FAI em ambiente de simulação buscam representar as características reais destes eventos. A literatura apresenta dois modelos consolidados e amplamente utilizados em estudos relacionados as FAI, sendo eles o modelo de diodos antiparalelos apresentado por Emanuel *et al.* (1990) e o modelo de resistências séries controladas desenvolvido por Nam *et al.* (2001). Esta seção se dedica a descrição detalhada destes modelos.

Ao longo dos anos, pesquisadores buscaram aprimorar estes modelos clássicos a partir de diversas alterações com diferentes propósitos de melhoria. Algumas propostas de alteração do modelo apresentado por Emanuel *et al.* (1990) são apresentadas na sequência.

Sharat, Snider e Debnath (1993) buscaram evidenciar a característica não linear da impedância da terra incluindo resistências não lineares ao modelo. No trabalho de David Chan Tat Wai e Xia Yibin (1998) foi proposto um modelo mais elaborado que inclui, além de uma impedância não linear, fontes de tensão variáveis no tempo, uma chave controlada que permite simular a re-ignição e extinção do arco elétrico e chaves convencionais temporizadas. Yong Sheng e Rovnyak (2004) propuseram um modelo simplificado que busca representar a dinâmica e aleatoriedade das FAI

adaptando o modelo de Emanuel *et al.* (1990) a partir da substituição das fontes de tensão contínuas por fontes de amplitudes aleatórias que se alteram a cada meio ciclo e da série resistor/indutor por um resistor não linear.

A adaptação proposta por Michalik, Rebizant *et al.* (2005) tornou o modelo mais complexo. O resistor linear foi mantido para representar a resistência da terra e um resistor variável e não linear foi incluído para representar a dinâmica do arco, sendo controlado por uma estrutura implementada no MODELS do ATP-EMTP. Além disso, foi feita uma associação série de fontes de tensão contínua e alternada, para garantir a assimetria da tensão e corrente de arco e a variação do ponto ignição e extinção do arco, respectivamente. Lai, Snider e Lo (2006) apresentaram um modelo mais simplificado que permite simular correntes assimétricas de falta a partir da parametrização desigual de duas resistências.

O modelo de Sedighi e Haghifam (2010) simula os primeiros oito ciclos da corrente da falta de alta impedância decorrente da queda de um condutor no solo com base na ocorrência de arcos elétricos. Este modelo suporta todos os componentes de frequência da corrente de falta de alta impedância gravada a partir de vários dados experimentais em um sistema de distribuição. Ele é composto pela associação em paralelo de uma adaptação do modelo proposto por Emanuel *et al.* (1990). A descrição da sua estrutura também está detalhada nesta seção.

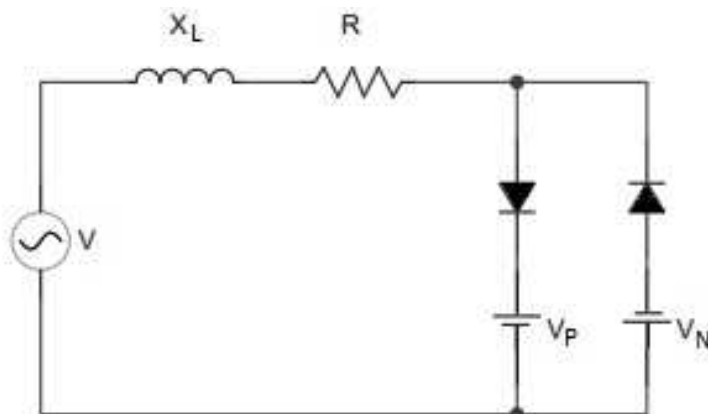
### 2.2.1 Diodos antiparalelos

O modelo de representação das FAI por meio de um circuito com diodos antiparalelos foi proposto por Emanuel *et al.* (1990), conforme Figura 5. O circuito simples busca reproduzir o arco elétrico decorrente de uma falta de alta impedância. Ele é composto por duas fontes de tensão contínuas antiparalelas ( $V_P$  e  $V_N$ ) conectadas por dois diodos, respeitando a condição de que  $V_N > V_P$  de maneira a existir uma diferença de potencial entre elas ( $\Delta V = V_N - V_P$ ). Durante o semiciclo positivo a corrente circula por  $V_P$  e no semiciclo negativo circula por  $V_N$ .

A escolha da magnitude da tensão das fontes DC permite fazer o controle da assimetria do modelo. A Figura 6 apresenta diversas superfícies definidas pela tensão  $V_N$  que demonstram a sua influência no aparecimento de correntes harmônicas de segunda e terceira ordem. A partir dessas superfícies, é possível analisar a influência que os parâmetros  $\Delta V$  e  $\tan(\theta) = X_L/R$  tem sobre as harmônicas de corrente.

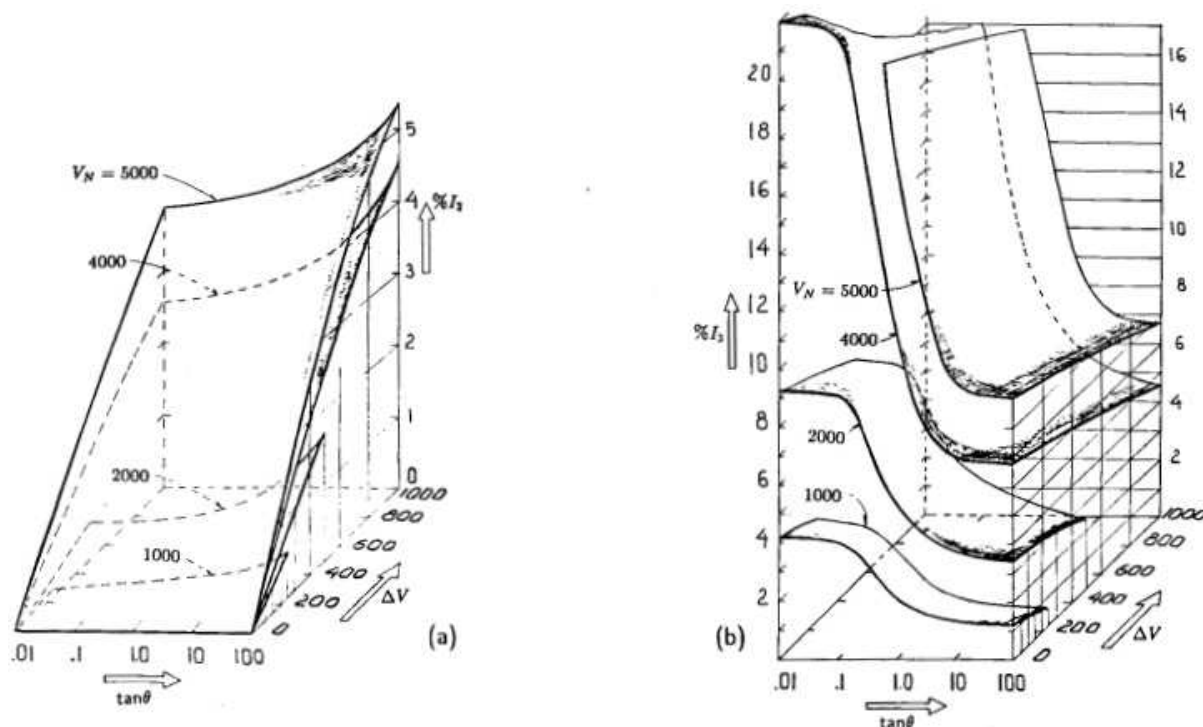
Nota-se que o aparecimento da segunda harmônica é fortemente dependente da diferença de potencial  $\Delta V$ . Essa dependência não é significativa no que se diz respeito a terceira harmônica. Quando se trata da influência em relação a  $\tan(\theta)$ , observa-se que a terceira harmônica da corrente é significativamente influenciada, porém esse parâmetro tem pouca influência na segunda harmônica da corrente. Outra observação pertinente é em relação a distorção da corrente de arco que é aumentada a medida

Figura 5 – Modelo de falhas de alta impedância por meio diodos antiparalelos.



Fonte – Emanuel *et al.* (1990).

Figura 6 – Corrente harmônica de arco; (a) corrente de segunda harmônica; (b) corrente de terceira harmônica.



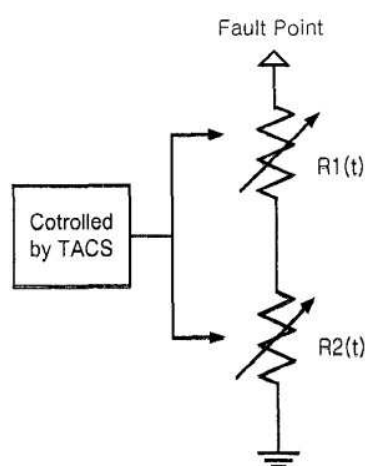
Fonte – Emanuel *et al.* (1990).

que a tensão de arco cresce.

### 2.2.2 Resistências séries controladas

O modelo para FAI desenvolvido por Nam *et al.* (2001) está representado na Figura 7. Ele é composto por duas resistências associadas em série variáveis no tempo. O modelo foi implementado no software EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*) e as resistências foram controladas por TACS (*Transient Analysis of Control Systems*).

Figura 7 – Modelo de faltas de alta impedância por meio de resistências séries controladas.



Fonte – Nam *et al.* (2001).

A resistência  $R_1(t)$  representa a não linearidade e a assimetria das FAI. Essas características são observadas periodicamente ao longo do regime permanente que sucede a ocorrência da falta. A resistência  $R_2(t)$  representa os efeitos *buildup* e *shoulder*. Esses efeitos são anteriores ao regime permanente estabelecido após a ocorrência da FAI, ou seja, ocorrem ao longo do transitório, período em que a corrente de falta assume diferentes magnitudes a cada ciclo. A associação em série permite que as características individuais representadas por cada resistência sejam sobrepostas.

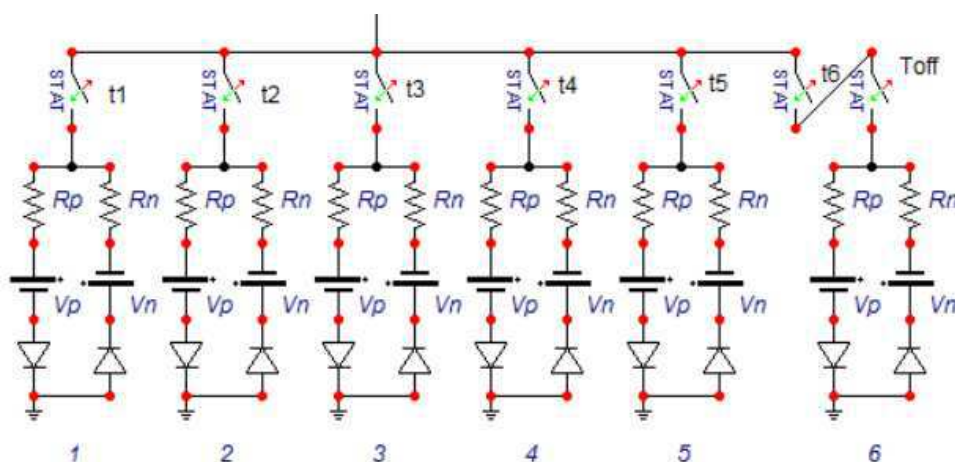
A determinação dos parâmetros é iniciada pela resistência  $R_1(t)$  que é definida pela razão entre a tensão e a corrente em um tempo  $t$  obtido a partir da tensão e corrente para um ciclo em regime permanente após a FAI. Como a resistência total é conhecida, faz-se a subtração da resistência  $R_1(t)$  ponto a ponto para encontrar a curva que represente a resistência  $R_2(t)$ . Esse processo pode ser bastante árduo e laborioso, sendo necessária a utilização de aproximações e interpolação.

### 2.2.3 Modelo de múltiplos arcos elétricos

O circuito elétrico que representa este modelo de FAI de Sedighi e Haghifam (2010) é composto pela associação paralela de seis modelos similares ao de Emanuel *et al.* (1990) conectados a um barramento por meio de chaves estatísticas, como

representado na Figura 8. Estas chaves demonstram a aleatoriedade do fenômeno e são parametrizadas por meio da definição do tempo médio de fechamento ou abertura e do desvio temporal dessa manobra, sendo seu estado determinado considerando a função de distribuição uniforme.

Figura 8 – Modelo de falhas de alta impedância de múltiplos arcos elétricos.



Fonte – Sedighi e Haghifam (2010).

Este modelo de FAI simula a ocorrência de múltiplos arcos elétricos em função da queda de um condutor no solo. A não linearidade deste tipo de falta em função das características da impedância de aterramento e da variabilidade da resistência do solo em razão das suas variadas condições é respeitada, como também sua característica resistiva, apresentando tensão e corrente em fase, e formas de ondas distintas nos semi ciclos positivos e negativos. O estudo ainda apresenta as parametrizações das variáveis de cinco estados distintos que representam amplitudes de corrente variadas para diferentes superfícies de contato, estas estão apresentadas na Tabela 1.

Os parâmetros dos arcos foram determinados a partir do processamento dos dados de corrente e tensão registrados experimentalmente nos trabalhos apresentados anteriormente por Sedighi, Haghifam e Malik (2005a,b) e Haghifam, Sedighi e Malik (2006). Nesse processamento é aplicada a análise de componente principal, técnica de transformação linear simples, com o objetivo de reduzir a dimensão do vetor, e o método de Bonferroni (HAYNES, 2013) para garantir bons coeficientes de confiança. Como a tensão e a corrente apresentam a mesma fase após a falta de alta impedância, a resistência à terra pode ser calculada a partir delas. A magnitude das fontes de tensão contínua  $V_p$  e  $V_n$  foram derivadas da curva V-I das FAI, seguindo a análise proposta por Emanuel *et al.* (1990) como pode ser observado na Figura 1.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo de múltiplos arcos elétricos para cinco estados de falhas de alta impedância.

	Parâmetro	Tempo (s) (liga/desliga)	Rp	Rn	Vp	Vn
<b>Estado 1</b>	Arco 1	0,06	1000	1050	4000	4500
	Arco 2	0,07/0,11	2900	3000	8000	8100
	Arco 3	0,09	3500	3550	7500	7600
	Arco 4	0,10	3700	3750	10000	10500
	Arco 5	0,08	4000	4010	1000	1300
	Arco 6	0,13	2800	2850	3000	3500
<b>Estado 2</b>	Arco 1	0,06	900	905	1800	1900
	Arco 2	0,08/0,13	2800	2820	3000	3500
	Arco 3	0,12	2500	2550	4000	4500
	Arco 4	0,14	2100	2150	10000	11000
	Arco 5	0,10	800	805	2000	2500
	Arco 6	0,15	2850	2900	3050	3550
<b>Estado 3</b>	Arco 1	0,06/0,18	500	505	900	1000
	Arco 2	0,08	2000	2050	2500	2700
	Arco 3	0,12	2050	2550	1900	1950
	Arco 4	0,14	1800	1900	11000	11500
	Arco 5	0,10	1000	1050	1000	1050
	Arco 6	0,19	900	905	1800	1900
<b>Estado 4</b>	Arco 1	0,06	280	300	750	900
	Arco 2	0,10	2000	2500	1800	2800
	Arco 3	0,12	2500	2700	3000	4000
	Arco 4	0,14/0,16	2700	2750	11300	11500
	Arco 5	0,08	800	805	950	1050
	Arco 6	0,18	2650	2700	11250	11450
<b>Estado 5</b>	Arco 1	0,06	1500	1550	9000	10000
	Arco 2	0,08	9000	9600	8000	9000
	Arco 3	0,12	6500	7000	11000	11050
	Arco 4	0,14/0,16	5800	6500	12000	12500
	Arco 5	0,10	10000	11100	2000	2050
	Arco 6	0,16	5300	6200	11000	11500

Fonte – Adaptado de Sedighi e Haghifam (2010).

### 2.3 METODOLOGIAS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

A revisão bibliográfica dos principais trabalhos acerca das metodologias de detecção de FAI em sistemas de distribuição de energia é apresentada nesta sessão. Verificou-se que esse tema continua sendo amplamente estudado, considerando o não estabelecimento de um método universal capaz de solucionar a questão de modo amplo e definitivo, justificando a necessidade da sua mitigação. Uma ampla gama de ferramentas computacionais são empregadas e combinadas em diferentes metodologias a fim de detectar FAI de maneira assertiva, sem provocar falsas detecções e, consequentemente, desligamentos desnecessários.

Alguns métodos clássicos de detecção de FAI são baseados no uso de filtros, detectando a falta através da sua assinatura harmônica, como apresentado por Benner



e Russell (1997) e Emanuel *et al.* (1990). Nesses trabalhos, utiliza-se basicamente o conteúdo harmônico da corrente de uma falta de alta impedância típica para realizar a sua detecção. No entanto, essa assinatura pode ser confundida com transitórios de outras naturezas e ruídos naturalmente presentes no sinal de corrente, ocasionando falsas detecções (KHAIRALLA, 2017). O mesmo ocorre com o trabalho de Girgis, Chang e Makram (1990) que aplica a teoria do filtro de Kalman para obter uma aproximação da variação no tempo das componentes harmônicas e fundamental da corrente.

Informações adicionais acerca das formas de onda de tensão e corrente produzidas quando o sistema é submetido a FAI foram sendo melhor conhecidas a partir da sua investigação ao longo dos anos e sendo empregadas como uma forma de distingui-las frente aos demais eventos aos quais a rede elétrica pode ser submetida em trabalhos mais recentes.

No trabalho de Macedo *et al.* (2015) é proposto um método baseado na análise das componentes inter-harmônicas do sinal de corrente. Já em Li, Meng e Song (2016) é proposta uma técnica de filtragem visando também identificar a assinatura da FAI. Nessa mesma categoria de métodos baseados em componentes de frequência, o trabalho de Soheili, Sadeh e Bakhshi (2018) propõe um esquema de detecção baseado na técnica da Transformada Rápida de Fourier. No trabalho de Wang, Geng e Dong (2018), a detecção da FAI é feita no domínio do tempo através da relação não-linear entre a tensão e corrente.

Cui, El-Arroudi e Joos (2017) recorrem a uma análise convencional no domínio do tempo e a uma técnica confiável de processamento de sinais, incluindo Transformada Discreta de Fourier e filtro Kalman, e propõe um novo conjunto de características eficazes usando métodos baseados em reconhecimento de padrões.

A Transformada Wavelet Discreta (TWD), técnica de processamento de sinais, tem sido extensivamente utilizada visando identificar os transitórios produzidos pelas FAI. A aplicação da TWD resulta em uma decomposição nos domínios do tempo e da frequência, isso faz com que seja uma ferramenta naturalmente adequada ao problema estudado. Diversas configurações de TWD são utilizadas e também associadas a outras técnicas de processamento para compor metodologias de detecção, como nos trabalhos de Magnago e Abur (1999), Kim *et al.* (2002) e Elkalashy *et al.* (2007). Após o processamento dos sinais, geralmente aplicam-se limiares nos sinais resultantes e com isso determina-se a ocorrência ou não da falta de alta impedância. Em Costa *et al.* (2015), a energia dos coeficientes da TWD, a partir do sinal de corrente, é utilizada visando a detecção instantânea da FAI. Já no trabalho de Chen *et al.* (2016), o cálculo de desvio padrão dos coeficientes da TWD é utilizado em um algoritmo de detecção simples.

Santos, Lopes *et al.* (2017) propõem um algoritmo de detecção de FAI a partir do estabelecimento de um limiar rígido calculado a partir dos máximos valores de

energia dos coeficientes de aproximação e detalhe obtidos a partir da aplicação da TWD para os sinais de tensão e corrente. Uma margem de segurança é estabelecida para o cálculo desse limiar – 0,1. Os dados da rede de distribuição utilizados nas simulações foram disponibilizados por uma concessionária brasileira, constituída de 90 barras e tensão de alimentação de 13,8 kV. Santos, Lopes *et al.* (2017) incluíram um gerador de ruídos para configurar a não idealidade do sistema e simularam faltas sólidas, energização de ramal e de banco de capacitores para testar a capacidade do algoritmo de distinguir esses eventos de uma falta de alta impedância. O trabalho também propõe uma implementação da localização da falta com redução de 70% na busca em campo pelo local de ocorrência e os resultados de simulação da detecção demonstraram eficiência.

Suteerawatananon *et al.* (2018) realizaram testes reais de faltas de alta impedância e aplicaram uma metodologia bastante simples que apenas aplica a TWD na forma de onda da corrente, realiza o somatório do coeficiente de detalhe e define um limiar de detecção. Essa metodologia foi aplicada em uma simulação e depois aplicada em um micro controlador para análise dos dados reais. Nesta etapa, o limiar estabelecido com os dados de simulação acabou sendo revisto. As faltas reais são detectadas com sucesso pelo algoritmo. A frequência de amostragem foi de 10 kHz, a simulação implementada no PSCAD e o algoritmo em MATLAB, depois convertido em C e em linguagem apropriada ao micro controlador (PIC).

Yeh, Sim e Bravo (2019) propõem um algoritmo de detecção em tempo real simples e robusto baseado na aplicação da TWD para um conjunto de dados de teste de um sistema de distribuição de 12 kV da Southern California Edison. O algoritmo é composto por apenas duas etapas e foi testado para dois casos de falta com frequências de amostragem iguais a 960 Hz e 5010 Hz. A etapa 1 corresponde a um processo de pré-filtragem adaptável a fim de eliminar ruídos presentes nos sinais de corrente do sistema em regime permanente e facilitar a detecção em tempo real. Esse processo é chamado de limiarização suave e emprega o nível 3 de decomposição da TWD, usando a wavelet Daubechies 6, determinando um limiar de detecção heurística. Na etapa 2 aplica-se a TWD nível 1, usando a wavelet Daubechies 2, para realizar a detecção da falta de alta impedância. Os resultados apresentados por eles demonstram a efetividade do algoritmo sem a ocorrência de falsas detecções.

Outras técnicas também são utilizadas como a árvore de decisão, técnicas estatísticas, medição do campo magnético e identificação da sua assinatura, máquina de vetores de suporte e redes neurais. Yong Sheng e Rovnyak (2004) propõem um método baseado em árvore de decisão para detectar as FAI usando a corrente de fase, magnitudes do segundo, terceiro e quinto harmônicos e a fase do terceiro harmônico. O treinamento e o teste da árvore de decisão são realizados com dados de simulação, porém dados experimentais podem ser utilizados para isso. Os sinais de corrente são

amostrados a uma taxa de 1920 Hz e os resultados de detecção são satisfatórios.

Sedighi, Haghifam, Malik e Ghassemian (2005) apresentam uma combinação de transformada Wavelet e de uma técnica estatística para realizar a detecção de FAI. Os coeficientes de nível 1 e 2 de corrente decompostos são obtidos a partir da decomposição utilizando a wavelet mãe rbiors3.1. A análise de componentes principais é usada para seleção de recursos e classificador Bayes para detecção de FAI. A taxa de amostragem é de 24.670 kHz e são utilizados dados reais e simulados. Os resultados mostram uma alta taxa de sucesso na detecção.

Sarlak e Shahrtash (2013) propõem um equipamento chamado de indicador de falta de alta impedância utilizado para rastrear a ocorrência desse tipo de falta em sistemas de distribuição. Sua metodologia é baseada nos recursos de processamento gerados pelo gradiente morfológico de multirresolução a partir do sinal de força do campo magnético e utilizando máquinas de vetor suporte (SVM) como classificador. Após o início da falha, ele necessita de apenas de três semiciclos dos dados do sinal de força do campo magnético para detectar e distinguir a ocorrência da FAI. Os resultados mostram desempenho aceitável de segurança e confiabilidade na detecção.

Sahoo e Baran (2014) desenvolveram uma metodologia que realiza uma análise de resolução múltipla com a ajuda da transformada discreta de Wavelet para extrair as características de correntes a serem monitoradas em um alimentador. Essas características são usadas para treinar uma máquina de vetores de suporte para classificação, ou seja, para diferenciar entre FAI e eventos de comutação. A TWD utilizada é a Daubechies 4, a corrente é amostrada a uma frequência de 1920 Hz. As faltas são caracterizadas pelos máximos e pela energia dos coeficientes de detalhe. Um método de aprendizado supervisionado é utilizado e a sua avaliação é feita a partir de índices de desempenho.

Sarwagya, De e Nayak (2008) apresentam um esquema simples de proteção baseado em dois critérios para detecção e isolamento das FAI em sistemas de distribuição radial de alimentação múltipla. O primeiro critério é derivado da soma de um ciclo de componentes sobrepostos de tensão residual e é usado para discriminar as FAI de quaisquer outros distúrbios possíveis do sistema de energia que geralmente exibem uma ou mais características semelhantes aos das FAI. O valor máximo da soma de um ciclo de componentes sobrepostos de correntes de sequência negativa que fluem em alimentadores diferentes é empregado como segundo critério para identificação de alimentador com falha. O desempenho do método proposto é testado através da simulação de várias FAI na presença de cargas balanceadas, desbalanceadas e harmônicas. O desempenho do esquema proposto também é testado na presença de eventos sem falhas. As observações sobre os resultados mostram claramente que o uso das FAI do esquema proposto pode ser detectado e isolado de forma mais rápida e de maneira confiável nos sistemas de distribuição com quaisquer conexões de

aterramento.

No trabalho de Bretas *et al.* (2006), as redes neurais artificiais são utilizadas para detectar a presença de FAI e para localizar as faltas. A estrutura de detecção é composta por uma rede retroalimentada com uma camada escondida, composta por 12 neurônios de entrada, 15 escondidos e 10 neurônios de saída. O método usa como entradas para detecção as componentes fundamentais, segundo, terceiro e quinto harmônico das correntes de sequência, sendo que todas são calculadas a partir de um filtro de Fourier de um ciclo com correção do decaimento exponencial. Caso alguma das saídas, que representam cada tipo de falta, sejam ativadas há indicativo de falta. No caso das 10 saídas ficarem inativas o contrário acontece. Para detectar efetivamente a falta, as condições positivas devem ser mantidas durante 10 janelas de tempo de um ciclo.

Michalik, Lukowicz *et al.* (2008) apresentam redes neurais para realizar a detecção de FAI em diferentes alimentadores de uma rede de distribuição de 22,9 kV. A potência aparente e ativa de sequência zero de diferentes harmônicos são utilizadas como princípio de decisão das redes. Estas são lineares, significando uma vantagem por possuírem baixa carga computacional e tempo de processamento. O terceiro harmônico é considerado o principal na tomada de decisões diante da ocorrência das FAI. Os resultados demonstram eficiência na discriminação correta das FAI em relação a outros eventos, como comutação de linhas e capacitores.

Etemadi e Sanaye-Pasand (2008) apresentaram uma metodologia composta pela TWD, para a extração de características das FAI, e um sistema neural adaptativo de inferência Fuzzy, para a identificação e classificação das faltas. Além disso, os autores também analisam o desempenho de diversas famílias de Wavlets mãe, chegando a conclusão de que para a metodologia proposta a que apresenta erros menos significativos é a *rbio3.3*. Para os testes são simulados diversas formas de onda de corrente para cargas lineares e não lineares, corrente secundária transformadores de corrente saturados e correntes de *inrush*, a fim de concluir sobre a capacidade de discernimento da metodologia proposta.

Através dessa análise bibliográfica percebe-se que a ampla maioria dos trabalhos utiliza os sinais de corrente do alimentador, registrados na subestação, para detectar as FAI. No entanto, estudos mostram que essa abordagem pode levar a falsas detecções em função da presença de ruídos no sinal de corrente (KHAIRALLA, 2017). Uma alternativa proposta em Moreto e Khairalla (2018) é a utilização dos sinais de tensão, considerando que estes são menos suscetíveis a ruídos.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo contextualizou a detecção de faltas de alta impedância no sistema elétrico de distribuição. A definição destas faltas foi apresentada como o resultado do

contato de um condutor energizado e uma superfície de alta resistividade presente nos seus arredores. Elas acometem principalmente as áreas descampadas, ao final dos alimentadores e das áreas rurais. Devido a não sensibilização do sistema convencional de proteção das redes e, conseqüentemente, não obtenção de registros oscilográficos, estas faltas permanecem no sistema gerando uma série de riscos. As principais características das FAI foram apresentadas neste capítulo, bem como seus modelos de simulação mais difundidos. Por fim, apresentou-se uma revisão bibliográfica das principais metodologias de detecção e suas contribuições para tentar resolver este problema que até o momento não apresenta uma solução definitiva e completamente eficaz.

### 3 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A descarga atmosférica, ou raio, é um fenômeno natural caracterizado pela condução de corrente elétrica de grande intensidade e dimensão. Esta é decorrente do rompimento da rigidez dielétrica do ar entre superfícies carregadas eletricamente por polaridades opostas. Estima-se que algumas dezenas a centenas de descargas ocorrem a cada segundo na atmosfera terrestre e que apenas 25% deste total atinge de fato a sua superfície (CIGRE, 2013).

O Brasil é o líder mundial no ranking dos países mais atingidos por descargas atmosféricas (DA) com a média de 77,8 milhões de raios por ano, estimativa divulgada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Essa liderança está atrelada a extensão territorial do país e ao fato da maior parte deste território estar situado na zona tropical. Estudos sugerem que um dos fatores que contribuem para a tendência crescente desta estimativa seria o aumento da temperatura global devido a intensificação do efeito estufa, uma vez que, ele está associado a ocorrência de diversos fenômenos climáticos ao redor do mundo (BOURSCHEIDT; PINTO; NACCARATO, 2016; SANTOS; COELHO *et al.*, 2017; NETO; PINTO; PINTO, 2013).

As DA são fenômenos incontrolláveis e de grande potencial destrutivo. De acordo com a superfície atingida, elas podem provocar apagões, queimadas, ferimento de pessoas e animais, e até mesmo a morte. No Brasil, o número de vítimas fatais por raios é de 2044 pessoas entre os anos 2000 e 2017 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, s.d.). A maior parte das mortes foi registrada no estado de São Paulo, sendo na grande maioria pessoas entre 25 e 59 anos, homens, no período de verão e as principais circunstâncias das fatalidades foram atividades rurais, dentro de casa e próximo a um veículo.

O sistema elétrico é por vezes atingido pelas DA, seja por incidência direta ou indireta, principalmente em locais descampados como as áreas rurais provocando sobretensões temporárias ao longo da rede e a queima de transformadores. Elas constituem a causa mais frequente de sobretensão no sistema de distribuição e são a maior causa de queda de energia em sistemas de transmissão e distribuição.

No Brasil, as DA são responsáveis por 40% dos desligamentos na distribuição, afetando negativamente os indicadores de continuidade e qualidade de energia e causando prejuízos estimados em 1 bilhão de reais por ano para o país (GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA, s.d.). Dentre os prejuízos do setor de energia estão a queima de equipamentos, perda de faturamento, aumento das despesas de manutenção e penalizações. Porém diversos setores também são afetados, como telecomunicações, seguro, equipamentos eletro-eletrônicos, construção civil, aviação, agricultura, pecuária, entre outros.

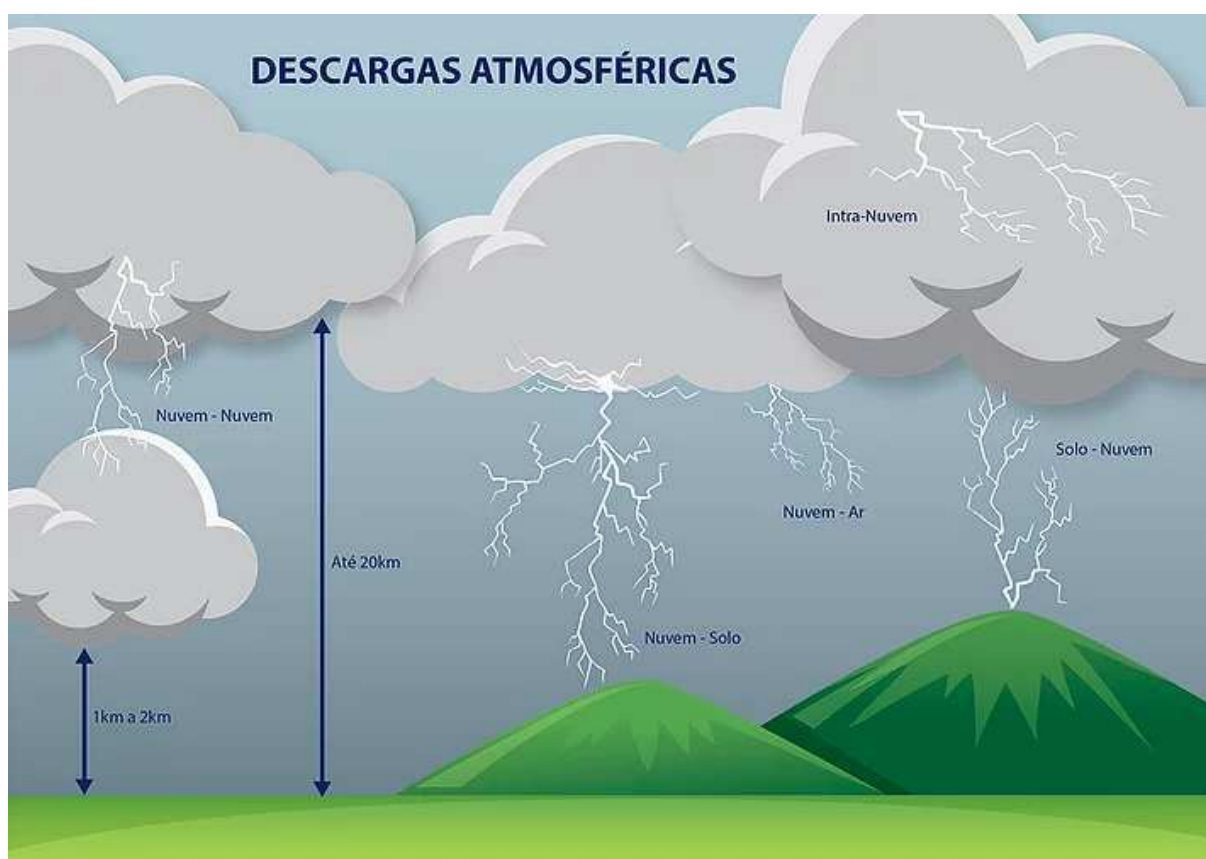
O desenvolvimento de ferramentas de monitoramento do sistema elétrico e de

detecção da incidência direta de DA na rede permite que as distribuidoras promovam melhorias do sistema e da qualidade de seus serviços reduzindo os riscos aos quais a população está sujeita. Além disso, essas ferramentas podem facilitar o esclarecimento das concessionárias perante a agência reguladora em relação as interrupções de fornecimentos de energia decorrentes desse fenômeno natural.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas podem ocorrer entre nuvens, intra-nuvem, nuvem-ar, nuvem-solo e solo-nuvem, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Tipos de descargas atmosféricas quanto a origem e destino do canal ionizado.

