

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA**

Leticia Hoffmann

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA BASEADA EM
TRANSFORMADA *WAVELET* CONTÍNUA PARA A
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE MÉDIA
TENSÃO**

Florianópolis

2019

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

Hoffmann, Leticia

Aplicação de metodologia baseada em transformada Wavelet contínua para a localização de faltas em redes de média tensão / Leticia Hoffmann ; orientador, Diego Issicaba, 2019.

94 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Localização de faltas. 3. Transformada Wavelet. 4. ATPDraw. I. Issicaba, Diego . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Leticia Hoffmann

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA BASEADA EM
TRANSFORMADA *WAVELET* CONTÍNUA PARA A
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE MÉDIA
TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Diego Issicaba, Ph.D

Florianópolis

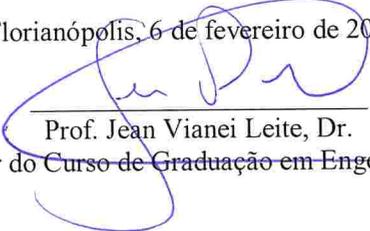
2019

Leticia Hoffmann

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA BASEADA EM TRANSFORMADA
WAVELET CONTÍNUA PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES
DE MÉDIA TENSÃO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequada para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora

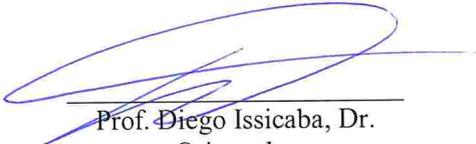
Florianópolis, 6 de fevereiro de 2019.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Diego Issicaba, Dr.

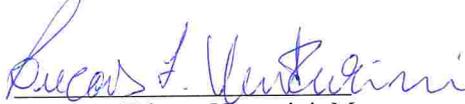
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Mauro Augusto da Rosa, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Lucas Fritzen Venturini, Me.

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus queridos pais.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto de PD 00405-1804/2018 da empresa ENERGISA - Desenvolvimento de um sistema para localização de faltas transitórias ou permanente, que possa ser facilmente instalado, sem necessidade de interrupção da rede elétrica, próprio para instalação em redes de 15kv e 34 kV, de baixo custo e integrado às tecnologias de IoT mais atuais.

LabPlan - Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

RESUMO

A rápida localização de uma falta em sistemas de distribuição reduz indicadores de duração de interrupção e aumentar a qualidade do serviço oferecido aos consumidores. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o estudo de metodologias de localização de faltas em redes de distribuição de média tensão baseadas na análise das ondas viajantes. A metodologia aplicada é baseada na transformada *Wavelet*, mediante construção de *Wavelet* mãe inferida de transientes gerados por faltas. O trabalho foi realizado, primeiramente, através de simulações de faltas no *software* de simulação de transitórios *Alternative transients program*. Posteriormente, o sinal de tensão da falta é analisado após ter sido aplicada a transformada *Wavelet*. O sistema utilizado para a realização de casos de estudo foi o da rede de distribuição de teste do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* de 34-nós. Os resultados obtidos são comparados com o caso de uma análise de *Wavelet* mãe tradicional.

Palavras-chave: Localização de Faltas, Transformada *Wavelet*, ATP-draw.

ABSTRACT

The rapid location of a fault in distribution systems tends to reduce indicators of interruption duration and increase the quality of service offered to consumers. In this context, the objective of this work is the study of fault localization methodologies in medium voltage distribution networks based on the analysis of traveling waves. The applied methodology is based on the Wavelet transform, by means of Wavelet construction inferred mother from transients generated by faults. The work was carried out, firstly, through simulations of faults in the simulation of transient ATP. Subsequently, the fault voltage signal is analyzed after passing through the Wavelet transform. The system used to conduct case studies was the Institute of Electrical and Electronics Engineers test distribution network of 34-nodes. The results obtained are compared with a traditional mother wavelet analysis.

Keywords: Fault Location, Wavelet Transform, ATP draw.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Arquitetura do Sistema Elétrica de Potência.....	23
Figura 2	Sistema de Distribuição	24
Figura 3	Exemplo curto-circuito trifásico-terra.	27
Figura 4	Exemplo curto-circuito bifásico	27
Figura 5	Exemplo curto-circuito bifásico-terra.....	28
Figura 6	Exemplo curto-circuito monofásico-terra.....	28
Figura 7	Transformada <i>Wavelet</i>	30
Figura 8	Função seno com diferentes fatores de escala.....	32
Figura 9	Exemplo <i>Wavelet</i> em três escalas possíveis (a=1, a=2, a=4).....	32
Figura 10	Duas escalas da <i>Wavelet</i> mãe para representar o sinal..	33
Figura 11	Translação de uma <i>Wavelet</i> para $b>0$	33
Figura 12	Teoria ondas viajantes.....	35
Figura 13	Método de <i>Warrington et al.</i> (1968).....	38
Figura 14	Circuito adaptado utilizado por <i>Roytman et al.</i>	39
Figura 15	Método de <i>Takagi et al.</i> (1982).....	40
Figura 16	<i>Takagi et al.</i> (1982).....	40
Figura 17	Circuito utilizado por <i>Srinivasan et al.</i> (1989).....	41
Figura 18	Circuito utilizado por de <i>Zhu et al.</i> (1997).....	42
Figura 19	Circuito utilizado por <i>Das et al.</i> (2000).....	43
Figura 20	Curto-circuito fase-terra sistema balanceado.....	43
Figura 21	Sistema desbalanceado	44
Figura 22	Método ondas viajantes única unidade aquisição.....	45
Figura 23	Circuito utilizado por <i>Borghetti et al.</i> para análise.....	52
Figura 24	Sistema teste de distribuição IEEE 34-nós	56
Figura 25	Configurações condutores.....	57
Figura 26	Condutores.....	57
Figura 27	Conecções e modelos	58
Figura 28	Sistema distribuição 34-nós <i>Borghetti et al.</i>	59
Figura 29	Modelo de transformador cargas.....	60
Figura 30	Dados de parametrização das linhas	60
Figura 31	Dados de parametrização das linhas	61

Figura 32	Valores PU transformadores.	63
Figura 33	Parametrização modelo #300.	65
Figura 34	Parametrização modelo #301.	65
Figura 35	Fluxograma algoritmo.	66
Figura 36	Simulação falta trifásica-terra.	70
Figura 37	Simulação falta bifásica-terra.	71
Figura 38	Simulação falta bifásica.	72
Figura 39	Simulação falta monofásica-terra.	73
Figura 40	Simulação manobra de desligamento de carga.	74
Figura 41	Simulação manobra de religamento de carga.	74
Figura 42	Simulação manobra de inserção de capacitor.	75
Figura 43	Aplicação transformada de <i>Clarke</i>	76
Figura 44	Parte inicial do transitório do sinal $\bar{s}b(t)$	77
Figura 45	Sinal $\bar{s}b(t)$ normalizado.	77
Figura 46	<i>Wavelet</i> mãe inferida.	78
Figura 47	Transformada de <i>Fourier</i> $s(t)$	78
Figura 48	Transformada de <i>Fourier Wavelet</i> mãe inferida.	79
Figura 49	Escalograma com energia do caminho de falta.	79
Figura 50	Escalograma com energia do caminho de falta <i>Wavelet Morlet</i>	80
Figura 51	Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso bifásica-terra.	81
Figura 52	Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso bifásica-terra.	82
Figura 53	Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso bifásica-terra.	82
Figura 54	Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso bifásica-terra <i>Morlet</i>	83
Figura 55	Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso bifásica.	84
Figura 56	Espectro de amplitude <i>Wavelet</i> mãe inferida - caso bifásica.	84
Figura 57	Escalograma caso bifásica.	85
Figura 58	Escalograma caso bifásica <i>Morlet</i>	85
Figura 59	Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso monofásica-terra.	86

Figura 60	Espectro de amplitude <i>Wavelet</i> mãe inferida - caso monofásica-terra.	87
Figura 61	Escalograma caso monofásica-terra.....	87
Figura 62	Escalograma caso monofásica <i>Morlet</i>	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ocorrência de tipos de curto-circuito	29
Tabela 2	Parâmetros transformador	63
Tabela 3	Cargas implantadas no sistema.	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 Objetivo geral	21
1.1.2 Objetivos específicos	22
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	23
2.2 FALTAS	25
2.2.1 Duração das faltas	26
2.2.2 Tipo de faltas	26
2.2.3 Resistência de faltas	29
2.2.4 Manobras	29
2.3 TRANSFORMADA <i>WAVELET</i>	30
2.3.1 Definição teórica	30
2.3.2 Condições de existência	30
2.3.3 Definição matemática	31
2.3.4 Escalonamento	31
2.3.5 Translação	31
2.3.6 Famílias <i>Wavelet</i>	33
2.3.7 Aplicações	34
2.4 ONDAS VIAJANTES	34
2.5 TRANSFORMADA MODAL	36
2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO	36
3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	37
3.1 MÉTODOS BASEADOS NA MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA	37
3.2 MÉTODOS BASEADOS EM COMPONENTES DE ALTA FREQÜÊNCIA	43
3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO	49
4 METODOLOGIA APLICADA AO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	51
4.1 METODOLOGIA BASEADA NO USO DA TRANSFOR- MADA <i>WAVELET</i>	51
4.2 MODELAGEM DO SISTEMA IEEE 34-NÓS EM AMBI- ENTE ATP	55
4.2.1 O sistema IEEE 34-nós	55
4.2.2 Adaptações realizadas em	58
4.2.3 Adaptações realizadas no trabalho	60

4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO	65
4.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO	68
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	69
5.1	ATP (<i>ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM</i>)	69
5.2	FALTAS E MANOBRAS SIMULADAS	70
5.2.1	Falta trifásica-terra	70
5.2.2	Falta bifásica-terra	71
5.2.3	Falta bifásica	72
5.2.4	Falta monofásica-terra	72
5.2.5	Manobra de desligamento de carga	73
5.2.6	Manobra de religamento de carga	74
5.2.7	Manobra de inserção de capacitor	75
5.3	APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE ANÁLISE DE TRANS- FORMADA <i>WAVELET</i> PARA FALTA 3ϕ -TERRA	76
5.4	CASOS ADICIONAIS	81
5.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	88
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
6.1	CONCLUSÕES	89
6.2	TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Com o notável aumento, ao longo dos anos, da demanda por energia elétrica, a busca pela qualidade do serviço oferecido, bem como necessidade de garantia da disponibilidade, tornam-se cada vez mais importantes os estudos e pesquisas a respeito da melhoria dos indicadores de continuidade dos sistemas de distribuição.

Neste contexto, estudos sobre a localização de faltas se fazem necessários. No Brasil, a ocorrência de interrupções no fornecimento de energia elétrica aos consumidores retorna em multas e penalidades às concessionárias de distribuição, segundo as normas e regulamentos definidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [1].

À vista disto, no que diz respeito à localização de faltas, existem diversos trabalhos que propõem metodologias e algoritmos a fim de precisar, cada vez mais, a localização das faltas. Para isso, faz-se uso de sistemas computacionais com o fim de reduzir o tempo de localização de falta realizada pela equipe de manutenção do sistema, e assim, a duração de indisponibilidade da energia elétrica, diminuindo assim as probabilidades de penalidades que a concessionária está sujeita.

Na aplicação de metodologias de localização de faltas, os recursos computacionais de hoje permitem uma elevada capacidade de processamento de dados, permitindo a análise de sinais em elevadas taxas de aquisição [2]. Isto permite análises não apenas baseadas em valores eficazes de tensão e corrente, como também baseadas em ondas viajantes. Ademais, no que se refere à simulação de eventos de faltas e sua análises, evidencia-se o *software* ATP (*Alternative Transients Program*), largamente utilizado pela comunidade acadêmica em dissertações de mestrado e teses de doutorados, bem como livros específicos de análise de transientes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa o estudo, descrição de fundamentação teórica e teste de uma metodologia de localização de faltas para redes de distribuição de média tensão. Os elementos centrais do trabalho são a modelagem de um sistema teste do IEEE em ambiente ATP, simulações de diferentes tipos de falta, aplicação de metodologia baseada na

Transformada *Wavelet* e análise de resultados.

1.1.2 Objetivos específicos

Destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudo e descrição de conceitos de Transformada *Wavelet* e ondas viajantes para localização de faltas;
- Simulações de faltas no sistema de distribuição teste IEEE 34-nós em ambiente *software* ATP;
- Estimação da localização de faltas por meio da comparação de frequências teóricas de frentes de ondas de ondas viajantes e as obtidas por simulação utilizando uma metodologia presente no estado da arte;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 possui por conteúdo uma introdução do assunto abordado, expõe objetivos gerais e específicos do trabalho e, por fim, um resumo da organização do documento.

O capítulo 2 é composto pela parte de fundamentação teórica. Apresenta-se uma conceituação a respeito do sistema elétrico, faltas, de Transformadas *Wavelets*, ondas viajantes e transformações modais; e, por fim, uma síntese do capítulo.

O capítulo 3 realiza uma breve apresentação do estado da arte no assunto de localização de falta;

O capítulo 4 aborda a modelagem e a metodologia utilizadas;

No capítulo 5 são apresentadas as simulações, os resultados obtidos, estudo de caso e uma breve comparação dos resultados com uma transformada convencional.

Por fim, o capítulo 6 contém uma conclusão do trabalho realizado, além de considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é abordada uma revisão de base teórica a respeito dos principais temas envolvidos no trabalho. Inicia-se por um levantamento a respeito de redes de distribuição, faltas e manobras, até chegar, por fim, em um aprofundamento teórico nas questões de técnicas e formulações matemáticas das transformadas *Wavelet* e *Fourier*, Ondas Viajantes e Transformada Modal.

2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

O sistema elétrico de potência responsável pelo fornecimento de energia elétrica pode ser representado por três grandes blocos em uma arquitetura básica simplificada, mostrada na Figura 1, onde a etapa responsável pelo fornecimento de energia ao consumidor final, e foco deste trabalho, é o sistema de distribuição.



Figura 1 – Arquitetura do Sistema Elétrica de Potência [3].

Os três grandes blocos do sistema podem ser compreendidos de acordo com as suas funções básicas descritas abaixo:

- Sistema de Geração: Conversão de algum tipo de energia em energia elétrica;
- Sistema de Transmissão/Subtransmissão: Transporte de energia de centros geradores aos centros de consumo.
- Sistema de Distribuição: Distribuidor da energia recebida pelo sistema de transmissão/subtransmissão aos consumidores finais.

O principal objetivo de uma rede de distribuição é a redução de faixas de tensão para valores que possam ser usados pelo consumidor final. O sistema de distribuição inicia a partir de uma subestação e com o recebimento de uma ou mais linhas de sub- e/ou transmissão, estas possuindo faixas de tensão entre 34,5 kV a 138 kV e 138 kV a 765 kV, respectivamente. Reduz-se os valores de tensão para faixas entre 34,5 kV e 127 V variando de acordo com as necessidades da concessionária, e reduzindo conseqüentemente os riscos que envolvem o uso de alta tensão para os consumidores. [2]

Subestações dispõem de um ou mais alimentadores que, em sua maioria, se caracterizam pela operação radial, onde o fluxo de potência flui da subestação para as extremidades, ou seja, em apenas um único sentido. Em todo o mundo, há vários níveis de tensão de distribuição arbitrados para utilização, mas vale citar os valores mais empregados no Brasil e, principalmente, no estado de Santa Catarina: 13,8/23/34,5 kV [4].

Na Figura 2 é apresentado um esquema de sistema de distribuição com os principais elementos caracterizadores da rede.

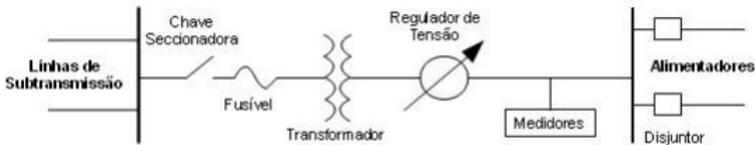


Figura 2 – Sistema de Distribuição [3].

O sistema de distribuição, como salientado anteriormente, efetivamente começa com a entrada de uma ou mais linhas de sub- e/ou transmissão. Logo após, a linha chega ao equipamento principal da subestação, o transformador, cuja função é, através da comutação de TAPs, reduzir o valor da tensão vinda do sistema de transmissão. Este equipamento, na sua constituição de autotransformador, carrega também a função de regulador de tensão, uma vez que, devido à variação de carga ao longo do dia, o nível de tensão pode sofrer irregularidades nos alimentadores.

Outro ponto importante é o sistema de proteção e controle dos sistemas de distribuição, o qual é composto por um conjunto de elementos como: relés, medidores de tensão e corrente, conhecido como transformador de tensão e transformador de corrente, oscilógrafos, seccio-

nadoras, disjuntores e fusíveis. Os relés são “interruptores” do sistema que, a partir de informações de corrente e/ou tensão, atuam abrindo uma parte do sistema através de disjuntores (chaves) quando detectado um mal funcionamento dos circuitos. Com o passar dos anos a base do relé mudou, começando com relés eletromecânicos e avançando até chegar aos relés digitais. Os transformador de tensão e corrente são responsáveis por enviar informações de tensão e corrente de pontos específicos do sistema para equipamentos do sistema de proteção como os relés. Além dos disjuntores, também são muito utilizadas no sistema as seccionadoras, caracterizadas como chaves de manobras, utilizadas no controle do sistema, para dentre outros fatores, o desligamento de linhas e manobras em topologias de redes. Por fim, o oscilógrafo, que não atua como uma proteção em si, mas sim como um registrador de eventos de faltas, a partir das informações de corrente e tensão do sistema.