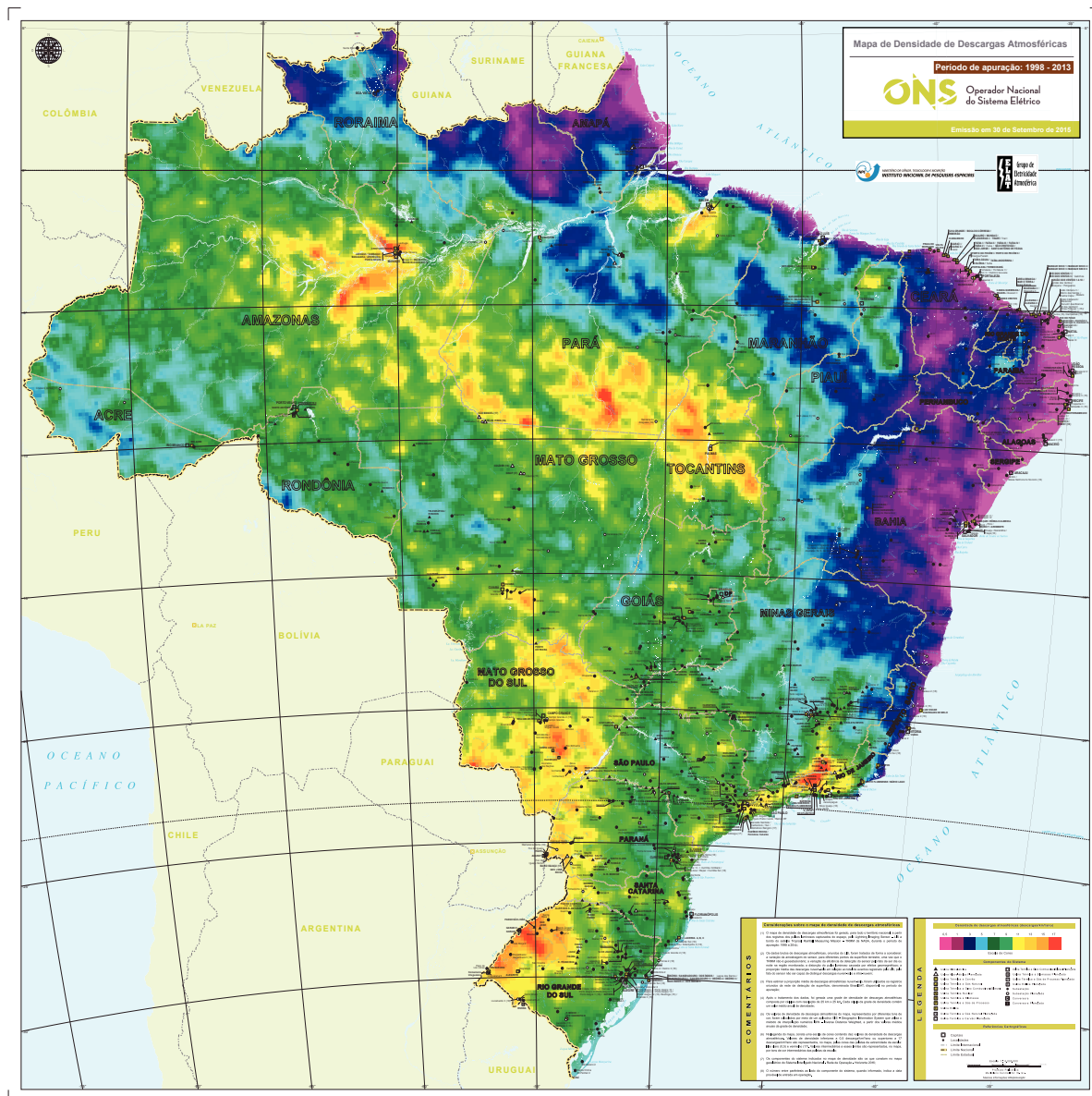


Fonte – <https://www.dbtec.com.br/>

Embora a maior parte do planeta Terra seja coberta por água, as áreas continentais são as mais atingidas pelas DA. As regiões tropicais são as mais afetadas com maior predominância de ocorrências no período de verão em razão do aquecimento atmosférico. Apesar de grande parte das DA serem observadas durante a formação de tempestades, esse não é um fator necessário nem determinante para que elas ocorram. A Figura 10 apresenta o mapa de densidade de descargas do Brasil com período

de apuração entre os anos de 1998 e 2013 e divulgado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico em 2015.

Figura 10 – Mapa brasileiro de densidade de descargas atmosféricas.



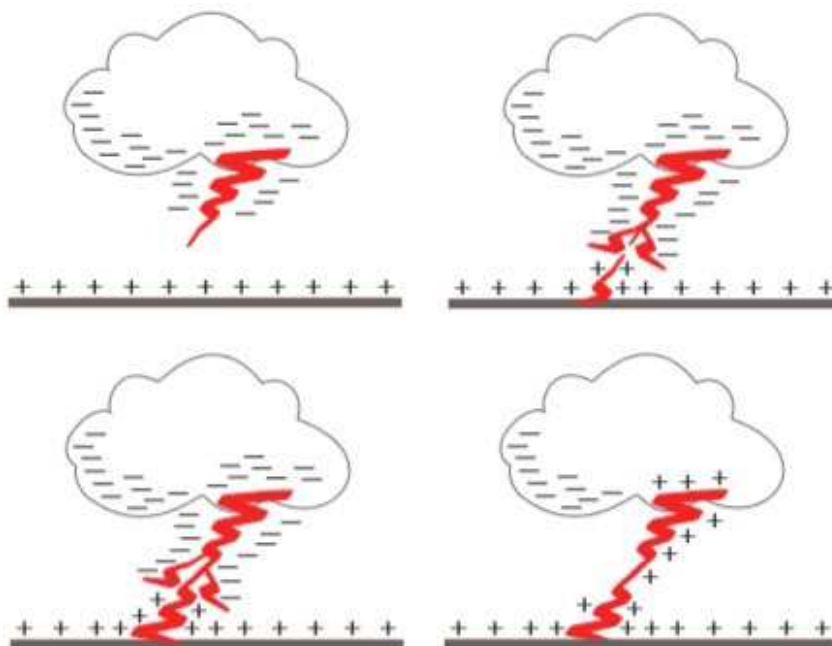
Fonte – Operador Nacional do Sistema Elétrico (s.d.).

A incidência de uma DA na superfície terrestre é resultado da separação de cargas nas nuvens podendo assumir diferentes distribuições, como representado na Figura 11. A concentração de cargas elétricas positivas ou negativas na parte inferior da nuvem faz surgir uma diferença de potencial entre ela e a terra. Um canal ionizado, chamado de *leader*, é formado quando a intensidade do campo elétrico supera a rigidez dielétrica do ar existente entre elas. O *leader* se aproxima da terra de forma progressiva, ao passo que ascendentemente há a movimentação de cargas com polaridade oposta.



O contato dessas duas formações permite a passagem efetiva da corrente pelo canal ionizado, denominada corrente de retorno.

Figura 11 – Representação da dinâmica de ocorrência de uma descarga atmosférica nuvem-solo.



Fonte – Adaptado de Finder (2012).

A descarga ocorre no momento em que a corrente de retorno atinge a nuvem, podendo ser simples ou múltipla, caso seja seguida de descargas subsequentes. No Brasil, 17% das descargas são simples e o número médio de descargas subsequentes é 4,6 (BALLAROTTI *et al.*, 2012). O intervalo de tempo médio observado entre as descargas múltiplas é de 62 milissegundos. Além disso, uma mesma descarga pode ter múltiplos canais atingindo múltiplos pontos da superfície separados por alguns quilômetros de distância. Cerca de 51% dos raios no país são multi-aterrados com uma média de 1,7 canais (SARAIVA *et al.*, 2010).

A caracterização das DA tem como um dos parâmetros mais importantes a magnitude da corrente. No Brasil, as descargas entre uma nuvem e a terra tem seu valor típico médio de corrente igual a 45 kA para o primeiro raio e 18 kA para os subsequentes. De acordo com Visacro *et al.* (2012), as medições máximas dessas correntes são de 153 e 65 kA, respectivamente. De maneira geral, a amplitude de corrente da primeira descarga é superior a observada nas descargas subsequentes. A Tabela 2 apresenta a distribuição estatística da corrente das descargas atmosféricas em solo brasileiro determinada a partir da aproximação lognormal.

As descargas nuvem-solo são consideradas descendentes e as solo-nuvem as-

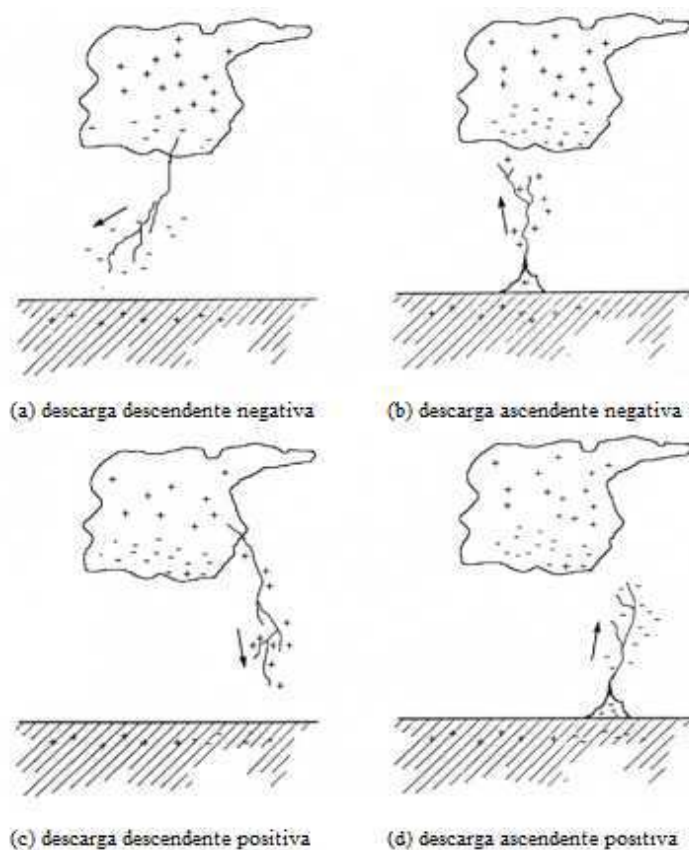
Tabela 2 – Distribuição estatística da corrente de descargas atmosféricas no Brasil.

Corrente de descargas atmosféricas (kA)			
	95%	50%	5%
Primeira Descarga Negativa	21	45	94
Descarga Subsequente Negativa	7,5	18	41

Fonte – Visacro *et al.* (2012).

centes e são classificadas como positivas e negativas de acordo com a polaridade das cargas observadas na porção da nuvem em que a descarga teve início, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Classificação das descargas atmosféricas.



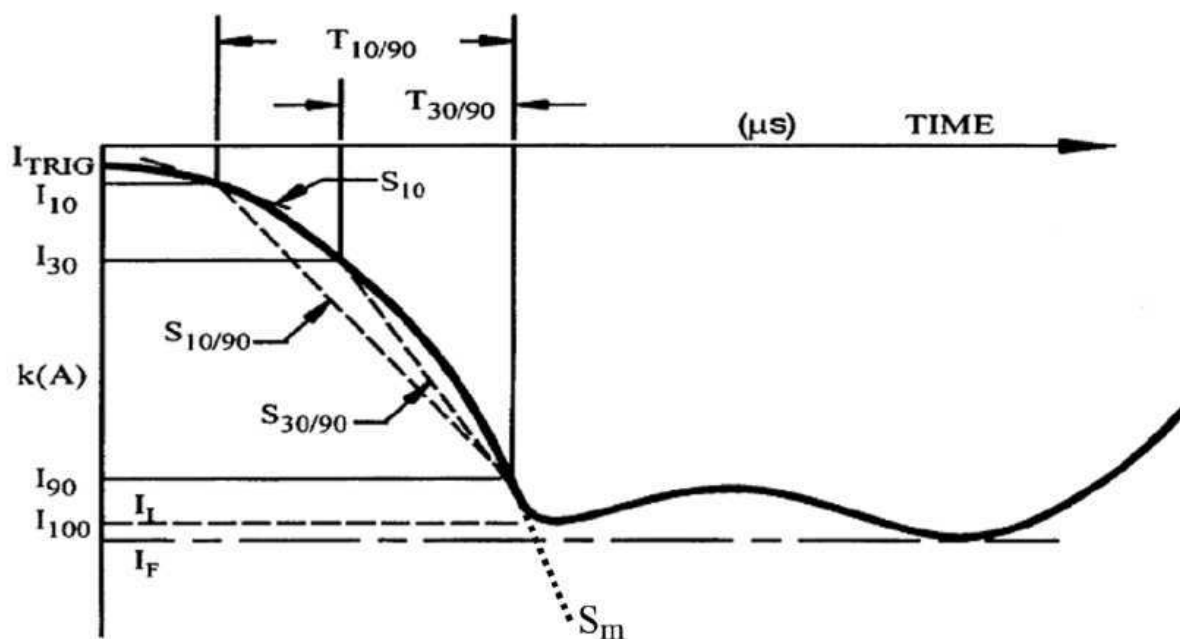
Fonte – Adaptado de CIGRE (2013).

Estima-se que 99% das DA que envolvem o solo são descendentes, sendo 90% negativas e apenas 10% positivas. As descargas positivas tem um potencial destrutivo muito mais significativo que as negativas tendo em vista sua característica energética mais intensa. As descargas ascendentes são mais raras, possuem níveis baixos de corrente e costumam partir de estruturas com altura igual ou superior a 100 metros ou

em objetos no topo de montanhas (CIGRE, 2013).

Além da magnitude, outras características são importantes na caracterização da onda de corrente das DA. A Figura 13 apresenta a forma de onda típica da corrente de uma descarga atmosférica de retorno negativa definida a partir de parâmetros descritos na Tabela 3.

Figura 13 – Forma de onda típica de uma descarga atmosférica de retorno negativa.



Fonte – CIGRE (2013).

Tabela 3 – Descrição dos parâmetros da forma de onda de corrente apresentada na Figura 13.

Parâmetro	Descrição
$I_{10}$	interseção de 10% da amplitude de corrente longo da forma de onda
$I_{30}$	interseção de 30% da amplitude de corrente longo da forma de onda
$I_{90}$	interseção de 90% da amplitude de corrente longo da forma de onda
$I_I$	valor de pico de corrente inicial correspondente a $I_{100}$
$I_F$	valor final do pico da corrente
$T_{10/90}$	tempo entre as interseções $I_{10}$ e $I_{90}$ da curva de corrente
$T_{30/90}$	tempo entre as interseções $I_{30}$ e $I_{90}$ da curva de corrente
$S_{10}$	taxa de crescimento instantânea da corrente em $I_{10}$
$S_{10/90}$	inclinação média entre as interseções $I_{10}$ e $I_{90}$
$S_{30/90}$	inclinação média entre as interseções $I_{30}$ e $I_{90}$
$S_m$	taxa máxima de aumento da corrente ao longo da frente de onda, tipicamente em $I_{90}$

Fonte – Adaptado de CIGRE (2013).

As redes elétricas são por vezes atingidas por DA provocando sobretensões de

curta duração, frentes de onda de poucos microssegundos e tempo de decaimento da ordem de  $100 \mu s$  a  $300 \mu s$ , sendo consideradas sobretensões de frentes de onda rápidas. Além disso, são classificadas como sobretensões de origem externa por serem resultado de uma interação elétrica da nuvem com o sistema de potência (ZANETTA JUNIOR, 2003). As descargas que incidem diretamente na rede elétrica ou nos seus arredores são capazes de provocar a indução de tensão nas linhas e sua análise permite o compreensão da influência que este fenômeno produz no funcionamento dos sistemas elétricos de potência. Este estudo se atém apenas a desenvolver uma metodologia de detecção da incidência direta de DA nos sistemas distribuição de energia.

## 3.2 MODELOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A modelagem das DA incidentes no sistema elétrico é geralmente representada em simulações por meio de uma fonte de corrente, parametrizada de acordo com as características do fenômeno. Nessa representação retrata-se o tempo de frente de onda da corrente, que corresponde ao intervalo de tempo em que a sua magnitude atinge o valor de crista ou pico, o tempo de cauda, marcado pelo decaimento da magnitude da corrente até a metade do seu valor de crista, e a taxa de crescimento.

O software de transitórios eletromagnéticos ATP-EMTP<sup>1</sup> disponibiliza algumas representações da forma de onda de corrente descrita por modelos empíricos que buscam modelar surtos elétricos, como: *Surge*, *Heidler* e *Standler*.

### 3.2.1 Surge

A fonte de corrente *Surge Type 15* é descrita pela exponencial dupla, conforme (1), sendo amplamente utilizada em testes de equipamentos para análise dos efeitos introduzidos pelas DA.

$$i(t) = I(e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (1)$$

Nessa equação,  $I$  compõe a amplitude do sinal, porém não necessariamente corresponde ao valor de pico da corrente,  $\alpha$  é um número negativo de especificação da taxa de decaimento e  $\beta$  é um número negativo de especificação da taxa de crescimento.

<sup>1</sup> Programa de simulação de transitórios eletromagnéticos amplamente utilizado pela comunidade acadêmica e concessionárias de energia: <https://www.emtp.org/>. Uma interface gráfica bastante conhecida é o ATPDraw <https://www.atpdraw.net/>

### 3.2.2 Heidler

O modelo de *Heidler Type 15* (HEIDLER; CVETIC; STANIC, 1999) é amplamente utilizado em estudos de sistemas elétricos (CIGRE, 2013) e é descrito por (2).

$$i(t) = I \frac{\frac{t}{T_f}^n}{\left(1 + \frac{t}{T_f}^n\right) e^{-\frac{t}{\tau}}} \quad (2)$$

Nessa equação,  $I$  compõe a amplitude do sinal sem representar o seu valor de pico,  $T_f$  é o tempo de frente de onda em segundos,  $\tau$  é o tempo de duração da descarga até o ponto de cauda correspondente a 37% da amplitude da corrente e  $n$  é o fator de influência da taxa de crescimento da corrente.

### 3.2.3 Standler

O modelo *Standler* também é utilizado para representar a forma de onda de corrente das DA sendo descrito por (3).

$$i(t) = I \frac{t^n}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

Nessa equação,  $I$  compõe a amplitude do sinal não correspondendo ao seu valor de pico,  $\tau$  é a constante do tempo de cauda e  $n$  é o expoente da frente de onda.

A fonte de corrente *Cigre Type 15* também descreve uma função de surto. É necessário que se indique a amplitude do sinal, o tempo de crista e de cauda e a máxima inclinação em ampères por segundos. Porém o seu equacionamento não é disponibilizado. Por fim, há a possibilidade de simplificação da onda de corrente utilizando a fonte *Slope Ramp Type 13* que é composta por duas rampas de diferentes inclinações. A sua parametrização consiste na definição da amplitude do sinal de corrente, do tempo de crista e do tempo de cauda.

## 3.3 CARACTERÍSTICAS DOS PROTETORES ANTI-SURTOS

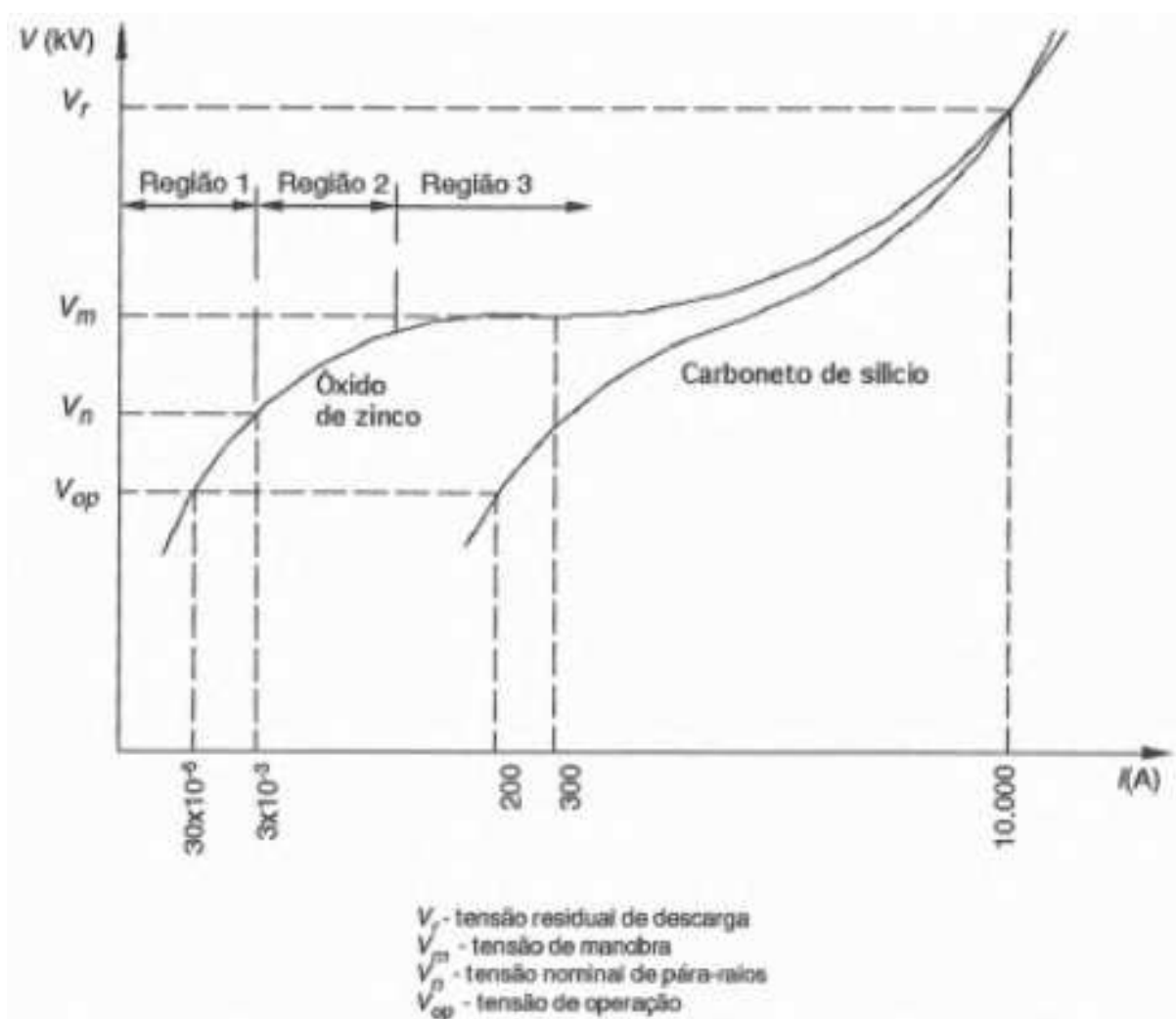
Os Protetores Anti-Surtos (PAS), também chamados de pára-raios, são empregados no sistema elétrico com o objetivo de protegê-lo contra sobretensões causadas por DA ou até mesmo por manobras de chaves seccionadoras e disjuntores. Eles são amplamente utilizados em redes aéreas de distribuição urbanas e rurais tendo em vista a vulnerabilidade destas redes à incidência de DA.

Os PAS são constituídos por carboneto de silício ou óxido de zinco atuando como resistores não lineares de acordo com as propriedades destes elementos. Eles apresentam alta resistividade quando a tensão do sistema se encontra em níveis normais. Caso a tensão do sistema ultrapasse um determinado limite, sendo identificada

uma sobretensão, os PAS assumem uma característica de baixa resistividade conduzindo a corrente à terra. A partir disso, os PAS reduzem o nível de tensão para um valor ao qual o sistema esteja dimensionado evitando a queima de equipamentos.

Os PAS que utilizam o carboneto de silício (SiC) como resistor não linear necessitam de centelhador série para que sua integridade física seja preservada, uma vez que, sem o centelhador o SiC conduziria uma corrente elevada à terra provocando um aquecimento exagerado do equipamento. Essa necessidade não é observada nos PAS que utilizam o óxido de zinco (ZnO), tendo em vista que quando submetidos à tensão de operação conduzem um valor baixo de corrente. A característica de tensão versus corrente destes elementos está representada na Figura 14.

Figura 14 – Característica V x I dos varistores SiC e ZnO.



Fonte – (MAMEDE FILHO, 2005)

Os PAS de óxido de zinco são preferencialmente utilizados em relação aos de carboneto de silício. Isso é justificado pela sua maior capacidade de absorção de

energia, por serem dotados de um nível de proteção mais definido, não possuem centelhadores e não apresentam corrente subsequente (MAMEDE FILHO, 2005).

### 3.4 MODELOS DE PROTETORES ANTI-SURTOS

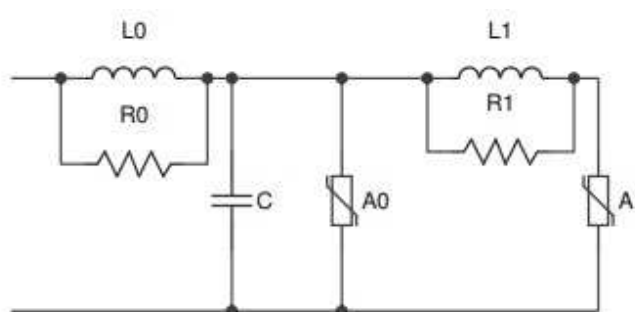
Os PAS não podem ser representados meramente por sua característica não linear de tensão-corrente quando se trata de estudos de descargas atmosféricas. Isso se justifica pelo fato de sua resposta também conter característica dinâmica, visto que a tensão sobre eles aumenta com a diminuição do tempo de crista da corrente e a tensão atinge seu valor de pico antes valor de pico da corrente. Em outras palavras, a tensão sobre os PAS é função da taxa de crescimento e da magnitude da corrente que eles conduzem.

Cabe ressaltar que os efeitos desse comportamento dinâmico são mais significativos para correntes com tempo de crista médio de  $8\mu s$  ou menores. A redução do tempo de crista de  $8\mu s$  para  $1,3\mu s$  causa o aumento da magnitude da tensão em aproximadamente 6% (IEEE, 1992). Dessa forma, esse comportamento deve ser incluído na modelagem dos PAS. A literatura destaca os trabalhos de modelagem de PAS desenvolvidos por IEEE (1992), Pinceti e Giannettoni (1999) e Fernández e Díaz (2001).

#### 3.4.1 Modelo IEEE W. G. 3.4.11

O modelo do IEEE W. G. 3.4.11 buscou descrever com consistência a característica dinâmica dos PAS com o objetivo principal de garantir a sua precisão. Dessa forma, obteve-se como resultado um modelo sofisticado que representa a resposta de PAS de óxido metálico para uma gama de correntes com diferentes tempos de crista. A Figura 15 apresenta o circuito elétrico representativo deste modelo.

Figura 15 – Modelo de protetor anti-surto do IEEE W. G. 3.4.11.



Fonte – IEEE (1992).

As resistências não lineares  $A_0$  e  $A_1$  são parametrizadas pela característica  $V \times I$ , de maneira que a tensão e a corrente associadas a  $A_0$  sejam maiores em relação aos mesmos parâmetros associadas a  $A_1$ . Essas resistências são separadas por um filtro RL que apresenta baixa impedância diante de surtos de frente lenta de maneira que  $A_0$  e  $A_1$  estejam associadas em paralelo. Para surtos de frente rápida, a impedância do filtro RL se torna mais significativa. A indutância associada ao campo magnético nas proximidades do PAS é representada pela indutância  $L_0$ . A resistência  $R_0$  é utilizada para garantir estabilidade numérica do algoritmo de simulação do modelo. Por fim, o elemento C representa a capacitância externa associada a altura estimada do PAS.

Este modelo oferece bons resultados para surtos de corrente com tempos de crista entre  $0.5\mu s$  e  $40\mu s$  apresentando erros inferiores a 5% (IEEE, 1992). A principal dificuldade na utilização deste modelo é a escolha dos valores dos parâmetros, haja vista que em alguns casos há a necessidade de um método iterativo para sua determinação. Porém, o cálculo dos valores iniciais de seus parâmetros pode ser feito de maneira simples a partir dos valores do comprimento da coluna do PAS em metros (d), do número de colunas em paralelo dos discos de óxido metálico (n) e da tensão nominal do sistema, em kV.

$$L_1 = \frac{15d}{n} \mu H \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{65d}{n} \Omega \quad (5)$$

$$L_0 = \frac{0.2d}{n} \mu H \quad (6)$$

$$R_0 = \frac{100d}{n} \Omega \quad (7)$$

$$C = \frac{100n}{d} pF \quad (8)$$

As resistências não lineares  $A_0$  e  $A_1$  podem ser estimadas por meio dos pontos  $V \times I$  padrões de modelos dependentes da frequência apresentados na Tabela 4 (IEEE. . . , 2009).

De posse dos valores iniciais de cada parâmetro, é possível montar o modelo do PAS e realizar testes de injeção de corrente de mesma magnitude e forma de onda utilizadas pelo fabricante e ajustar os valores de  $A_0$  e  $A_1$  para aproximar as curvas de tensão e corrente de comutação obtidas pelos testes e as disponibilizadas pelo fabricante. A indutância  $L_1$  foi identificada como o parâmetro cuja variação proporciona maior impacto no modelo. Seu valor deve ser ajustado por meio de tentativa e erro para que se encontre nos testes uma tensão de descarga equivalente a publicada em catálogo.



Tabela 4 – Relação entre tensão e corrente de modelo dependente da frequência de para-raios.

Corrente	Característica A0	Característica A1
<b>I (kA)</b>	<b>V(pu)</b>	<b>V(pu)</b>
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 – IEEE... (2009)

### 3.4.2 Modelo de Pinceti e Giannettoni

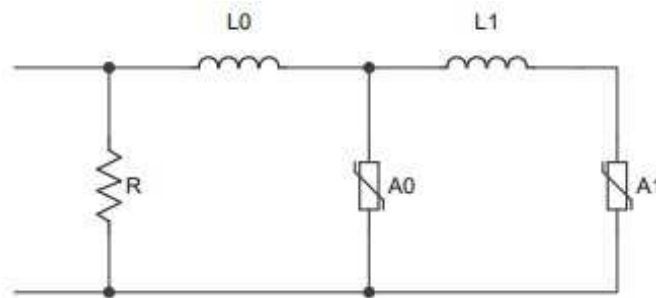
O modelo de Pinceti e Giannettoni (1999) consiste em uma simplificação do desenvolvido pelo IEEE W. G. 3.4.11. As alterações propostas incluem mudanças no circuito elétrico bem como na metodologia de cálculo dos parâmetros. O cálculo proposto é mais objetivo, não requer método iterativo para determinar os parâmetros do modelo e necessita apenas de dados elétricos fornecidos pelos fabricantes do equipamento.

O modelo apresenta boa precisão e descreve o comportamento dos equipamentos de grande parte dos fabricantes de maneira adequada. A validação deste modelo foi realizada pela comparação entre o erro relativo entre a tensão residual calculada e a tensão apresentada pelo fabricante do equipamento modelado. Os erros apresentados por este modelo são menores e tem uma característica mais homogênea em relação aos apresentados pelo modelo do IEEE W. G. 3.4.11.

A Figura 16 apresenta o circuito representativo do modelo de Pinceti e Giannettoni (1999). Percebe-se que, em relação ao modelo apresentado na Figura 15, houve a eliminação da capacitância  $C$  e a substituição dos resistores  $R_0$  e  $R_1$  por um resistor  $R$  alocado nos terminais de entrada.

Pinceti e Giannettoni (1999) propuseram a aplicação de duas regras para a definição dos parâmetros, uma para determinar os resistores não lineares e outra para as indutâncias. Os resistores não lineares seguem a mesma regra aplicada pelo

Figura 16 – Modelo de Pinceti



Fonte – Pinceti e Giannettoni (1999)

modelo IEEE W. G. 3.4.11. A determinação das indutâncias é feita por (9) e (10).

$$L_1 = \frac{I}{4} \cdot \frac{V_{r1} - V_{r8}}{V_{r8}} \cdot V_n \quad (9)$$

$$L_0 = \frac{I}{12} \cdot \frac{V_{r1} - V_{r8}}{V_{r8}} \cdot V_n \quad (10)$$

em que,

$V_n$  é a tensão nominal do para-raios,

$V_{r1}$  é a tensão residual de uma corrente de surto de frente rápida de 10 kA ( $\frac{1}{T_2} \mu s$ ),

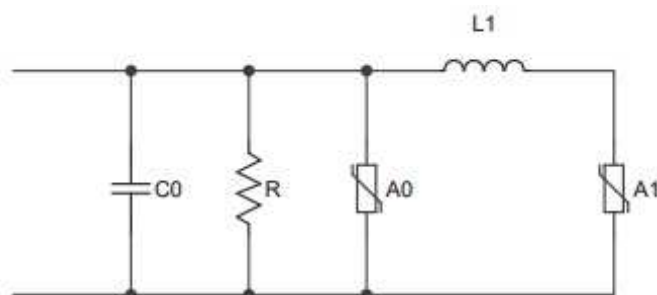
$V_{r8}$  é a tensão residual para uma corrente de surto de 10 kA com formato 8/20  $\mu s$ .

### 3.4.3 Modelo de Fernández-Díaz

O modelo de Fernández e Díaz (2001), representado na Figura 17, também constitui uma simplificação do modelo proposto pelo IEEE W. G. 3.4.11. Assim como Pinceti e Giannettoni (1999), buscou-se o desenvolvimento de uma metodologia de ajuste de parâmetros mais objetiva. As alterações propostas são a desconsideração das resistências  $R_0$  e  $R_1$  e também da indutância  $L_0$ . A capacitância  $C_0$  conectada aos terminais de entrada foi mantida e associou-se o resistor  $R$  em paralelo.

Algumas premissas foram estabelecidas por Fernández e Díaz (2001) para determinar os parâmetros do modelo. As características das resistências não lineares  $A_0$  e  $A_1$  são calculadas a partir dos valores das tensões residuais e correntes de descarga correspondentes disponibilizadas pelo fabricante. Como regra deve-se assumir que a soma das correntes  $I_0$  e  $I_1$  correspondam a corrente de descarga do PAS e a razão entre elas seja constante ao longo da excursão da tensão residual. O estabelecimento

Figura 17 – Modelo de Fernandez



Fonte – Fernández e Díaz (2001)

dessa regra garante que o aumento percentual da tensão entre os terminais de entrada dependa apenas da indutância  $L_1$  para uma dada amplitude de corrente e tempos de frente de onda menores que  $8\mu s$ .

O cálculo do aumento percentual da tensão residual para a corrente nominal do PAS pode ser feito aplicando (11).

$$\Delta U_{res}\% = \frac{U_{In,T_1} - U_{In,8/20}}{U_{In,8/20}} \cdot 100 \quad (11)$$

em que,

$U_{In,T_1}$  é a tensão residual para uma corrente de descarga com tempo de frente  $T_1$  e amplitude nominal,

$U_{In,8/20}$  é a tensão residual para a corrente de descarga atmosférica de amplitude nominal.

De posse do aumento percentual da tensão residual e do tempo de frente da corrente de descarga, determina-se diretamente a indutância elementar  $L'_1$  a partir das curvas mostradas na Figura 18.

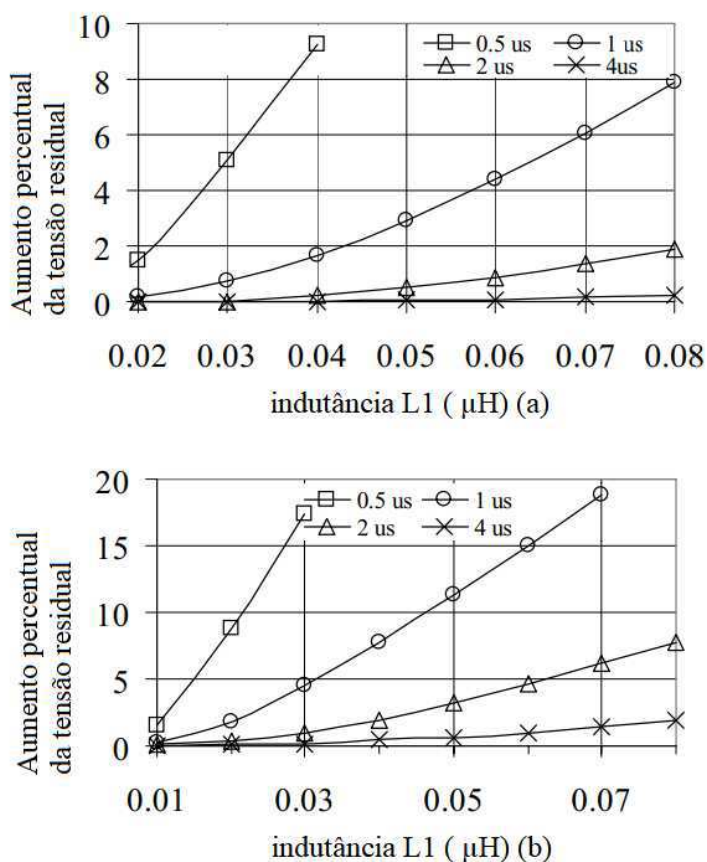
O fator de escala pode ser calculado por meio de (12).

$$n = \frac{U_{In,8/20,C}}{U_{In,8/20}} \quad (12)$$

em que,

- $U_{In,8/20,C}$  é a tensão residual para a corrente nominal de descarga atmosférica para o para-raios completo,
- $U_{In,8/20}$  é a tensão residual para a corrente nominal de descarga atmosférica para a válvula de bloqueio de 1 kV.

Figura 18 – Curvas para seleção da indutância para a) válvula de bloqueio de 5 kA e b) válvula de bloqueio de 10 kA. valve block.



Fonte – Adaptado de Fernández e Díaz (2001)

A indutância  $L_1$  do modelo é dada pela multiplicação da indutância elementar e do fator de escala. A capacitância  $C_0$  é dada em pF e obtida por (13).

$$C_0 = 100/d \quad (13)$$

em que  $d$  é o comprimento do PAS em metros.

O valor da resistência  $R$  depende da tensão a que o PAS se destina. A resistência é igual a 1  $M\Omega$  e 10  $M\Omega$  para média e alta tensão, respectivamente.

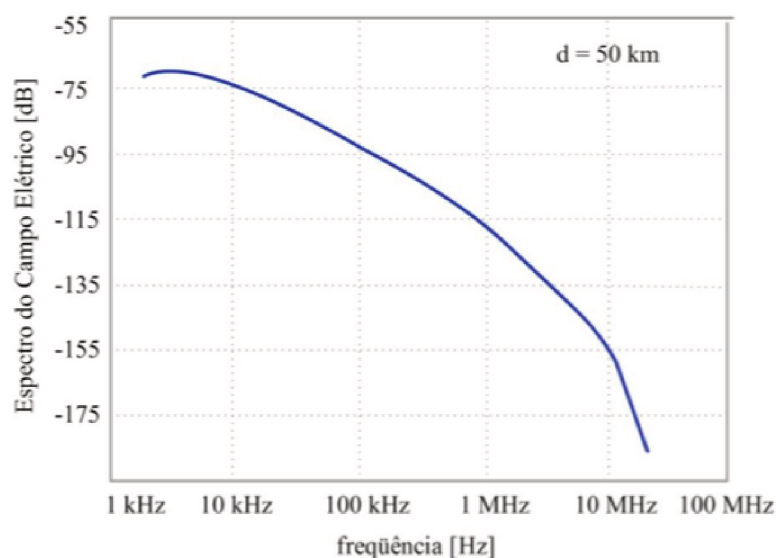
### 3.5 METODOLOGIAS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As metodologias de detecção de DA presentes na literatura buscam suprir a necessidade de identificação de interrupções e danos causados ao sistema elétrico pela queda de raios na superfície terrestre. Sabe-se que o fenômeno é aleatório e possui diferentes características nas diversas regiões do planeta. Ao longo dos anos,

trabalhos foram desenvolvidos com o intuito caracterizar as DA, monitorar o comportamento atmosférico, identificar as atividades das DA, e a partir disso, estabelecer relações entre estes fenômenos e os eventos observados nos sistemas elétricos.

Essas metodologias são baseadas em parâmetros específicos de medição, como a radiação eletromagnética e os sinais elétricos de tensão ou corrente. A radiação eletromagnética é o parâmetro utilizado na maior parte dos estudos e publicações com o objetivo de caracterizar e localizar o fenômeno que pode ser intra-nuvem ou nuvem-solo. A movimentação de elétrons que ocorre nas DA provoca a radiação eletromagnética em todo o espectro de frequência, conforme apresentado na Figura 19, que representa o espectro de uma descarga de 50 quilômetros de altitude. A maior parte da energia se concentra na faixa de alta frequência.

Figura 19 – Espectro de frequência do campo elétrico das descargas atmosféricas.



Fonte – Adaptado de Dentel (2013).

A Tabela 5 relaciona as radiações associadas as DA de acordo com a banda de frequência da radiação e o processo de descarga.

A partir disso, diversos sistemas de detecção de DA foram desenvolvidos no mundo inteiro aplicando monitoramentos terrestre ou via satélite dependendo da faixa de comprimento de onda medida e da característica de interesse a ser extraída. No geral, os sensores dos satélites fazem a captura do sinal ótico e os sensores terrestres operam na banda de *Low Frequency* (LF) e *Very Low Frequency* (VLF) (DENTEL, 2013).

As configurações adotadas para compor um sistema de detecção de DA, como a escolha do sensor e do método de localização determinam as características do sistema, como a escala de cobertura, a ordem de grandeza do erro de localização, a

Tabela 5 – Radiações associadas às descargas atmosféricas.

Banda de frequência	Processo de descarga	Processo de radiação
ELF~LF VHF~UHF	Descarga de retorno Líder escalonado	Transferência de carga Corrente elétrica
IR e luz visível	Descargas de retorno Líder escalonado M componente	Emissões térmicas e transição de elétrons
Raios-X	Líder escalonado	Quebra fugitiva (Runaway breakdown)

Fonte – Adaptado de Dentel (2013).

qualidade das medições e estimações e a eficiência da detecção, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Características das redes terrestres de detecção de descargas atmosféricas.

Sensores	Métodos de localização	Cobertura	Erro de localização	Eficiência de detecção
LF/VLF	TOA, MDF	Local e regional	Metros	~90%
VLF	ATD, MDF, TOGA	Regional e global	Kilometros	<25%
VHF	TOA, interferometria	Local	Metros	>90%
ELF	MDF	Global	Megametros	<5%

Fonte – Adaptado de Dentel (2013).

O sistema brasileiro de detecção de DA é o BrasilDAT. Ele conta com setenta *Earth Networks Lightning Sensors* (ENLS) que registram o instante e a localização precisa do ponto de impacto e características físicas das descargas que atingem o solo, como intensidade e polaridade. Eles fazem a distinção das descargas internas das nuvens, as que envolvem o solo e as descargas totais. Os sensores detectam a radiação eletromagnética emitida pelas descargas, também conhecidas como relâmpagos. A faixa de frequência dessa radiação fica entre 10Hz e 10 MHz. As informações obtidas são analisadas com o uso de algoritmos específicos, eliminando aquelas que não tenham como origem as DA.

Atualmente, os ENLS do BrasilDAT estão espalhados por quatro regiões do país, sendo elas: Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste. As descargas nuvem-solo são detectadas por meio de ondas LF e *Very High Frequency* (VHF) com eficiência de 90% e precisão menor de 1 km nas regiões onde há sensores instalados. Na região Norte do país, os relâmpagos são detectados por meio de ondas *Very Low Frequency* (VLF), com eficiência de 50% e precisão menor de 10 km.

A metodologia empregada nos sensores deste sistema para determinar a lo-

calização é a de tempo de chegada, conhecida como *Time Of Arrival* (TOA). Essa metodologia está cada vez mais precisa em relação ao sistema de localização magnética devido ao aprimoramento do *Global Positioning System* (GPS) para determinação de localização e tempo (NACCARATO; PINTO, 2012).

Modelos numéricos de previsão do tempo, como o *Global Forecast System* (GFS) e o *Weather Research and Forecasting* (WRF), servem como fontes de dados para sistemas de detecção de DA, tendo em vista a possibilidade de monitoramento de tempestades, de forma que esses dados podem ser relacionados as ocorrências de faltas no sistema elétrico (NACCARATO; PINTO, 2012).

As metodologias citadas, baseadas em radiações eletromagnéticas, são pouco assertivas, pois não determinam se a falta gerada no sistema elétrico foi de fato provocada pela incidência de um raio na rede. Dessa maneira, outros métodos de investigação que buscam solucionar essa questão se baseiam em medições de tensão e/ou corrente do próprio sistema elétrico. Ainda tem muito campo para ser explorado nesse sentido, tendo em vista que as referências nesta área ainda apresentam resultados teóricos envolvendo simulação de sistema de transmissão e distribuição sem aplicação e comprovação prática da eficácia das metodologias em sistemas reais.

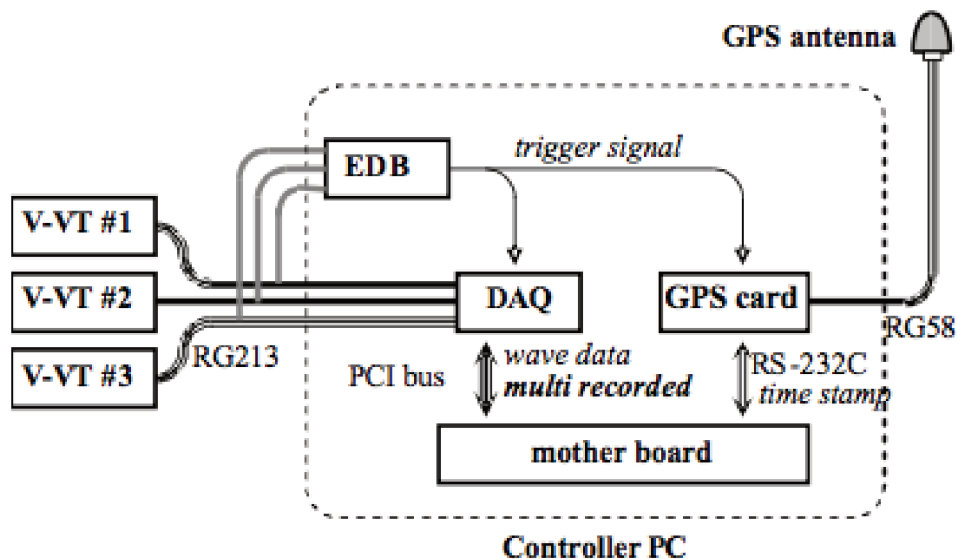
Um sistema de medição distribuído que relaciona a ocorrência de DA às faltas ocorridas no sistema de distribuição de energia italiano foi proposto por Bernardi *et al.* (2007). O sistema conta com três transdutores de tensão conectados a cada uma das fases do sistema elétrico. Os sinais de saída destes vão para o bloco de detecção de evento e para o conversor A/D que opera em até 100 MSa/s, conforme esquema apresentado na Figura 20.

O bloco de detecção de evento tem a capacidade de detectar sobretensões a partir do circuito representado na Figura 20. Na saída, ele fornece um sinal *Transistor-Transistor Logic* (TTL) que é encaminhado ao conversor A/D e ao equipamento de GPS, de acordo com o esquemático mostrado na Figura 21.

Uma outra abordagem foi apresentada por Assala, Chen e Ji (2013) utilizando sinais elétricos a partir da teoria de morfologia matemática. Um algoritmo de filtragem morfológica foi desenvolvido para o sinal de tensão, capaz de processar diferentes tipos de sobretensões que acometem o sistema elétrico, provocados por comutação, conexão de bancos de capacitores e incidência de descargas atmosféricas. A estrutura mais apropriada para este tipo de aplicação é o elemento estruturado plano, por meio da utilização de operadores de erosão e dilatação, bem como o conceito de gradiente morfológico que proporciona um melhor processamento do sinal. Os resultados mostram que frequências de amostragem maiores apresentam uma detecção mais precisa por parte dos gradientes morfológicos, especialmente quando se trata de sobretensões provocadas por DA por serem eventos extremamente rápidos.

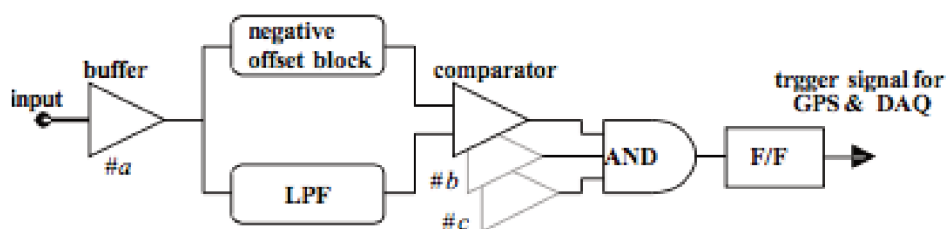
A incidência de uma descarga na rede elétrica é uma injeção de corrente de

Figura 20 – Diagrama de blocos do sistema de detecção proposto por (BERNARDI *et al.*, 2007).



Fonte – Bernardi *et al.* (2007)

Figura 21 – Circuito elétrico do bloco de detecção de evento.



Fonte – Adaptado de Bernardi *et al.* (2007).

grande magnitude que necessariamente causa um transitório de alta frequência no sistema. De acordo com as características dessa descarga, que são aleatórias, ela pode provocar a ocorrência de correntes disruptivas nos isoladores e a formação de arcos elétricos entre o condutor de fase e a terra, por exemplo, caracterizando uma falta fase-terra e causando a atuação de equipamentos de proteção da rede. Dessa forma, estudos buscam realizar a detecção de DA a partir da distinção entre as faltas comuns (monofásica, bifásica ou trifásica) a que o sistema está submetido, as descargas que também levam a ocorrência destas faltas e as descargas que não provocam faltas, e conseqüentemente, não causam desligamento por atuação da proteção.

Seguindo este objetivo, Haifeng Li, Gang Wang e Zhiwei Liao (2004) apresentam uma metodologia baseada na decomposição Wavelet de multi-resolução do sinal



de corrente de falta para extrair as características dos eventos até o sexto nível de decomposição. A partir disso, calcula-se a energia de cada componente por meio do Teorema de Parseval, de acordo com (14).

$$\int |f(t)|^2 dt = \sum |a(k)|^2 + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 \quad (14)$$

Um critério de identificação de faltas a partir da combinação das energias de baixa e alta frequência é apresentado resultando em uma razão  $k$ , definida em (15). Determina-se, portanto, um limiar  $k_o$  que realize a distinção entre as descargas sem faltas e as descargas com faltas e demais faltas que acometem o sistema.

$$k = \frac{\sum_l \sum_{j=1}^N i_{d_{lj}}^2}{\sum_{j=1}^N i_{aj}^2} \quad (15)$$

em que  $i_{d_{lj}}$  é o  $j$ -ésimo valor da corrente superposta na  $l$ -ésima versão detalhada,  $i_{aj}$  é o  $j$ -ésimo valor da corrente superposta da  $a$ -ésima versão aproximada e  $N$  é o número de pontos de amostragem dentro do período calculado.

O trabalho de Zou *et al.* (2009) também se encaixa nesta linha, diferentemente de (HAIFENG LI; GANG WANG; ZHIWEI LIAO, 2004), buscou-se desenvolver uma metodologia que mantivesse a confiabilidade e a sensibilidade, porém que proporcionasse um processamento computacional mais rápido. A transformação de Clark é aplicada para análise da corrente de falta em cada uma das situações. Observa-se as características de simetria da forma de onda da corrente induzida pela descarga nos casos que não provocam falhas no sistema e de assimetria nos casos em que há a ocorrência de falhas. A partir disso, as formas de onda da corrente transitória acima e abaixo dos eixos temporais são integradas em um curto período a fim de traçar critérios que expressem a distinção entre eles. A integração das formas de onda de corrente transitória acima e abaixo do eixo do tempo são calculadas por meio dos somatórios em (16) e (17), respectivamente.

$$I_+ = \sum_{k=n_1}^{n_2} i_+(k) \quad (16)$$

$$I_- = \sum_{k=n_1}^{n_2} i_-(k) \quad (17)$$

Dois critérios hierarquizados são estabelecidos relacionando os fatores  $I_+$  e  $I_-$  e são utilizados limiares para caracterizar os eventos. O critério primário é definido por (18) e corresponde ao cálculo da razão relativa dos fatores. O critério secundário

busca ampliar a confiabilidade da discriminação dos eventos, ele é definido por (19) e corresponde a diferença dos fatores.

$$\lambda = \frac{\max(I_+, I_-) - \min(I_+, I_-)}{\min(I_+, I_-)} \quad (18)$$

$$S = |I_+ - I_-| \quad (19)$$

Abdullah (2016) apresenta um método de detecção que busca determinar a evolução de uma descarga atmosférica incidente na rede em uma falta ou não. Para isso observa-se o comportamento da frequência fundamental da corrente, que aumenta em magnitude à medida que a falha ocorre e não se altera quando não ocorre falha. A abordagem adotada é chamada de entropia da decomposição Wavelet.

A transformação de Clark é aplicada e extrai-se apenas componente  $\alpha$ , que deve ser normalizada em relação ao pico de corrente anterior a incidência da descarga. A utilização dessa transformação é justificada pela praticidade de se processar apenas um sinal ao invés de três e a componente  $\alpha$  sempre apresenta magnitudes de corrente superiores as observadas nas fases, fato interessante para este tipo de análise.

A transformada Wavelet ortonormal é aplicada à componente  $\alpha$  até o nível 5 de decomposição visando eliminar os ruídos do sinal. O coeficiente de aproximação é extraído e integralizado a partir de um somatório de quadrados. Tendo em vista a característica senoidal da corrente e a normalização aplicada anteriormente, o resultado esperado quando não há a ocorrência de falta é igual a  $\frac{\pi}{2}$ . Considerando a presença de ruídos no sinal, determina-se um limiar um pouco superior a  $\frac{\pi}{2}$ , adquirido a partir de simulações, de forma que se houver a extrapolação deste limiar a falta é então detectada. O autor simulou 1044 casos variando a localização da descarga e o tipo de falta, porém a metodologia não foi precisa para todas as configurações testadas, demonstrando certa limitação do algoritmo proposto.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo as descargas atmosféricas foram definidas como um fenômeno natural e aleatório e as suas atividades no Brasil e no mundo foram demonstradas a partir de dados estatísticos. As principais características das DA foram apresentadas, bem como seus modelos de simulação a partir da utilização do ATP-EMTP. Os protetores anti-surtos, equipamentos de proteção adotados nos sistemas elétricos com o objetivo de desviar a injeção de corrente de alta magnitude imposta pela incidência das DA, foram caracterizados, bem como os modelos mais difundidos na literatura. Além disso, as metodologias de detecção de descargas atmosféricas foram destacadas, de acordo com as suas variáveis de medição, com a apresentação das suas propostas e resultados, demonstrando a necessidade do presente estudo.

## 4 MODELAGEM DOS SISTEMAS DE TESTE

A modelagem dos sistemas de teste busca simular o comportamento das formas de onda de tensão e corrente do sistema frente a ocorrência de faltas de alta impedância e a incidência de descargas atmosféricas. Por consequência, a fim de garantir sua validade, é indispensável que o modelo escolhido para representar os elementos do sistema respeitem as características do evento estudado. Como apresentado no Capítulo 2, as faltas de alta impedância apresentam baixa amplitude, sendo confundidas com ruídos normais do sistema ou transitórios de manobras rotineiras. Sua frequência é baixa, sendo próxima da frequência nominal do sistema elétrico, e geralmente possuem um longo período de atuação. Por sua vez, as descargas atmosféricas possuem alta amplitude e frequência e um transitório rápido, como exposto no Capítulo 3.

A contraposição das características dos eventos abordados neste trabalho justifica a necessidade da modelagem de sistemas específicos para o estudo de cada um dos eventos. O alimentador teste de 34 barras do IEEE (PES, 1991) foi escolhido para ambas as modelagens a fim de promover a unidade das simulações e dos resultados. O diagrama representativo deste alimentador está apresentado na Figura 22. Ele corresponde a um modelo de alimentador no estado do Arizona nos Estados Unidos com carga total instalada de 2054 kVA, comprimento total no tronco principal aproximado de 57,8 km e tensão entre fases de 24,9 kV. A modelagem foi realizada no *software ATP-EMTP*.

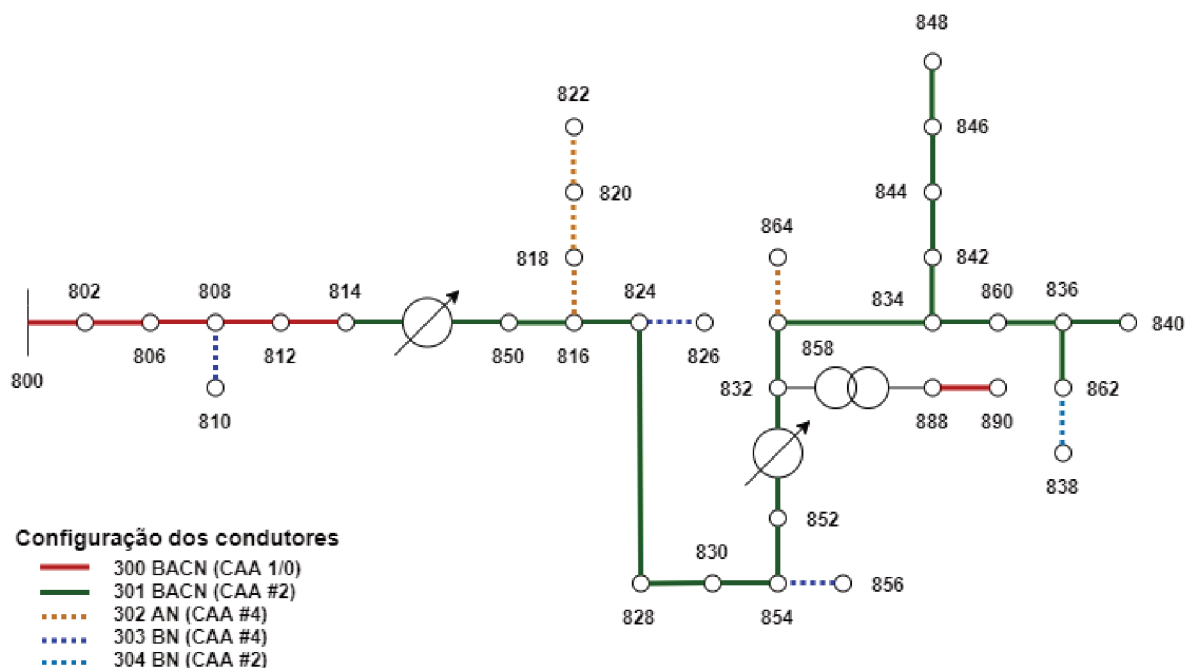
Esse alimentador é bastante utilizado no meio acadêmico e possui características interessantes como não-homogeneidade, desbalanceamento significativo entre as fases e derivações laterais monofásica, bifásica e trifásica.

Este capítulo se dedica a descrição das modelagens dos estudos de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas. A maior contribuição deste capítulo diz respeito à disponibilização do modelo proposto do alimentador teste para estudo de descargas atmosféricas, que considera a dependência da frequência para modelar os equipamentos da rede.

### 4.1 ESTUDO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

A modelagem do sistema para o estudo de faltas de alta impedância se resume na representação dos seguintes elementos: fonte de alimentação, equivalente de Thévenin visto pela rede dos elementos a jusante do alimentador, transformador de potencial, seções de linha, proteções (disjuntores e relés) e cargas. Todos esses elementos foram modelados por meio de elementos pré-definidos do próprio ATP-EMTP, baseado no desenvolvimento do trabalho de Khairalla (2017) e parametrizados de acordo com Kersting (2001). A Figura 23 apresenta parte da arquitetura do alimentador simulado.

Figura 22 – Diagrama esquemático do alimentador teste IEEE 34 barras.



Fonte – Adaptado de ([34]).

A fonte de alimentação foi modelada por uma fonte de tensão trifásica, as proteções por chaves simples, o equivalente de Thévenin e as cargas por componentes RLC. O transformador de potencial foi representado por um transformador trifásico ideal parametrizado como abaixador para que no seu secundário pudessem ser medidos tensão e corrente com níveis condizentes aos disponibilizados por oscilógrafos convencionais.

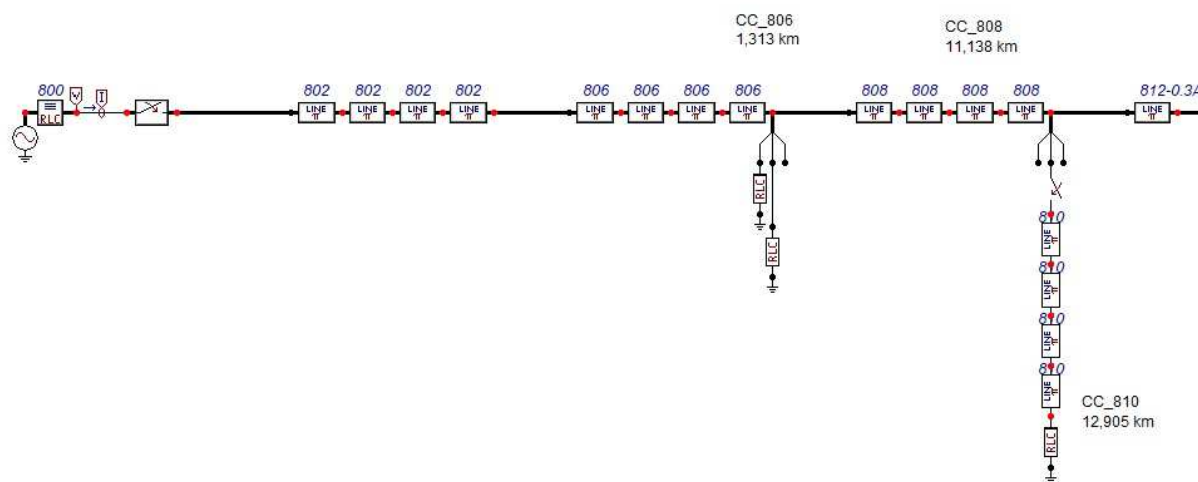
A rede foi representada pelo modelo pi de parâmetros concentrados. Sua escolha foi pautada na característica de baixa frequência desse tipo de falta. Além disso, o modelo pi também permite representar acoplamentos mútuos distintos entre as fases de forma a modelar a característica de não-transposição do alimentador.

## 4.2 MODELO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

O modelo de falta de alta impedância escolhido foi proposto por Sedighi e Haghifam (2010). Sua descrição foi apresentada anteriormente no Capítulo 2. Em vista disso, a forma de onda da corrente de falta, medida e aplicada na fase A da barra 848, está apresentada na Figura 24. Essa curva expressa as características principais deste tipo de falta, como o fenômeno *buildup* e a assimetria entre os semiciclos positivos e negativos.

Neste mesmo ponto, localizado ao final do alimentador, foi medida também a

Figura 23 – Parte do alimentador de distribuição simulado em ATPDraw.



Fonte – Da autora.

tensão, a partir dessas duas grandezas, tem-se a curva V-I resultante da simulação do modelo escolhido para a falta de alta impedância, conforme representado na Figura 25.