Ao final das linhas de distribuição estão os consumidores médios e pequenos de energia elétrica.

2.2 FALTAS

Falta elétrica, ou curto-circuito, tem por definição segundo [5] ser uma corrente que flui de um condutor para o terra, ou para outro condutor, devido a uma conexão anormal (incluindo um arco elétrico) entre os dois elementos. A rede de distribuição é a parte do sistema de potência que mais sofre com perturbações e faltas. Isso decorre devido a maior proximidade das redes de distribuição com atividades humanas, de árvores e da própria carga [2]. As causas para as faltas podem ser as mais diversas possíveis. Segundo [6] as faltas mais frequentes ocorreram devido à:

- Descargas atmosféricas;
- Ação de ventos, chuvas e similares;
- Poluição ou queimadas;
- Falhas em cadeias de isoladores;
- Quedas de árvores sobre linhas aéreas;
- Fadiga e/ou envelhecimento de isoladores;
- Inundações e desmoronamentos;

- Ação de animais em equipamentos do sistema;
- Manobras incorretas.

Os efeitos causados pelo curto-circuito no sistema são de grande relevância devido às elevadas correntes que são geradas, podendo acarretar a interrupção do abastecimento de energia elétrica em determinadas regiões. As faltas no sistema elétrico podem ser diferenciadas segundo suas características relacionadas ao tempo de duração do evento, o número de condutores envolvidos, às resistências a faltas e ao balanço entre fases. Uma análise a respeito dessas características é realizada nos itens que seguem.

2.2.1 Duração das faltas

O evento de falta, com relação a sua duração, pode ser dividido em dois tipos: faltas temporárias e faltas permanentes.

As faltas temporárias são aquelas em que, havendo a operação de um equipamento de proteção, desaparece a causa do defeito e o sistema funciona normalmente depois de religado, ou seja, não ocorre danos físicos à estrutura do sistema elétrico e o sistema volta ao funcionamento após a atuação do disjuntor ou religador (religamento automático).

Como exemplos de causas de faltas temporárias, destacam-se: descargas atmosféricas, presença de arco elétrico devido à aproximação dos condutores, ou ainda galhos de árvores que encostam nos condutores [7].

Já as faltas permanentes são aquelas que interferem na estrutura física do sistema, e requerem a intervenção humana para correção do fator que causou o problema antes que o sistema seja religado. Dentre as possíveis causas para a ocorrência de faltas permanentes, pode-se elencar: a quebra de um cabo, a queda de uma árvore sobre as linhas, ou ainda a colisão de um veículo contra um poste.

2.2.2 Tipo de faltas

Com relação aos tipos de faltas, estão inclusas as seguintes características: número de condutores envolvidos na falta e balanço entre fases de acordo com cada ocorrência. São detalhados nos itens seguintes as classificações possíveis, bem como uma breve explicação a respeito de cada uma das classificações.

- Faltas trifásicas-terra: Faltas trifásicas, também conhecidas como simétricas, são aquelas que atingem as três fases do sistema (A,B e C). As faltas trifásicas podem ou não envolver a terra. A Figura 3 apresenta uma ilustração do curto-circuito trifásico-terra.

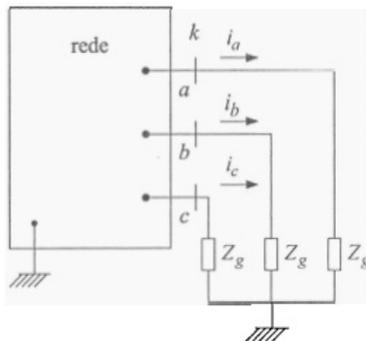


Figura 3 – Exemplo curto-circuito trifásico-terra [8].

- Faltas Bifásicas ou Fase-Fase : As faltas bifásicas são aquelas em há o envolvimento de duas fases (A-B), (A-C) ou ainda (B-C); são consideradas assimétricas devido ao seu desbalanço entre as fases após o evento. Na Figura 4 segue a ilustração do curto-circuito bifásico-terra.

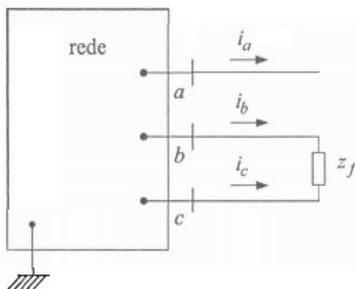


Figura 4 – Exemplo curto-circuito bifásico [8].

- Faltas Bifásicas-terra ou Fase-Fase-terra: Faltas bifásicas também podem ter a presença da terra (A-B-t), (A-C-t) ou ainda (B-C-t);

neste caso também ocorre o desbalanço entre as fases do sistema. Na Figura 5 exibe a ilustração do curto-circuito bifásico-terra.

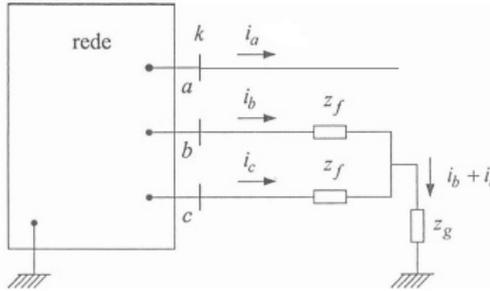


Figura 5 – Exemplo curto-circuito bifásico-terra [8].

- Falta Monofásica ou Fase-Terra: São aquelas em que há o envolvimento de apenas uma fase e a terra (A-t), (B-t) ou ainda (C-t), e, pelo fato de envolver apenas uma fase, também são consideradas assimétricas ou desbalanceadas. Na Figura 6 é apresentada uma ilustração do curto-circuito monofásico-terra.

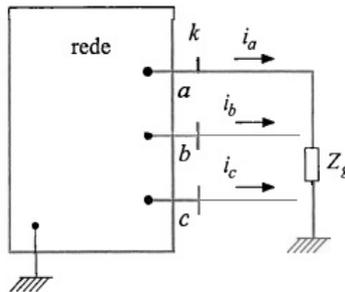


Figura 6 – Exemplo curto-circuito monofásico-terra [8].

Entre as classificações das faltas exibidas, segundo [7], pela própria natureza física dos tipos de curtos-circuitos, os trifásicos são considerados os mais raros; em contrapartida, o curto-circuito monofásico-terra é o mais recorrente. A tabela 1 abaixo lista os tipos de faltas, bem como a frequência de sua ocorrência.

Tipos de Faltas	Probabilidades
Trifásicas	6%
Bifásica ou Fase-Fase	15%
Bifásica-terra ou Fase-Fase-terra	16%
Monofásica ou Fase-terra	63%

Tabela 1 – Ocorrência de tipos de curto-circuito [7].

2.2.3 Resistência de faltas

Outra característica importante na classificação de faltas diz respeito a sua resistência de falta. O valor da resistência durante o evento tem grande impacto na corrente que é gerada pelo curto-circuito. No entanto é o número de condutores envolvidos que determinará a grandeza da resistência. O evento da falta pode ter duas categorias, a saber: curto circuito franco ou curto circuito através de impedâncias. Apesar do uso do termo impedância, apenas a parte real é considerada, ou seja a resistência da falta [4].

Quando ocorre um curto circuito franco ou sólido, não há uma impedância ou em alguns casos pode existir a presença de uma impedância de baixo valor. Este tipo de evento costuma ocorrer em eventos de curto monofásico terra ou bifásicos [7].

Já curto-circuitos de alto valor de impedância são aqueles no qual a falta apresenta uma resistência considerável entre o condutor e a terra, ou mesmo entre condutores. Eventos que apresentam uma grande resistência, tornam-se menos detectáveis no sistema de localização e proteção, devido as suas alterações serem confundidas com um aumento na carga do sistema [4].

2.2.4 Manobras

Apesar de não ser considerada uma falta no sistema, também é necessário uma breve menção a respeito de manobras, a fim de proporcionar um adequado entendimento a respeito dos eventos simulados no decorrer deste trabalho. Manobras são procedimentos realizados por operadores do sistema, por meio da alteração de posição de chaves, a fim de gerenciar o sistema da melhor forma, ocasionando por exemplo o desligamento de uma linha ou ainda a energização ou desenergização de carga.

2.3 TRANSFORMADA *WAVELET*

2.3.1 Definição teórica

Uma função *wavelet* pode ser definida como uma função capaz de decompor outras funções originalmente escritas no domínio do tempo e representá-las de forma que se pode analisá-las em diferentes escalas no domínio do tempo e frequência. Essa decomposição de uma função em funções *wavelet* é chamada de Transformada *wavelet* e possui as formas contínua e discreta.



Figura 7 – Transformada *Wavelet* [9].

2.3.2 Condições de existência

Uma função para ser dita, *Wavelet*, tem que ter por característica possuir uma área total nula sobre a curva da função, e também possuir energia finita. Pode-se definir as afirmações anteriores pelas fórmulas das Equações 2.1 e 2.2.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < L; \quad (2.2)$$

onde $L \in \mathbb{N}$.

2.3.3 Definição matemática

A definição da Transformada *Wavelet* contínua é dada pela Equação 2.3. Definindo-se também $\psi_{a,b}(t)$ pela fórmula da Equação 2.4, pode-se reescrever a transformada conforme Equação 2.5.

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.3)$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2.4)$$

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (2.5)$$

sendo que $\psi_{a,b}(t)$ são designadas como as *Wavelets* filhas. Os fatores a e b são chamados fator de escala e de translação, respectivamente, e são descritos nos itens a seguir.

2.3.4 Escalonamento

O fator de escala geralmente é uma variável que pode multiplicar ou dividir a variável temporal. O papel desta variável é comprimir ou dilatar a função sem alterar sua forma ou localização referencial. A Figura 8 apresenta a função senoidal com diferentes fatores de escala. No caso desta função o fator é multiplicado pela variável temporal e seu aumento de valor provoca a compressão da função.

No caso da Equação 2.3 tem-se o fator de escala dividindo a variável temporal. Nesse caso um aumento do fator provoca uma expansão da função, como apresentada na Figura 9.

A alteração da escala provoca também uma maior e/ou menor concordância na representação do sinal. Por exemplo na Figura 10 tem-se uma mesma *Wavelet* usada para a transformada *Wavelet*, no entanto a escala maior neste caso representa melhor o sinal de interesse.

2.3.5 Translação

O fator de translação provoca uma alteração temporal na *Wavelet*, estes podem negativos ou positivos. No caso de alteração negativa ($b > 0$ na Equação 2.4) tem-se um deslocamento da função para a di-

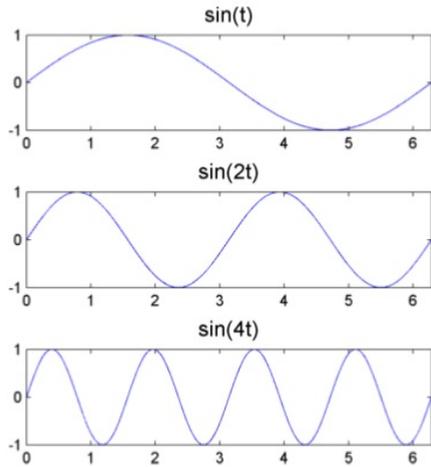


Figura 8 – Função seno com diferentes fatores de escala [9].

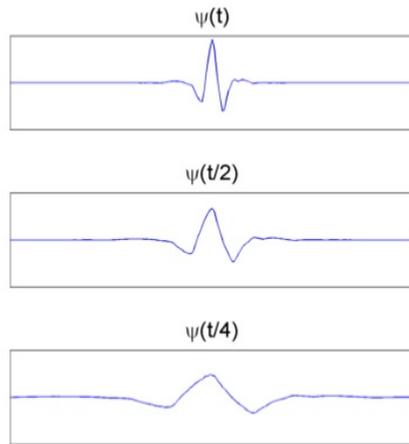


Figura 9 – Exemplo *Wavelet* em três escalas possíveis ($a=1$, $a=2$, $a=4$) [9].

reita em relação ao eixo temporal. Um valor de alteração positiva ($b < 0$ na Equação 2.4) tem-se um deslocamento para esquerda da função em relação ao eixo temporal. A Figura 11 exemplifica as afirmações anteriores.



Figura 10 – Duas escalas da *Wavelet* mãe para representar o sinal [9].

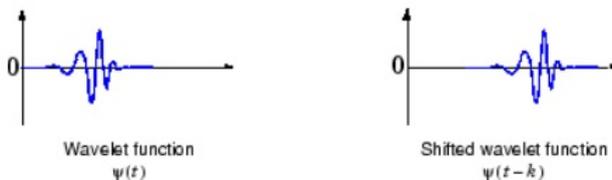


Figura 11 – Translação de uma *Wavelet* para $b > 0$ [9].

2.3.6 Famílias *Wavelet*

Algumas famílias tradicionais de *Wavelet* são descritas a seguir [10]:

- Família *Daubechies*: Esta família *Wavelet* é o alicerce das atuais aplicações de *Wavelets*. Ela possui excelente aplicação para análise de textura em processamento de imagens.
- Família *Haar*: Esta família é um caso especial da família *Daubechies*. Caracteriza-se por ser um filtro simétrico sendo útil para detecção de bordas. No entanto, encontra menos aplicações práticas se comparado a de *Daubechies*.
- Família Gaussiana: Caracteriza-se por possuir derivadas nulas até a ordem $n-1$. Por este motivo é regular e muito utilizada.
- Família Chapéu Mexicano: Esta família é um caso específico da Gaussiana com ordem igual a 2.
- Família *Morlet*: Família que se está usando neste trabalho. A *wavelet* de *Morlet* é uma exponencial complexa (uma portadora) a qual é multiplicada por uma janela gaussiana. Sua fórmula é apresentada na Equação 2.6:

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2.6)$$

A transformada da *Wavelet Morlet* caracteriza-se por ser uma técnica mais precisa em relação à técnica de transformada de *Fourier*. A *Wavelet Morlet* se assemelha as curvas de ondas dos transitórios no sistema elétrico de potência [11], motivo pelo qual se está utilizando desta *Wavelet* para análise de transitórios de faltas neste trabalho.

2.3.7 Aplicações

As aplicações voltadas à área de sistemas de potência no setor elétrico têm crescido significativamente. Entre as aplicações mais conhecidas podemos mencionar as seguintes [10]:

1. Proteção de sistemas de potência;
2. Análise de qualidade de potência;
3. Previsão de carga;
4. Análise de medidas de um sistema de potência;
5. Análise de transientes de sistemas de potência.

2.4 ONDAS VIAJANTES

Em sistemas de energia, ondas eletromagnéticas viajam continuamente usando as linhas de transmissão e distribuição como meio físico de locomoção quando está energizada. É desta forma, portanto, que ocorre a transmissão da energia, onde há ondas incidentes, refletidas e refratadas na linha [12].

Uma coerente analogia poderia ser implementada mediante a dinâmica envolvendo cordas. Acaso se amarre uma corda em uma extremidade e se balance a sua outra ponta, é possível observar uma onda se propagando através dela. Entretanto, quando esta onda atinge a extremidade, ela simplesmente não desaparece, mas retorna ao ponto de origem do evento. A Figura 12 ilustra essa teoria. O que ocorre na corda é similar ao que ocorre com as ondas em linhas de distribuição.

Quando ocorre uma falta na rede de distribuição ou transmissão de energia, uma nova onda é gerada, refletida e refratada no ponto

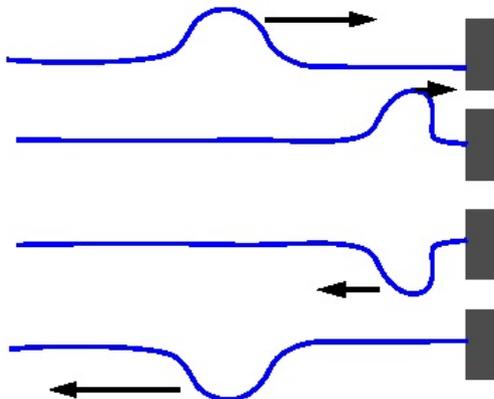


Figura 12 – Teoria ondas viajantes [12]

de ocorrência do evento. O estudo de ondas viajantes pode ser mais aprofundado de acordo com as suas características, estas abordadas no decorrer deste documento.

A propagação de ondas viajantes sempre se dá na direção de todos os terminais da linha de distribuição e provoca os transitórios elétricos percebidos pelos relés de proteção e outros dispositivos de automação e controle localizados nos centros de operação do sistema.

A teoria de ondas viajantes permite que sejam definidos os coeficientes de reflexão e refração da onda viajante em descontinuidades, a velocidade de propagação da onda e a impedância de surto da linha. Vale ressaltar que, durante a propagação ao longo da linha, as ondas viajantes são atenuadas principalmente por perdas resistivas e por corrente de fuga e ainda podem sofrer distorções na sua forma de onda [13].

Quando uma onda viajante atinge uma descontinuidade, ou seja, um ponto de transição no qual há uma súbita mudança nos parâmetros do circuito, tais como um terminal aberto ou em curto-circuito, uma junção, um enrolamento de uma máquina ou transformador, etc, uma parte da onda é refletida de volta, e uma parte da onda é transmitida para a outra seção do circuito. A onda que chega na descontinuidade é chamada de onda incidente e as duas ondas oriundas da descontinuidade são chamadas de ondas refletidas e refratadas (transmitida), respectivamente. Tais ondas formadas no ponto de transição seguem as leis de Kirchhoff. Elas satisfazem as equações diferenciais da linha

de transmissão, e são condizentes com os princípios de conservação de energia [14].

2.5 TRANSFORMADA MODAL

Para o estudo de ondas viajantes nas linhas de distribuição é importante analisar os sinais de corrente e tensão considerando o acoplamento magnético entre os condutores. Para isto, os sinais de tensão e corrente são transformadas em componentes modais independentes, ou seja, modo 0, modo 1 e modo 2. A transformada de *Clarke* [15] pode ser utilizada para chegar a tal resultado. A matriz adotada para a transformada de *Clarke* é a que segue nas matrizes abaixo.

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{-\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{-\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

onde i_A, i_B, i_C e u_A, u_B, u_C são as componentes de fase da corrente e tensão respectivamente e i_0, i_1, i_2 e u_0, u_1, u_2 são as componentes modais da corrente e tensão, respectivamente. Desta forma cada componente modal se comporta como se fosse um sistema monofásico.

2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos que serão aplicados no decorrer deste trabalho. Uma breve revisão desde sistema de distribuição de energia elétrica, faltas elétricas, transformada *Wavelet* (base deste trabalho) bem como ondas viajantes e transformada modal foram abordadas.

3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Para o estado da arte é realizado um estudo sobre o assunto tema deste trabalho, que é localização de faltas em sistemas de distribuição.

A localização de faltas em sistemas elétricos de potência é essencial para manter a continuidade do serviço ao consumidor e evitar a aplicação de penalidades. Em vista disso, muitos esforços são realizados para entregar ao consumidor um serviço de qualidade e contínuo. A qualidade de energia das redes de distribuição, com particular referência ao número e duração de interrupções curtas e longas, depende do número anual de faltas e do tempos de restauração relevantes [7]. A disponibilidade de localização precisa da falta pode resultar em redução importante do tempo de restauração.

No princípio dos sistemas de distribuição não existiam métodos específicos para localizar as faltas. Apenas se utilizava a técnica primitiva baseada na inspeção visual no qual através de meios de transportes terrestres e/ou aéreos, os agentes percorriam todo o sistema a procura do local da falta [4].

A partir dessas técnicas primitivas, que ainda são utilizados por algumas concessionárias, foram investigadas várias abordagens disponíveis na literatura acadêmica. Dentre as abordagens foca-se a descrição em 2 macros grupos.

3.1 MÉTODOS BASEADOS NA MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA

Nesta abordagem de localização de faltas, estão métodos cujos cálculos utilizam a componente fundamental do sinais de tensão ignorando as outras componentes harmônicas. Dentre os métodos conhecidos deste grupo destacam-se por ordem cronológica:

- Método de *Warrington et al.* (1968)

O método de *Warrington et al.* (1968) segundo [4] caracteriza-se por ser o método da componente reativa da impedância com priorização pelo sistema de transmissão. No entanto serviu como início para aplicações e estudos em sistemas de distribuição. A Figura 13 serve como base para entender o princípio de funcionamento do método de *Warrington et al.*

A impedância pode ser vista em qualquer ponto do circuito a partir da Equação 3.1:

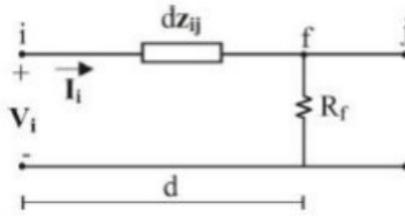


Figura 13 – Método de *Warrington et al. (1968)* [16].

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (3.1)$$

Escrevendo-se a impedância do alimentador por unidade de comprimento como sendo composta por uma componente resistiva e uma componente reativa ($z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$), e considerando a impedância de falta R_f puramente resistiva, a impedância Z_i pode ser escrita como [2]:

$$Z_i = d.(r_{ij} + jx_{ij}) + R_f \quad (3.2)$$

$$d = \frac{im.(Z_i)}{x_{ij}} \quad (3.3)$$

A partir disso, a componente reativa de Z_i indica a distância da falta na Equação 3.2, já que se conhece a reatância do condutor por unidade de comprimento vista na Equação 3.3.

Porém, como o método é destinado principalente para sistemas de transmissão, o uso para a distribuição de energia possui limitações destacadas segundo [2] como: sua utilização apenas em circuito equivalente monofásico fazendo com que não abranja todo sistema de distribuição; consideração de linhas homogêneas não retratando a real situação dos alimentadores ao longo de toda a sua extensão; um maior erro com o aumento da resistência de falta pois não considera a influência das impedâncias de cargas no método; e por fim múltiplas localizações de falta possíveis visto que o método não considera as ramificações laterais existentes em redes de distribuição [16].

- Método de *Roytman et al.* (1982)

O artigo publicado por *Roytman et al.* (1982) foi um dos primeiros a abordar a área de proteção de sistemas de potência voltados a localização das faltas em sistemas de distribuição.

Segundo [4], o método de *Roytman et al.* (1982) é baseado na aplicação do teorema de Tellegen, que pode ser aplicado tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo. O estudo propõe a localização de faltas, tanto na ocorrência de curto-circuito como circuito aberto, com base na aquisição dos dados de corrente e tensão do terminal da subestação. Este método é um aprimoramento do método da impedância reativa (*Warrington et al.*, 1968), pois já começa a considerar a influência das cargas ao longo do alimentador e também ocorrências em circuitos trifásicos.

A Figura 14 ilustra o circuito teórico estudado e implementado no artigo [17], no qual *Roytman et al.* (1982) utiliza um sistema de distribuição.

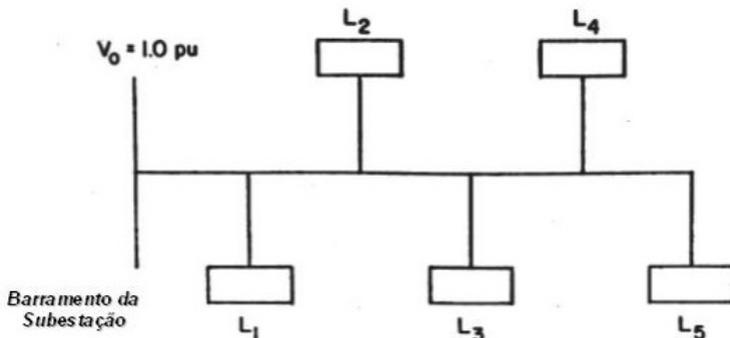


Figura 14 – Circuito adaptado utilizado por *Roytman et al.* [17].

- Método de *Takagi et al.* (1982)

O método de *Takagi et al.* (1982) assim como o método de *Warrington et al.* é voltado também para os sistemas de transmissão. No entanto, este método contribuiu para a localização de faltas em sistemas de distribuição. O princípio trata segundo [18] do cálculo da reatância de uma linha com defeito, com um microprocessador, usando dados de tensão e corrente da linha de transmissão.

Takagi et al. (1982) de acordo com [4] aplica o teorema da superposição de sistemas elétricos. Desta forma, o método utiliza dados das grandezas de corrente e tensão do circuito pré-falta e posteriormente do circuito puramente com defeito, compondo o sistema em falta, para o cálculo da distância em que ocorreu o curto-circuito.

Pela consideração do uso em linhas curtas de transmissão, a capacitância dos condutores é desprezada nos cálculos do algoritmo.

A Figura 15 e a Figura 16 ilustram os circuitos teóricos estudados e implementados no artigo.

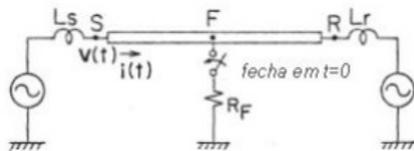


Figura 15 – Método de *Takagi et al.* (1982) [18].

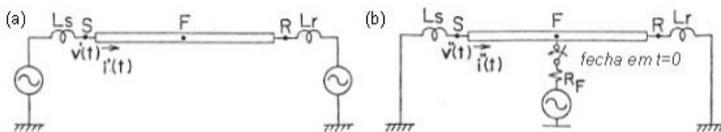


Figura 16 – *Takagi et al.* (1982)) [18].

- Método de *Srinivasan et al.* (1989)

Segundo [19] esquemas convencionais de localização de falhas não levam em conta as cargas e seu importante comportamento de impedância, e isso levaria a erros consideráveis no caso de linhas de transmissão radiais com cargas, comumente encontradas nos níveis de 120 kV e inferiores.

Em vista disso seu método consiste em que a distância da falta é obtida pela resolução de uma equação implícita, podendo ser tratadas faltas monofásica à terra, fase a fase e trifásica à terra.

O algoritmo proposto de acordo com [4] peca na utilização da teoria das componentes simétricas, a qual também considera as linhas como transpostas. Por outro lado, um avanço neste método

é o equacionamento em que a corrente de falta não é considerada em fase com a corrente medida nos terminais da subestação, além da consideração de cargas e suas respectivas variações, entre corrente constante, impedância constante e potência constante. O método continua desprezando os efeitos capacitivos nas linhas e também, propõe a utilização de dados do terminal final de linha para futuros estudos e alterações no equacionamento.

No entanto o método de *Srinivasan et al.* (1989) permitiu uma contribuição maior devido ao fato de métodos localizarem faltas através de cálculos iterativos, que possuem desempenho superior aos antecessores de componente reativa da impedância. Porém, seu ponto negativo é a maior duração no tempo de processamento dos cálculos.

A Figura 17 ilustra o sistema estudado por *Srinivasan et al.*

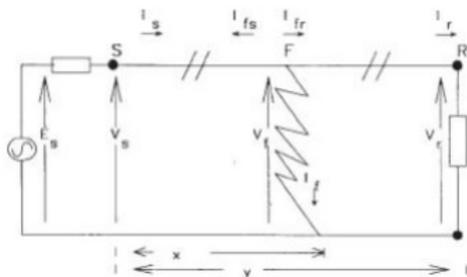


Figura 17 – Circuito utilizado por *Srinivasan et al.*(1989) [19].

- Método de *Zhu et al.*(1997)

O método do de *Zhu et al.*(1997) é um modelo de algoritmo de localização de falta baseada na solução iterativa das equações que descrevem a condição de falta em estado estacionário. Assim como ocorre no Método de *Takagi et al.* (1982), o método não utiliza componentes simétricas mas sim componentes de fase.

Neste método houve avanço em relação aos anteriores com relação aos alimentadores serem geometricamente diferentes e também não transposto, no entanto assim como em *Takagi et al.* (1982) ainda peca em desconsiderar o efeito capacitivo das linhas.

Em [20] para lidar com as incertezas inerentes à modelagem do sistema, o algoritmo de localização de falta foi adaptado para

estimar as regiões de falta com base em modelagem probabilística e análise. Como o alimentador de distribuição é uma rede radial, várias possibilidades de localização de falhas podem ser computadas com medições disponíveis apenas na subestação.

A Figura 18 apresenta o o circuito utilizado por *Zhu et al.*(1997) no artigo.

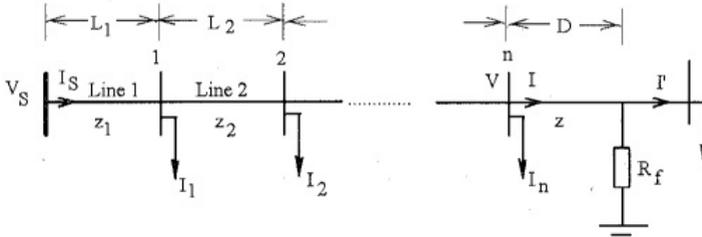


Figura 18 – Circuito utilizado por de *Zhu et al.*(1997) [20].

- Método de *Das et al.* (2000)

Nesta proposta de trabalho *Das et al.* (2000) apresenta um método iterativo de desenvolvimento de um protótipo de localizador de faltas que estima a localização de faltas em linhas de subtransmissão e distribuição radiais. A técnica de localização de faltas é baseada no componente de frequência fundamental de tensões e correntes medidas no terminal da linha.

Segundo [4] o equacionamento de *Das et al.* (2000) para a localização de faltas em sistemas de distribuição inovou ao considerar a não-linearidade dos condutores, a presença de derivações laterais e bancos de capacitores, além da variação de carga, ao longo dos alimentadores.

O procedimento se dá a partir de uma estimativa inicial da seção da falta. A Figura 19 ilustra o circuito teórico estudado e implementado no artigo *Das et al.* (2000).

- Método de *Choi et al.*(2004)

O trabalho de *Choi et al.*(2004) propõe uma análise até então não desenvolvida. Devido a natureza desequilibrada dos sistemas de distribuições, seja pela existência de muitos ramos laterais ou pela presença de cargas monofásicas, a localização de faltas se torna, um trabalho complexo.

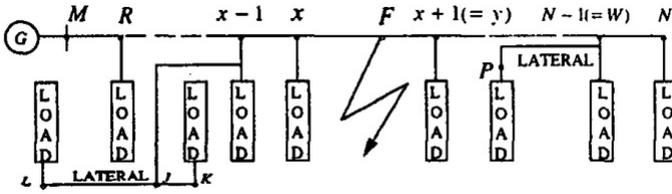


Figura 19 – Circuito utilizado por *Das et al.* (2000) [21].

No entanto *Choi et al.* (2004) propõe um algoritmo de localização de faltas de análise direta (método não-iterativo) do circuito trifásico para distribuição desequilibrada.

O algoritmo proposto supera o limite do algoritmo convencional, que requer o sistema balanceado. Além disso, é aplicável a qualquer sistema de energia, mas especialmente útil para a distribuição de energia desequilibrada. Segundo [22] sua eficácia foi comprovada por muitas simulações em ambiente EMTP (*Electromagnetic Transients Program*).

O circuito estudado por [22] é apresentado na Figura 20 e na Figura 21, onde na Figura 20 é mostrado o circuito com linha monofásica com curto-circuito fase-terra em sistema balanceado, e na Figura 21 mostra-se o desbalanço de carga em linhas de distribuição devido a ramificação do sistema.

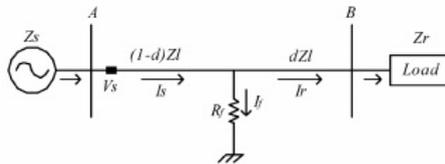


Figura 20 – Curto-circuito fase-terra sistema balanceado [21].

3.2 MÉTODOS BASEADOS EM COMPONENTES DE ALTA FREQUÊNCIA

Baseadas na análise de ondas viajantes originadas por falta, esta abordagem engloba métodos para localização de faltas através das informações que os transitórios das faltas podem carregar. Esse método

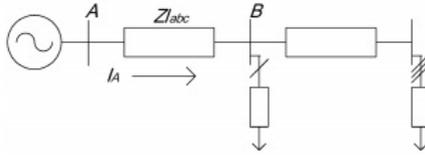


Figura 21 – Sistema desbalanceado [21].

é conhecido pelo uso de ondas viajantes. Falhas em linhas de transmissão ou em redes de distribuição causam transitórios que viajam ao longo das linhas como ondas compostas por uma série de frequências que vão desde alguns quilohertz até vários mega-hertz, sobrepostos à componente fundamental da frequência nas formas de onda de tensão e corrente [2].

As ondas deslocam-se pelo sistema com velocidades próximas à da luz, afastando-se do ponto da falta em direção aos pontos terminais da linha de transmissão ou distribuição propagando-se pelo sistema elétrico adjacente com amplitude decrescente, resultado dos efeitos combinados da impedância da linha e de múltiplas reflexões. Desta forma, a localização da falta é baseada na determinação precisa do momento em que as frentes de onda passam por pontos conhecidos, geralmente subestações ou só mesmo terminais nas extremidades das linhas [4].

A localização da falta pode ser obtida a partir do tempo que as ondas viajantes levam para chegar as unidades de aquisição de dados, sendo esse o princípio dos principais métodos que utilizam informações dos transitórios [23].

Outra forma de obter informações a partir dos transitórios gerados durante a falta consiste em obter informações de frequência do sinal registrado durante a falta e compará-las às frequências teóricas calculadas a partir das características do sistema.

A seguir é introduzida uma listagem de trabalhos da literatura acadêmica sobre o tema.

1. Localização de faltas através de unidades de aquisição:

- Unidade de aquisição em um único terminal.

Para ilustrar a teoria por trás de métodos baseados em ondas viajantes que empregam dados de um único terminal, é inserida a Figura 22 onde é mostrada uma linha com dois terminais (s e r) e uma falta no ponto f a uma distância d do ponto s (primeiro terminal).

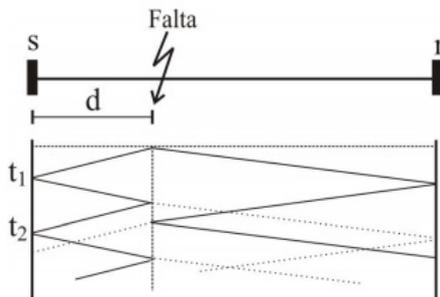


Figura 22 – Método ondas viajantes única unidade aquisição [2].

Considera-se que:

- A unidade de aquisição instalada em s;
- A primeira onda viajante gerada pelo surto de falta chega a esse ponto no instante de tempo t_1 ;
- No instante de tempo t_2 o sinal refletido na falta poderá ser novamente observado na unidade de aquisição.