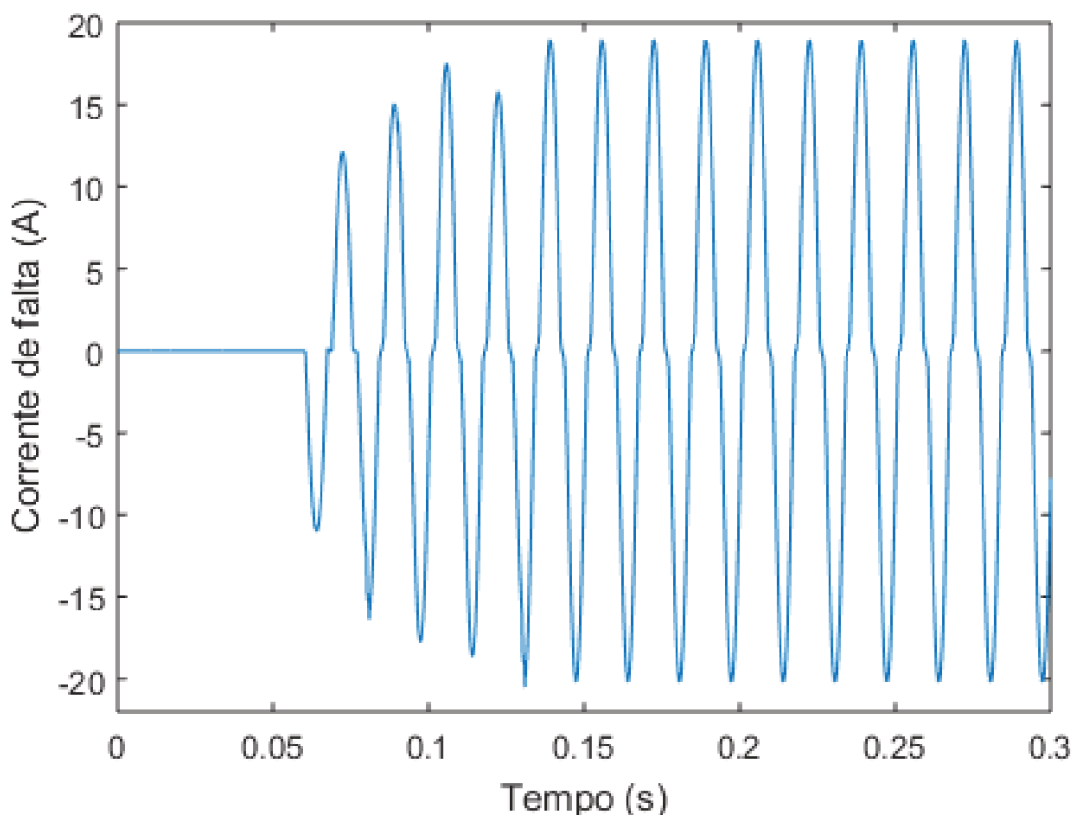
### 4.3 ESTUDO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A estrutura da rede desenvolvida para o estudo das descargas atmosféricas é composta pelos seguintes elementos: fonte de tensão trifásica, impedância equivalente vista pela rede, isoladores, postes, segmentos de linha, transformadores, protetores anti-surto e aterramento dos protetores anti-surto. Os modelos de cada um deles estão descritos nas seções seguintes.

#### 4.3.1 Linha de distribuição

Tendo em vista a característica de alta frequência das descargas atmosféricas, verifica-se a necessidade da utilização de um modelo de linha de distribuição com parâmetros distribuídos, que seja dependente da frequência, permitindo assim a observação da propagação da sobretensão resultante desse fenômeno ao longo do sistema. Portanto, foi adotado o modelo de linha JMarti disponível no ATPD-EMTP e configurado pela rotina LCC. Seu bloco representativo está mostrado na Figura 26.

Figura 24 – Forma de onda da corrente da falta de alta impedância simulada.



Fonte – Da autora.

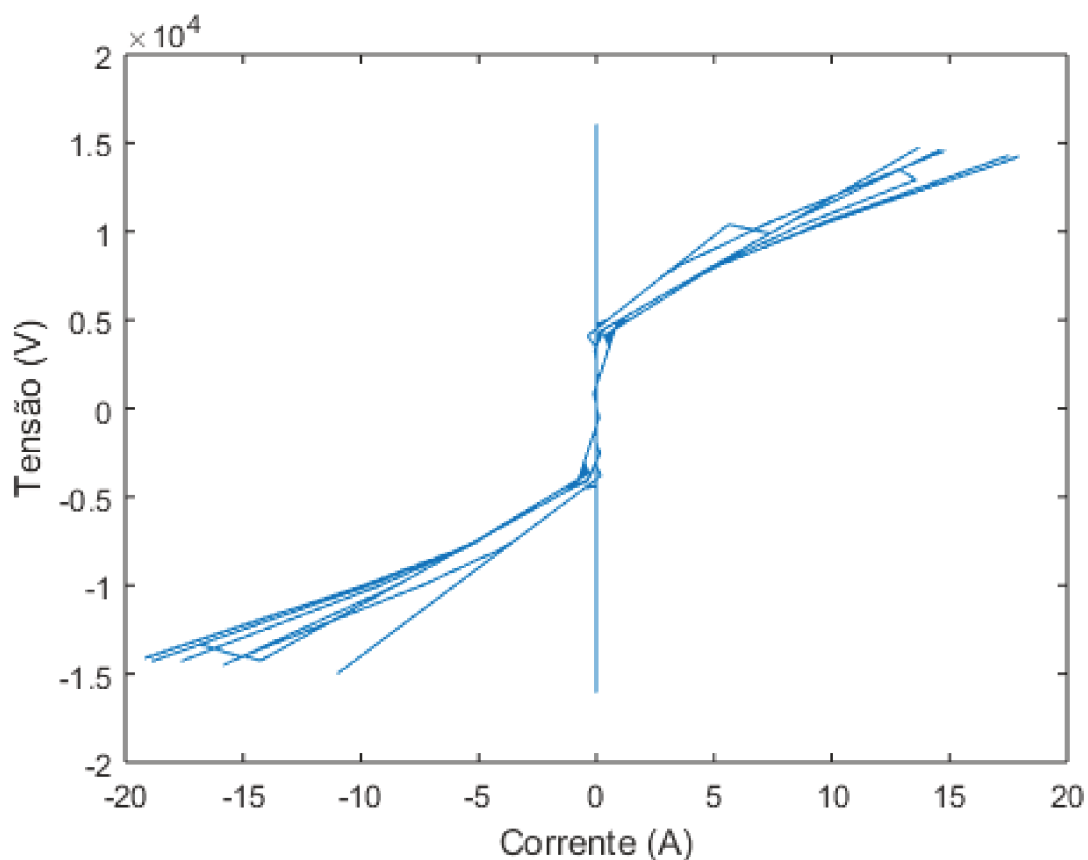
A Figura 27 apresenta as configurações do modelo da rotina LCC, como o tipo do sistema, os dados padrões e o modelo da linha. A linha em questão foi caracterizada como uma linha aérea (*overhead line*) trifásica considerando o efeito pelicular no condutor.

Os dados padrões considerados foram 1000 ohms.m para a resistividade do solo, 60 Hz de frequência fundamental e para cada vão se atribuiu o seu respectivo valor de comprimento. Para as características do modelo, selecionou-se o tipo JMarti, a frequência característica foi definida como 500.000 Hz dividida em 8 décadas com 10 pontos/década e a frequência de regime permanente igual a 60 Hz (SILVA, 2015).

As configurações dos dados da rotina LCC para cada fase da linha incluem a sua numeração, raio interno e externo do condutor, a resistência em ohms/km em corrente contínua, a distância horizontal entre os condutores, a altura vertical do centro do condutor medido na torre em relação ao solo e a altura vertical do centro do condutor medido no meio do vão em relação ao solo. Os condutores utilizados na parametrização estão de acordo com as configurações de cada tipo de seguimento de linha, conforme dados da Tabela 7.

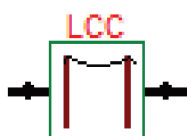
Os segmentos de linha do sistema são extensos, de modo que se a distância mé-

Figura 25 – Curva V-I da falta de alta impedância simulada.



Fonte – Da autora.

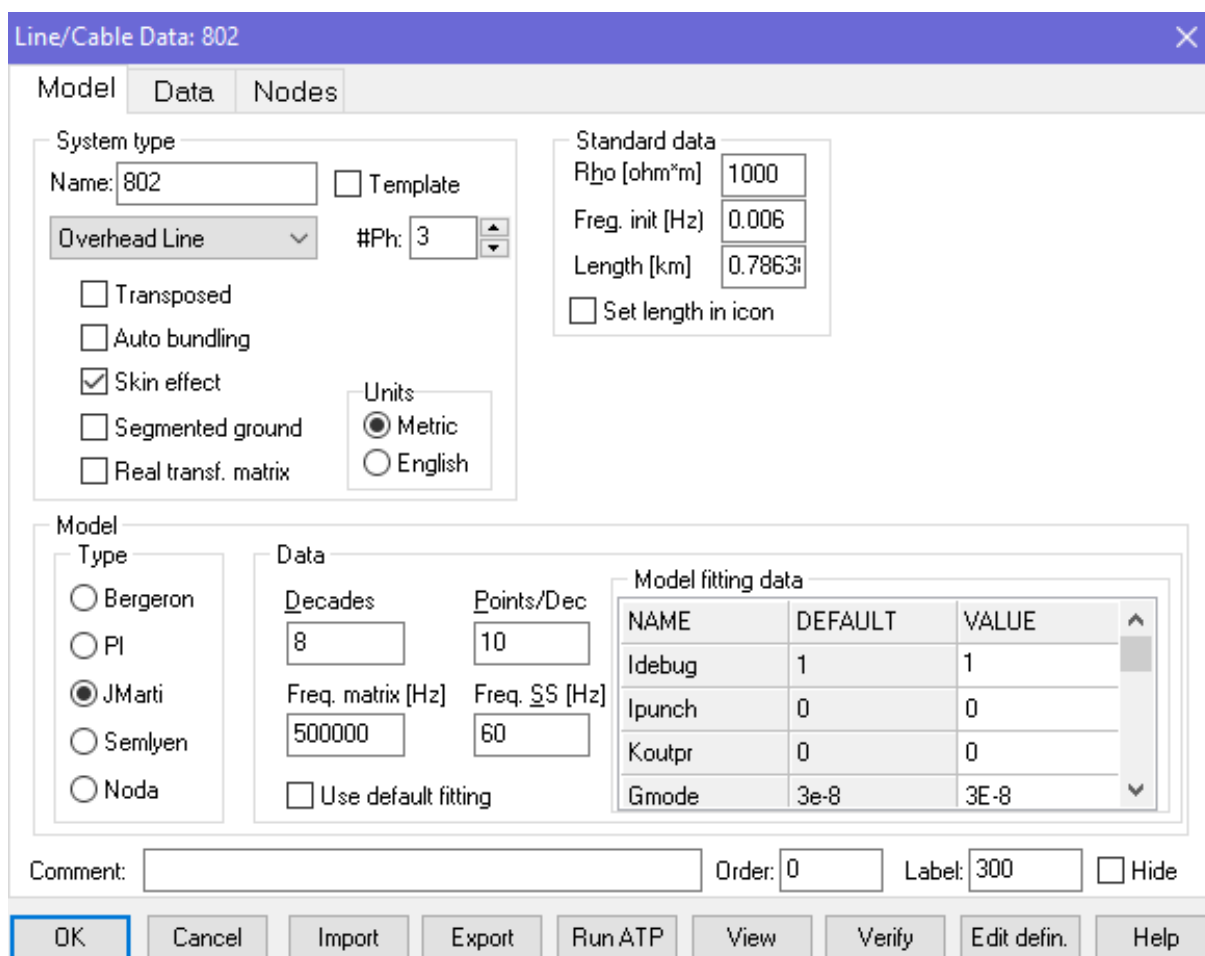
Figura 26 – Bloco do modelo de linha da rotina LCC.



Fonte – Da autora.

dia entre os postes fosse de 80 metros seria necessário representar aproximadamente 1.164 postes na modelagem. Sendo assim, os segmentos de linha foram particionados de modo a constituir um circuito equivalente passível de representação no ATP-EMTP. Assim, optou-se por representar aproximadamente um a cada vinte postes reais, a partir da adoção de um comprimento médio de linha de 1,6 quilômetros. A Tabela 8 apresenta detalhadamente os dados do circuito equivalente simulado.

Figura 27 – Parametrização do modelo da rotina LCC.



Fonte – Da autora.

Tabela 7 – Parâmetros das configurações de linha

Configuração	Fase	Raio interno (cm)	Raio externo (cm)	Resistência (ohms/km)	Distância horizontal (m)	Altura da torre (m)	Altura do meio vão (m)
300	1	0.1685	0.5055	0.58685	0	10.2	8.6
	2	0.1685	0.5055	0.58685	0.9	10.2	8.6
	3	0.1685	0.5055	0.58685	1.8	10.2	8.6
301	1	0.1335	0.4005	0.93481	0	10.2	8.6
	2	0.1335	0.4005	0.93481	0.9	10.2	8.6
	3	0.1335	0.4005	0.93481	1.8	10.2	8.6
302	1	0.106	0.318	1.48278	0	10.2	8.6
303	1	0.106	0.318	1.48278	0	10.2	8.6
304	1	0.1335	0.4005	0.93481	0	10.2	8.6

Fonte – Adaptado de (PES, 1991).



Tabela 8 – Seguimentos das linhas de distribuição.

Nó A	Nó B	Comprimento total (km)	Comprimentos individuais (km)	Configuração
800	802	0,786	1 x 0,786	300
802	806	0,527	1 x 0,527	300
806	808	9,824	5 x 1,6 1 x 1,8237	300
808	810	1,769	1 x 1,769	303
808	812	11,430	6 x 1,6 1 x 1,830	300
812	814	9,062	5 x 1,6 1 x 1,062	300
814	850	0,003	2 x 0,05	301
816	818	0,521	1 x 0,521	302
816	824	3,112	1 x 1,6 1 x 1,512	301
818	820	14,676	8 x 1,6 1 x 1,876	302
820	822	4,188	2 x 1,6 1 x 0,988	302
824	826	0,924	1 x 0,924	303
824	828	0,256	1 x 0,256	301
828	830	6,230	3 x 1,6 1 x 1,43	301
830	854	0,158	1 x 0,158	301
832	858	1,494	1 x 1,494	301
832	888	0,000	0,000	XFM-1
834	860	0,616	1 x 0,616	301
834	842	0,085	1 x 0,085	301
836	840	0,262	1 x 0,262	301
836	862	0,085	1 x 0,085	301
842	844	0,411	1 x 0,411	301
844	846	1,109	1 x 1,109	301
846	848	0,162	1 x 0,162	301
850	816	0,094	1 x 0,094	301
852	832	0,003	2 x 0,05	301
854	856	7,111	4 x 1,6 1 x 0,720	303
854	852	11,226	6 x 1,6 1 x 1,626	301
858	864	0,494	1 x 0,494	302
858	834	1,777	1 x 1,777	301
860	836	0,817	1 x 0,817	301
862	838	1,481	1 x 1,481	304
888	890	3,219	1 x 1,6 1 x 1,619	300

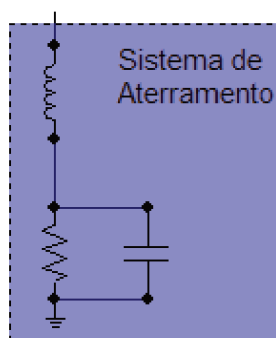
Fonte – Da autora.

### 4.3.2 Aterramento

O HEM (*Hybrid Eletromagnetic Model*) foi adotado como modelo para o aterramento do sistema por considerar a dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Este modelo é composto de um capacitor e resistor associados em para-

lelo (SILVA, 2015). Além disso, considera-se a indutância dos condutores de ligação e seus acessórios associada em série a esse conjunto, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Modelo de representação do sistema de aterramento.



Fonte – Da autora.

O modelo HEM é parametrizado de acordo com as equações (20) e (21).

$$C = 0,0743\epsilon_r(nF) \quad (20)$$

$$R = 0,119\rho(\Omega) \quad (21)$$

em que  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa e  $\rho$  é a resistividade do solo.

Considerando a permissividade relativa igual a 20 e a resistividade do solo igual  $1000 \Omega.m$ , temos uma capacitância de  $1,486nF$  e uma resistência de  $119\Omega$ . A indutância dos condutores de ligação e seus acessórios foi considerada igual a  $10\mu H$ , conforme adotado por Silva (2015). Esse aterramento foi associado ao modelo dos protetores anti-surto.

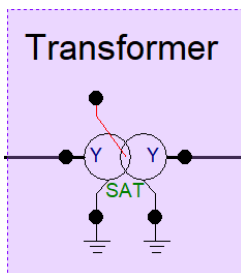
### 4.3.3 Transformadores

O alimentador de 34 barras do IEEE inclui um transformador abaixador entre as barras 832 e 888. Ele foi representado por um modelo de transformador saturável disponível no ATP-EMTP, como representado na Figura 29. Sua parametrização é descrita pelos dados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados do transformador abaixador.

Transformador abaixador	kVA	KV-alta	KV-baixa	R - %	X - %
XFM -1	500	24.9 - Gr.W	4.16 - Gr. W	1,9	4,08

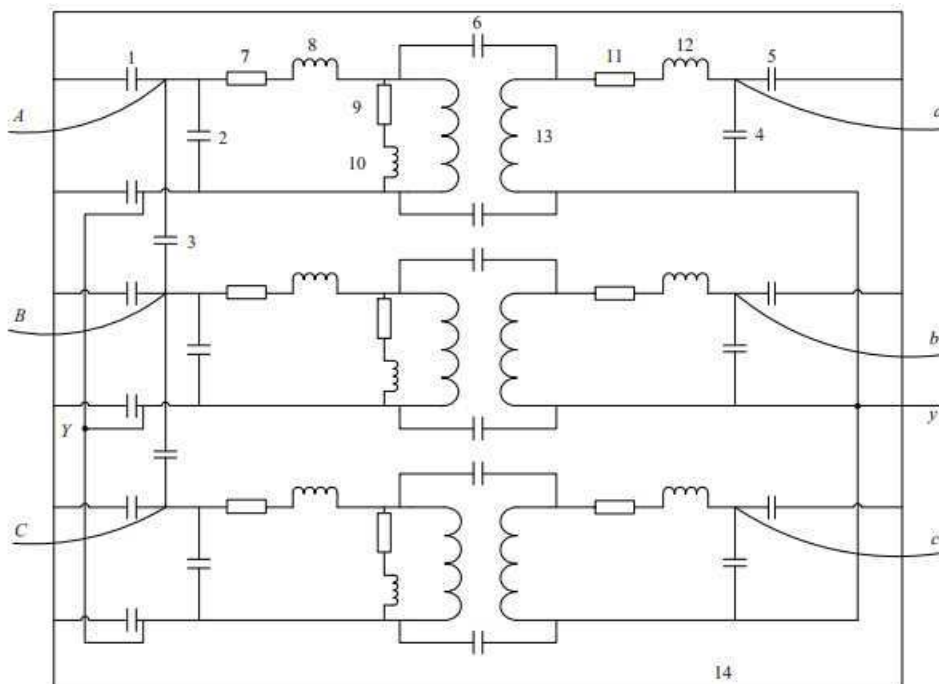
Figura 29 – Modelo do transformador abaixador.



Fonte – Da autora.

Outro transformador foi incluído para representar o transformador de potencial existente na subestação por meio do qual são adquiridas as medições de tensão. Seu modelo é representado pelo circuito ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Modelo de transformador de potencial para transitórios causados por descargas atmosféricas.



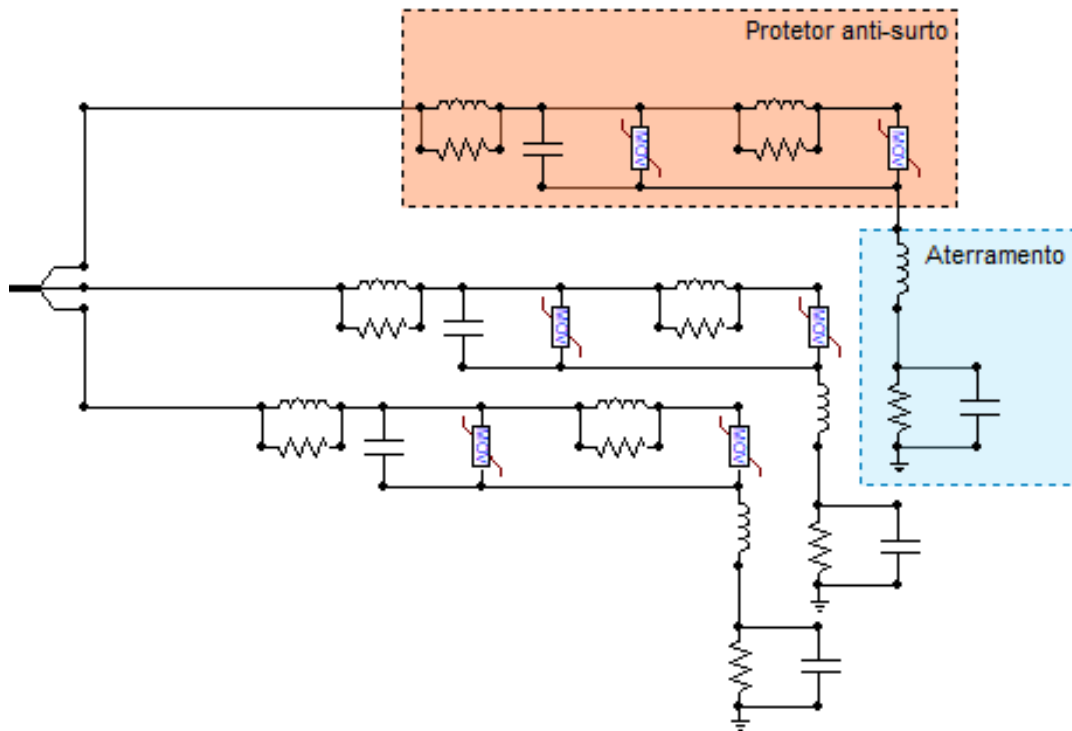
Fonte – Sun *et al.* (2015).

Esse modelo tem uma ampla resposta de banda de frequência para uma melhor representação das sobretensões causadas pelas descargas atmosféricas incidentes no sistema. Os parâmetros foram configurados de acordo com o trabalho apresentado por Sun *et al.* (2015).

#### 4.3.4 Protetor anti-surto

Os protetores anti-surto realizam a drenagem da corrente introduzida no sistema pela descarga atmosférica para proteger os equipamentos do sistema contra a sobretensão. O modelo de protetor anti-surto escolhido foi o IEEE W.G. 3.4.11, que foram dispostos ao longo do alimentador nas barras 808, 812, 816, 828, 834, 852, 854 e 862. Os detalhes do protetor anti-surto simulado podem ser percebidos na Figura 31.

Figura 31 – Modelo de protetor anti-surto simulado.



Fonte – Sun *et al.* (2015).

A parametrização dos elementos foi feita de acordo com as Equações (22), (23), (24), (25) e (26).

$$R_1 = 43,4\Omega \quad (22)$$

$$L_1 = 86,8nH \quad (23)$$

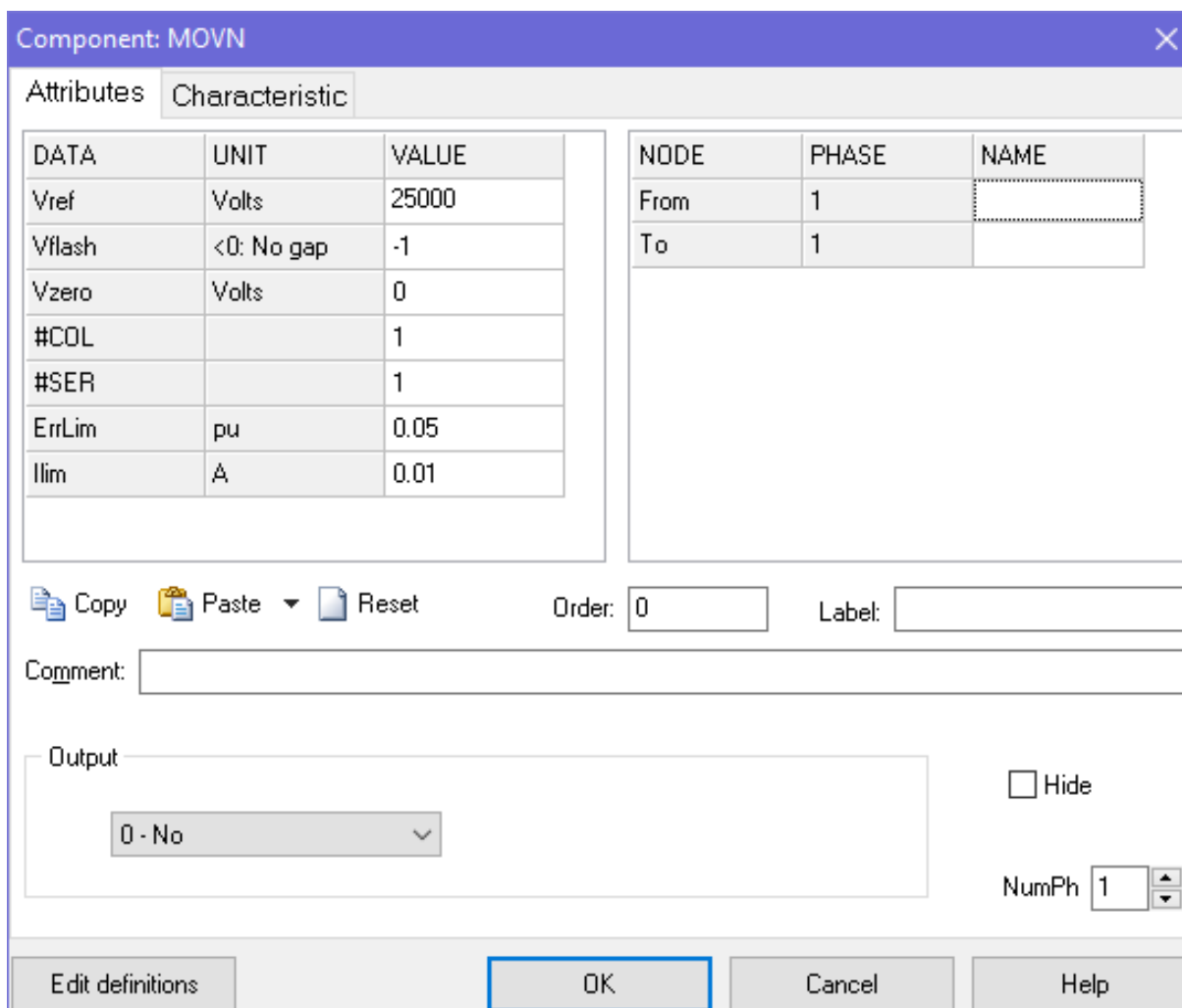
$$C = 230,4pF \quad (24)$$

$$L_2 = 6,51\mu H \quad (25)$$

$$R_2 = 28,21\Omega \tag{26}$$

Os elementos de resistência variável (MOV) necessitam da definição de atributos como tensão de referência e quantidade de elementos associados em série e em paralelo, e esta foi feita de acordo com os dados apresentados na Figura 32.

Figura 32 – Atributos do protetor anti-surto.



Fonte – Da autora.

Além destes dados, a característica não linear do MOV também deve ser definida. Para isso faz-se a inserção de uma curva V x I padrão de acordo com a tensão nominal do sistema ou equipamento a ser protegido. A Tabela 10 apresenta a curva V x I obtida a partir da tensão de alimentação do sistema e as diretrizes fornecidas pelo IEEE (1992).

Tabela 10 – Característica V x I dos varistores de óxido metálico.

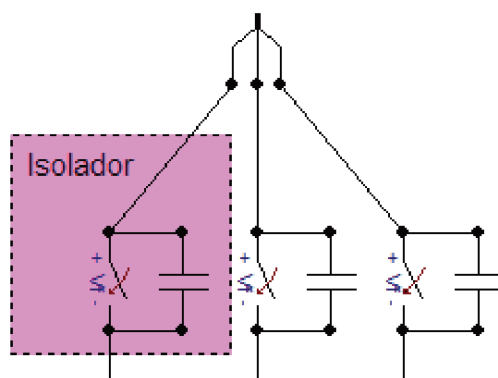
Current [kA]	A0 Voltage [kV]	A1 Voltage [kV]
0.01	42.0	-
0.1	46.2	36.9
1	50.4	40.8
2	52.2	42.9
4	54.0	44.4
6	54.6	45.0
8	56.1	45.9
10	57.0	46.5
12	57.9	46.8
14	59.1	47.4
16	60.0	47.7
18	61.5	48.0
20	63.0	48.3

Fonte – Da autora.

#### 4.3.5 Isoladores

Os isoladores são modelados por chaves normalmente abertas controladas por tensão em paralelo com um capacitor. O fechamento da chave simboliza a perda do isolamento que acontece quando a tensão disruptiva do isolador é atingida (SILVA, 2015). A Figura 33 apresenta a representação do modelo do isolador simulado para o sistema de distribuição em estudo.

Figura 33 – Modelo do isolador.



Fonte – Da autora.

A capacitância possui um valor típico de  $60pF$  e a chave foi configurada conforme os dados mostrados na janela apresentada na Figura 34, que define o tempo de

fechamento da chave, o tempo mínimo que a chave deve permanecer fechada, ambos em segundos, a margem de corrente em ampères e a tensão de *flashover* em Volts.

Figura 34 – Atributos da chave controlada por tensão do modelo de isoladores.

The screenshot shows a software dialog box titled 'Component: SWITCHVC'. It contains two tables of attributes and node information, along with control elements like 'Copy', 'Paste', 'Reset', 'Order', 'Label', 'Comment', 'Output', and 'Hide'.

DATA	UNIT	VALUE
T-cl		0
T-de		0.001
Imar		0
V-fl		180000

NODE	PHASE	NAME
SWF	C	800
SWT	C	X0001

Order:  Label:

Comment:

Output:   Hide

Buttons: Edit definitions, OK, Cancel, Help

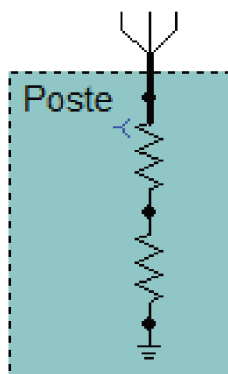
Fonte – Da autora.

### 4.3.6 Postes

Os postes são modelados por duas resistências associadas em série, que correspondem a sua estrutura propriamente dita e outra que corresponde ao seu aterramento. Esta associação pode ser simplificada por uma equivalente por meio da soma dos valores das duas resistências. Para representar a conexão do poste com os isoladores do sistema trifásico é utilizada uma associação de resistências em estrela para que a corrente que circula pelo poste corresponda à soma das correntes dos isoladores das três fases. O valor atribuído a estas resistências,  $1\Omega$ , foi pequeno, a fim

de não influenciar no comportamento do sistema. Com isso, os postes do sistema são representados pelo modelo final mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Modelo elétrico do poste, conexão e aterramento.



Fonte – Da autora.

O poste padrão adotado foi do tipo duplo T em concreto. A determinação da resistência da estrutura do poste pode ser calculada por (27) (SILVA, 2015).

$$R_{poste} = 60 \ln \left( 2\sqrt{2} \frac{H_c}{r_c} \right) - 60 \quad (27)$$

em que  $H_c$  é a altura média dos postes e  $r_c$  é o raio da base dos postes ambos em medidas em metros.

A altura média dos postes é dada pela altura do poste subtraída pelo engaste, que corresponde ao comprimento do poste que fica enterrado no solo. O engaste mínimo de poste é de 1,5 metros e o seu cálculo é dado por (28) (SILVA, 2015).

$$e = 0,1L + 0,6 \quad (28)$$

em que L é o comprimento do poste em metros.

Os postes do sistema medem 12 metros, de forma que o engaste calculado seja de 1,8 metros e a altura média seja de 10,2 metros.

O raio da base de um poste duplo T deve ser calculado utilizando uma equação que iguala a área do retângulo formado pela base e a área de um círculo equivalente. A partir dela, determinou-se que o raio da base do poste em questão é igual a 0,2303 metros. Concluiu-se, portanto, que a resistência da estrutura do poste é dada por 289,833Ω.

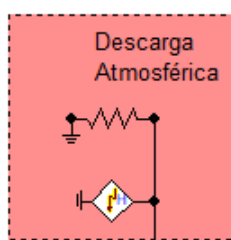


A resistência de aterramento foi adotada como  $10\Omega$  conforme simplificação apresentada por Silva (2015). Dessa maneira, a resistência equivalente do poste é dada por  $299,833\Omega$ .

#### 4.4 MODELO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

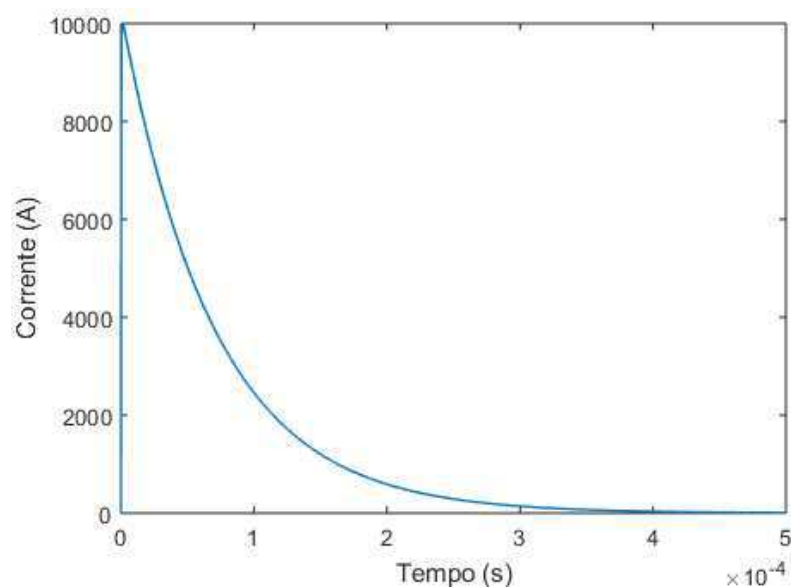
O modelo escolhido para representar as descargas atmosféricas é composto pela fonte Heidler de corrente em paralelo com um resistor, representando respectivamente a onda característica de corrente da descarga atmosférica e o canal de ionização formado pelo rompimento da rigidez dielétrica do ar. A Figura 36 representa a modelagem simulada no ATPDraw. A forma de onda de corrente adotada foi a  $1,2 \times 50\mu s$  com amplitude de 10 kA, conforme Figura 37.