A partir disto pode-se descobrir a distância d através da Equação 3.4, onde a V é a velocidade de propagação das ondas no condutor:

$$d = \frac{(t_2 - t_1).V}{2} \quad (3.4)$$

Esta teoria foi aplicada no método de [24], onde os sinais utilizados são de alta-frequência, sobrepostos às formas de onda das tensões trifásicas. A polaridade desses sinais serve para distinguir reflexões que provém do ponto de falta daquelas que provém de derivações do alimentador.

A unidade de aquisição é colocada em um terminal e os sinais trifásicos de tensão e corrente, por meio da transformada de *Clarke*, são trabalhados como circuitos monofásicos para se ter uma melhor análise dos transitórios.

Os resultados obtidos segundo [2] levaram a conclusões como: as cargas alocadas ao longo da rede de distribuição podem refletir as ondas viajantes de modo semelhante à falta; dependendo dos níveis de impedância de cada componente do sistema e ondas viajantes originadas por faltas que ocorrem

muito próximas a um terminal do alimentador são difíceis de serem analisadas, pois as reflexões provenientes do ponto de falta praticamente se sobrepõem àquelas provenientes desse terminal.

- Unidade de aquisição em dois ou mais terminais

A partir das técnicas utilizadas em localização de faltas com ondas viajantes através de dados em um único terminal e os resultados obtidos, despertou-se o interesse dos pesquisadores em contornar os problemas do método anterior e aperfeiçoá-lo. Onde antes havia apenas uma unidade de aquisição em um único terminal, agora é implementado em dois ou mais terminais.

O princípio básico da teoria delinea-se da seguinte forma:

- Coleta-se em ambos os terminais, os instantes de tempo t_a e t_b em que a frente de onda chega em cada ponta;
- Tendo conhecimento do comprimento dos alimentadores, l , pode-se então determinar a localização da falta, d , a partir do primeiro terminal pela Equação 3.5:

$$d = \frac{l + V \cdot (t_a - t_b)}{2} \quad (3.5)$$

onde V é definido por $v = k \cdot c$, sendo c é a velocidade da luz dada em $3 \times 10^8 \text{m/s}$ e k é um fator de controle e realimentação do sistema, que depende de particularidades na linha do sistema. Com a instalação das unidades de aquisição em mais de um terminal conseguiu-se maior precisão da localização das faltas devido à energia das ondas viajantes serem captadas por pelo menos dois terminais. Porém, segundo [4] o sistema não seria muito eficaz, pois as ondas viajantes refletem e sofrem grandes atenuações por todo o sistema de distribuição, devido a sua composição repleta de ramificações laterais (tanto trifásicas, bifásicas e monofásicas) e diversas cargas interligadas. Neste ramo de pesquisa, destaca-se o trabalho de [25] onde, segundo [2], emprega-se funções de correlação cruzada que permitem localizar faltas em um sistema real com inúmeras derivações laterais, a partir da instalação de unidades de aquisição nos dois extremos do alimentador principal com um bom grau de precisão. Dessa maneira, a energia proveniente das reflexões vindas do ponto de falta é maior que a das reflexões em derivações la-

terais, o que possibilita a distinção entre os dois eventos, e conseqüentemente a localização das faltas.

Os resultados obtidos por [25] tiveram considerável avanço na precisão da localização, porém a grande quantidade de ramificações em sistemas de distribuição tornam seu custo de implementação alto se comparado ao método anterior, além da necessidade de sincronismo entre as unidades.

2. Localização de faltas através de informações de frequência durante transitório:

Nesta abordagem de localização de faltas através de informações de frequência durante o transitório, a análise do sinal se dá através da transformada *Wavelet*, esta já definida anteriormente onde é possível se obter informações precisas de quais as frequências envolvidas em um sinal para um dado instante de tempo.

Segundo [2], se por um lado a análise de um sinal baseada na teoria de *Fourier* decompõe o sinal em variantes de senos e cossenos, na análise de um sinal via *wavelets*, o sinal é decomposto em variantes da função *wavelet* mãe determinadas por um coeficiente de escala. Em linhas gerais, a análise via *wavelets* é a medida da correlação das *wavelets* de diferentes escalas deslocadas ao longo do sinal analisado no tempo.

Alguns trabalhos aplicados desta teoria são ilustrados a seguir a fim apresentar os avanços obtidos na área até hoje.

- *Ancell et al.*(1994), [26]

No artigo de *Ancell et al.*(1994) tem-se um estudo de um método que emprega ondas viajantes chamado Estimativa da Máxima Semelhança nos tempos de chegadas das ondas refletidas. O método é comparado com métodos que usam correlação para estimação da distância de falta. A conclusão dos autores foi que o método de Estimativa da Máxima Semelhança possui em geral um desempenho superior aos métodos de correlação. No entanto, possui a desvantagem de depender muito dos sinais base (*Wavelet*) utilizados nas ondas incidentes usadas nas simulações e também um aumento significativo do esforço computacional.

- *Magnago et al.* (1996), [27]

Outro artigo com uso de ondas viajantes é o de *Magnago et al.* (1996). Nele os autores propõe usar um método que envolve desacoplar os sinais transientes em seus componentes modais. Os

sinais modais são então transformados do domínio do tempo para o domínio da frequência, aplicando a transformada *Wavelet*. Os coeficientes de transformada *wavelet* nas duas escalas mais baixas são então usados para determinar a localização da falta para vários tipos de faltas e configurações de linha. O método de localização de falta proposto é independente da impedância de falta e mostra-se adequado para linhas compensadas com capacitor. Os resultados mostraram um erro de estimativa na localização da falta relacionado ao tempo de amostragem usado no registro do transitório da falha. Além disso, para faltas aterradas próximo ao meio da linha, o erro do algoritmo de localização da falta também aumenta.

- *Chaari et al.* (1996), [28]

O artigo de *Chaari et al.* (1996) mostra em estudo feito no ano de 1996 quando ainda essa abordagem do uso de transitórios para fins de reconhecimento de faltas e localização era nova para proteção de sistema elétrico de potência. Para isso, as transformada *Wavelet* são essenciais para obtenção dos modos dominantes dos transitórios.

- *Assef et al.* (1996), [29]

O artigo de *Assef et al.* (1996) discute a possibilidade do uso da transformada *Wavelet* ser um pré-processamento para Redes Neurais Artificiais (RNA). Este auxilia a decisão, após treinamento, sabe se o sinal medido está com defeito ou não.

As entradas da rede neural são os conteúdos dos coeficientes de *Wavelet* obtidos após a aplicação recursiva da transformada em sinais com defeitos. As simulações das faltas foram geradas em EMTP.

- *Thomas et al.* (1998), [30]

O trabalho de *Thomas et al.* (1998) baseia-se em um método de monitoramento de linhas de transmissão para estimar o transitório de tensão a partir do transitório de corrente. O princípio baseia-se na teoria de ondas viajantes provocadas em linhas de transmissão de alta tensão como resultado de uma falta. O método proposto pode-se dizer único no sentido em que os transitórios de tensão podem ser deduzidos sem empregar medições tomadas a partir de transdutores de tensão.

- *Borghetti et al.* (2008) [31] : O trabalho de *Borghetti et al.* (2008) está intimamente ligado a este trabalho. Seu método, al-

goritmo e teoria foram as bases para o desenvolvimento deste trabalho e seu conteúdo é exibido no decorrer do capítulo 4.

3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Dentre as abordagens expostas no decorrer deste estado da arte, o método utilizado neste trabalho pertence a categoria de localização de faltas através de ondas viajantes, onde há o uso de informações da frequência durante os transitórios gerados pelas faltas, aplicando metodologia de análise baseada em transformada *Wavelet*. Onde a análise da transformada, realizada no domínio da frequência, visa determinar as frequências características que podem ser usadas para inferir a localização da falta, assumindo a topologia da rede e o condutor da linha geometria conhecida.

4 METODOLOGIA APLICADA AO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Neste capítulo é detalhada a modelagem do sistema teste de distribuição do IEEE de 34-nós em ambiente ATP. Ademais, descreve-se a metodologia aplicada no trabalho ao problema de localização de faltas em redes de média tensão.

4.1 METODOLOGIA BASEADA NO USO DA TRANSFORMADA WAVELET

Como mencionado no capítulo 3, a metodologia proposta em [31] serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho. A proposta de [31] é baseada no uso da transformada *Wavelet* contínua para a localização de faltas em redes de distribuição através da construção de *Wavelets*-mãe inferidas a partir de transitórios originados de faltas.

O método de *Borghetti et al.* [31] baseia-se na identificação de algumas frequências características associadas a caminhos específicos nas quais as ondas viajantes originadas por faltas se propagam. Essas frequências podem ser identificadas através da análise em cima dos sinais de tensão ou corrente detectadas na entrada do sistema, ou seja, transformador da subestação. *Borghetti et al.* utiliza as formas de onda de tensão para seu estudo.

Toda análise e simulação é realizada no sistema teste de distribuição do IEEE 34-nós. A Figura 23 apresenta o exemplo utilizado por *Borghetti et al.* para suas simulações.

De acordo com os autores, quando ocorre uma falta em algum ponto do sistema, esta gera frentes de ondas que viajam para todos os sentidos do sistema. Essas frentes de ondas refletem nas terminações das linhas e em junções. Em um ponto de observação podem ser associados alguns caminhos de frente de onda. Na Figura 23 são mostrados os caminhos associados do ponto da falta até o ponto de observação, para a falta simulada por *Borghetti et al.*, na barra 800, isto é, na entrada do sistema.

Considerando-se que o sistema teste possui uma topologia radial, ou seja, um alimentador principal e ramificações, o cálculo para o número de caminhos possíveis para uma falta é a soma entre o número de ramificações até a falta mais o número de junções, considerando a falta também uma junção. A partir da escolha do ponto de observa-

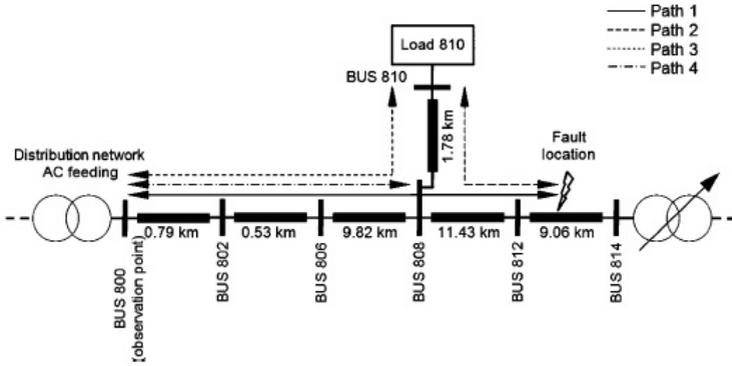


Figura 23 – Circuito utilizado por *Borghetti et al.* para a análise [31].

ção, é necessário identificar quantos caminhos diferentes se é possível enxergar.

Observando o exemplo usado por *Borghetti et al.*, na Figura 23, é possível identificar 4 caminhos pelos quais a frente de onda pode viajar a partir da falta. No entanto, o número de caminhos observáveis são apenas três: 1, 3 e 4. Cada caminho, como mencionado anteriormente, pode ser atrelado a uma frequência característica e, a partir dessa frequência, é possível detectar onde estará o ponto de falta.

Vale notar também que a propagação das ondas viajantes envolvem três modos (0, 1 e 2) e cada modo possui uma velocidade de propagação de onda diferente, o que influencia diretamente, portanto, no cálculo da frequência característica em cada modo.

Assumindo que a topologia da rede e as velocidades de cada modo são conhecidas, é possível calcular as frequências teóricas para cada modo i em cada caminho p de acordo com a Equação 4.1:

$$f_{p,i} = \frac{v_i}{n_p \cdot L_p} \quad (4.1)$$

em que v_i é a velocidade de viagem no modo i , L_p é a distância percorrida pela onda no caminho p e n_p é o número de vezes necessário para uma determinada onda viajante se propagar ao longo do caminho p antes de atingir novamente a mesma polaridade.

O coeficiente n_p pode ser determinado pela comparação entre os coeficientes de reflexão nas duas extremidades da linha percorrida no caminho p de acordo com as seguintes características:

- Extremidades onde há um transformador de potência, o coeficiente de reflexão é próximo de +1;
- Extremidades que correspondem a uma junção entre mais de duas linhas são caracterizadas por um coeficiente de reflexão negativo -1;
- O coeficiente de reflexão da extremidade onde a falta está ocorrendo é próximo a -1.

Como mencionado anteriormente, o coeficiente n_p é definido a partir do sinal dos coeficientes de reflexão das linhas que conectam cada caminho. Se ambas as extremidades possuem polaridades iguais (de acordo com as características citadas acima) o valor de n_p é igual a 2. Caso tenham polaridades opostas o valor de n_p é igual a 4. Após a identificação dos caminhos e dos coeficientes de reflexão, é possível determinar as frequências teóricas a partir da Equação 4.1.

Os próximos passos se dão para a construção da *Wavelet* mãe e aplicação do algoritmo de localização de falta. Como os sinais de transitórios de corrente e tensão são a soma de componentes de baixa frequência (frequência industrial constante) e alta frequência (perturbação causada pela falta) é necessária a sua decomposição [31].

A identificação de frequências características deve ser realizada usando técnicas de análise de sinal apropriadas que permitam o ajuste do espectro de sinal "versus" tempo. Para isso é necessário o uso das representações frequência-tempo (TFR). O sinal TRF liga um sinal de tempo unidimensional a uma função bidimensional de tempo e frequência. Dois exemplos de TRFs conhecidos são a transformada de *Fourier* de curta duração e a Transformada *Wavelet*.

Os autores [31] afirmam que o uso de operadores tradicionais como transformada rápida de *Fourier* para análise do espectro não são ideais, já que não permitem a análise em diferentes escalas de frequência e tempo. No entanto, esta análise é possível com o uso de transformada *Wavelet* contínua de , que além de ser uma TFR, permite uma boa resolução de frequência em baixas frequências e um bom tempo resolução em altas frequências. Em particular, permite a análise de componentes de alta frequência muito próximos uns dos outros no tempo e componentes de baixa frequência muito próximos uns dos outros em frequência.

Portanto, acordada a necessidade do uso da transformada *Wavelet*, o próximo passo se dá pelo processo de construção de *Wavelet* mães inferidas. Os passos para a criação da *Wavelet* mãe são:

1. A primeira etapa do processo consiste em avaliar a forma de onda

do transitório do sinal $s(t)$, e a partir deste, selecionar a parte inicial do transitório, $\bar{s}(t)$. Esta nova função $\bar{s}(t)$ é usada para a construção da *Wavelet* mãe, que tem início no começo do transitório e se prolonga até uma duração ΔT que corresponde ao conteúdo mínimo de frequência esperada do sinal analisado.

2. Definida a nova forma de onda $\bar{s}(t)$, a primeira condição de função *Wavelet* (ver seção 2, item 2.3) é satisfeita de acordo com a Equação 2.1, com normalização do sinal em relação ao seu valor máximo.
3. Nesta etapa, a fim de atender a condição dada na Equação 2.2, a *Wavelet* mãe é contruída como uma série de avanços e atrasos $k\Delta t$, multiplicados por um decaimento esponencial, como pode ser visto na Equação 4.2.

$$\psi(t) = \left(\sum_{k \in \mathbb{N}} \bar{s}(t + k\Delta t) + \bar{s}(t - k\Delta t) \right) e^{-\tau t^2} \quad (4.2)$$

Criada a *Wavelet* mãe, o próximo passo é a transformada *Wavelet* em si. A Equação 4.3 apresenta a transformada *wavelet* contínua, que é composta pela integral do produto entre o sinal da falta e a *Wavelet* filha, contruída a partir dos deslocamentos e mudanças de escalas definidos por a e b .

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t - b}{a} \right) dt \quad (4.3)$$

onde a é a escala, b o deslocamento no tempo, $s(t)$ é o sinal da falta e ψ é a *Wavelet* filha. A fórmula amostrada dos coeficientes é apresentada a seguir:

$$C(a, b) = T_s \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n=0}^{N-1} \psi^* \left[\frac{(n - i)T_s}{a} \right] s(nT_s) \quad (4.4)$$

em que $C(a, b)$ são os coeficientes, correspondentes aos iT_s elementos de uma matriz que representam o TFR bidimensional como função de tempo e frequência.

Os coeficientes podem ser vistos como índices de similaridade entre o sinal que se deseja analisar e a *Wavelet* filha e a partir deles são realizados os cálculos da energia desses coeficientes. A soma dos valores ao quadrado de todos os coeficientes pertencentes à mesma escala,

que são denotados como energia do sinal, identifica um escalograma que fornece o peso de cada componente de frequência, como pode ser identificado na Equação 4.5

$$E_{\text{cwt}}(a) = \sum_{n=0}^{N-1} (C(a, nT_s))^2 \quad (4.5)$$

onde a identificação das frequências características associadas para a localização da falta é realizada por meio da inspeção dos picos máximos do escalograma obtido.

Para simplificar computacionalmente a Equação 4.5 é aplicado a transformada de *Fourier* de acordo com o teorema de Parseval, e pode ser visto na Equação 4.5.

$$F(C(a, b)) = \sqrt{a}\Psi^*(a.\omega)X(\omega) \quad (4.6)$$

onde $F(C(a, b))$ é a transformada de *Fourier* de $C(a, b)$, $X(\omega)$ é a transformada conjugada de *Fourier* do sinal de falta $x(t)$, e $\Psi^*(a\omega)$ é a transformada de *Fourier* da *Wavelet* filha $\psi(t)$.

4.2 MODELAGEM DO SISTEMA IEEE 34-NÓS EM AMBIENTE ATP

Nesta seção é explorada a parte de modelagem do sistema teste de distribuição do IEEE 34-nós. São apresentadas as adaptações realizadas por *Borghetti et al.* no sistema original a fim de simplificar o sistema, bem como as alterações realizadas no sistema teste para este trabalho.

4.2.1 O sistema IEEE 34-nós

Para as simulações das faltas foi utilizado o sistema teste de distribuição do IEEE de 34-nós composto por linhas aéreas. O diagrama com a estrutura do sistema pode ser observado na Figura 24. São apresentadas neste item as características e as considerações relacionadas a modelagem deste sistema.

- O sistema IEEE 34-nós possui ramificações com diferentes configurações de condutores. Nesse sistema são utilizadas as seguintes:

ID#500 (3 fases - 4 fios) e ID#510 (1 fase - 2 fios). A Figura 25 mostra a disposição desses fios nos postes nas duas configurações utilizadas, bem como suas dimensões (em pés). Já a Figura 26 apresenta o sequenciamento das fases para cada ID# e as dimensões dos condutores.

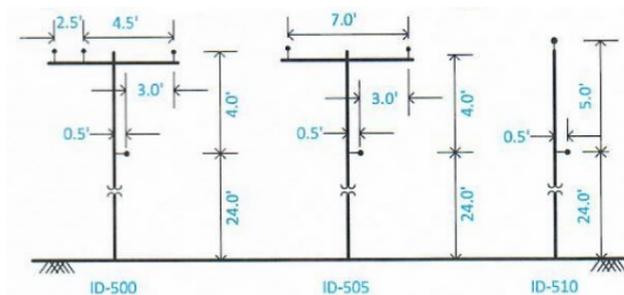


Figura 25 – Configurações condutores [33].

Configurações linhas aéreas				
Configuração	Faseamento	Fases	Neutro	ID
		ACSR	ACSR	
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

Figura 26 – Condutores - adaptado de [32].

- O sistema IEEE 34-nós possui 3 níveis de tensão em toda sua extensão. São eles: 69 kV, 24,9 kV e 4,9 kV.
- O sistema conta ainda com os seguintes elementos:
 1. Fonte de entrada (69 kV);
 2. (34) barras/nós;
 3. (33) Segmentos de linhas de distribuição. As distâncias, bem como configurações utilizadas para cada segmento pode ser obtidos em [32];
 4. (2) Transformadores:
 - Subestação Δ - Y, 2500 kV, 69/24,9 kV;
 - Baixa tensão (832-888), Y - Y, 500 kV, 24,9/4,16 kV.

5. (2) Reguladores de tensão:
 Regulador-1: 814-850;
 Regulador-2: 852-832.
6. (6) Cargas pontuais e (19) cargas distribuídas: Modelos e conexões das cargas podem ser vistos na Tabela da Figura 27. Os valores das cargas (pontuais e distribuída) podem ser vistas em [32].

Código	Conexão	Modelo
Y-PQ	Estrela	kW e kVAr Constante
Y-I	Estrela	Corrente Constante
Y-Z	Estrela	Impedância Constante
D-PQ	Delta	kW e kVAr Constante
D-I	Delta	Corrente Constante
D-Z	Delta	Impedância Constante

Figura 27 – Conexões e modelos - adaptado de [33].

7. (2) Bancos de capacitores:
 Barra 844: 100 kVar, 3 Fases;
 Barra 848: 150 kVar, 3 Fases.

4.2.2 Adaptações realizadas em [31]

No sistema original, como mencionado anteriormente, o alimentador é composto pelo tronco principal e suas ramificações com diferentes configurações de condutores. No entanto, *Borghetti et al.* desconsidera essa condição, sendo que todo o tronco principal e suas ramificações têm configuração ID#500. Entretanto mantém-se os dimensionamentos dos condutores trifásicos que se baseavam na Figura 26.

O diagrama unifilar seguido por *Borghetti et al.* pode ser visto na Figura 28. Nele pode ser observado que todas as cargas (pontuais ou distribuídas) no sistema são deslocadas para as extremidades de cada ramificação e tronco principal.

Outro fator de destaque é a conexão das cargas com as linhas onde estão instaladas. Em cada ponto de carga há um transformador abaixador de tensão que transforma as tensões de 24,9 kV para 0,4 kV. Conforme mostrado na Figura 29.

Outra alteração assumida por *Borghetti et al.* é a eliminação da baixa tensão, ou seja, todo circuito referente a 4,16 kV é retirado do sistema.

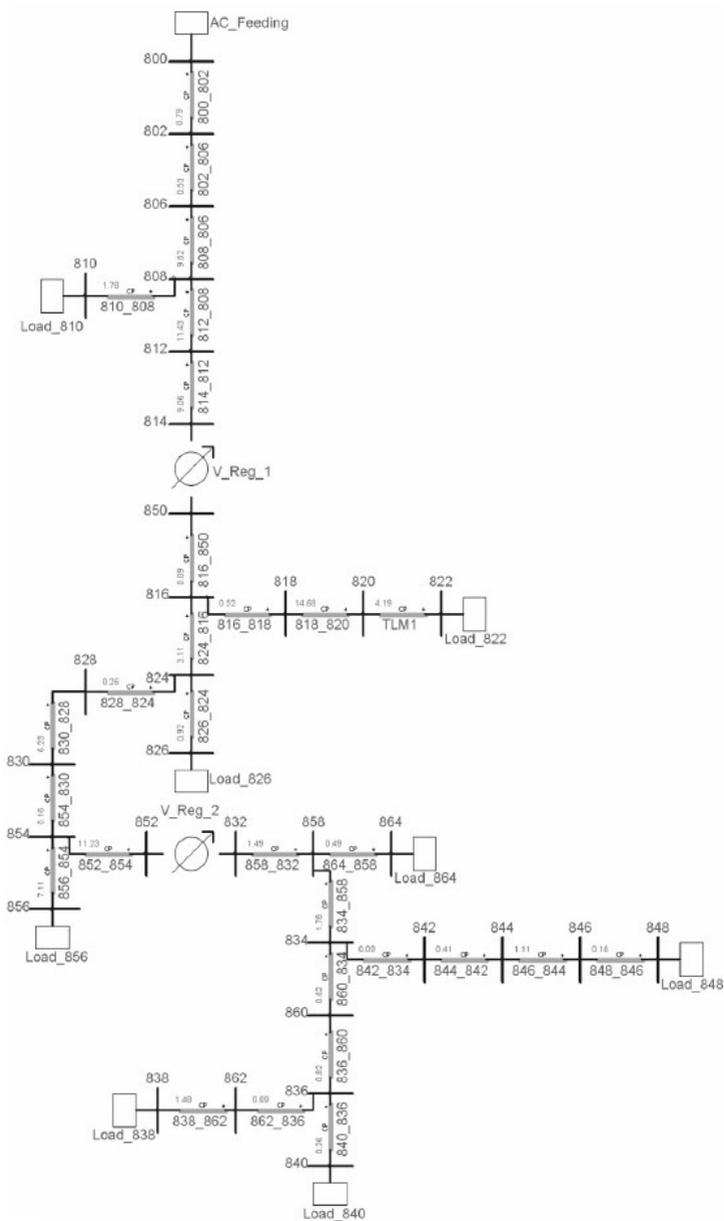


Figura 28 – Sistema distribuição 34-nós *Borghetti et al.* [31].

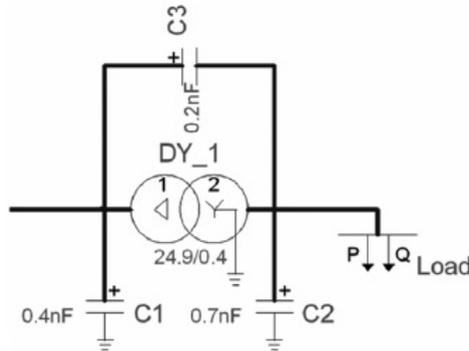


Figura 29 – Modelo de transformador cargas [31].

Por fim, com relação à parametrização das linhas de distribuição, foi utilizado o modelo de parâmetros constantes (CP-Line), onde não há dependência da frequência. Segundo [31] isso se deve, por um lado, ao comprimento tipicamente limitado das linhas de distribuição e, por outro lado, ao conteúdo típico de frequência dos transientes de falta, que não deve exceder algumas dezenas de kHz. Os valores utilizados por *Borghetti et al.* estão presentes na Figura 30.

Modo	R (Ω/km)	L (mH/km)	C ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Z_c (Ω)	Velocidade de propagação
0	0.984	2.367	5.823×10^{-03}	637.99	2.693×10^{-05}
1	0.136	0.908	1.243×10^{-02}	270.27	2.976×10^{-05}
2	0.065	0.875	1.273×10^{-02}	262.17	2.997×10^{-05}

Figura 30 – Dados de parametrização das linhas - adaptado de [31].

4.2.3 Adaptações realizadas no trabalho

Nesta seção é apresentada a modelagem realizada sobre o sistema de distribuição teste do IEEE 34-nós baseada em considerações relevantes a este trabalho, para posterior simulação em *software* ATP. A Figura 31 representa o sistema simulado base para as simulações de faltas. Para as adaptações as seguintes considerações iniciais foram elaboradas:

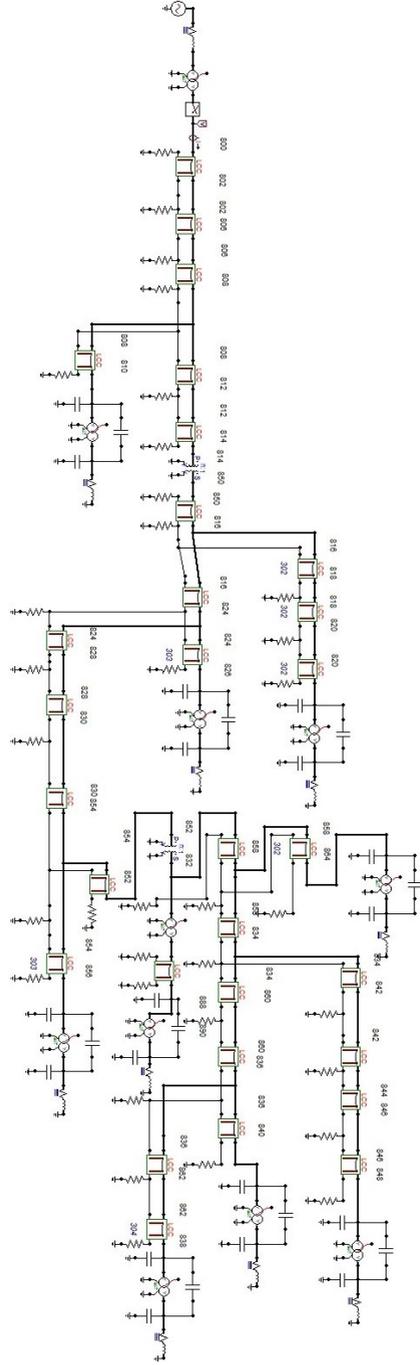


Figura 31 – Dados de parametrização das linhas.

- O sistema começa com uma fonte de tensão não ideal de 69 kV através de uma impedância dada por [34];
- Todas as linhas de distribuição possuem configuração de condutores igual a ID#500. No entanto, obedecem o sequenciamento de fase e dimensionamento de condutores presentes na Figura 26 correspondentes a parte trifásica;
- Diferente do que acontece no circuito original, todos os transformadores presentes no circuito são utilizados em configuração Y - Y;
- Os reguladores, usados para manter o níveis de tensão estáveis ao longo do circuito, são representados como autotransformadores ideais e com relação de transformação unitária;
- O sistema de distribuição é modelado com todos níveis de tensão do circuito original, ou seja, subestação transformador (2500 kVA, 69 kV/24,9 kV), tronco principal transformador (500 kVA 24,9 kV/4,9 kV);

Contudo, foi aderido de *Borghetti et al.* a inserção do transformador nos terminais há carga, como pode ser visto na Figura 29. Com tensão reduzida para 400 V;

- As cargas do sistema também receberam o mesmo tratamento dado por *Borghetti et al.*, de maneira que todas foram alocadas ao final de sua ramificação. Com todas as fases possuindo o mesmo valor de carga;
- Todas as cargas foram consideradas como impedância constante;
- Todas as chaves de abertura do sistema são trifásicas;
- Todas as linhas de distribuição foram modeladas, com modelos de linhas aéreas, modelo π , não transpostas e à 4 condutores.

Após a apresentação das considerações iniciais, nesta etapa são apresentados os cálculos e as equações utilizadas para a modelagem das linhas de distribuição, transformadores, cargas e fonte de tensão.

- Fonte de tensão: A subestação é representada por uma fonte trifásica de tensão não ideal, definida com:

Amplitude: 69 kV;

Frequência: 60 Hz;

Impedância de fonte [34]: $Z_{\text{pos}}: 0,7673+i.4,7852 \Omega$, $Z_{\text{zero}}: 0,3474+i.8,518 \Omega$

- Transformador: O transformador teve seus parâmetros de resistência série e indutância definidos de acordo com as Equações 4.7 e 4.8. Como é possível ver na Figura 32, os autores de [32] forneceram valores de R e L em PU, logo é necessária sua conversão para valores reais. A Equação 4.7 indica o cálculo do valor base de impedância, e a Equação 4.8 a transformação para valores reais.

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	2500	69 - D	24.9 - Gr. W	1	8
XFM -1	500	24.9 - Gr.W	4.16 - Gr. W	1.9	4.08

Figura 32 – Valores PU transformadores.

$$Z_b = \frac{V_{bL}^2}{S_{b3\phi}} \quad (4.7)$$

Em que Z_b é o valor base da impedância, V_{bL} é o valor de tensão de linha e $S_{b3\phi}$ é o valor da potencia complexa trifásica.

$$Z_{\text{real}} = Z_b \cdot Z_{\text{pu}} \quad (4.8)$$

A Tabela 2 discrimina os parâmetros de impedância do transformador.

Transformador	Resistência(Ω) Primário/Secun- dário	Indutância(H) Primário/Secun- dário
Subestação	19,04/2.48	0,404/0.0526
Média para Baixa tensão	23,56/0,656	0,056/0,00096
Cargas	23,56/0,656	0,056/0,00096

Tabela 2 – Parâmetros transformador.

- Cargas: Valores de cargas (resistivas e indutivas) são dados em grandezas de potência complexa. A conversão para valores de resistência e impedância indutiva são dadas pelas Equações 4.9 e

4.10:

$$S = \frac{V^2}{Z} \quad (4.9)$$

Resultando em $Z = (R + jX)$ onde R é a resistência, X impedância indutiva, S a potência complexa trifásica, Z a impedância trifásica e V a tensão de linha.

$$X = \omega L \quad (4.10)$$

Com que L é a indutância e ω é a frequência angular. De acordo com as equações apresentadas os seguintes valores de cargas foram alcançados, como pode ser visto na Tabela 3 abaixo:

Barra	Valor Carga - Parte real $R(\Omega)$ /fase	Valor Carga - Parte imaginária $L(H)$ /fase
810	10.333,3	34,21
822	6.069,4	8,16
826	20.938,72	27,44
856	147.812,2	1.893,70
890	3.305,9	4,380
864	218.842,7	284,05
838	5.905,5	7,83
840	187.840	301,07
848	70.400	113,51

Tabela 3 – Cargas implantadas no sistema.

- Linhas de distribuição: Para a parametrização das linhas de distribuição foi usado o modelo LCC (Linhas e cabos constantes). O elemento LCC baseia-se nas seguintes rotinas do ATP: linhas constantes, cabos constantes e parâmetros de cabos. O usuário deve primeiro descrever a geometria do sistema e as constantes dos materiais. Os valores utilizados nesse trabalho para a parametrização pode ser visto em [32] onde são visto os dados geométricos de acordo com cada tipo de condutor. É possível observar na Figura 33 e na Figura 34 as duas parametrizações realizadas de acordo com a configurações #300 e #301 mencionadas na Figura 26.

onde $Ph.no$ é o número de fases, R_{in} é o raio interno do condutor,

Model		Data		Nodes			
#	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.13594	1.01092	0.756	0	8.5344	8.5344
2	2	0.13594	1.01092	0.756	0.762	8.5344	8.5344
3	3	0.13594	1.01092	0.756	2.1336	8.5344	8.5344
4	4	0.13594	1.01092	0.756	1.2192	7.3152	7.3152

Figura 33 – Parametrização modelo #300.

Model		Data		Nodes			
#	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.1274	0.8026	1.0501	0	8.5344	8.5344
2	2	0.1274	0.8026	1.0501	0.762	8.5344	8.5344
3	3	0.1274	0.8026	1.0501	2.1336	8.5344	8.5344
4	4	0.1274	0.8026	1.0501	1.2192	7.3152	7.3152

Figura 34 – Parametrização modelo #301.

R_{out} é o raio externo do condutor, $Resis$ é o valor de resistência do condutor por km, $Horiz$ é distância horizontal a partir do centro do feixe de uma linha de referência, V_{tower} é a altura vertical do feixe na torre e por fim V_{mid} é a altura da flecha.