Figura 36 – Modelo de descargas atmosféricas.



Fonte – Da autora.

Figura 37 – Curva de corrente  $1,2 \times 50\mu s$  da fonte Heidler.



Fonte – Da autora.

A escolha desse modelo de representação se justifica pela sua ampla utilização em estudos, uma vez que, é considerada uma boa estimativa para representar a maior parte das descargas atmosféricas por possuírem características semelhantes a estas. A configuração da fonte Heidler implementada foi proposta por Silva (2015) e pode ser vista na Figura 38. De acordo com Silva (2015), o valor da resistência que modela o canal de ionização costuma variar de 100 a 3000 $\Omega$ , tendo sido adotado o valor de 400 $\Omega$ .

Figura 38 – Configuração da fonte Heidler para forma de onda de corrente de 1,2 x 50 $\mu$ s com amplitude de 10 kA.

The screenshot shows a dialog box titled "Component: HEIDLER". It contains two tables and several control elements.

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Ampere	10000
T <sub>f</sub>	s	1.2E-6
tau	s	7E-5
n		2
T <sub>start</sub>	s	0.28926
T <sub>stop</sub>	s	1

NODE	PHASE	NAME
HEI	B	X0027

Below the tables are buttons for Copy, Paste, and Reset. There is an "Order:" field with the value 0 and a "Label:" field. A "Comment:" text area is also present. Under "Type of source", the "Current" radio button is selected, and there is a "Hide" checkbox. At the bottom, there are buttons for "Edit definitions", "OK", "Cancel", and "Help".

Fonte – Da autora.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

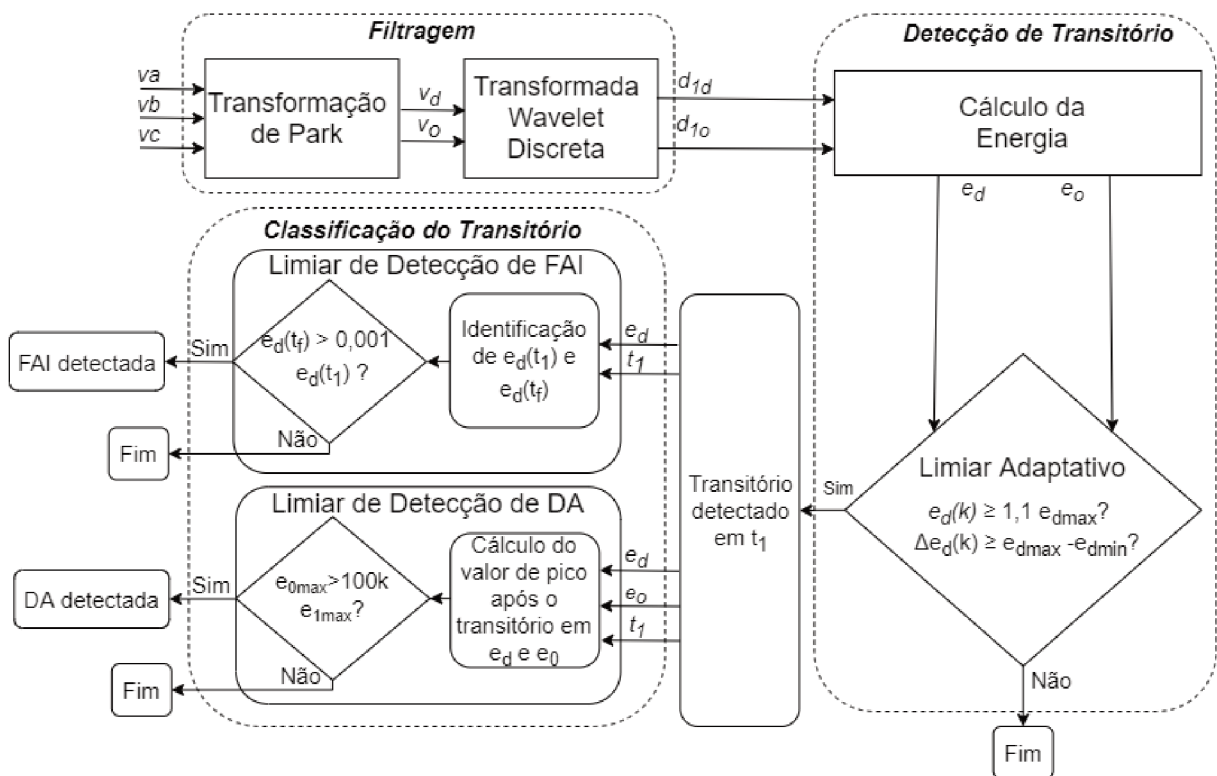
Neste capítulo foram apresentadas as descrições das modelagens propostas para o estudo das faltas de alta impedância e descargas atmosféricas. Ambas foram baseadas no alimentador de 34 barras do IEEE, amplamente utilizado pela comuni-

dade científica, com o objetivo de unificar os resultados deste trabalho e possibilitar comparações futuras. Por apresentar característica de alta frequência, o estudo das descargas atmosféricas exigiu um modelo de sistema mais detalhado que fosse capaz de reproduzir o comportamento dos diversos equipamentos presentes no sistema frente a esse evento. Este capítulo apresentou como contribuição a descrição de todos os equipamentos da modelagem proposta.

## 5 METODOLOGIAS DE DETECÇÃO PROPOSTAS

Os esquemas de detecção de faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas propostos se baseiam nos sinais de tensão medidos na saída da subestação no secundário do transformador de potencial trifásico -  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ . Eles possuem particularidades, porém compartilham da mesma estrutura de processamento de sinais, conforme ilustrado na Figura 39. Essa estrutura pode ser dividida em três blocos: filtragem, detecção de transitório e classificação de falta. Cada um desses blocos é detalhado neste capítulo.

Figura 39 – Fluxograma dos esquemas de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas.



Fonte – Da autora.

### 5.1 FILTRAGEM

A filtragem do sinal é baseada na aplicação da transformação de Park e da transformada Wavelet discreta. O objetivo principal é condensar o sinal trifásico obtido pelas medições facilitando o processamento e filtrar as baixas frequências de modo a permitir a identificação da presença de distúrbios consequentes das faltas de alta impedância e da incidência de descargas atmosféricas.

### 5.1.1 Transformação de Park

A Transformação de Park (TP) converte as componentes trifásicas do sistema no domínio do tempo na referência abc em componentes de eixo direto, quadratura e zero em um referencial rotativo, filtrando a frequência nominal do sistema (MORETO; KHAIRALLA, 2018). Conforme apresentado na Figura 39, as componentes de interesse neste estudo são as de eixo direto e zero. A TP é calculada considerando um instante de tempo  $t$  a partir da equação (29).

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \Gamma_p \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (29)$$

Nela,  $d$  e  $q$  são as componentes do sistema de dois eixos em uma referência rotativa, 0 é a componente zero do sistema de dois eixos em referência estacionária e  $a$ ,  $b$ , e  $c$  são as componentes do sistema trifásico na referência abc.

$\Gamma_p$  é dada pela equação (30).

$$\Gamma_p = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \cos(\phi - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\phi + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\phi) & -\sin(\phi - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\phi + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Nessa equação,  $\phi = \omega t$  é o ângulo entre os eixos  $a$  e  $q$  no alinhamento de  $q$ ,  $\omega$  representa a velocidade de rotação do plano  $d - q$  e  $t$  é o tempo do alinhamento inicial em segundos.

### 5.1.2 Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet Discreta (TWD) realiza a decomposição de um sinal em componentes de baixa e alta frequência, essas são chamadas de coeficientes de aproximação e detalhe, respectivamente. A TWD permite que a componente de alta frequência possa ser analisada separadamente, sendo conveniente para a detecção de transitórios eletromagnéticos.

A TWD é calculada conforme a equação (31). Seu cálculo consiste na convolução do sinal a partir de coeficientes discretos de dilatação e translação por meio de filtros bases, chamados de famílias de wavelets mãe.

$$TDW(f, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \Psi \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (31)$$

Nessa equação,  $m$  é um número inteiro que administra a dilatação e  $n$  também é um número inteiro que administra a translação, começando de  $a_0$  e  $b_0$ , e  $k$  é o número da amostra do sinal.

Os parâmetros de dilatação e translação variam discretamente. Os valores dos parâmetros  $a$  e  $b$  podem se restringir a uma grade discreta na análise de sinais fixando-se um passo de dilatação  $a_0$  e um passo de translação  $b_0$ . Primeiro, os parâmetros de escala e translação são discretizados e em seguida discretiza-se o tempo ou variável independente (KHAIRALLA, 2017).

O coeficiente de aproximação apresenta a mesma tendência do sinal original por ser uma representação de baixa frequência e o coeficiente de detalhe é dado pela diferença entre dois coeficientes de aproximação sucessivos retratando o comportamento das componentes de alta frequência.

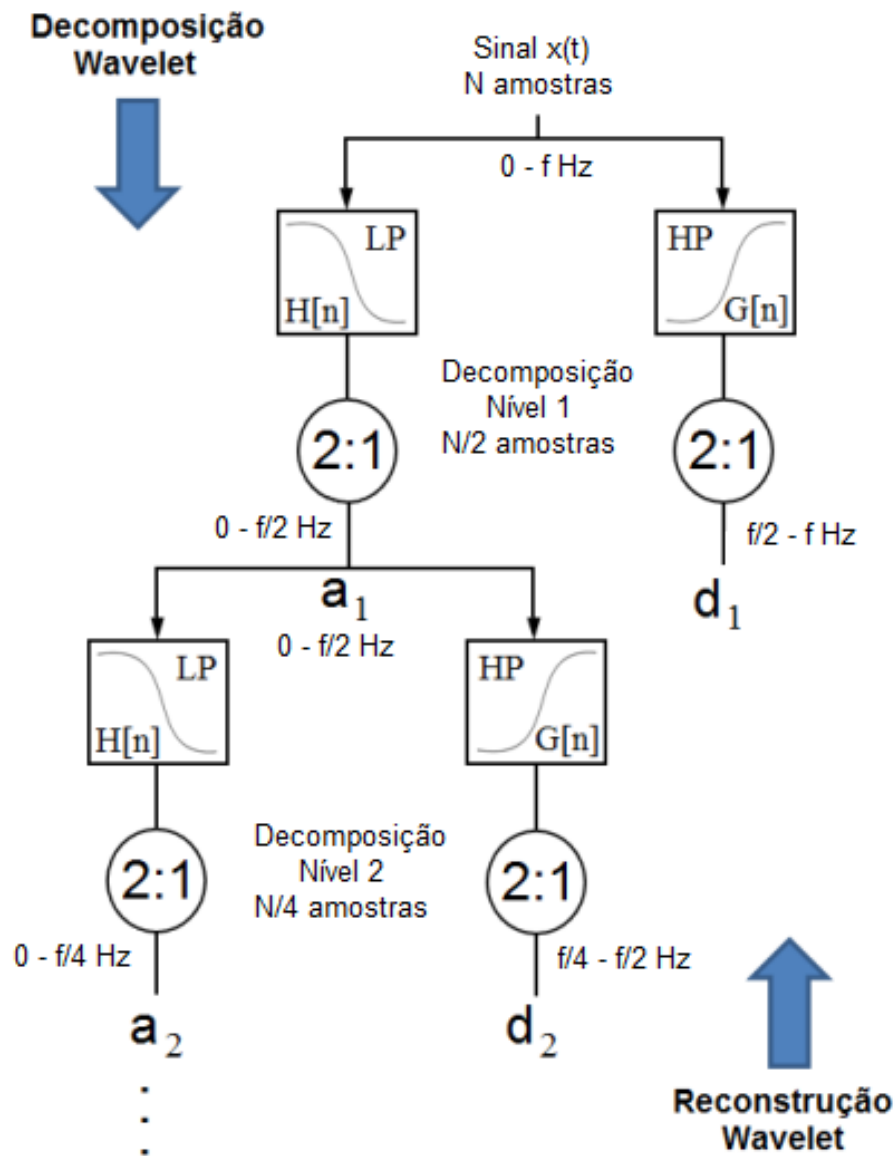
O cálculo da TWD é comumente realizado por meio da decomposição de multi-resolução de sinal, também chamado de algoritmo de Mallat, apresentado por Mallat (1989). Esse algoritmo também permite a reconstrução do sinal a partir das componentes de aproximação e detalhe resultantes. A arquitetura da decomposição multi-resolução, empregada neste trabalho, está representada na Figura 40.

A TWD consiste em uma transformação linear através de uma função base chamada wavelet mãe, a qual possui diversos tipos e modelos. Diversas funções bases estão disponíveis na literatura. A escolha da wavelet mãe apropriada é de extrema importância para obter-se bons resultados. Essa escolha deve ser pautada nas características do estudo a ser desenvolvido.

A família Daubechies possui característica ortogonal. Isso significa que o número de convoluções em cada escala é proporcional à largura da função wavelet mãe nesta escala, sendo utilizado em processamento de sinais visto que fornece a representação mais compacta do sinal em análise (KHAIRALLA, 2017). Essa família é amplamente utilizada para análise de sinais provenientes de sistemas elétricos de potência. Ela foi desenvolvida por Ingrid Daubechies, que criou vários tipos de ondas, conforme ilustrado na Figura 41, nomeadas por  $dbn$ , em que  $db$  refere-se à abreviação do nome da família e  $n$  a sua ordem.

A família Daubechies 4 ( $db4$ ) foi escolhida por sua ampla utilização em aplicações de sistemas elétricos devido ao seu comportamento diante de distúrbios de transitório rápido (MORETO; KHAIRALLA, 2018). Com o primeiro nível de decomposição, já foram obtidos resultados satisfatórios. Dessa forma, o nível 1 foi adotado como uma boa estratégia, considerando menor esforço computacional e agilidade.

Figura 40 – Arquitetura da transformada wavelet discreta a partir da decomposição multiresolução.



Fonte – Adaptado de (KHAIRALLA, 2017).

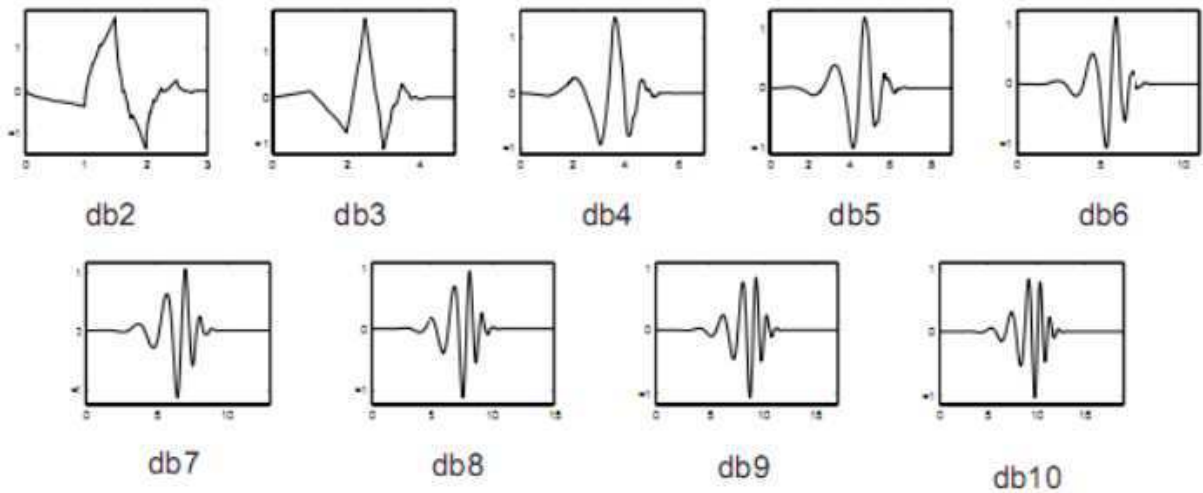
A transformação da db4 possui quatro wavelets e coeficientes da função de escala. Estes são definidos pelas equações (32), (33), (34) e (35).

$$h_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \tag{32}$$

$$h_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \tag{33}$$

$$h_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \tag{34}$$

Figura 41 – Formas de onda das Wavelets da família Daubechies.



Fonte – (KHAIRALLA, 2017).

$$h_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad (35)$$

A função de escalonamento para a entrada de dados é aplicada a cada passo da transformada wavelet. Dado um conjunto de dados original que possua  $N$  valores, a função de escalonamento quando aplicada na transformada resultará em  $N/2$  valores suavizados. Os valores dos coeficientes wavelet da função de escalonamento da família db4 são apresentados pelas equações (36), (37), (38) e (39).

$$g_0 = h_3 \quad (36)$$

$$g_1 = -h_2 \quad (37)$$

$$g_2 = h_1 \quad (38)$$

$$g_3 = -h_0 \quad (39)$$

O escalonamento e funções wavelet são calculados a partir do produto interno dos coeficientes e quatro valores de dados, dessa maneira as funções de escala e de tempo da wavelet db4 são dadas pelas equações (40) e (41).

$$a_i = h_0 s_{2i} + h_1 s_{2i+1} + h_2 s_{2i+2} + h_3 s_{2i+3} \quad (40)$$

$$b_i = g_0 s_{2i} + g_1 s_{2i+1} + g_2 s_{2i+2} + g_3 s_{2i+3} \quad (41)$$



## 5.2 DETECÇÃO DE TRANSITÓRIO

Esse bloco busca identificar inicialmente se houve algum evento que tenha causado transitório no sistema. Essa identificação é realizada a partir da implementação do cálculo da energia dos coeficientes de detalhe resultantes da TWD e da definição de um limiar adaptativo capaz de identificar essa ocorrência.

### 5.2.1 Cálculo da Energia

A razão principal para o cálculo da energia é evidenciar a característica do transitório e, conseqüentemente, melhorar a precisão da detecção. Sendo assim, o cálculo da energia é realizado por meio do janelamento de um ciclo da frequência fundamental da tensão, de acordo com as equações (42) e (43). O número de amostras resultantes dessa técnica de cálculo é igual a diferença entre o número total de amostras do sinal e o tamanho da janela. Para contornar esse fato, a fim de que o número de amostras resultante seja igual ao do sinal original, admite-se que o valor resultante do cálculo da primeira janela seja atribuído ao correspondente a um ciclo de amostras da energia, conforme descrito pela equação (42).

$$e_p(k) = \sum_{n=1}^{\Delta k} d_{1p}^2(n), \quad \text{para } 1 \leq k \leq \Delta k \quad (42)$$

$$e_p(k) = \sum_{n=k-\Delta k-1}^{\Delta k} d_{1p}^2(n), \quad \text{para } \Delta k \leq k \leq k_t \quad (43)$$

Nessas equações,  $p$  é um índice que corresponde a componente de eixo direto ou zero,  $d_{1p}$  é o primeiro nível do coeficiente de detalhe da transformada wavelet,  $\Delta k$  é o tamanho da janela e  $k_t$  é o número de amostras do sinal original.

### 5.2.2 Limite adaptativo

O limite adaptativo identifica os valores máximo e mínimo da energia dos coeficientes de detalhe dos dois primeiros ciclos do sinal a fim de determinar o limite de desvio máximo e a taxa de variação consideradas normais no regime permanente do sistema. A partir disso, são estabelecidos limites de normalidade úteis aos quais a superação identifica a ocorrência de um transitório. Seu caráter adaptativo é justificado por considerar as características e ruídos presentes no sinal na sua operação normal a cada ciclo do processamento. Dessa forma, o transitório é identificado quando ambas as condições descritas pelas equações (44) e (45) forem satisfeitas e o instante de tempo dessa identificação é então registrado.

$$e_p(k) \geq 1.1e_{max} \quad (44)$$

$$\Delta e_p(k) \geq e_{max} - e_{min} \quad (45)$$

Nessas equações,  $e_{max}$  e  $e_{min}$  são os valores máximo e mínimo de energia dos coeficientes de detalhe nos primeiros dois ciclos do sinal, respectivamente, e  $\Delta e_p(k)$  é a taxa de variação da energia calculada, obtida a partir da subtração da energia de amostras consecutivas.

### 5.3 CLASSIFICAÇÃO DO TRANSITÓRIO

A classificação de transitório resulta da análise das respostas das simulações dos cenários de faltas de alta impedância, de incidência de descargas atmosféricas, além de faltas e situações comuns do sistema elétrico, como faltas de baixa impedância, inserção e retirada de banco de capacitores e energização e desligamento de ramais, que também provocam transitórios, de modo que estas não provoquem falsas detecções por parte da metodologia. O bloco de classificação das faltas é específico para o tipo de falta que se deseja identificar, portanto, há um específico para as faltas de alta impedância e outro dedicado as descargas atmosféricas. Eles se baseiam na energia calculada e no instante de tempo de identificação do transitório. A caracterização de cada um deles é descrita nas seções seguintes.

#### 5.3.1 Classificação de faltas de alta impedância

A classificação de faltas de alta impedância é feita por meio da verificação da amplitude máxima da energia do coeficiente de detalhe correspondente a componente de eixo direto e da amplitude média após 200 milissegundos do tempo de ocorrência do transitório. Para estabelecer essa relação, tempo médio de atuação dos relés de proteção em sistemas de distribuição foi levado em consideração, sendo geralmente próximo a 150 milissegundos (KHAIRALLA, 2017). Cabe ressaltar que esse bloco deve ser parametrizado de acordo com as topologias de proteção das concessionárias de energia, a partir da avaliação dos tempos de atuação do sistema de proteção do alimentador que se pretende realizar a detecção desse tipo de falta. Caso a proteção de sobrecorrente não tenha atuado após 200 milissegundos com a presença do transitório, há a possibilidade de que uma falta de alta impedância esteja acometendo o sistema.

A energia média é calculada de acordo com a equação (46) e corresponde a média aritmética das amostras de um ciclo após 200 milissegundos do instante de registro do transitório.

$$\bar{e} = \frac{\sum_{n=0}^k e_p(t_n)}{k} \quad (46)$$

Nessa equação,  $\bar{e}$  representa o valor médio da energia,  $e_p(t_n)$  é o valor da energia correspondente ao tempo  $t_n$ , considerando que  $t_0$  representa o tempo registrado pela detecção do transitório a partir da verificação do limiar adaptativo acrescido de 200 milissegundos, e  $k$  é o número de amostras por ciclo, definido pela frequência em que o sinal de tensão foi amostrado.

A condição estabelecida para que seja detectada uma falta de alta impedância é que a energia média calculada, conforme (46), corresponda a pelo menos 0,1% do valor máximo da energia após a detecção do transitório. Sendo assim, uma falta de alta impedância é detectada no sistema caso a hipótese estabelecida por (47) seja satisfeita.

$$\bar{e} \geq 0,001e_{max} \quad (47)$$

Nessa inequação,  $e_{max}$  corresponde ao maior valor de amplitude da energia do coeficiente de detalhe da componente de eixo direto observado após o instante em que o transitório foi registrado.

### 5.3.2 Classificação de descargas atmosféricas

A classificação de descargas atmosféricas é feita a partir da comparação das máximas energias dos coeficientes de detalhe das componentes de eixo direto e zero da tensão após a identificação do transitório. Sendo assim, a partir do instante de tempo em que o transitório ocorreu, os vetores de ambas as energias são percorridos a fim de determinar o maior valor registrado em cada um deles. A detecção de uma descarga atmosférica ocorre quando a diferença entre a amplitude destas energias for superior a 100.000, conforme (48).

$$e_{0max} - e_{dmax} > 100.000 \quad (48)$$

Nessa equação,  $e_{dmax}$  e  $e_{0max}$  são as energias máximas dos coeficientes de detalhe das componentes de eixo direto e zero, respectivamente, observada após o instante em que o transitório foi registrado pelo algoritmo.

Essa comparação se justifica pela observação do comportamento da forma de onda da energia dos respectivos coeficientes na simulação da ocorrência de descargas atmosféricas e dos demais tipos de defeito ou situações que também provocam transitórios no sistema. No caso das descargas atmosféricas, o patamar que a amplitude de cada componente atinge é expressamente diferente e o mesmo não ocorre nos demais

casos. Essas características serão enfatizadas no capítulo 6 por meio da apresentação dos resultados deste estudo.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo se dedicou a apresentação das metodologias de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas. Ambas compartilham da mesma estrutura, dividida em três blocos: filtragem, detecção de transitório e classificação de falta. As definições da transformação de Park e transformada Wavelet empregadas no bloco de filtragem foram apresentadas e suas utilizações dentro do algoritmo foram definidas. O cálculo da energia dos coeficientes de detalhe foi estabelecido, bem como os critérios para definição do limiar adaptativo utilizado para determinar a detecção de transitórios nos sinais de tensão do sistema. Por fim, o bloco de classificação de falta composto por dois classificadores específicos para faltas de alta impedância ou descargas atmosféricas foram apresentados, bem como a estratégia adotada para a sua definição.

A linguagem utilizada na implementação das metodologias foi o Python. Cabe ressaltar que, as metodologias propostas não se destinam a proteção contra faltas de alta impedância nem de descargas atmosféricas, mas como ferramentas de diagnóstico pós-operação. Porém, podem sim ser associados a uma dinâmica que seja capaz de atuar diretamente nos dispositivos de proteção.

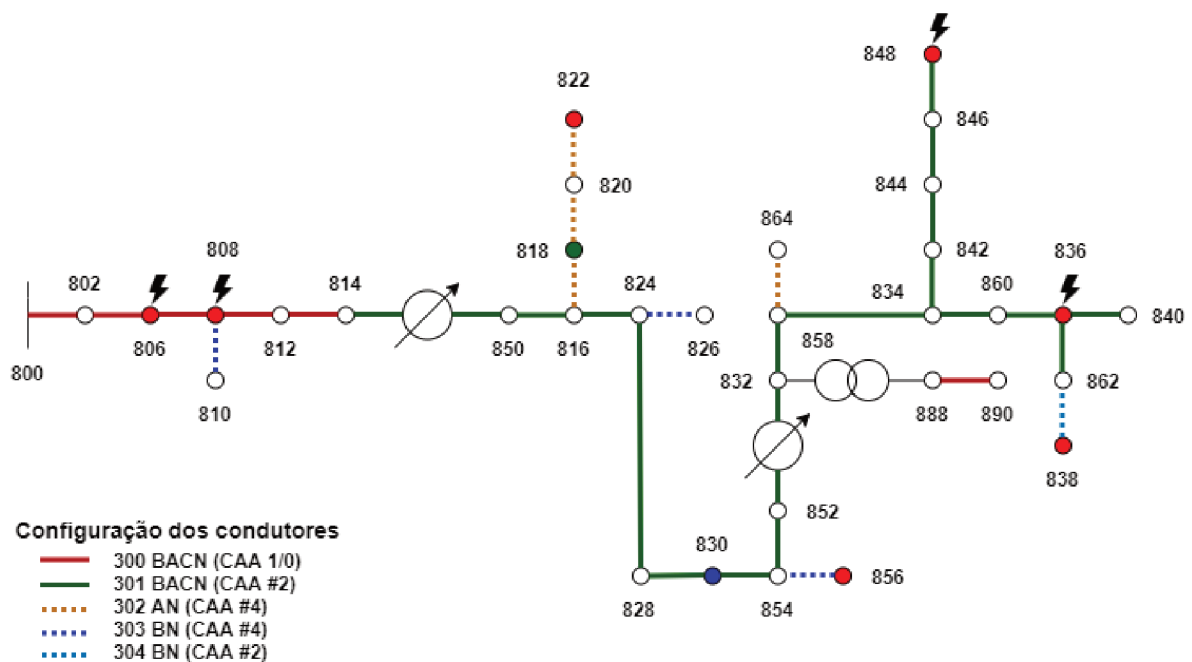
## 6 RESULTADOS

Com o objetivo de validar as metodologias de detecção propostas, cenários de faltas de alta e baixa impedância e descargas atmosféricas foram simulados nos sistemas teste de distribuição. Além disso, situações comuns a esse tipo de sistema, que também produzem transitórios, foram implementadas no modelo de rede de parâmetros concentrados a fim de testar a capacidade de distinção dos fenômenos e, conseqüentemente, analisar o desempenho das metodologias.

As faltas de baixa impedância foram implementadas a partir da inclusão de uma resistência de  $0,001 \Omega$  à terra. As demais situações simuladas foram a desenergização e energização de banco de capacitores e a energização e desenergização de um ramal, implementadas respectivamente pela operação da chave que conecta um banco de capacitores trifásico de 1,2 Mvar a barra 830 e a que conecta o ramal 818 ao tronco principal do sistema.

A Figura 42 apresenta o diagrama do sistema com indicação das barras em que os cenários foram simulados. As faltas de alta impedância estão representadas pela cor vermelha, a energização e desenergização de ramal pela cor verde, a desenergização e desenergização de banco de capacitores pela cor azul e as descargas atmosféricas pela simbologia de um raio.

Figura 42 – Diagrama do alimentador teste IEEE 34 barras com representação dos cenários simulados.



Fonte – Da autora.

A Tabela 11 apresenta um resumo dos cenários simulados, caracterizados pelo tipo do evento, local (barra e fase) e instante de ocorrência, destacando os cenários representativos de cada tipo de falta em negrito que terão as formas de onda apresentadas neste capítulo. Todos os eventos, uma vez inseridos, duram até o final da simulação.

Tabela 11 – Sumário dos cenários de teste simulados.

Eventos	Barra	Fase	Instante (s)
<b>Faltas de alta e baixa impedância</b>	806	A	0.06
	806	B	0.06
	806	C	0.06
	808	A	0.06
	822	A	0.06
	838	B	0.06
	<b>848</b>	<b>A</b>	<b>0.06</b>
	848	B	0.06
	848	C	0.06
	856	B	0.06
<b>Energização de ramal</b>	<b>818</b>	<b>A</b>	<b>0.06</b>
<b>Desenergização de ramal</b>	<b>818</b>	<b>A</b>	<b>0.06</b>
<b>Desenergização de banco de capacitores</b>	<b>830</b>	<b>ABC</b>	<b>0.06</b>
<b>Energização de banco de capacitores</b>	<b>830</b>	<b>ABC</b>	<b>0.06</b>
<b>Descarga atmosférica</b>	806	B	0.28926
	808	B	0.28926
	828	A	0.28926
	836	A	0.28926
	836	B	0.28926
	836	C	0.28926
	<b>848</b>	<b>A</b>	<b>0.28926</b>
	848	B	0.28926
848	C	0.28926	

Os resultados obtidos a partir da aplicação das metodologias descritas no Capítulo 5 aos sinais de tensão medidos no secundário do transformador de potencial são apresentados e analisados neste capítulo. Esses resultados consistem na apresentação das formas de onda das tensões trifásicas, das componentes de eixo direto e zero, dos coeficientes de detalhe e da energia calculada. Além disso, o sumário das saídas dos algoritmos de detecção de faltas de alta impedância e descargas atmosféricas de cada cenário em formato de tabela, indicando ainda o tempo em que o transitório foi detectado pelo algoritmo. Cabe ressaltar que a frequência de amostragem utilizada na aquisição de dados foi 15.360 Hz.