Após a exposição do sistema utilizado e das adaptações realizadas o ítem 4.3 aborda a implementação do método realizado para testes do algoritmo.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO

O algoritmo implementado para localização de faltas foi desenvolvido em MATLAB (*Matrix Laboratory*) e tem sua rotina apresentada de acordo com o fluxograma detalhado na Figura 35.

Como pode ser visto do fluxograma apresentado na Figura 35, o programa se inicia com o carregamento dos arquivos de formas de onda de tensão de faltas, simuladas em ambiente ATP. Paralelamente é realizado o cálculo das frequências teóricas de acordo com a Equação 4.1, onde o usuário entra com informações de valores de indutância e capacitância da linha, número de caminhos possíveis, coeficientes n_p e distâncias dos caminhos, além do modo de propagação usado.

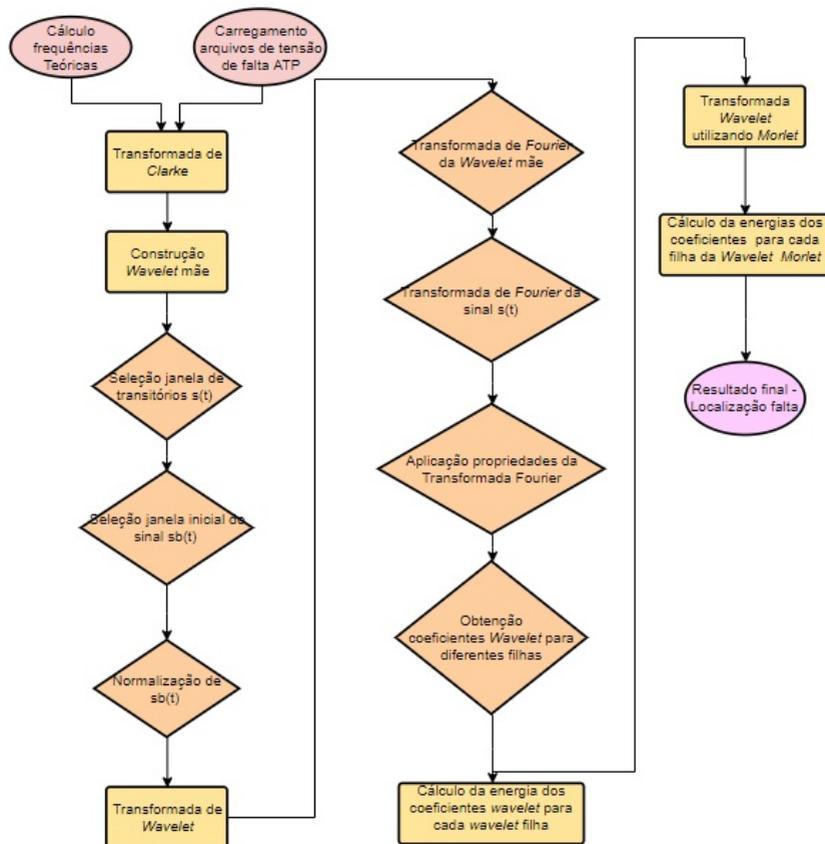


Figura 35 – Fluxograma algoritmo.

Após o carregamento das formas de onda de tensão, é aplicado ao sinal a transformada de *Clarke* onde o sinal trifásico apresentado em componentes de fase são transformados, de acordo com a Equação 2.5, em componentes simétricas, adquirindo um comportamento de 3 (três) sinais monofásicos independentes.

Em seguida, é iniciada então a construção da *Wavelet* mãe inferida da falta. O primeiro passo se dá pela seleção da janela inicial do sinal transitório, $s(t)$, a partir de inspeção visual, obtendo então $\bar{s}(t)$. No próximo passo, é realizado então a normalização de $\bar{s}(t)$ em relação a seu valor máximo. Por fim é implementado o deslocamento de $\bar{s}(t)$, onde é gerada então, a *Wavelet* mãe.

O algoritmo, então, passa para a aplicação da transformada de *Fourier* da *Wavelet* mãe inferida e do sinal original $s(t)$. Então, a partir da aplicação de propriedades da transformada de *Fourier* é realizada a transformada *Wavelet*, e em seguida os coeficientes de *Wavelet* são obtidos para diferentes *Wavelet* filhas.

Por fim, é feito o cálculo da energia dos coeficientes *Wavelet* para cada filha e a localização da falta é realizada através de inspeção visual no escalograma gerado.

4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O trabalho de [31] serviu como base para este projeto. Logo, nesta seção é realizada uma apresentação dos elementos do trabalho de *Borghetti et al.* que foram aplicados a este projeto.

O trabalho implementado tem como tema a aplicação de metodologia baseada em transformada *Wavelet* contínua para localização de faltas em redes de distribuição de média tensão. Começou-se com o uso do sistema teste de distribuição de 34-nós adaptado de acordo com a necessidade deste projeto. Simulações de faltas em ambiente ATP foram realizadas para análise de transitório.

Assim, como em [31] foi construída uma *Wavelet* mãe inferida a partir do transitório proveniente da falta e implementado o algoritmo para a estimação da localização da falta.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo, a partir da modelagem apresentada no capítulo anterior, serão descritas as simulações de faltas (Trifásica-Terra Sólida, Bifásica, Bifásica-Terra e Monofásica-Terra) e manobras (Desligamento de carga, Religamento de carga e Inserção de Capacitores), simuladas através do *software* ATP, as quais foram usadas para validar o algoritmo apresentado. Estas simulações fornecem informações que, no decorrer deste trabalho, serão utilizadas para realizar a localização de faltas no sistema de distribuição, utilizando o *software* MATLAB para a aplicação da algoritmia e posterior validação de métodos e algoritmos presentes na literatura acadêmica nesta área.

5.1 ATP (*ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM*)

O ATP é um *software* destinado a simulações na área de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em redes polifásicas. Por meio dele é possível modelar sistemas de transmissão e redes de distribuição, utilizando configurações de linhas arbitrárias. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados. Como um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, são calculados valores em intervalos de tempo discretos [35].

O ATP foi originado na tese de pós-doutorado do Dr. Hermann Dommel, no final dos anos 60, e ao longo dos anos o programa passou por diversas modificações e contribuições do mundo inteiro. O ATP fornece aos usuários um módulo auxiliar para gerar os arquivos de entrada para as simulações dos sistemas transitórios, que é o ATPdraw. Este dispõe de grande parte dos modelos de componentes de um sistema elétrico de potência em uma interface gráfica.

O programa permite o uso dos principais elementos do sistema de potência, desde linhas de transmissão e distribuição até fontes, transformadores, elementos concentrados e distribuídos, bem como permite a sua parametrização de acordo com o sistema real existente.

A razão para escolha do ATP para as simulações utilizadas neste trabalho foi devido ao programa atender às necessidades de precisão para análise de transitórios, como ocorre na prática, além de sua intuitiva forma de manuseio e utilização.

5.2 FALTAS E MANOBRAS SIMULADAS

Como exposto no capítulo anterior, o sistema utilizado para realizar a simulação das faltas e manobras foi o sistema de distribuição teste da IEEE 34-nós adaptado. Nos itens a seguir dispostos, serão discriminadas as faltas e manobras abordadas, seguidas da ilustração das formas de ondas de tensão resultante das simulações, bem como uma breve explicação a respeito do evento.

5.2.1 Falta trifásica-terra

O primeiro evento a ser simulado foi a falta trifásica-terra. A falta foi aplicada na barra 814 do sistema teste de distribuição de 34-nós, onde as três fases (A, B e C) são levadas à terra através de uma impedância de 1Ω . A janela de tempo da simulação foi de 0,1 s, de modo que o evento de falta alocado em 0,05 s. Na Figura 36 é possível observar a forma de onda da tensão, antes, durante e após o evento, do ponto de observação na entrada do sistema, ou seja, na saída da subestação.

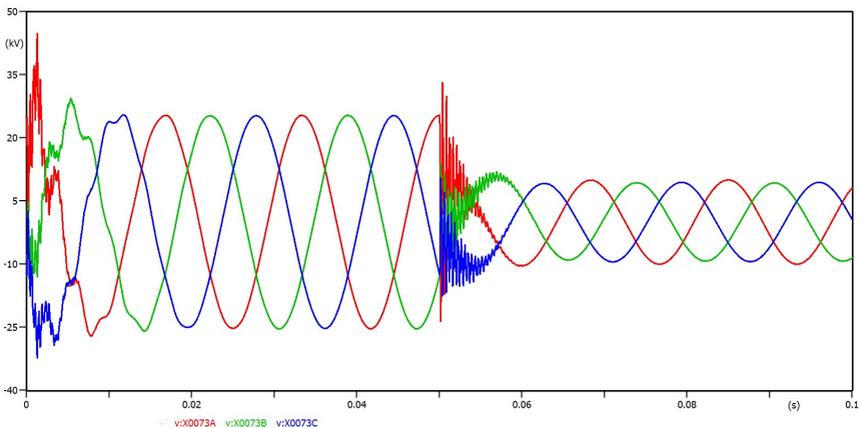


Figura 36 – Simulação falta trifásica-terra.

Como é possível constatar pela forma de onda, até a pré-falta o valor da tensão na entrada do sistema se mantém com o valor fornecido pela fonte não ideal em 23,8 kV de pico (há uma queda de tensão devida a não idealidade da fonte). Durante o evento verifica-se um período

transitório que ocorre até o sistema entrar em regime permanente, em torno de 0,06 s, com valor atenuado de tensão para aproximadamente 9,4 kV de pico, isto se dá pela fuga de corrente para a terra. porém pelo fato de ser uma falta simétrica, não ocorre desbalanço entre as fases no regime permanente. No entanto, é o intervalo do transitório que é de interesse para futura aplicação no algoritmo de análise da transformada *Wavelet* para a localização de faltas.

5.2.2 Falta bifásica-terra

O caso da falta bifásica-terra, assim como as próximas faltas que serão citadas posteriormente, seguiu o mesmo procedimento que a falta trifásica-terra, ou seja, aplicação do evento na barra 814, janela de simulação de 0,1 s, evento alocado em 0,05 s, e tensão de entrada aproximadamente 23,8 kV. No entanto, para este caso a falta é aplicada apenas em duas fases, A e B, onde estas são levadas à terra através de uma impedância de 1Ω . A forma de onda antes, durante e após evento pode ser observada na Figura 37.

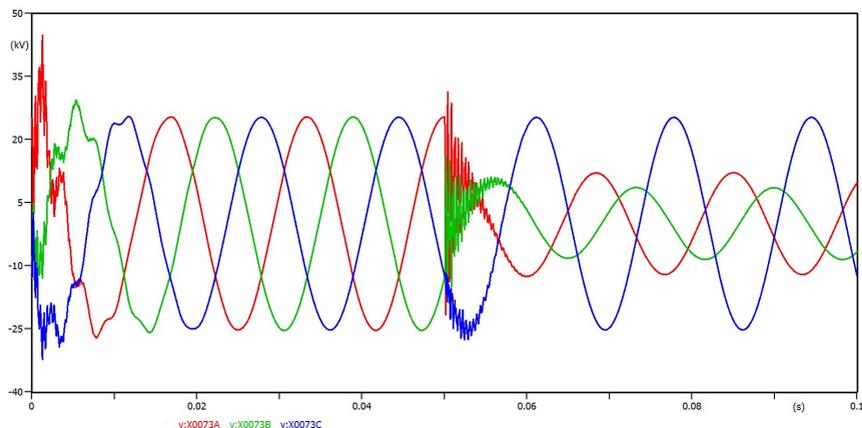


Figura 37 – Simulação falta bifásica-terra.

Observa-se que, da mesma forma que ocorre na falta trifásica-terra, após o evento da falta, o sistema entra em um regime permanente em aproximadamente 0,06 s. As duas fases em falta mantêm, entretanto, um nível de tensão menor que a fase que não sofreu curto, apesar de, durante o período transitório, a falta ser "sentida" por todas as fases.

5.2.3 Falta bifásica

Neste caso, da mesma forma que ocorre na falta bifásica-terra, o evento atinge duas fases (A e B), porém não há contato com a terra. A Figura 38 mostra a forma de onda da tensão na simulação realizada.

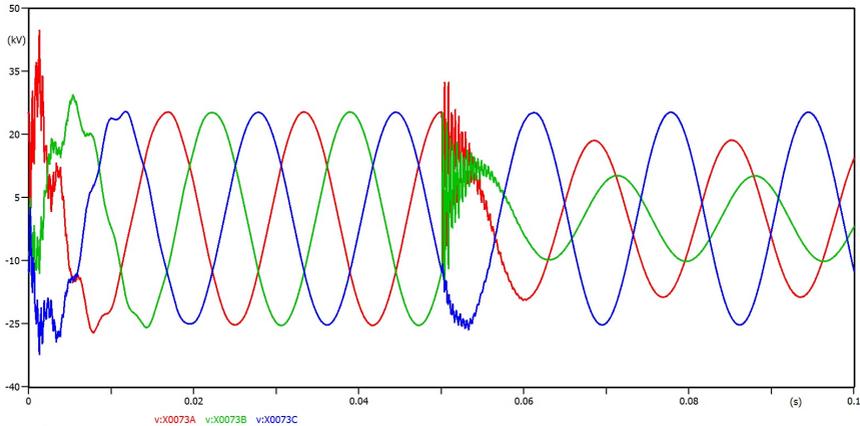


Figura 38 – Simulação falta bifásica.

No resultado desta simulação é possível observar que ocorre o mesmo efeito do caso bifásico-terra, de modo que após o evento o sistema entra em um regime permanente, onde as fases curto-circuitadas têm valor de tensão reduzido e a fase não afetada continua com o mesmo nível de tensão que havia na pré-falta.

5.2.4 Falta monofásica-terra

Por último, foi simulada uma falta monofásica-terra, aplicando-se um curto-circuito apenas na fase A. A Figura 39 mostra a simulação da forma de onda da tensão do ponto de observação da entrada da subestação.

Nota-se que a falta monofásica-terra ocasiona efeito em regime permanente apenas na fase afetada pelo curto, apesar de, durante o estado transitório, todas as fases sentirem o evento. É importante frisar que, no decorrer do trabalho, é o período transitório que é utilizado para a obtenção dos resultados.

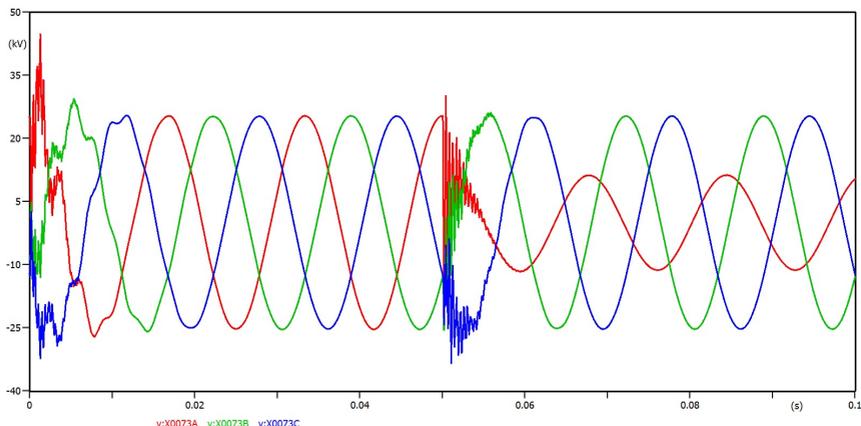


Figura 39 – Simulação falta monofásica-terra.

5.2.5 Manobra de desligamento de carga

Além das faltas, foi de interesse também a realização de manobras no sistema de distribuição, a fim de entender o seu impacto em um ponto de interesse do sistema, neste caso, do ponto de vista da subestação. Neste caso, é simulada uma manobra de desligamento parcial de cargas através de um chaveamento aplicado na barra 814, onde aproximadamente 90% da carga é desligada do sistema. À semelhança do que ocorre nos outros casos de faltas, o evento é alocado em 0,05 s considerando uma janela de simulação de 0,1 s. Na Figura 40 é mostrado o resultado da simulação efetuada.

Através da forma de onda da tensão apresentada na Figura 40, pode ser observado que o desligamento das cargas gera um transitório de aproximadamente 1 ciclo de onda nas três fases (A, B e C) do sistema, retornando, após, a um regime permanente sem alteração de amplitude na tensão das fases.

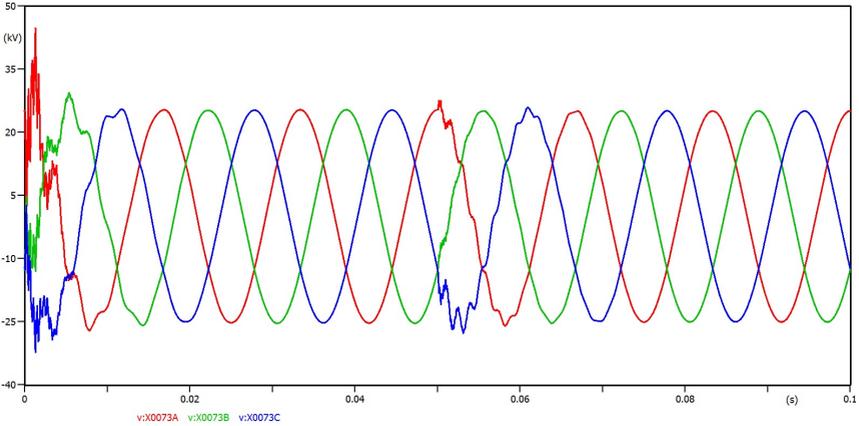


Figura 40 – Simulação manobra de desligamento de carga.