As formas de onda da energia referentes às componentes de eixo direto e zero dos cenários representativos citados estão apresentadas na Figura 43 com o objetivo de explicitar as estratégias de detecção das metodologias propostas. Devido a baixa magnitude dessa componente, a escala logarítmica foi empregada facilitando a

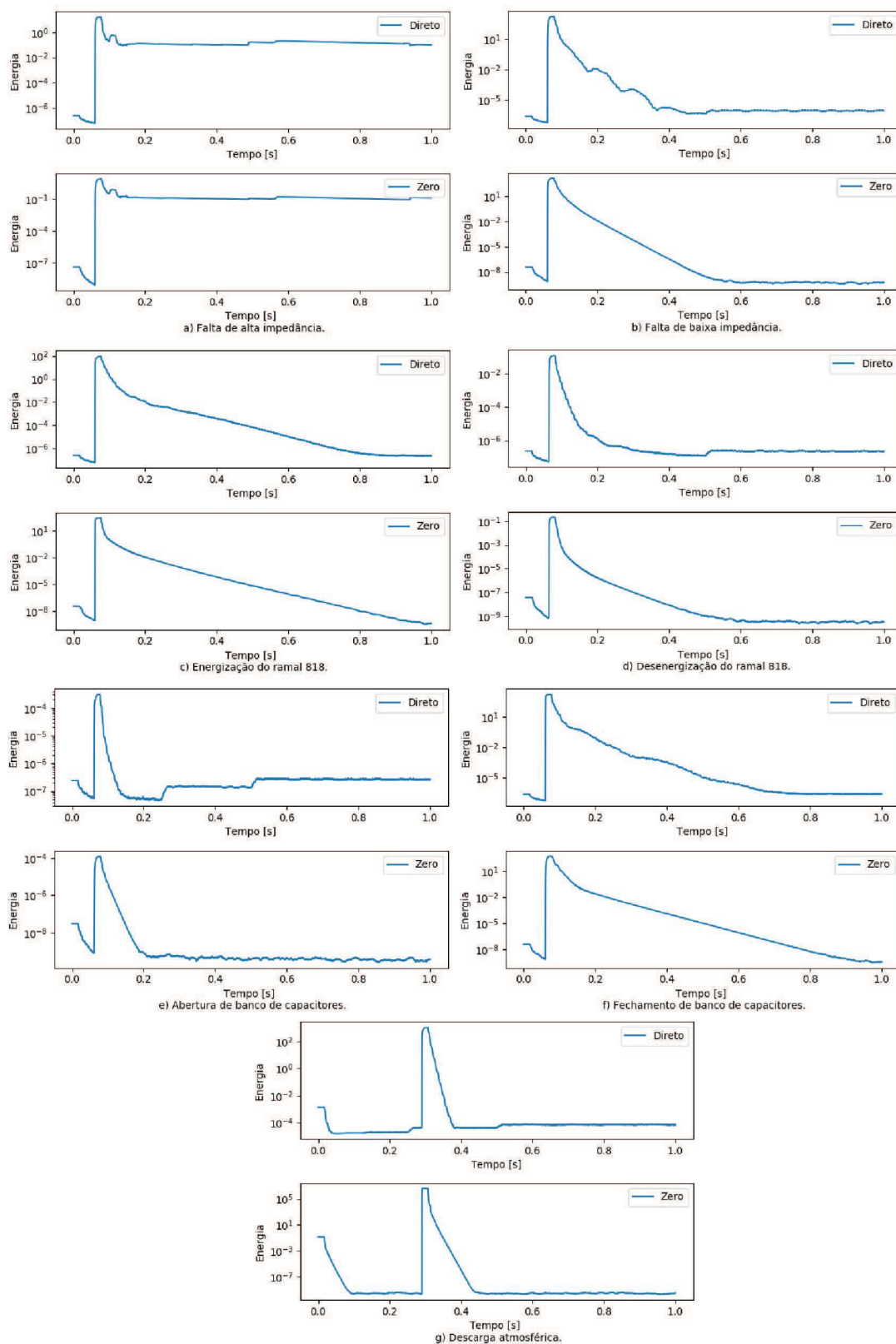
observação do seu comportamento ao longo do tempo. Cabe ressaltar que devido ao método de cálculo da energia, descrito pelas Equações (42) e (43), adotado para que o número de amostras da energia calculada seja igual ao do sinal original, superando a característica observada no cálculo feito por janelamento de que o número de amostras calculadas é igual à diferença do número de amostras e o tamanho da janela adotada, é atribuído o mesmo valor de energia para o primeiro ciclo de amostras. Esse perfil pode ser observado no início de todos os resultados das formas de onda de energia calculada.

A estratégia utilizada na detecção de faltas de alta impedância é baseada na diferenciação do comportamento ao longo do tempo da energia referente às componentes de eixo direto. A partir da observação dos resultados dos cenários simulados, apresentadas na Figura 43, concluiu-se que o processo de decaimento da amplitude da energia após a ocorrência do transitório é característico de cada evento, porém todos apresentam uma similaridade não observada no caso da ocorrência de faltas de alta impedância. Essa similaridade consiste na atenuação da energia até retornar a um valor próximo ao observado antes do transitório. No caso da falta de alta impedância, a energia da componente de eixo direto apresenta baixa taxa de decaimento, mantendo um comportamento com característica quase constante após o transitório sem retornar ao patamar anterior a falta.

A estratégia utilizada na detecção de descargas atmosféricas é pautada na análise da máxima amplitude de energia observada após o início do transitório referentes as componentes de eixo direto e zero. A partir dos resultados da Figura 43, também foi observada uma identidade entre a ordem de grandeza do valor de pico da energia das componentes de eixo direto e zero. Contudo, no caso da simulação de uma descarga atmosférica o valor de pico da energia da componente zero é muito superior ao apresentado pela de eixo direto. Dessa forma, a estratégia adotada pelas metodologias de detecção foi a determinação de limiares capazes de distinguir as singularidades ressaltadas pelas análises das faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas.

Na sequência deste capítulo, os resultados detalhados obtidos para os cenários representativos de cada evento simulado são apresentados.

Figura 43 – Comparativo da energia das componentes de eixo direto e zero dos cenários de falta simulados.

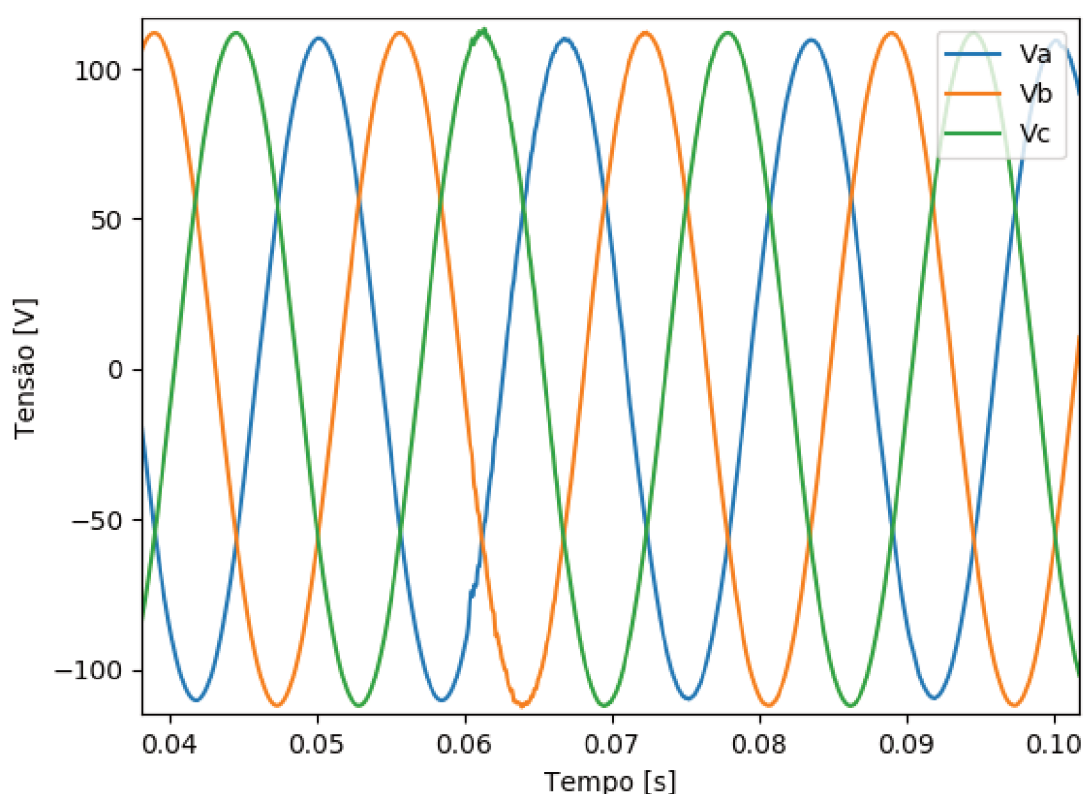




## 6.1 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As tensões trifásicas coletadas na simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848 estão apresentadas na Figura 44. As distorções observadas nas formas de onda das tensões são consideradas pequenas. Esse comportamento era esperado, uma vez que, as faltas de alta impedância são caracterizadas pela baixa amplitude de corrente.

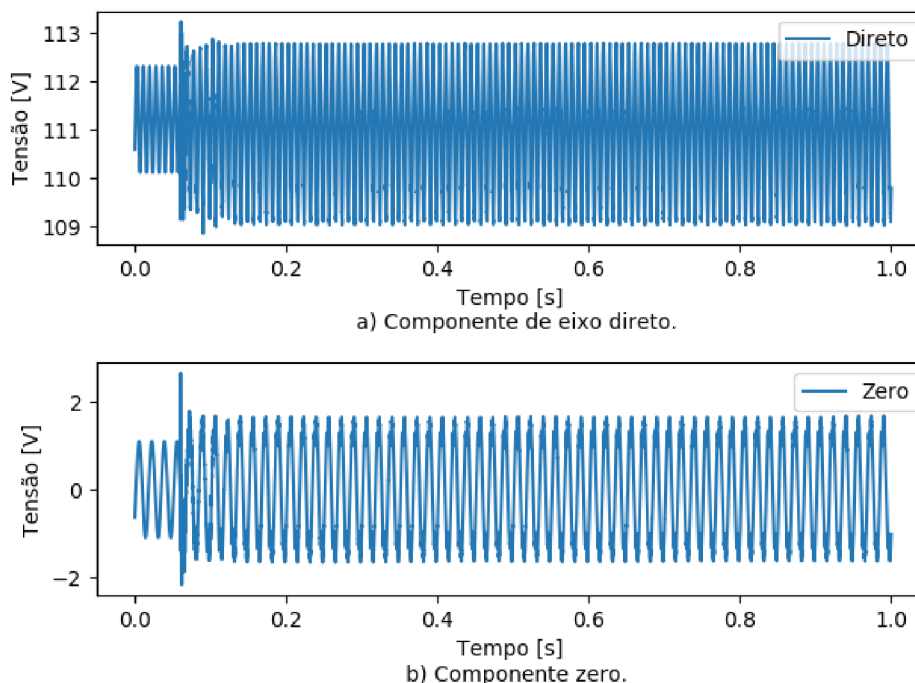
Figura 44 – Tensões trifásicas medidas na simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848.



A transformada de Park aplicada às tensões trifásicas resultam nas componentes de eixo direto e zero. As formas de onda dessas componentes para a falta de alta impedância na fase A da barra 848 estão apresentadas na Figura 45. Ambas retratam o transitório de baixa amplitude provocado pela incidência da falta de alta impedância. No período anterior a falta, a amplitude apresenta uma variação menor e comportamento uniforme, sofre alteração não linear com baixa variação de amplitude durante o transitório estabilizando em um valor superior ao observado inicialmente. A componente de eixo direto varia em torno da tensão nominal do secundário do transformador de potencial e a componente zero oscila em torno de zero.

A transformada Wavelet aplicada às componentes de eixo direto e zero resultam em coeficientes de detalhe e aproximação. O coeficiente de detalhe retrata as com-

Figura 45 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848.



ponentes de alta frequência presentes no sinal sendo interessante para metodologia proposta. As formas de onda deste coeficiente relativo às componentes de eixo direto e zero da falta de alta impedância em análise estão apresentadas na Figura 46.

Os coeficientes de detalhe relativos a ambas as componentes têm comportamentos similares. No período anterior a falta são nulos e assim que a falta se inicia sua amplitude é alterada abruptamente, de modo que a amplitude máxima da componente de eixo direto supera 0,5 e a da componente zero também ultrapassa ligeiramente o mesmo valor. Após o transitório inicial, elas apresentam oscilações variáveis ao longo do tempo.

As energias calculadas com base nos coeficientes de detalhe resultantes da aplicação da transformada Wavelet exibem um comportamento semelhante em relação as suas formas de onda diferindo ligeiramente no valor da amplitude, conforme disposto na Figura 47. Observa-se que após o transitório a amplitude se mantém praticamente constante e com valor próximo ao obtido durante o transitório, não havendo o decaimento da energia a medida que o tempo passa.

Figura 46 – Coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero da simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848.

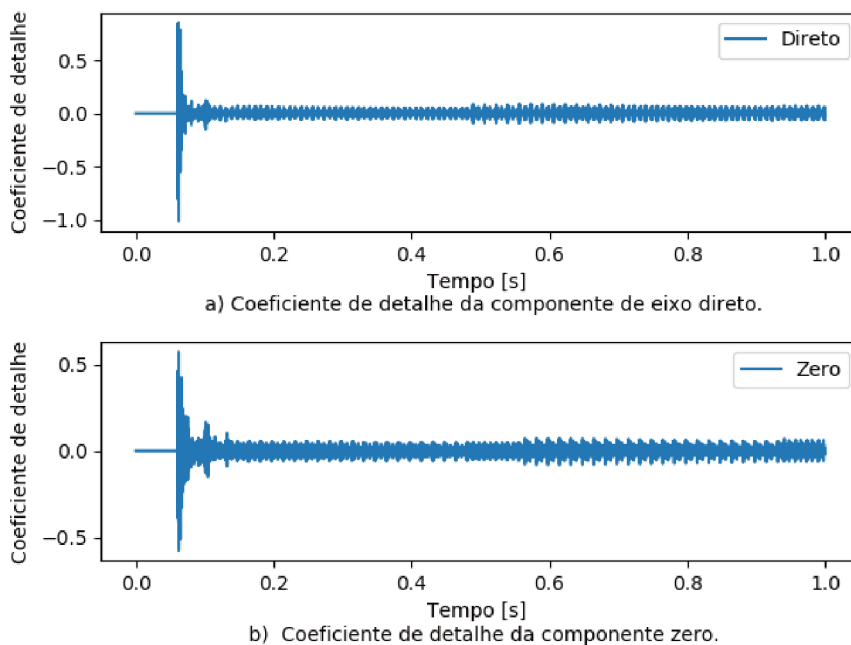
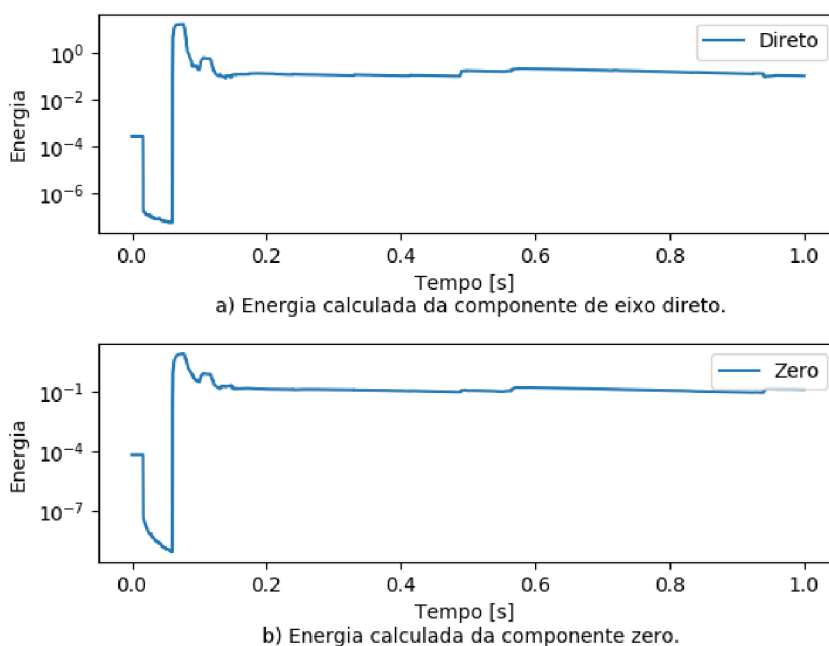


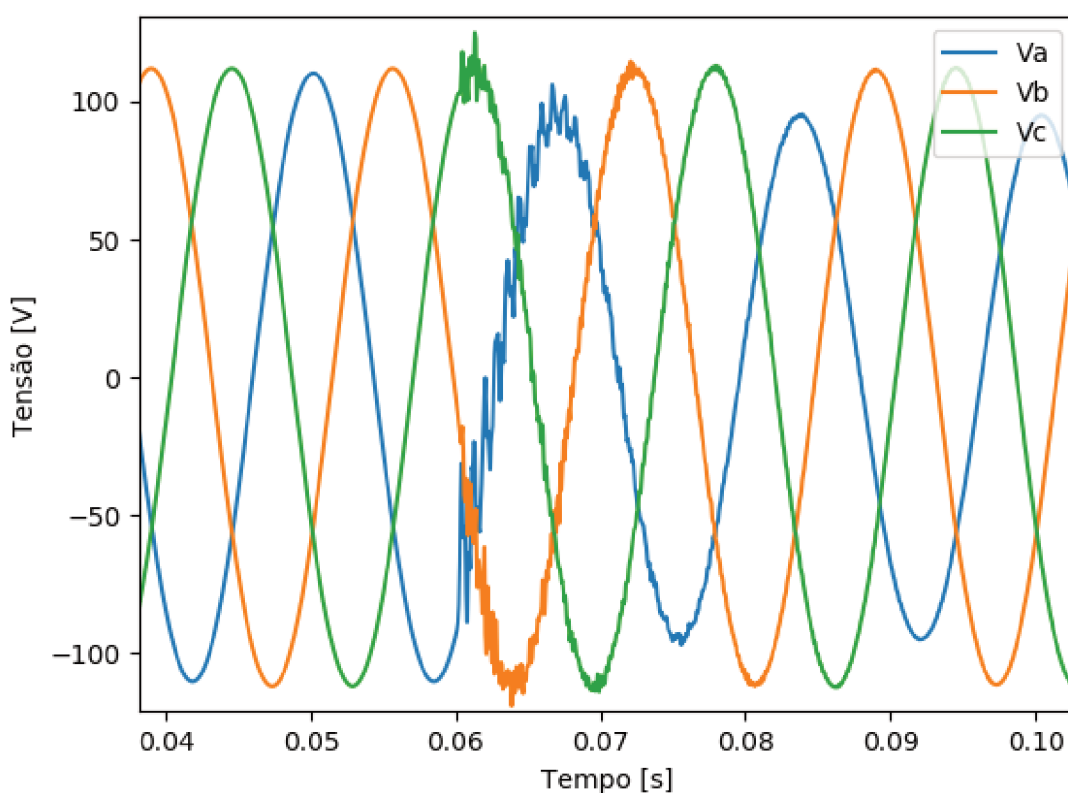
Figura 47 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero das tensões e energia da simulação da falta de alta impedância na fase A da barra 848.



## 6.2 FALTAS DE BAIXA IMPEDÂNCIA

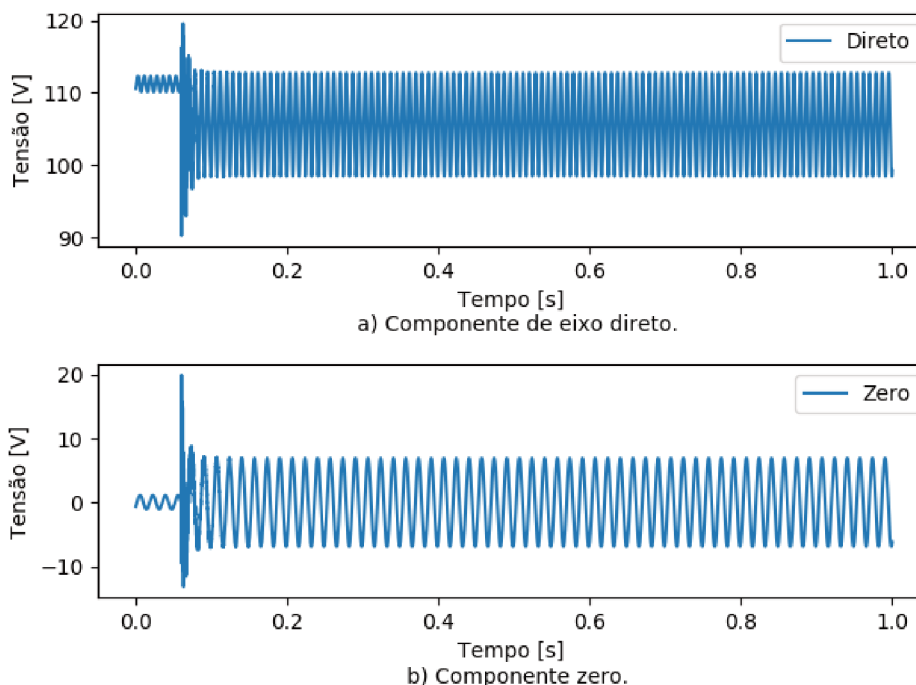
A análise das faltas de baixa impedância também é realizada com base nos resultados obtidos na fase A da barra 848. As tensões trifásicas coletadas nessa simulação estão apresentadas na Figura 48. As distorções das formas de onda das tensões são mais expressivas neste caso que o da aplicação da falta de alta impedância, principalmente na fase em que a falta ocorre. Observa-se ainda a diminuição da amplitude da tensão nesta mesma fase.

Figura 48 – Tensões trifásicas medidas na simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848.



Os resultados obtidos a partir da transformada de Park para a falta de baixa impedância na fase A da barra 848 estão apresentadas na Figura 49. As formas de onda de ambas as componentes retratam o transitório provocado pela incidência da falta de baixa impedância. Diferentemente do resultado obtido pela incidência da falta de alta impedância, a componente de eixo direto varia em torno de uma tensão inferior a nominal do secundário do transformador de potencial após o início da falta e é observada uma maior variação de amplitude. Já a componente zero também oscila em torno do valor zero, porém durante o transitório possui um valor de pico dez vezes maior que o observado na ocorrência da falta de alta impedância e após esse período é estabilizado com amplitude também superior.

Figura 49 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848.



As formas de onda dos coeficientes de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero se comportam de maneiras semelhantes entre si, conforme apresentado na Figura 50. A amplitude máxima de ambas é próxima de 5, valor muito superior ao observado na Figura 46 que retrata o resultado de uma falta de alta impedância.

As energias calculadas para este caso, apresentadas na Figura 51, exibem um comportamento ligeiramente diferente em relação às formas de onda, contudo, em ambas é observado um decaimento ao longo do tempo. A energia da componente de eixo direto revela um comportamento mais oscilatório, enquanto que a energia da componente zero apresenta um decaimento que se assemelha mais a uma reta. A ordem de grandeza das amplitudes são semelhantes entre si e são aproximadas das observadas antes do transitório.

Figura 50 – Coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero da simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848.

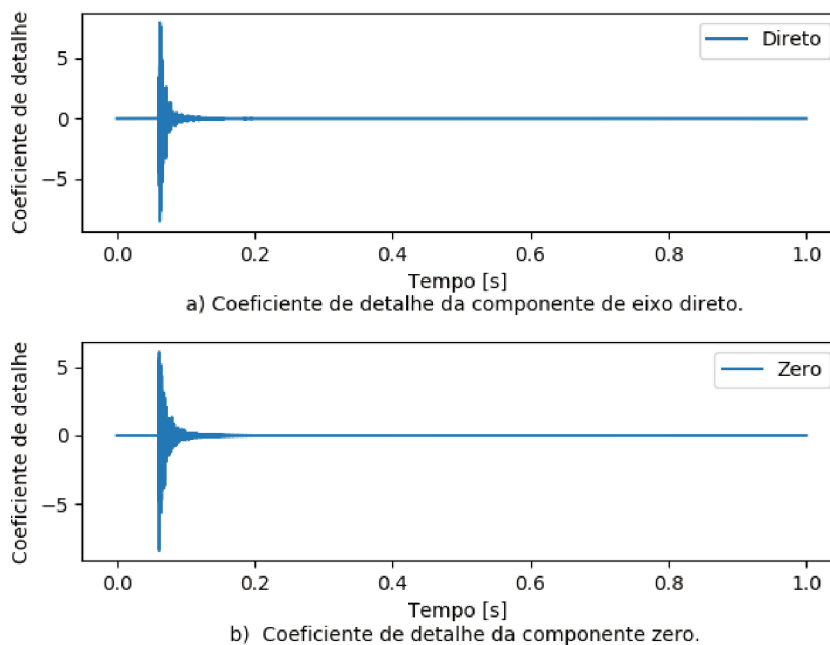
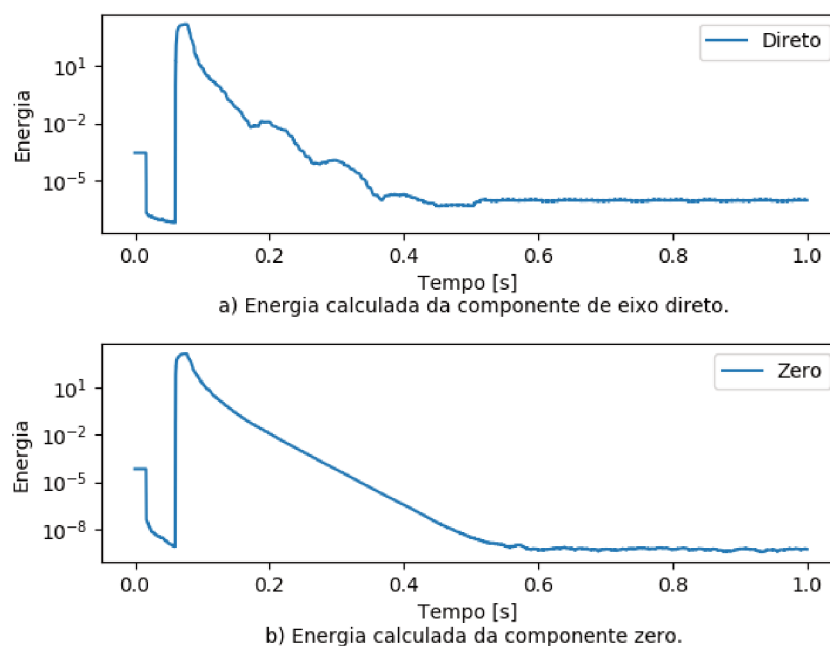


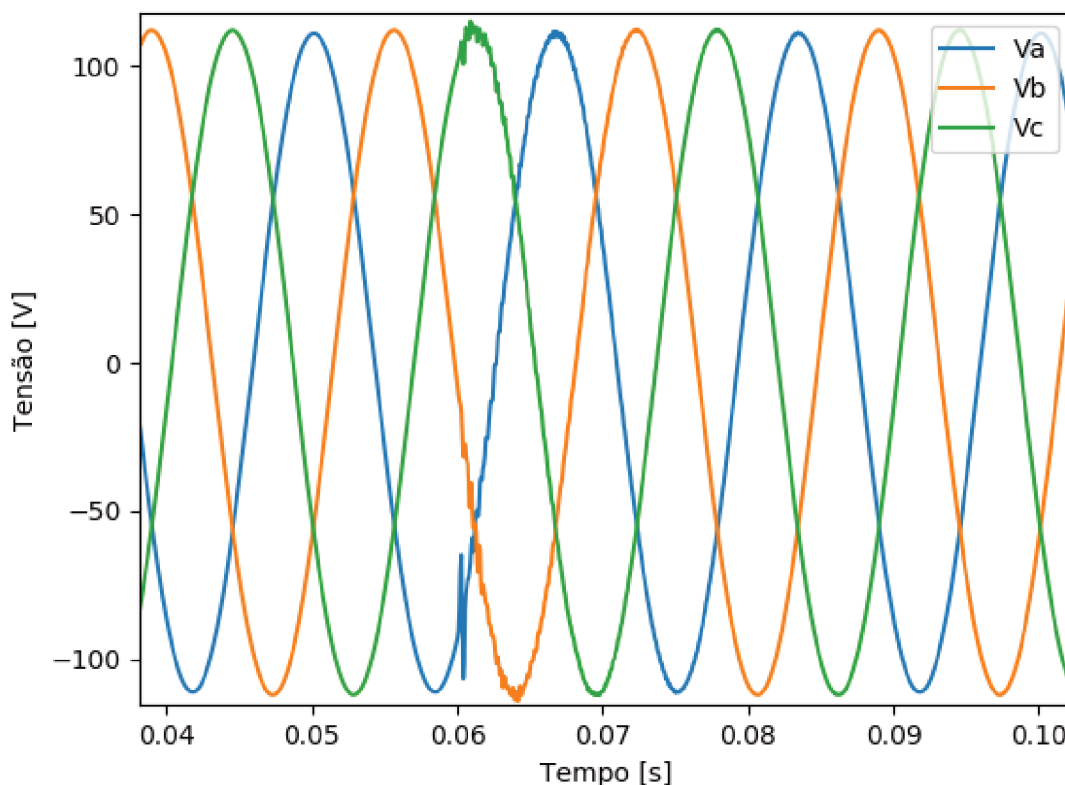
Figura 51 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe das componentes de eixo direto e zero das tensões e energia da simulação da falta de baixa impedância na fase A da barra 848.



### 6.3 ENERGIZAÇÃO DE RAMAL

As tensões trifásicas coletadas na simulação da energização do ramal 818 estão apresentadas na Figura 52. As três fases da tensão apresentam distorções significativas nas suas formas de onda sem alteração da amplitude máxima.

Figura 52 – Tensões trifásicas medidas na simulação da energização do ramal 818.



As componentes de eixo direto e zero da transformada de Park para a energização do ramal 818 retratam o transitório ocorrido, conforme apresentado na Figura 53. A componente de eixo direto oscila em torno da tensão nominal do secundário do transformador e apresenta tensão de pico próxima de 120 Volts. A componente zero varia em torno de zero com valor máximo inferior a 10, valor bem superior ao apresentado no caso da falta de alta impedância.

Os coeficientes de detalhe resultantes da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero para a energização do ramal 818 estão apresentado na Figura 54. O comportamento destes coeficientes, de um modo geral, podem ser considerados semelhantes entre si. Contudo, a componente de eixo direto apresenta um transitório mais lento e menor amplitude, superando o valor 2. Diferentemente, a componente de eixo zero apresenta um transitório mais curto e de maior intensidade com valor máximo superior a 5.

As energias calculadas com base nos coeficientes de detalhe da energização

Figura 53 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da energização do ramal 818.

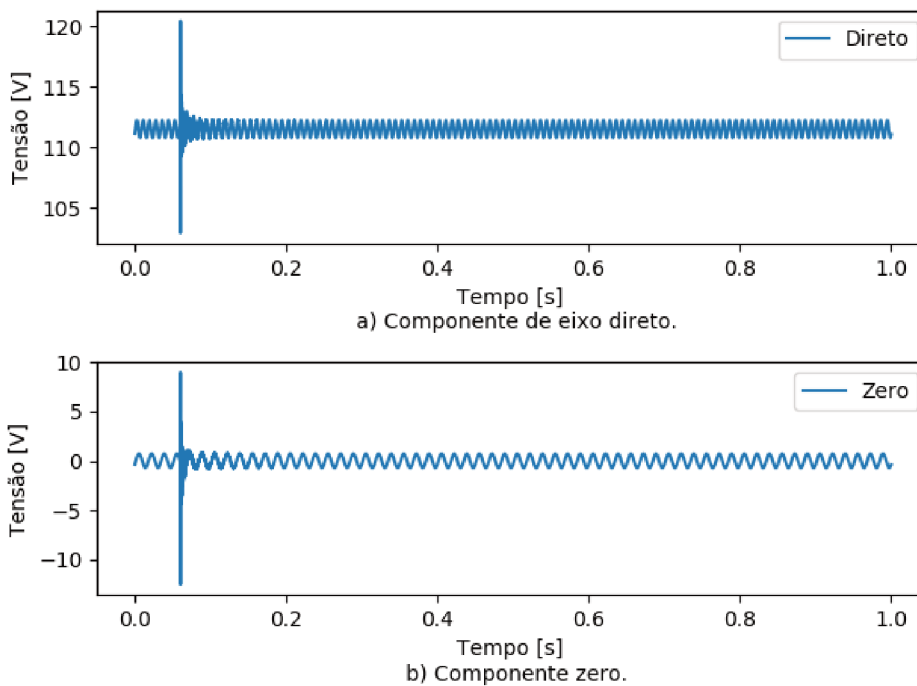
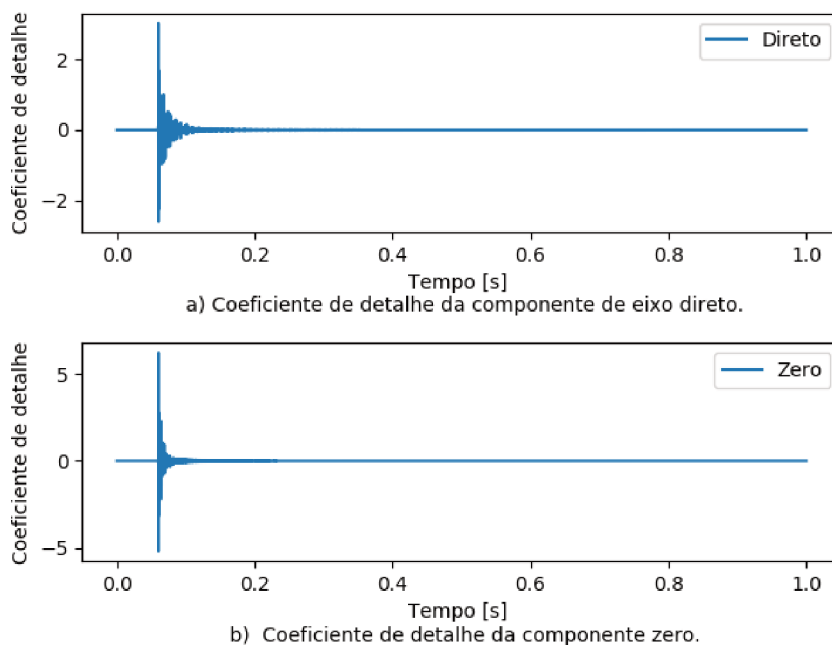


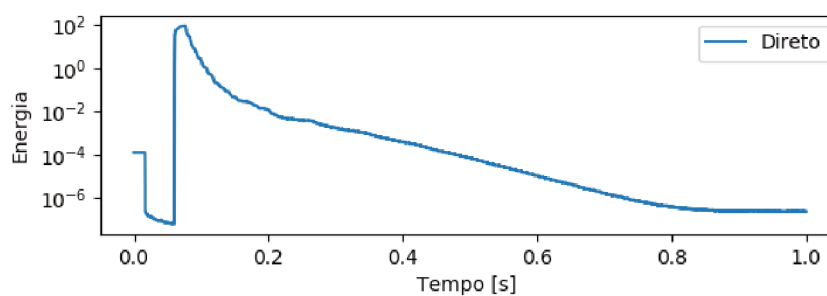
Figura 54 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da energização do ramal 818.



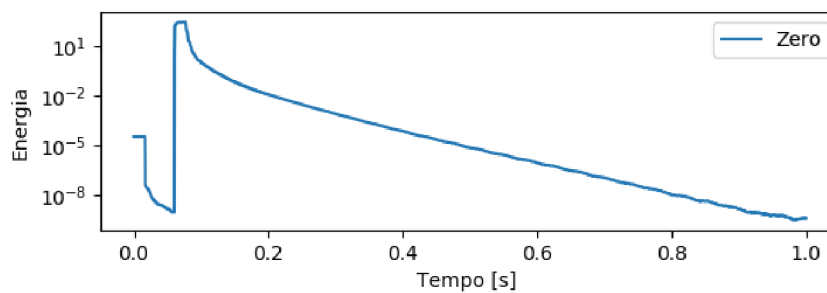


do ramal 818 têm comportamentos semelhantes entre si com decaimento ao longo do tempo até atingir o valor próximo do inicial, conforme formas de onda da Figura 55. A energia da componente de eixo direto apresenta amplitude máxima ligeiramente superior entre elas.

Figura 55 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da energização do ramal 818.



a) Energia calculada da componente de eixo direto.

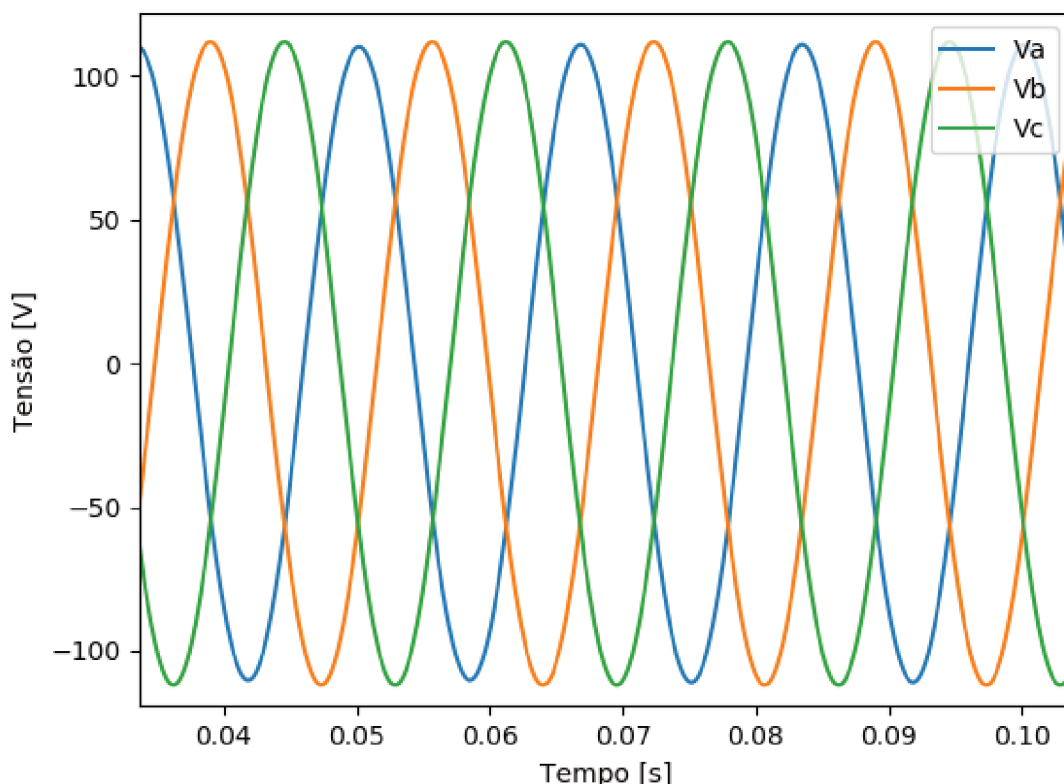


b) Energia calculada da componente zero.

#### 6.4 DESENERGIZAÇÃO DE RAMAL

As tensões trifásicas coletadas na simulação da desenergização do ramal 818 estão apresentadas na Figura 56. As três fases da tensão não apresentam distorções perceptíveis nas suas formas de onda nem mudança significativa na amplitude máxima.

Figura 56 – Tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização do ramal 818.



As componentes de eixo direto e zero da transformada de Park para a desenergização do ramal 818 estão apresentadas na Figura 57. Ambas as formas de onda das componentes retratam o transitório provocado pela desenergização do ramal. A componente de eixo direto oscila em torno da tensão nominal do secundário do transformador de potencial com variação de amplitude muito pequena. A componente zero varia em torno de zero com valor máximo igual a 1 e após a desenergização do ramal há a redução deste valor.

Os coeficientes de detalhe resultantes da aplicação da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero, apresentados na Figura 58, têm baixas amplitudes e comportamento semelhantes entre si ao longo do tempo com transitório rápido.

As energias calculadas a partir dos coeficientes de detalhe apresentam decaimento substancial ao longo do tempo, conforme Figura 59. A energia da componente zero apresenta amplitude máxima ligeiramente superior em relação a apresentada

Figura 57 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização do ramal 818.

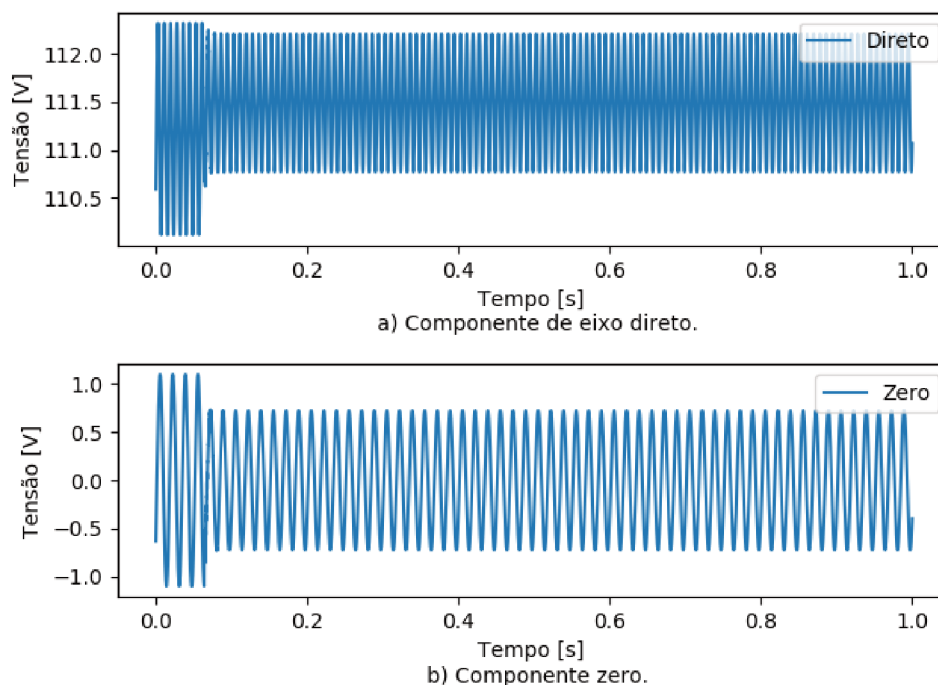
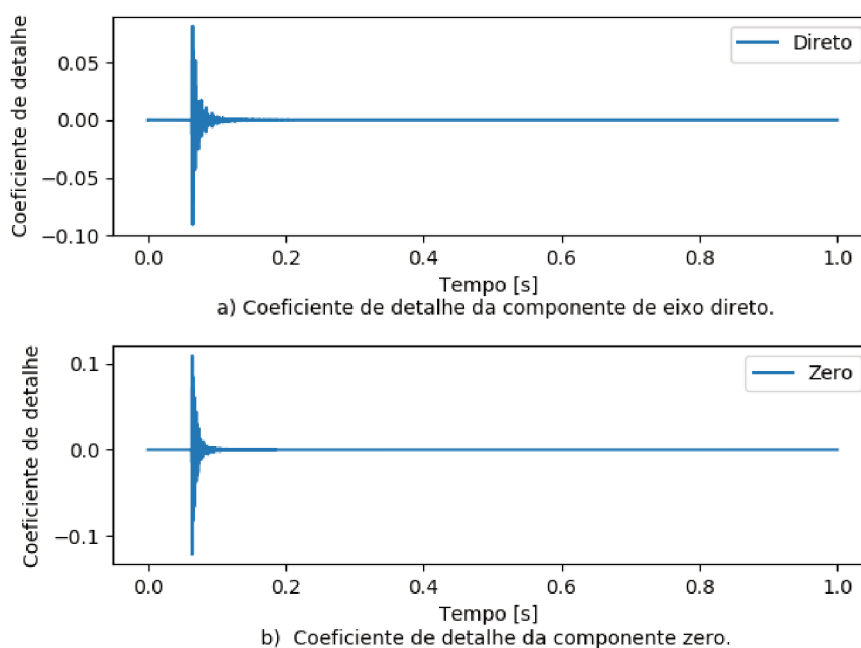
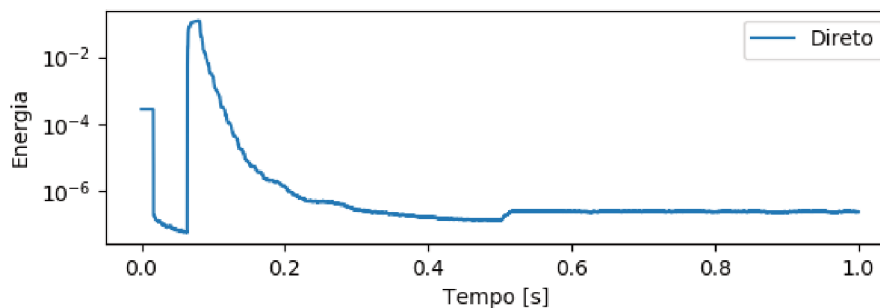


Figura 58 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização do ramal 818.

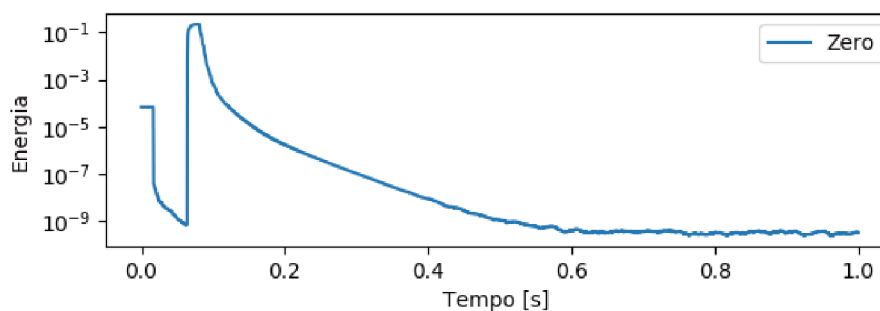


pela energia da componente de eixo direto.

Figura 59 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização do ramal 818.



a) Energia calculada da componente de eixo direto.

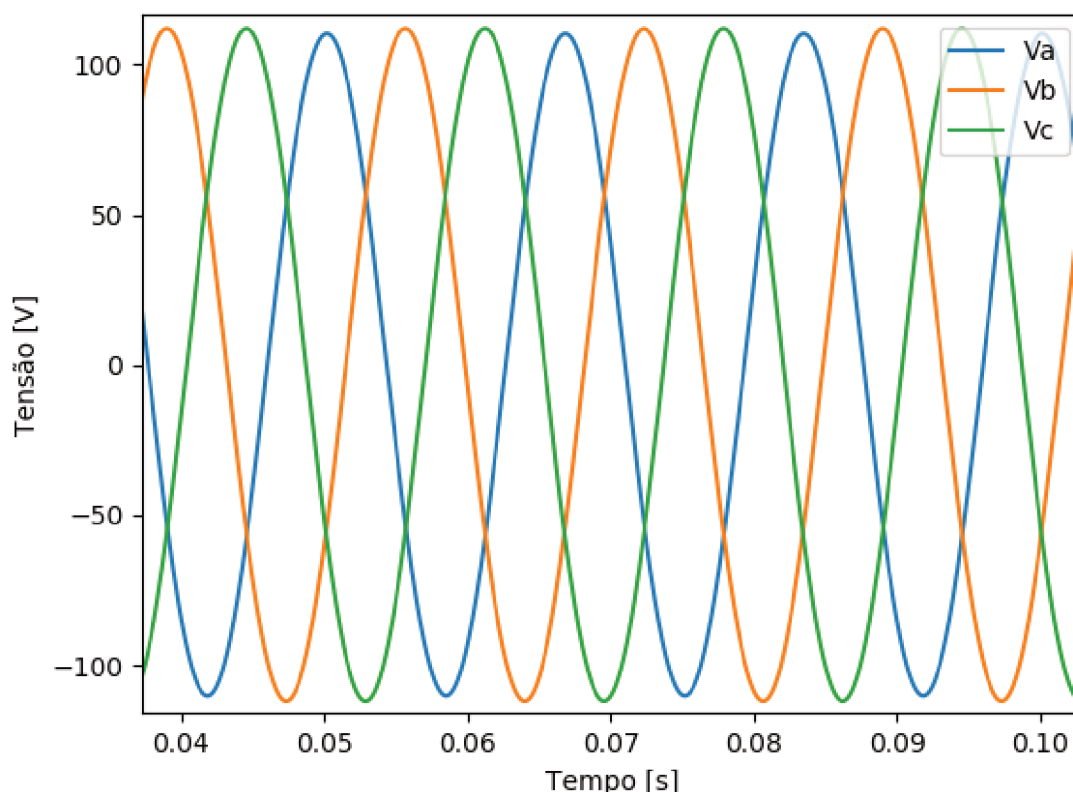


b) Energia calculada da componente zero.

## 6.5 DESENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES

As tensões trifásicas coletadas na simulação da desenergização de banco de capacitores se comportam de maneira semelhante durante todo o tempo da medição, conforme apresentado na Figura 60, impossibilitando a observação do transitório a partir destes dados.

Figura 60 – Tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores.

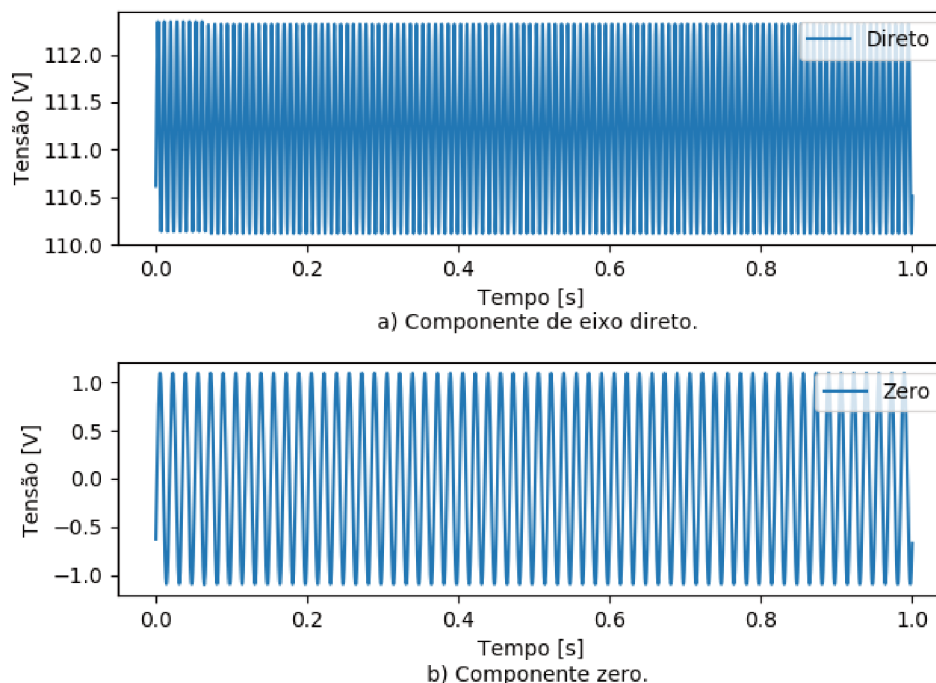


As componentes de eixo direto e zero da transformada de Park para a desenergização de banco de capacitores estão apresentadas na Figura 61. A forma de onda da componente de eixo direto retrata o transitório provocado pela desenergização do banco a partir da diminuição da sua amplitude de variação em torno da tensão nominal do transformador. A componente zero tem a forma de onda aparentemente cíclica e uniforme ao longo do tempo, com amplitude próxima de 1, sendo reduzida após o transitório.

Os coeficientes de detalhe resultantes do processamento das tensões medidas com a desenergização de banco de capacitores, apresentados na Figura 62, têm amplitudes ainda mais baixa que as observadas na desenergização do ramal 818 e comportamentos semelhantes entre si ao longo do tempo com transitório rápido.

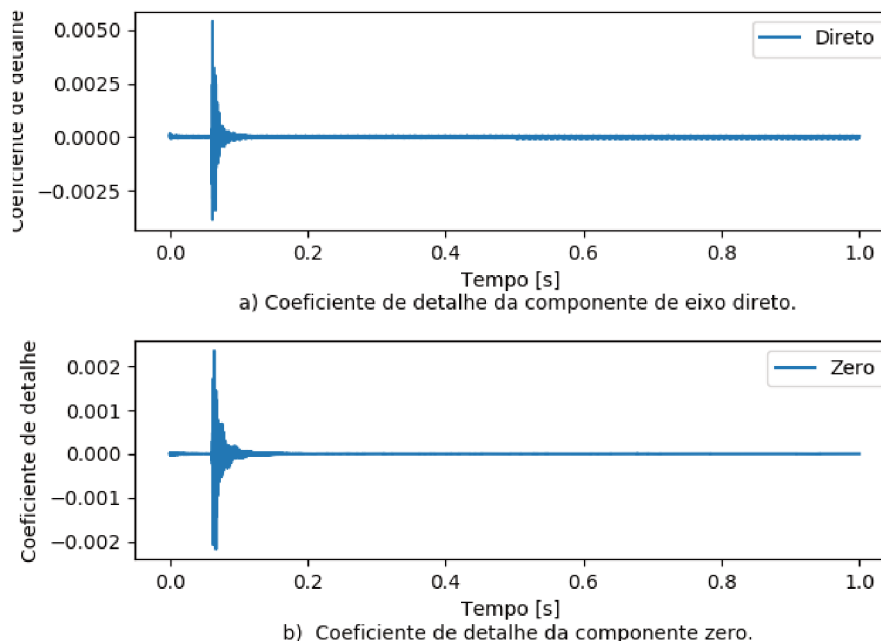
As energias calculadas a partir dos coeficientes de detalhe resultantes da trans-

Figura 61 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores.



formada Wavelet apresentam comportamentos distintos, contudo, ambas demonstram um decaimento substancial ao longo do tempo, conforme Figura 63. A energia da componente de eixo direto apresenta amplitude máxima ligeiramente superior em relação a apresentada pela energia da componente de eixo zero e seu decaimento é mais rápido apresentando algumas elevações ao longo do tempo. A energia da componente zero é mais lenta no decaimento, porém se mantém mais uniforme com o tempo.

Figura 62 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores.



## 6.6 ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES

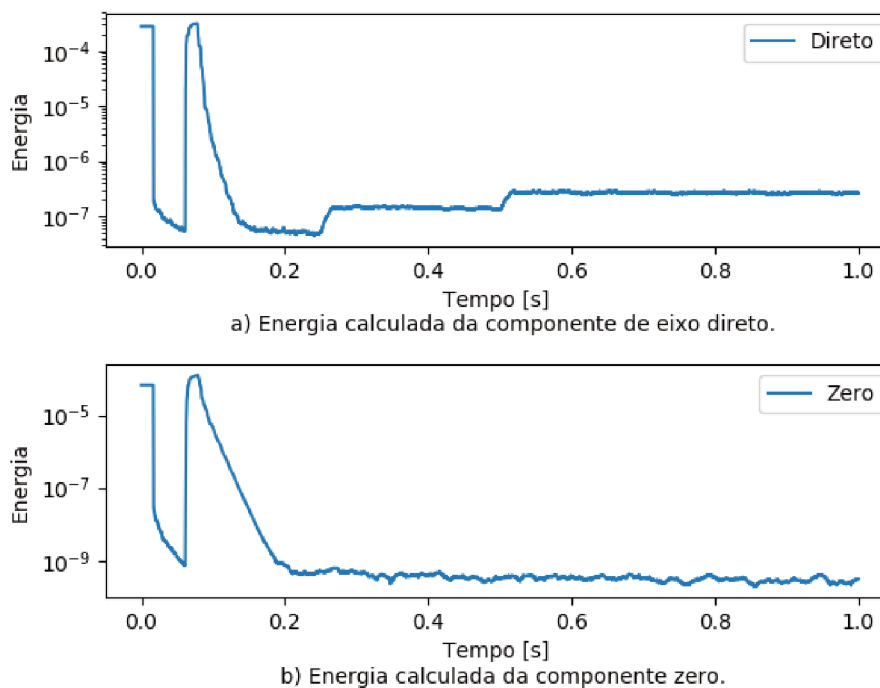
As tensões trifásicas coletadas na simulação do energização de banco de capacitores apresentam distorções significativas, principalmente na fase C, conforme as formas de onda mostradas na Figura 64.

As componentes de eixo direto e zero da transformada de Park para o energização de banco de capacitores estão apresentadas na Figura 65. Ambas as formas de ondas das componentes de eixo direto e zero retratam o transitório provocado pelo energização do banco com acentuação de amplitude, diferente do ocorrido na desenergização do banco. Durante o transitório, a amplitude da componente de eixo direto supera 120 e a amplitude da componente zero ultrapassa 2.

Os coeficientes de detalhe resultantes da aplicação da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero, apresentados na Figura 66, têm amplitudes significativas, próximas de 10 e 4, respectivamente. O transitório apresentado pelo coeficiente associado a componente de eixo direto é relativamente mais rápido que o apresentado pela componente zero.

As energias calculadas com base nos coeficientes de detalhe resultantes da aplicação da transformada Wavelet apresentam comportamento similares para o caso do energização de banco de capacitores. Ambas as formas de onda sofrem uma variação abrupta no início do transitório e um decaimento ao longo do tempo, retornando

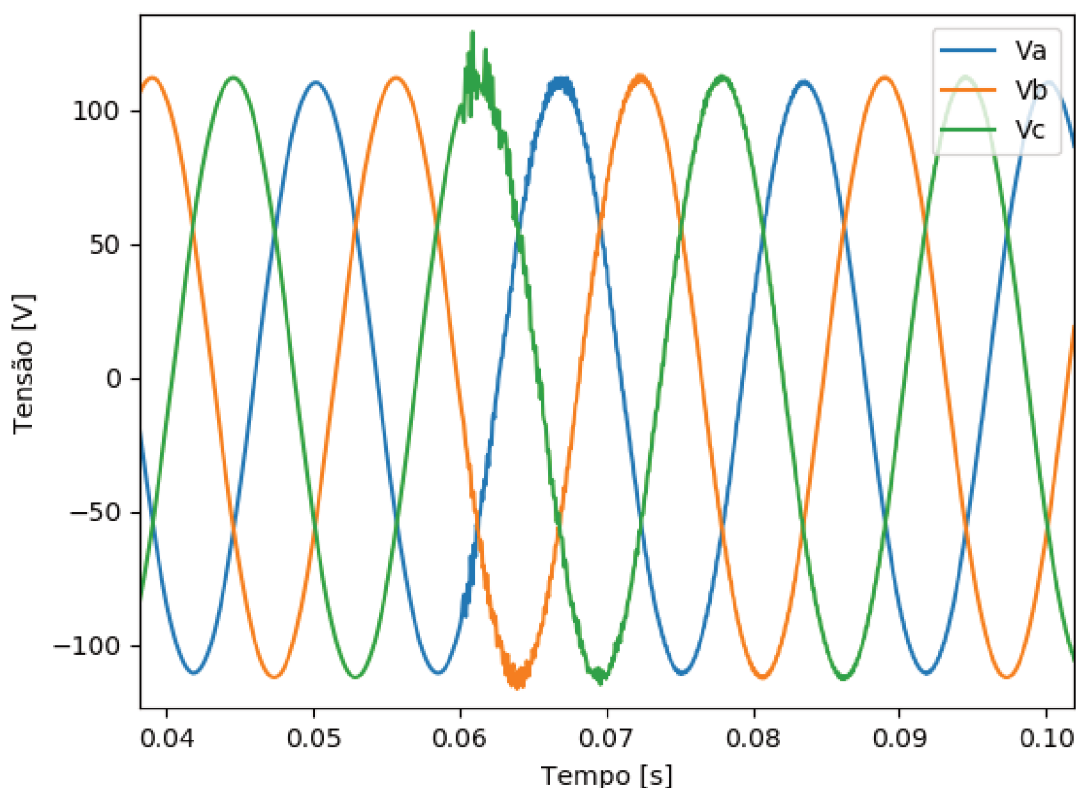
Figura 63 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da desenergização de banco de capacitores.



a um valor próximo ao observado antes da ocorrência do transitório, conforme Figura 67.



Figura 64 – Tensões trifásicas medidas na simulação do energização de banco de capacitores.



## 6.7 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os resultados da incidência de uma descarga atmosférica na fase A da barra 848 são apresentados e analisados nesta sessão como uma forma de demonstrar o comportamento dos sinais de tensão na entrada do sistema diante desse tipo de evento, conforme Figura 68.

A descarga afeta as tensões das três fases de modo a sofrer distorções extremamente significativas, com transitório rápido. Posteriormente há o restabelecimento das características observadas antes da ocorrência da descarga. A amplitude máxima observada supera 2.000 Volts, valor maior que 15 vezes a tensão nominal do secundário do transformador em que a medição é feita.

As componentes de eixo direto e zero da transformada de Park para esse cenário de descarga atmosférica estão apresentadas na Figura 69. Ambas as formas de ondas das componentes de eixo direto e zero retratam o transitório provocado pela descarga. A componente de eixo direto oscila em torno de zero com amplitude próxima da tensão nominal do secundário do transformador. Após o início da descarga, um transitório rápido pode ser observado com pouca variação de amplitude. A componente zero, contudo, sofre drástica variação de amplitude durante o transitório apresentando

Figura 65 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação do energização de banco de capacitores.

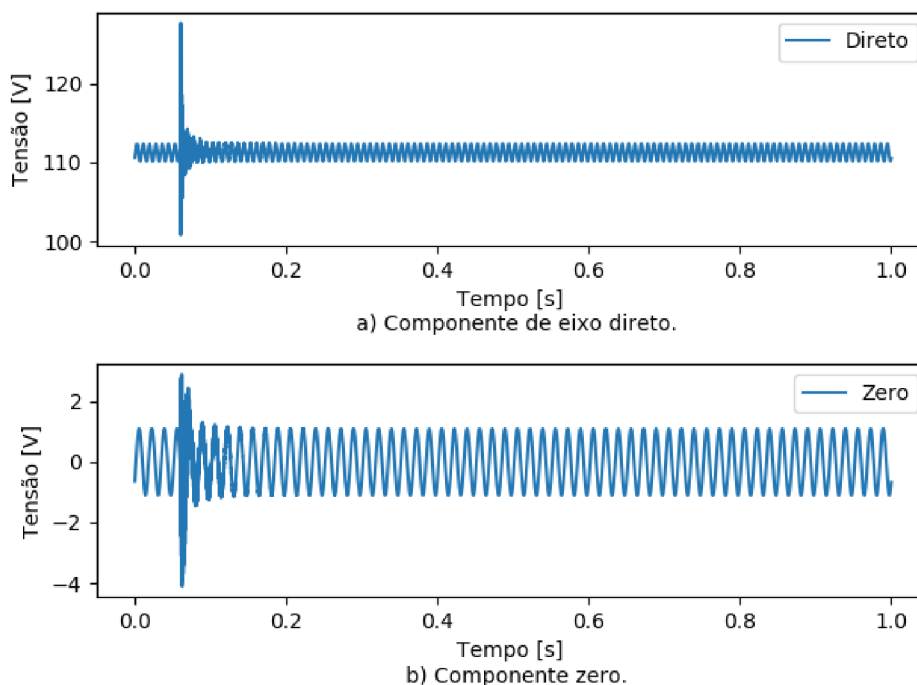


Figura 66 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação do energização de banco de capacitores.

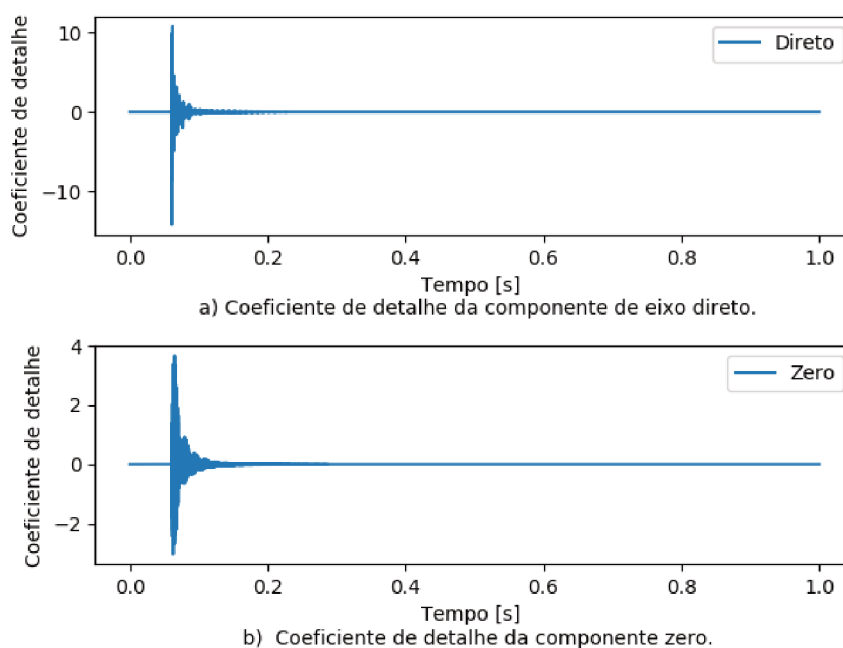


Figura 67 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação do energização de banco de capacitores.