5.2.6 Manobra de religamento de carga

Em complemento à manobra citada no item anterior, foi realizada também a manobra de religamento de carga do sistema nas mesmas condições que foram realizadas para o desligamento, ou seja, uma janela de simulação de 0,1 s e um fechamento de chave em 0,05 s aplicado na barra 814 do sistema teste de distribuição de 34-nós. A Figura 41 abaixo exibe o resultado obtido.

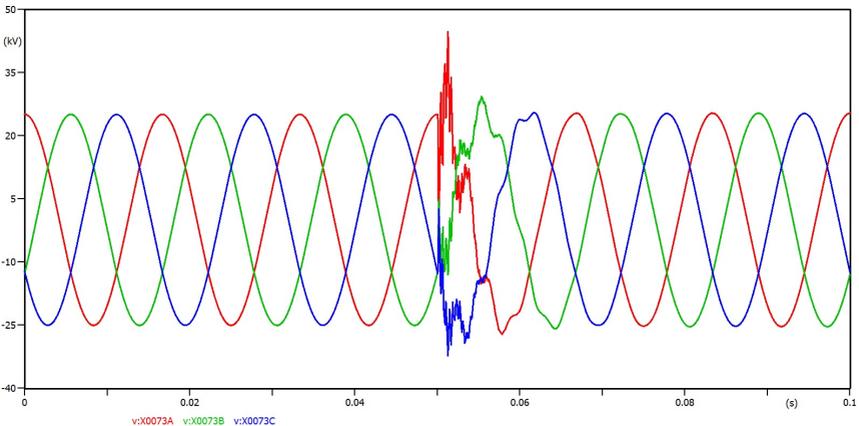


Figura 41 – Simulação manobra de religamento de carga.

Como é possível perceber da imagem anterior, a inserção da carga no sistema gera um transitório na tensão do sistema em 1 ciclo de onda nas três fases, retornando, em seguida, ao regime permanente sem danos ao nível de tensão.

5.2.7 Manobra de inserção de capacitor

A manobra de inserção de capacitores foi O último evento simulado, e possui relevante importância no sistema, especialmente na área de operação, devido à necessidade da manutenção do nível de tensão na rede, considerando que a inserção do capacitor é um artifício utilizado para elevar o nível de tensão quando a demanda por energia está muito alta. Em contrapartida, é realizada a sua retirada quando a demanda do consumo de energia está baixa, visando diminuir o reativo, e isto ocorre, geralmente, em períodos de menor consumo de energia, como durante a madrugada.

A Figura 42 mostra a simulação realizada com a inserção de dois bancos de capacitores, onde o primeiro de $0,4 \text{ uF}$ está colocado na barra 844, e o segundo de valor $0,64 \text{ uF}$ está alocado na barra 848. O sistema chaveia os capacitores realizando sua inserção no instante $0,05 \text{ s}$ de uma janela de simulação de $0,1 \text{ s}$.

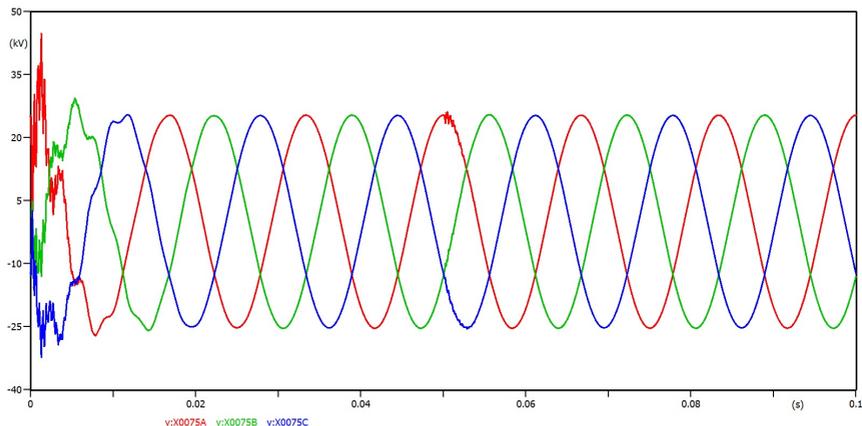


Figura 42 – Simulação manobra de inserção de capacitor.

Através da Figura 42 é possível observar que a inserção do banco de capacitor é sentida na forma de onda da tensão na entrada do sistema. A inserção gera, apenas um pequeno efeito no transitório gerado

nas fases, até entrar em regime permanente, devido ao tamanho do capacitor.

Em uma primeira etapa do projeto deste trabalho, foram realizadas as simulações apresentadas no item anterior, de modo que as formas de ondas das tensões obtidas tiveram satisfatório desempenho de acordo com o que é esperado do sistema. Estes resultados e informações retiradas das simulações são primordiais para o seguimento de trabalho que é a análise dos transitórios perante a transformada *Wavelet* e todo algoritmo proposto para a localização de faltas.

5.3 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE ANÁLISE DE TRANSFORMADA *WAVELET* PARA FALTA 3ϕ -TERRA

Para a aplicação do algoritmo implementado, foi simulado, assim como em [31], um caso de falta trifásica sólida aplicado entre as nós 814 e 850 em uma taxa de amostragem de 10^7 s. Nesta seção é apresentada aplicação do algoritmo passo a passo através dos gráficos obtidos, até a localização da faltas propriamente dita no escalograma.

A primeira etapa consiste na aplicação da transformada de *Clarke*, com a transformação de componentes de fases em componente simétricas, representando circuito trifásico em 3 circuitos monofásicos. A Figura 43 apresenta essa transformação.

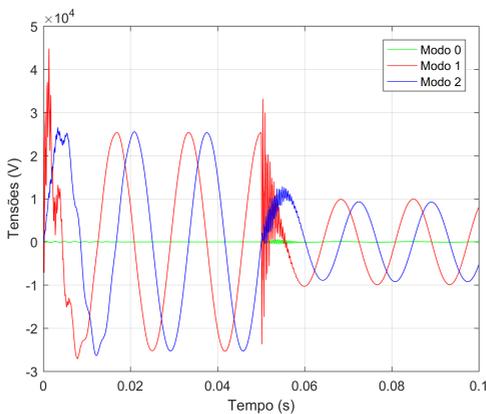


Figura 43 – Aplicação transformada de *Clarke*.

Conclui-se que por ser uma falta trifásica e, consequentemente balanceada, a componente de sequência 0 permanece aproximadamente

igual a zero enquanto que as componentes de modo 1 e 2 carregam a falta.

Após, a componente de modo 1 é utilizada para a implementação do algoritmo, onde então, é selecionada a partir de inspeção visual a parte inicial do transitório do sinal denotado por $\bar{s}b(t)$, como pode ser visto no gráfico da Figura 44.

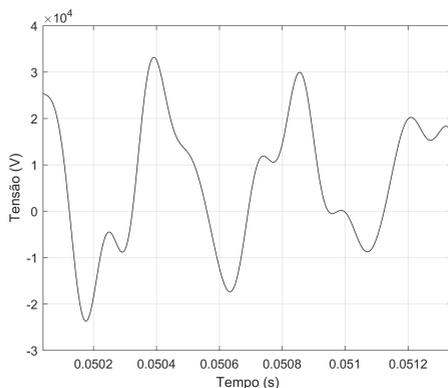


Figura 44 – Parte inicial do transitório do sinal $\bar{s}b(t)$.

A fim de atender as condições de existência de uma função *Wavelet*, é realizada a normalização de $\bar{s}b(t)$ em relação a seu valor máximo, como visto no gráfico da Figura 45.

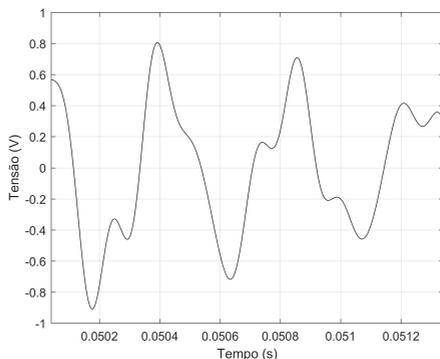


Figura 45 – Sinal $\bar{s}b(t)$ normalizado.

A partir da normalização do sinal, é realizado o passo final para

a construção da *Wavelet* mãe ao multiplicá-la pela exponencial de decaimento de $\tau = 1e^{-7}$ de acordo com a Equação 4.2. O resultado final da então gerada *Wavelet* mãe, pode ser vista no gráfico da Figura 46.

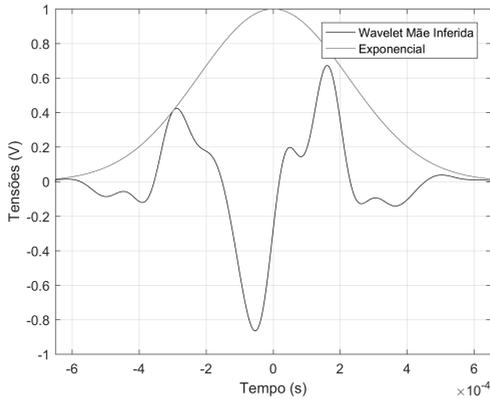


Figura 46 – *Wavelet* mãe inferida.

Em posse da *Wavelet* mãe inferida, é continuado o processo de localização de falta. É realizada então a transformada de *Fourier* do sinal de entrada $s(t)$, visto na Figura 47, onde é mostrando o espectro de amplitude em função da frequência.

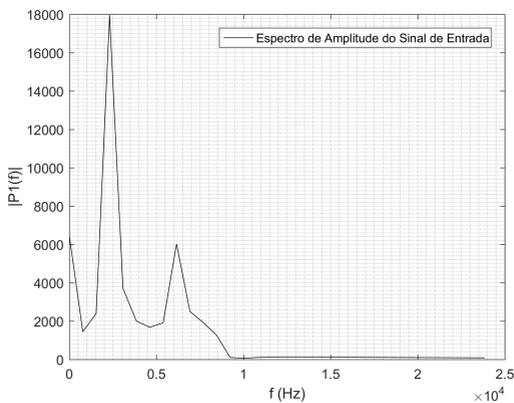


Figura 47 – Transformada de *Fourier* $s(t)$.

Logo após é realizada a transformada de *Fourier* da *Wavelet* mãe

inferida, ilustrada na Figura 48.

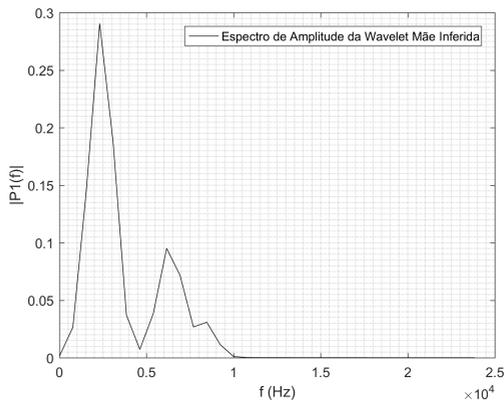


Figura 48 – Transformada de *Fourier Wavelet* mãe inferida.

onde então é calculado os coeficientes de *Wavelet* para diferentes *Wavelets* filhas utilizando 4.6. O resultado final, ou seja, a detecção da falta é realizada por inspeção visual no escalograma visto na Figura 49.

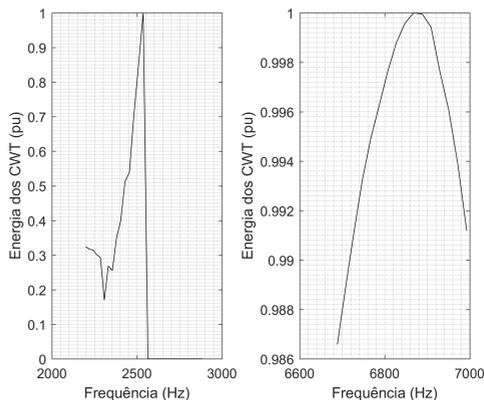


Figura 49 – Escalograma com energia do caminho de falta.

Para fins de comparação, é apresentada a simulação da mesma falta para o uso de uma *Wavelet* mãe tradicional. Os resultados obtidos com a *Morlet* para a localização de faltas é apresentado na Figura 50.

O resultado da implementação do algoritmo como pode ser visto

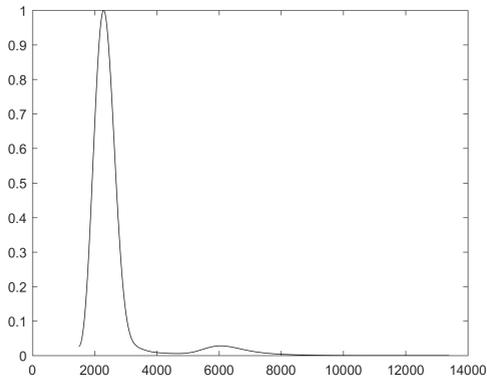


Figura 50 – Escalograma com energia do caminho de falta *Wavelet Morlet*.

na Figura 49. Obteve-se valores conclusivos para a localização da falta no caminho 800-814. É possível observar o pico de energia em uma frequência de 2.536 Hz, muito próxima da frequência teórica característica de 2.353 Hz, conforme [31]

Ademais, é possível observar também a presença de uma outra frequência em 6.868 Hz que faz referência ao caminho 800-808, porém com amplitude de energia menor em unidade reais. o pico de energia na frequência de 11.520 Hz correspondente ao caminho 800-810, no entanto, este não aparece no gráfico. Isso se deve a simulação realizada do sistema em ATP. A ondas geradas não apresentam componentes de alta frequência, portanto o sinal gerado em ATP não capta essa frequência.

Por fim, é apresentado o escalograma de energia da transformada *Morlet* onde é possível observar as frequências de 2.292 Hz, para caso onde a amplitude de energia é maior (caminho da falta) e 6.057 Hz onde o pico de energia não possui uma amplitude expressiva como esperado, considerando não é o caminho da falta. No entanto, a *Morlet*, assim como o trabalho realizado, também não apresenta a frequência do terceiro caminho, pelos mesmos motivos descritos.

Os resultados obtidos por *Borghetti et al.*, diferente dos resultados descritos, detectam a presença da frequência de todos os caminhos possíveis. Isto porque a simulação fornece componentes de frequência próximos ao 11.000 kHz.

Borghetti et al. consegue um valor de frequência de 2.900 Hz enquanto o método implementação chega a 2.536 Hz, quando a falta se

localiza na frequência de 2.353 Hz.

5.4 CASOS ADICIONAIS

Este estudo de caso adicional se dá pela apresentação da extensão dos casos simulados em ATP e simulados no algoritmo da transformada *Wavelet* para a localização de faltas. Os casos estudados foram: Falta bifásica-terra, bifásica e monofásica-terra. É apresentado também, os resultados obtidos com o uso da *Wavelet Morlet* para estas mesmas faltas.

O caso da falta bifásica-terra pode ser visto nas figuras a seguir. A Figura 51 mostra o espectro de amplitude do sinal de falta original $s(t)$, a Figura 52 mostra o espectro de amplitude da *Wavelet*-mãe inferida, a Figura 53 mostra o escalograma do caso bifásica-terra e a Figura 54 mostra o escalograma obtido com a *Wavelet Morlet*.

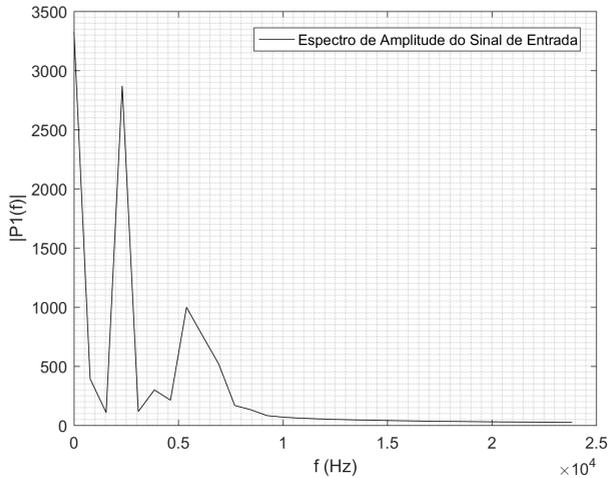


Figura 51 – Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso bifásica-terra.



Figura 52 – Espectro de amplitude *Wavelet* mãe inferida - caso bifásica-terra.

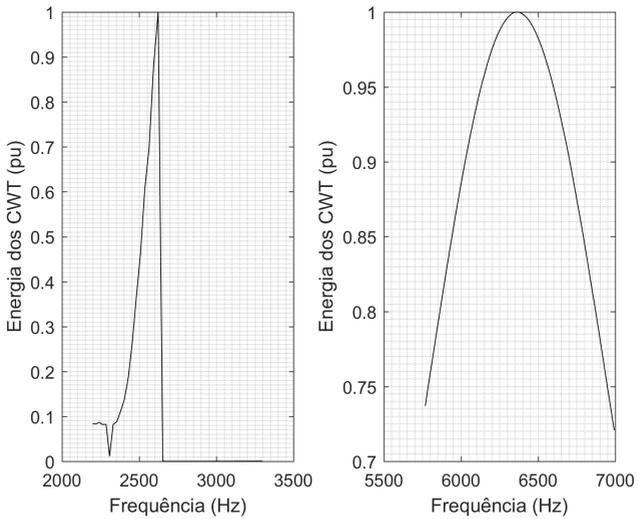


Figura 53 – Escalograma caso bifásica-terra.