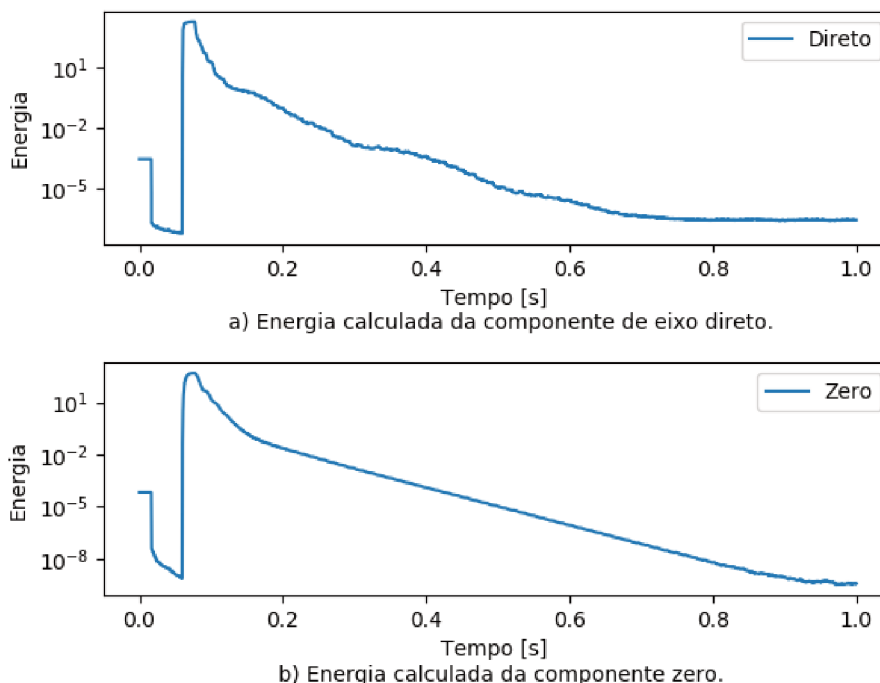
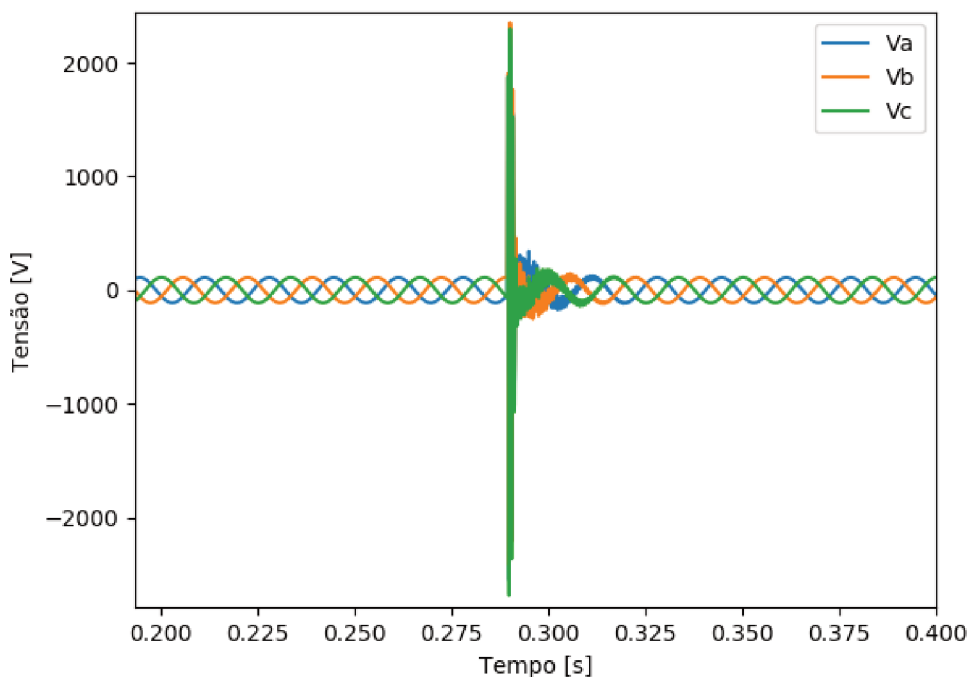
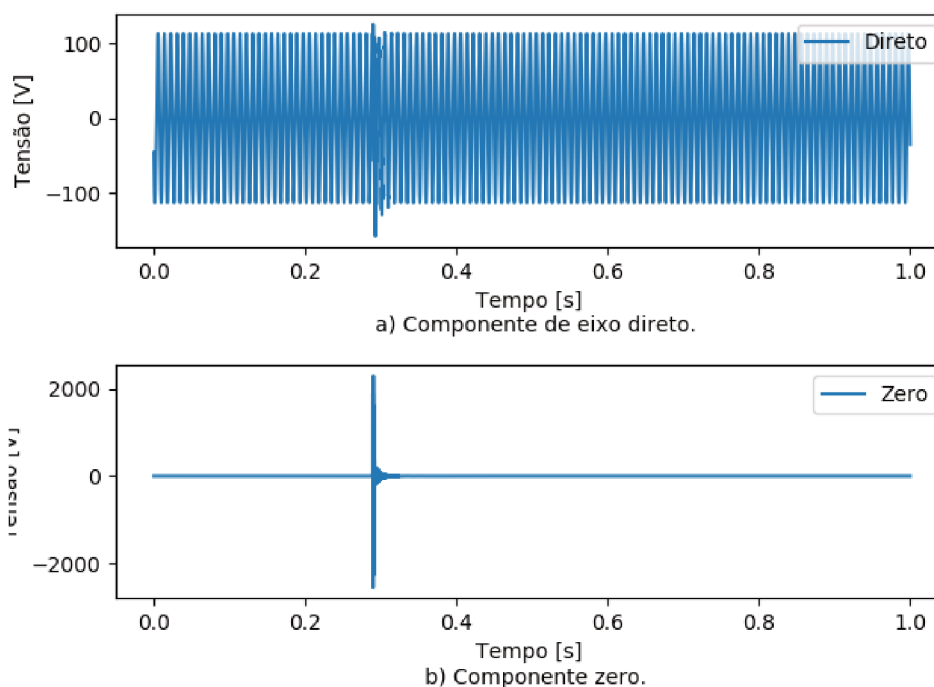


Figura 68 – Tensões trifásicas medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848.



valor máximo superior a 2.000 Volts. No período anterior e posterior ao transitório essa componente é nula.

Figura 69 – Componentes de eixo direto e zero da transformada de Park das tensões trifásicas medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848.



Os coeficientes de detalhe resultantes da aplicação da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero, apresentados na Figura 70, têm amplitudes significativas, próxima de 10 e superior a 500, respectivamente. O transitório do coeficiente associado a componente de eixo direto é relativamente mais lento que o apresentado pela componente zero.

As energias calculadas associadas aos coeficientes de detalhe da transformada Wavelet para as componentes de eixo direto e zero estão apresentadas na Figura 71. Há uma diferença notável entre elas em relação a ordem de grandeza da amplitude máxima atingida. A energia referente a componente de eixo direto tem amplitude da ordem de  $10^2$  e a energia da componente zero é da ordem de  $10^7$ . Essa característica é utilizada na metodologia para realizar a detecção deste tipo de ocorrência.

Figura 70 – Coeficiente de detalhe da transformada Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848.

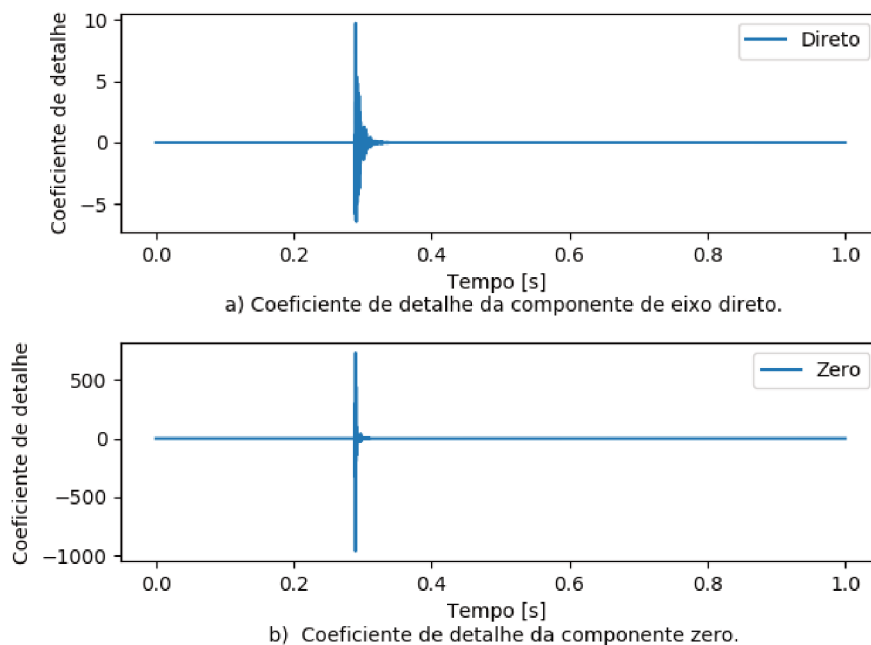
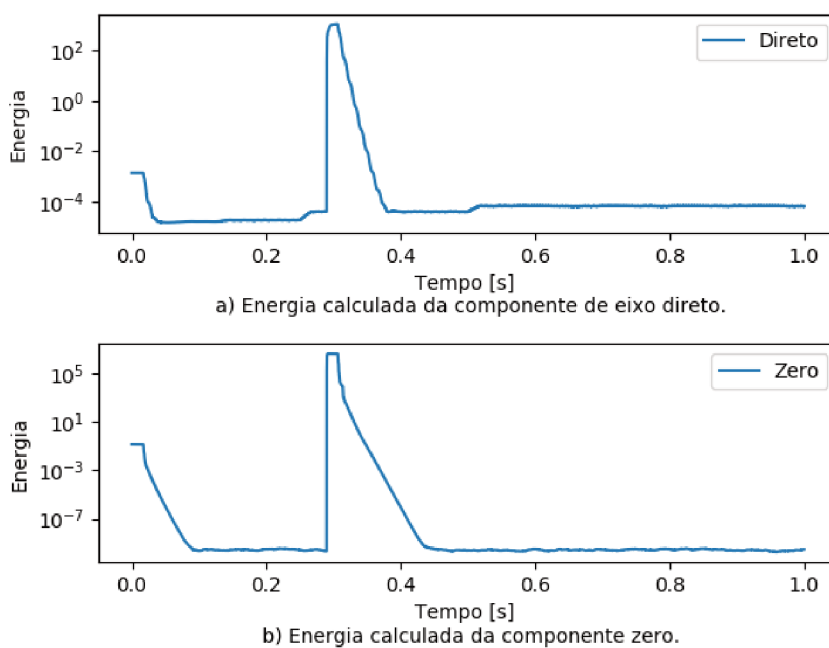


Figura 71 – Energia calculada a partir do coeficiente de detalhe da transformada de Wavelet das componentes de eixo direto e zero das tensões medidas na simulação da descarga atmosférica na fase A da barra 848.



## 6.8 SUMÁRIO DOS RESULTADOS

A Tabela 12 apresenta o resumo dos resultados de todos os cenários simulados.

Tabela 12 – Sumário dos resultados das metodologias de detecção.

Eventos	Local	Instante	Instante da detecção	Deteção de FAI	Deteção de DA
<b>Falta de alta impedância</b>	806 fase A	0.06	0.0602826	sim	não
	806 fase B	0.06	0.060543	sim	não
	806 fase C	0.06	0.0602826	sim	não
	808 fase A	0.06	0.0602826	sim	não
	822 fase A	0.06	0.0602826	sim	não
	838 fase B	0.06	0.0606732	sim	não
	848 fase A	0.06	0.0602826	sim	não
	848 fase B	0.06	0.0606732	sim	não
	848 fase C	0.06	0.0602826	sim	não
	856 fase B	0.06	0.060543	sim	não
<b>Falta de baixa impedância</b>	806 fase A	0.06	0.0601524	sim	não
	806 fase B	0.06	0.0601524	sim	não
	806 fase C	0.06	0.0601524	sim	não
	808 fase A	0.06	0.0601524	sim	não
	822 fase A	0.06	0.0601524	não	não
	838 fase B	0.06	0.0601524	não	não
	848 fase A	0.06	0.0601524	não	não
	848 fase B	0.06	0.0601524	não	não
	848 fase C	0.06	0.0601524	não	não
	856 fase B	0.06	0.0601524	não	não
<b>Energização</b>	Ramal 818	0.06	0.0601524	não	não
<b>Desenergização</b>	Ramal 818	0.06	0.0640584	não	não
<b>Desenergização do banco de capacitores</b>	830 trifásico	0.06	0.0617148	não	não
<b>Energização do banco de capacitores</b>	830 trifásico	0.06	0.0601524	não	não
<b>Descarga atmosférica</b>	806 fase B	0.28926	0.2894346	não	sim
	808 fase B	0.28926	0.2894346	não	sim
	828 fase A	0.28926	0.2895647	não	sim
	836 fase A	0.28926	0.2895647	não	sim
	836 fase B	0.28926	0.2895647	não	sim
	836 fase C	0.28926	0.2895647	não	sim
	848 fase A	0.28926	0.2895647	não	sim
	848 fase B	0.28926	0.2895647	não	sim
848 fase C	0.28926	0.2895647	não	sim	

O algoritmo de detecção das faltas de alta impedância foi eficiente, porém apresentou falsas detecções de faltas de baixa impedância nas três fases da barra 806 e na fase A da barra 808. A proximidade dessas barras em relação ao ponto de medição fez com que a energia apresentasse uma taxa de decaimento mais lenta, desse modo o algoritmo interpretou esse fato como uma falta de alta impedância. Na prática, essa

limitação não seria observada no seu funcionamento, tendo em vista que a falta de baixa impedância sensibiliza a proteção convencional da rede baseada em sobrecorrente. Dessa modo, haveria a atuação dos equipamentos de proteção e extinção da falta e o algoritmo não realizaria a falsa detecção, pois o sinal de tensão refletiria essa atuação tendo comportamento diferente do resultado obtido na simulação por não levar em conta essa manobra da proteção.

O algoritmo de detecção de descargas atmosféricas foi completamente efetivo, distinguindo com 100% de precisão os casos em que houve a incidência de uma descarga na rede ou não. Os parâmetros utilizados por esse algoritmo para realizar a detecção apresentam uma margem maior para calibração e o mesmo não acontece com o algoritmo destinado a detecção de faltas de alta impedância em que as características dos eventos simulados apresentam maior similaridade.

## 6.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados da aplicação das metodologias propostas para a detecção de faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas a partir dos dados obtidos via simulação dos cenários nas redes de teste modeladas. Esses cenários foram compostos pelas faltas de interesse, faltas de baixa impedância, energização e desenergização de ramal e abertura e energização de banco de capacitores. A partir dos resultados das formas de onda de tensão trifásicas, das componentes de eixo direto e zero, dos coeficientes de detalhe e da energia calculada foi possível realizar uma análise do comportamento dessas variáveis, expor a lógica utilizada para compor as metodologias e concluir sobre o desempenho das mesmas na distinção dos eventos simulados.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou revisões da literatura e a proposição de uma metodologia para detecção de dois fenômenos que acometem as redes de distribuição de energia, são eles: as faltas de alta impedância e a incidência de descargas atmosféricas. As faltas de alta impedância oferecem riscos a segurança dos seres humanos e animais quando estes entram em contato com condutores energizados caídos no solo ou com o fogo decorrente de queimadas provocadas pela formação de arcos elétricos. As descargas atmosféricas têm grande poder destrutivo e também oferecem riscos à integridade das pessoas, além de causarem interrupções no fornecimento de energia elétrica, queima de equipamentos do sistema e de unidades consumidoras. Estas situações afetam a qualidade do serviço de distribuição de energia gerando multas aplicadas pelos órgãos reguladores e paralisa atividades industriais, comerciais e a prestação de serviços, somando prejuízos econômicos generalizados de grande expressão, sobretudo às distribuidoras de energia.

Ambos os fenômenos não são detectados pelos sistemas de proteção convencionais presentes nos sistemas de distribuição. As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que quando atingem a rede causam transitórios de alta intensidade, porém seus efeitos são extintos rapidamente. Entretanto, por vezes elas provocam o rompimento de condutores e acabam dando origem às faltas de alta impedância. Estas não provocam grande impacto nos sinais de tensão e corrente, sendo confundidas com manobras normais do sistema e persistem por longos períodos. Estudos para solucionar o problema da detecção de faltas de alta impedância foram desenvolvidos continuamente por profissionais da área ao longo de anos tendo em vista o alto grau de risco oferecido à vida das pessoas. Contudo, nenhum deles até o momento foi capaz de apresentar uma solução definitiva ao problema.

Os fenômenos estudados apresentam características opostas no que diz respeito ao comportamento do transitório eletromagnético introduzido as tensões trifásicas do sistema. As faltas de alta impedância possuem baixa amplitude e frequência, enquanto que as descargas atmosféricas possuem alta amplitude e frequência. Diante disso, o estudo propôs modelagens específicas do sistema teste do IEEE de 34 barras para os estudos de cada fenômeno capazes de refletir o real comportamento das tensões no ponto de medição, localizado no secundário do transformador de potencial da saída da subestação.

A modelagem proposta para o estudo das faltas de alta impedância englobou o modelo da fonte, equivalente de Thèvenin visto pela fonte, transformadores, linhas, banco de capacitores e cargas, implementados a partir de elementos de parâmetros concentrados. O modelo escolhido para representar a falta foi apresentado por Sedighi e Haghifam (2010). A modelagem da rede para a análise das descargas atmosféricas



foi baseada em parâmetros distribuídos, levando em conta a característica de frequência. Além disso, houve a necessidade do detalhamento de outros elementos da rede, como postes, aterramentos e protetores anti-surtos.

As metodologias de detecção apresentam a mesma estrutura, que visa a agregação das tensões trifásicas em componentes de eixo direto e zero a partir da aplicação da transformação de Park e extração das características de alta frequência por meio do uso da transformada Wavelet família Daubechies 4 e nível de decomposição 1 resultando em coeficientes de detalhe. Outra estrutura identifica a ocorrência de transitório a partir do cálculo da energia desses coeficientes e do estabelecimento de limites adaptativos a cada novo conjunto de dados. Verificada a ocorrência de um transitório, diferentes estruturas de classificação, dedicadas às faltas de alta impedância e descargas atmosféricas, que possuem limiares pré-definidos de acordo com a detecção a ser empregada são aplicadas a energia calculada anteriormente. Os resultados obtidos ao final são as detecções das faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas e o instante de tempo em que o transitório teve início.

A aquisição das tensões trifásicas do sistema de distribuição teste foi feita via simulação no ATP-EMTP. Os resultados obtidos demonstraram a efetividade da metodologia proposta para faltas de alta impedância condicionada à correta atuação do sistema de proteção convencional. Essa ressalva deve ser feita tendo em vista a baixa taxa de decaimento da amplitude da tensão quando o sistema é submetido a uma falta de baixa impedância localizada próxima a subestação ocasionando uma falsa detecção. Quando se trata da detecção de descargas atmosféricas, os resultados foram precisos e conclusivos. Conclui-se, portanto, que o presente trabalho apresentou metodologias efetivas de detecção de faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas em redes de distribuição a partir do processamento apenas das tensões trifásicas na saída da subestação.

## 7.1 TRABALHOS FUTUROS

As propostas a seguir são sugestões que visam o aperfeiçoamento das modelagens e metodologias apresentadas neste trabalho, bem como propostas complementares de continuidade do estudo da detecção de faltas de alta impedância e de descargas atmosféricas em redes de distribuição de energia para trabalhos futuros.

- Ampliação do estudo com a aquisição de dados oscilográficos reais de alimentadores de distribuição;
- Inclusão de ruídos aleatórios nas tensões trifásicas na entrada do sistema que busque retratar a realidade observada nos sinais das redes reais;

- Aprimoramento da modelagem da rede proposta no estudo de descargas atmosféricas com maior detalhamento dos equipamentos com a inclusão de transformadores abaixadores e geração distribuída;
- Aprimoramento das metodologias de detecção a partir da análise de outras características para a determinação dos limiares de verificação;
- Implementação de um algoritmo de localização das faltas de alta impedância e das descargas atmosféricas.

## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A. A wavelet entropy approach for detecting lightning faults on transmission lines. *In: 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)*. [S.l.: s.n.], mai. 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/TDC.2016.7520052.
- ABRACOPEL. **Anuário estatístico brasileiro dos acidentes de origem elétrica**. Salto, São Paulo, 2018. Disponível em:  
[http://www.abrinstal.org.br/docs/abracopel\\_anuario18.pdf](http://www.abrinstal.org.br/docs/abracopel_anuario18.pdf).
- ASSALA, P. D. S.; CHEN, H.; JI, T. Power system overvoltage detection based on a morphological filtering algorithm. *In: 2013 IEEE Power Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], jul. 2013. P. 1–4. DOI: 10.1109/PESMG.2013.6672087.
- BALLAROTTI, Maurício G. *et al.* Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 117, n. D6, mar. 2012. ISSN 2156-2202. DOI: 10.1029/2011JD017135. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1029/2011JD017135>.
- BENNER, C. L.; RUSSELL, B. D. Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 3, p. 635–640, mai. 1997. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/28.585852.
- BERNARDI, M. *et al.* A Distributed Measurement System for Correlating Faults to Lightning in Distribution Networks. *In: XV International Symposium on High Voltage Engineering*. Slovenia: [s.n.], ago. 2007. (T8-470), p. 1–7.
- BOURSCHEIDT, Vandoir; PINTO, Osmar; NACCARATO, Kleber P. The effects of Sao Paulo urban heat island on lightning activity: Decadal analysis (1999–2009). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 121, n. 9, p. 4429–4442, mai. 2016. ISSN 2169-8996. DOI: 10.1002/2016JD024782.  
 Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016JD024782>.
- BRETAS, A. S. *et al.* A Novel High Impedance Fault Location for Distribution Systems Considering Distributed Generation. *In: 2006 IEEE/PES Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America*. [S.l.: s.n.], ago. 2006. P. 1–6. DOI: 10.1109/TDCLA.2006.311623.
- CHEN, J. *et al.* Detection of high impedance faults using current transformers for sensing and identification based on features extracted using wavelet transform. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 10, n. 12, p. 2990–2998, 2016. ISSN 1751-8687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0021.

CIGRE. **Lightning Parameters for Engineering Applications**. [S.l.], 2013.

Disponível em: <https://e-cigre.org/publication/549-lightning-parameters-for-engineering-applications>.

COSTA, F. B. *et al.* Real-Time Detection of Transients Induced by High-Impedance Faults Based on the Boundary Wavelet Transform. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 6, p. 5312–5323, nov. 2015. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2015.2434993.

CUI, Q.; EL-ARROUDI, K.; JOOS, G. An effective feature extraction method in pattern recognition based high impedance fault detection. *In*: 2017 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP). [S.l.: s.n.], set. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/ISAP.2017.8071380.

DAVID CHAN TAT WAI; XIA YIBIN. A novel technique for high impedance fault identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 3, p. 738–744, jul. 1998. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/61.686968.

DENTEL, Laure Madeleine. **Modelagem de sistemas de detecção de descargas atmosféricas na Amazônia**. Dez. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5829>.

ELKALASHY, N. I. *et al.* Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 14, n. 2, p. 375–383, abr. 2007. ISSN 1070-9878. DOI: 10.1109/TDEI.2007.344617.

EMANUEL, A. E. *et al.* High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, p. 676–686, abr. 1990. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/61.53070.

ETEMADI, A. H.; SANAYE-PASAND, M. High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 2, n. 1, p. 110–118, jan. 2008. ISSN 1751-8695. DOI: 10.1049/iet-gtd:20070120.

FERNÁNDEZ, F.; DÍAZ, R. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations. **International Conference on Power System Transients IPST01**, p. 144-1 - 144–5, 2001. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/255638750\\_Metal-oxide\\_surge\\_arrester\\_model\\_for\\_fast\\_transient\\_simulations](https://www.researchgate.net/publication/255638750_Metal-oxide_surge_arrester_model_for_fast_transient_simulations).

FINDER. **Guia para aplicação de dispositivos de proteção contra surtos - DPS**. [S.l.], nov. 2012.

- GIRGIS, A. A.; CHANG, W.; MAKRAM, E. B. Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 4, p. 1714–1724, out. 1990. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/61.103666.
- GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. Cartilha de Proteção contra Raios. [S.l.]. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/protecao/cartilha.de.protecao.contra.raios.php>.
- HAGHIFAM, M. -.; SEDIGHI, A. -.; MALIK, O. P. Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection. **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 153, n. 3, p. 359–367, mai. 2006. ISSN 1350-2360. DOI: 10.1049/ip-gtd:20045224.
- HAIFENG LI; GANG WANG; ZHIWEI LIAO. Distinguish between lightning strikes and faults using wavelet-multi resolution signal decomposition. *In: 2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], abr. 2004. 80–83 vol.1. DOI: 10.1049/cp:20040068.
- HAYNES, Winston. Bonferroni Correction. *In: Encyclopedia of Systems Biology*. Edição: Werner Dubitzky. New York, NY: Springer New York, 2013. P. 154–154. ISBN 978-1-4419-9863-7. DOI: 10.1007/978-1-4419-9863-7\_1213. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7\\_1213](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_1213).
- HEIDLER, F.; CVETIC, J. M.; STANIC, B. V. Calculation of lightning current parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, p. 399–404, abr. 1999. DOI: 10.1109/61.754080.
- IEEE. Modeling of metal oxide surge arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 1, p. 302–309, jan. 1992. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/61.108922.
- IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems. **IEEE Std C62.22-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997)**, p. 1–142, jul. 2009. DOI: 10.1109/IEEESTD.2009.6093926.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Vítimas de raios - Infográfico. Dados do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT). [S.l.]. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/vitimas.de.raios.-.infografico.php>.
- JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance-revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 949–956, abr. 1989. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/61.25575.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. *In: 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*. [S.l.: s.n.], jan. 2001. 908–912 vol.2. DOI: 10.1109/PESW.2001.916993.

KHAIRALLA, Igor Kursancew. **Algoritmo adaptativo de detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição usando as transformadas de park e wavelet**. 2017. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/185599>.

KIM, Chul-Hwan *et al.* A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 4, p. 921–929, out. 2002. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2002.803780.

LAI, T.M.; SNIDER, L.A.; LO, E. Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults. **Electric Power Systems Research**, v. 76, n. 8, p. 626–633, 2006. Selected Topics in Power System Transients. ISSN 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.12.021>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779605002816>.

LI, Y.; MENG, X.; SONG, X. Application of signal processing and analysis in detecting single line-to-ground (SLG) fault location in high-impedance grounded distribution network. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 10, n. 2, p. 382–389, 2016. ISSN 1751-8687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2015.0555.

MACEDO, J. R. *et al.* Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 9, n. 16, p. 2593–2601, 2015. ISSN 1751-8687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2015.0407.

MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals. *In: 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*. [S.l.: s.n.], jul. 1999. 426–431 vol.1. DOI: 10.1109/PSS.1999.784386.

MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 11, n. 7, p. 674–693, jul. 1989. ISSN 1939-3539. DOI: 10.1109/34.192463.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. Edição: LTC Editora. 3ª. [S.l.]: LTC Editora, 2005.

MICHALIK, M.; LUKOWICZ, M. *et al.* New ANN-Based Algorithms for Detecting HIFs in Multigrounded MV Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 1, p. 58–66, jan. 2008. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.911146.

MICHALIK, M.; REBIZANT, W. *et al.* Wavelet transform approach to high impedance fault detection in MV networks. *In: 2005 IEEE Russia Power Tech.* [S.l.: s.n.], jun. 2005. P. 1–7. DOI: 10.1109/PTC.2005.4524815.

MORETO, M.; KHAIRALLA, I. Kursancew. A Voltage Based High Impedance Fault Detection Scheme for Distribution Feeders Using Park and Wavelet Transform. *In: 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC).* [S.l.: s.n.], jun. 2018. P. 1–6. DOI: 10.23919/PSCC.2018.8442520.

NACCARATO, K. P.; PINTO, O. Lightning detection in Southeastern Brazil from the new Brazilian Total Lightning Network (BrasilDAT). *In: 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP).* [S.l.: s.n.], set. 2012. P. 1–9. DOI: 10.1109/ICLP.2012.6344294.

NAM, S. R. *et al.* A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. *In: 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262).* [S.l.: s.n.], jul. 2001. 1175–1180 vol.2. DOI: 10.1109/PESS.2001.970231.

NETO, Osmar Pinto; PINTO, Iara R.C.A.; PINTO, Osmar. The relationship between thunderstorm and solar activity for Brazil from 1951 to 2009. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 98, p. 12–21, 2013. ISSN 1364-6826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.03.010>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682613000862>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Mapa de Densidade de Descargas Atmosféricas - 1998-2013. [S.l.]. Disponível em: [http://www.ons.org.br/Mapas/Mapa%20Densidade%20Descargas%20Atmosfericas\\_1998-2013\\_pdf.pdf#search=mapa%20brasileiro%20descargas](http://www.ons.org.br/Mapas/Mapa%20Densidade%20Descargas%20Atmosfericas_1998-2013_pdf.pdf#search=mapa%20brasileiro%20descargas).

PENTEADO NETO, Renato de Arruda. **Sistemas para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica**. 2005. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

PES. **IEEE PES Distribution Systems Analysis Subcommittee Radial Test Feeders**. [S.l.], 1991. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>.

PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, p. 393–398, abr. 1999. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/61.754079.

SAHOO, S.; BARAN, M. E. A method to detect high impedance faults in distribution feeders. *In: 2014 IEEE PES T D Conference and Exposition.* [S.l.: s.n.], abr. 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/TDC.2014.6863531.

SANTOS, Ana Paula; COELHO, Caio *et al.* Climatic diagnostics associated with anomalous lightning incidence during the summer 2012/2013 in Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, ago. 2017. DOI: 10.1002/joc.5227.

SANTOS, W. C.; LOPES, F. V. *et al.* High-Impedance Fault Identification on Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 1, p. 23–32, fev. 2017. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2548942.

SANTOS, W. C.; SOUZA, B. A. *et al.* High Impedance Faults: From Field Tests to Modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, n. 6, p. 885–896, dez. 2013. ISSN 2195-3899. DOI: 10.1007/s40313-013-0072-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40313-013-0072-8>.

SARAIVA, A. C. V. *et al.* A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 115, n. D11, jun. 2010. ISSN 2156-2202. DOI: 10.1029/2009JD012604. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2009JD012604>.

SARLAK, M.; SHAHRTASH, S. M. High-Impedance Faulted Branch Identification Using Magnetic-Field Signature Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 1, p. 67–74, jan. 2013. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2222056.

SARWAGYA, K.; DE, S.; NAYAK, P. K. High-impedance fault detection in electrical power distribution systems using moving sum approach. **IET Science, Measurement Technology**, v. 12, n. 1, p. 1–8, 2008. ISSN 1751-8830. DOI: 10.1049/iet-smt.2017.0231.

SEDIGHI, A. -.; HAGHIFAM, M. -.; MALIK, O. P.; GHASSEMIAN, M. -. High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 4, p. 2414–2421, out. 2005. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.852367.

SEDIGHI, A. R.; HAGHIFAM, M. R. Simulation of high impedance ground fault In electrical power distribution systems. *In: 2010 International Conference on Power System Technology*. [S.l.: s.n.], out. 2010. P. 1–7. DOI: 10.1109/POWERCON.2010.5666061.

SEDIGHI, A.-R.; HAGHIFAM, M.-R.; MALIK, O.P. Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 76, n. 1, p. 136–144, 2005. ISSN 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.05.004>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877960500163X>.

SEDIGHI, A.-R.; HAGHIFAM, M.-R.; MALIK, O.P. Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems. **Electric Power Systems Research**,



v. 76, n. 1, p. 136–144, 2005. ISSN 0378-7796. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.05.004>. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877960500163X>.

SHARAT, A. M.; SNIDER, L. A.; DEBNATH, K. A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection. *In: 1993 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-93*. [S.l.: s.n.], dez. 1993. 613–620 vol.2.

SILVA, Márcio Severino da. **Análise de desempenho de redes de distribuição monofilares com retorno pela terra (MRT) frente a descargas atmosféricas**. Dez. 2015. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/16929/1/DISSERTA%C3%87%C3%830\\_M%C3%81RCIO%20SILVA\\_Vdigital.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/16929/1/DISSERTA%C3%87%C3%830_M%C3%81RCIO%20SILVA_Vdigital.pdf).

SOHEILI, Adel; SADEH, Javad; BAKHSHI, Reza. Modified FFT based high impedance fault detection technique considering distribution non-linear loads: Simulation and experimental data analysis. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 94, p. 124–140, 2018. ISSN 0142-0615. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.035>. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061517306555>.

SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W.; FEDIRCHUK, D. J. Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 461–470, jan. 1994. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/61.277718.

SUN, Y. *et al.* Establishment and simulation of distribution transformer transient model under lightning stroke. *In: 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. [S.l.: s.n.], nov. 2015. P. 1757–1762. DOI: 10.1109/DRPT.2015.7432526.

SUTEERAWATANANON, S. *et al.* Design of a Low Cost Microcontroller Based High Impedance Fault Detector. *In: 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. [S.l.: s.n.], jul. 2018. P. 552–555. DOI: 10.1109/ECTICon.2018.8619950.

VISACRO, Silvério *et al.* Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station. **Atmospheric Research**, v. 117, p. 55–63, 2012. Special Issue dedicated to the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP). ISSN 0169-8095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.07.010>.

Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809511002419>.

WANG, B.; GENG, J.; DONG, X. High-Impedance Fault Detection Based on Nonlinear Voltage-Current Characteristic Profile Identification. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 4, p. 3783–3791, jul. 2018. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2016.2642988.

YEH, H.; SIM, S.; BRAVO, R. J. Wavelet and Denoising Techniques for Real-Time HIF Detection in 12-kV Distribution Circuits. **IEEE Systems Journal**, v. 13, n. 4, p. 4365–4373, dez. 2019. ISSN 2373-7816. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2942093.

YONG SHENG; ROVNYAK, S. M. Decision tree-based methodology for high impedance fault detection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 2, p. 533–536, abr. 2004. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820418.

ZANETTA JUNIOR, Luiz Cera. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. Edição: Editora da Universidade de São Paulo. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

ZOU, G. *et al.* Identification of Lightning Stroke and Fault in the Transient Component Based Protection. *In: 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. [S.l.: s.n.], mar. 2009. P. 1–5. DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918412.