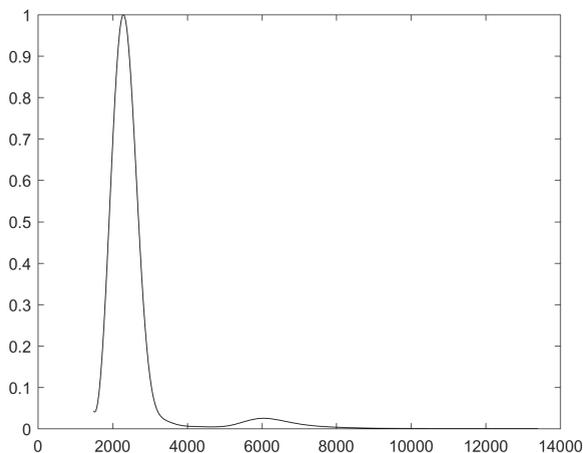


Figura 54 – Escalograma caso bifásica-terra *Morlet*.

Como pode ser visto na Figura 53 a frequência selecionada na falta bifásica-terra foi de 2.622 Hz, onde novamente foi similar a frequência teórica que possui valor de 2.128 Hz. E segundo pico em 6.357 Hz, onde a frequência teórica é 6.043 Hz. A *Wavelet Morlet* também apresentou resultado satisfatório com frequência em 2.288 Hz, com segundo pico em 6.025 Hz.

A próxima falta gerada foi a bifásica porém, sem presença de terra. Novamente pode ser visto nas Figuras 55, 56, 57 e 58, onde apresentam, respectivamente, o espectro de amplitude do sinal de falta original $s(t)$, espectro de amplitude *Wavelet* mãe inferida, escalograma caso bifásica e por fim o resultado da *Wavelet Morlet*.

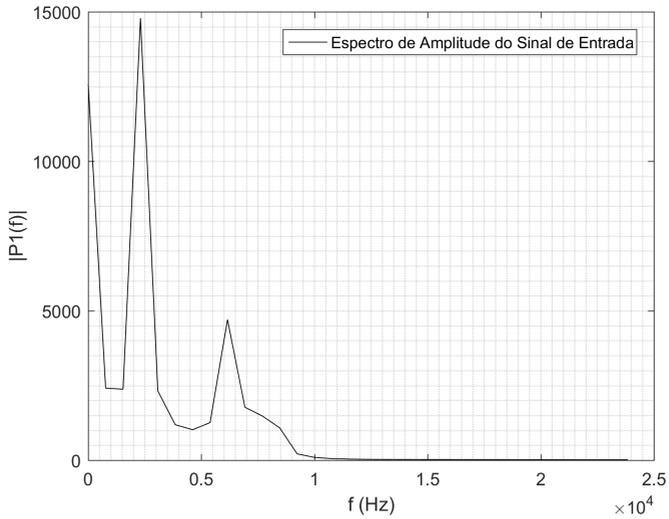


Figura 55 – Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso bifásico.

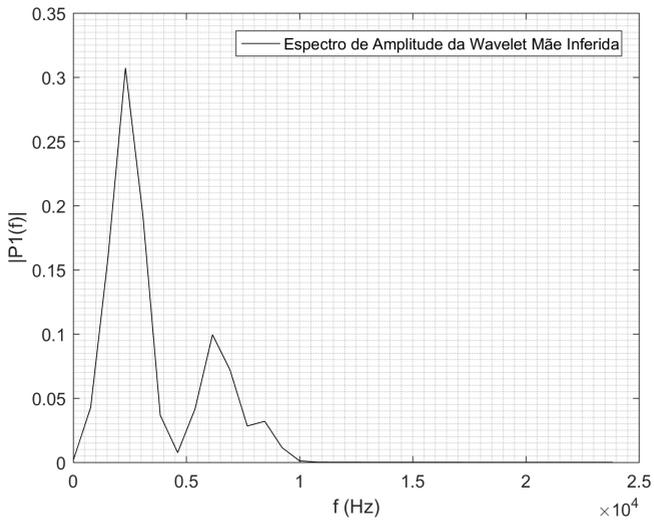


Figura 56 – Espectro de amplitude *Wavelet* mãe inferida - caso bifásico.

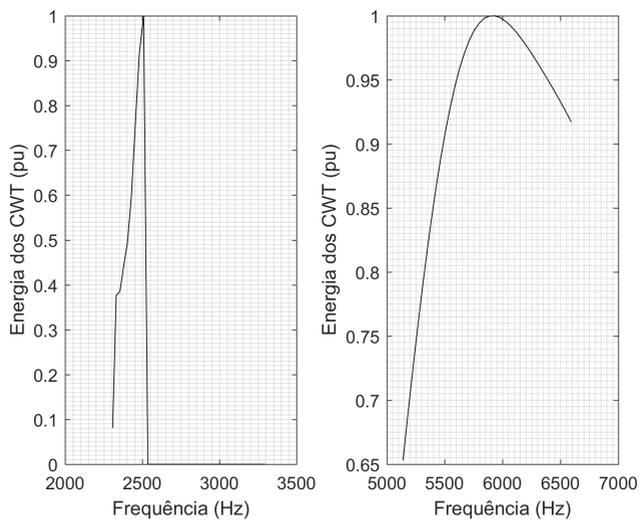
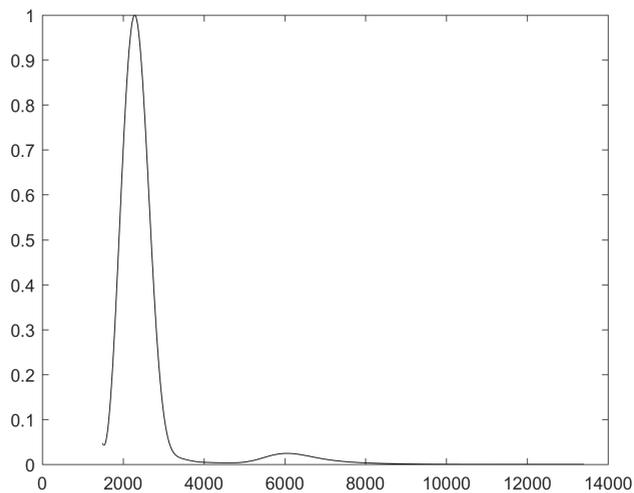


Figura 57 – Escalograma caso bifásica.

Figura 58 – Escalograma caso bifásica *Morlet*.

O valor obtido com frequência teórica foi de 2.353 Hz já em simulação foi aproximadamente 2.508 Hz. Enquanto que a o segundo caminho obteve frequência de 5.932 Hz, quando a sua frequência teórica é de 6.680 Hz. A *Morlet* obteve para o caminho de falta a frequência de 2.285 Hz, e para o segundo caminho a frequência de 6.079 Hz. Por fim, foram gerados resultados em faltas monofásica-terra. Neste caso o modo de propagação foi o modo 0. As Figuras 59, 60, 61 e 62 são apresentadas abaixo.

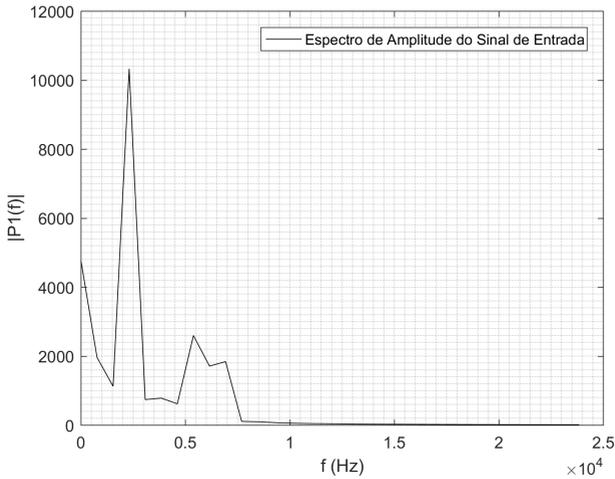


Figura 59 – Espectro de amplitude sinal de entrada $s(t)$ - caso monofásica-terra.



Figura 60 – Espectro de amplitude *Wavelet* mãe inferida - caso monofásica-terra.

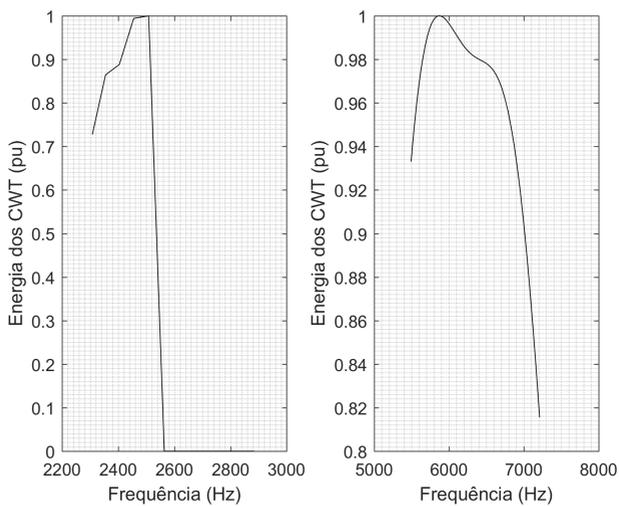


Figura 61 – Escalograma caso monofásica-terra.

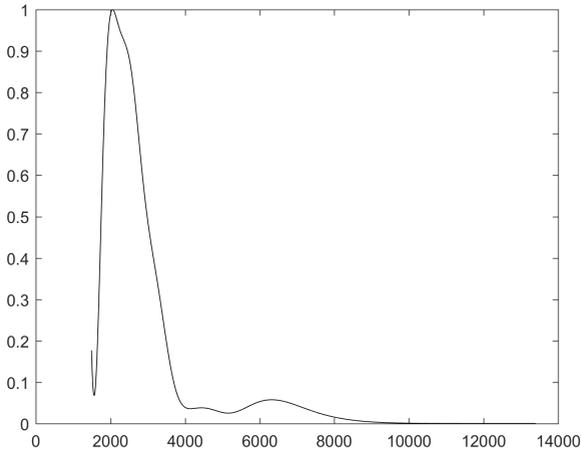


Figura 62 – Escalograma caso monofásica *Morlet*.

Neste caso de falta monofásica-terra a frequência teórica foi de 2.128 Hz enquanto que a frequência obtida pela implementação do método foi de 2.508 Hz. Enquanto que o segundo pico ocorreu em 5.8571 Hz, quando sua frequência teórica é 6.043 Hz.

A *Morlet* obteve uma frequência teórica de 2.054 Hz para o primeiro pico (pico da falta), e 6.314 Hz pra o segundo pico.

5.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a implementação do algoritmo em uma falta trifásica. No entanto é realizada uma extensão, aplicando o algoritmo desenvolvido em 3 (três) outros casos de faltas (bifásica-terra, bifásica e monofásica).

Ademais, os resultados obtidos ainda foram comparados ao da *Wavelet Morlet*.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia baseada em transformada *Wavelet* contínua para a localização de faltas em redes de média tensão. Para tanto, o trabalho envolveu as etapas de modelagem e simulação do sistema de potência usado como teste, estudo e implementação do algoritmo baseado em transformada *Wavelet* e de análise dos resultados.

O desenvolvimento e parametrização do sistema teste de distribuição de 34-nós do IEEE em ambiente ATP, serviu de base para os testes do algoritmo implementado. Com as simulações, foram obtidos os transitórios das faltas e manobras no sistema.

Na etapa de aplicação do algoritmo desenvolvido, as formas de onda dos transitórios gerados pelas faltas foram aplicadas, permitindo a obtenção de resultados satisfatórios. Como apresentado no capítulo 5, é possível identificar o caminho que as faltas percorreram com valores de frequência muito próximos aos teóricos esperados.

Devido às escolhas de parâmetros utilizados para modelar o sistema IEEE 34-nós em ambiente ATP, os transitórios eletromagnéticos gerados não apresentam a componente de 11 kHz relativa a um dos caminhos possíveis, impossibilitando refazer parte da análise apresentada por *Borghetti et al. (2008)* e que confere ao método proposto pelo mesmo desempenho superior a da transformada *Wavelet* utilizando como mãe a *Morlet*.

Além disso, a metodologia retirada de *Borghetti et al. (2008)* e reproduzida neste trabalho, não se mostrou efetiva para a análise dos eventos de manobra, devido as premissas adotadas na construção do modelo, que foi concebido com o objetivo de identificar o caminho da falta. Contudo, os resultados obtidos nas simulações apresentam resultados satisfatórios e poderão ser aplicados em trabalhos futuros que contemplem tais eventos.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se o aprimoramento do algoritmo implementado, através da automatização de etapas realizadas manualmente pelo programador, viabilizando o automatismo completo do

sistema de localização de faltas. Considera-se também uma possível alteração na ferramenta matemática base deste trabalho, ou seja, uma possível alteração no uso da transformada *Wavelet* contínua com o uso da transformada *Wavelet* discreta ao invés da contínua, a fim de simplificar o método desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST, Módulo 8 Qualidade de Energia Elétrica*. 2018.
- [2] Joni COSER. Contribuições aos métodos para localização de faltas em alimentadores de distribuição. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Tese (Doutorado). Florianópolis, 2006.
- [3] W. H KERSTING. *Distribution System Modeling and Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [4] Igor Kursancew Khairalla. Análise de desempenho dos métodos de localização de faltas em redes de distribuição. Universidade Federal de Santa Catarina, Trabalho de Conclusão de Curso, Florianópolis, 2011.
- [5] Recommended practice for calculating ac short-circuit currents in industrial and commercial power systems. *IEEE Std 551-2006 [The Violet Book]*, pages 1–308, Nov 2006.
- [6] J.M. Filho and D.R. Mamede. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Grupo Gen - LTC, 2011.
- [7] Geraldo KINDERMANN. *Curto Circuito, 2nd Edition*. 1997.
- [8] Luiz Cera ZANETTA JR. *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência, 1ed*. Editora Livraria Física, 2006.
- [9] Mathworks. Wavelet transform. 2018.
- [10] Carlos Enrique Gutierrez. Eliminação do ruído por encolhimento de wavelets. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dissertação de mestrado, Rio de Janeiro, 2002.
- [11] A. Borghetti, M. Bosetti, M. Di Silvestro, C. A. Nucci, and M. Palone. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: Definition of mother wavelets inferred from fault originated transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2):380–388, May 2008.

- [12] Patricia LINS. Ondas viajantes. 2014.
- [13] S. R. NAIDU. *Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência*. 1985. Co-edição Eletrobrás/ Universidade Federal da Paraíba.
- [14] L. V. Bewley. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 50(2):532–550, June 1931.
- [15] W. C. Duesterhoeft, M. W. Schulz, and E. Clarke. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 70(2):1248–1255, July 1951.
- [16] A. R.; VAN C. WARRINGTON. *Protective Relays, Their theory and Practice*, volume 1. 1968.
- [17] L. M. Roytman, B. J. Thomas, F. C. Trutt, and M. N. S. Swamy. Direct fault location in electrical power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(10):4049–4054, Oct 1982.
- [18] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(8):2892–2898, Aug 1982.
- [19] K. Srinivasan and A. St.-Jacques. A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(3):1676–1682, July 1989.
- [20] Jun Zhu, D. L. Lubkeman, and A. A. Girgis. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(2):801–809, April 1997.
- [21] R. Das, M. S. Sachdev, and T. S. Sidhu. A fault locator for radial subtransmission and distribution lines. In *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, volume 1, pages 443–448 vol. 1, July 2000.
- [22] Myeon-Song Choi, Seung-Jae Lee, Duck-Su Lee, and Bo-Gun Jin. A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1):35–41, Jan 2004.

- [23] L. J. Lewis. Traveling wave relations applicable to power-system fault locators. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 70(2):1671–1680, July 1951.
- [24] Z. Q. Bo, G. Weller, and M. A. Redfern. Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 146(1):73–79, Jan 1999.
- [25] D. W. P. Thomas, R. J. O. Carvalho, and E. T. Pereira. Fault location in distribution systems based on traveling waves. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, volume 2, pages 5 pp. Vol.2–, June 2003.
- [26] G. B. Ancell and N. C. Pahalawatththa. Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using travelling waves. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(2):680–689, April 1994.
- [27] F. H. Magnago and A. Abur. Fault location using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(4):1475–1480, Oct 1998.
- [28] O. Chaari, M. Meunier, and F. Brouaye. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3):1301–1308, July 1996.
- [29] Y. Assef, O. Chaari, and M. Meunier. Classification of power distribution system fault currents using wavelets associated to artificial neural networks. In *Proceedings of Third International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis (TFTS-96)*, pages 421–424, June 1996.
- [30] D. W. P. Thomas, R. E. Batty, C. Christopoulos, and A. Wang. A novel transmission-line voltage measuring method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(5):1265–1270, Oct 1998.
- [31] A. Borghetti, M. Bosetti, M. Di Silvestro, C. A. Nucci, and M. Palone. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: Definition of mother wavelets inferred from fault originated transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2):380–388, May 2008.
- [32] IEEE. Sistema teste iee 34-barras. 1992.

- [33] W. H. Kersting. Radial distribution test feeders. In *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, volume 2, pages 908–912 vol.2, Jan 2001.
- [34] R. F. Arritt and R. C. Dugan. Matching the ieev test feeder short circuit results. In *PES T D 2012*, pages 1–7, May 2012.
- [35] H. K. PRIKLER, L; HOIDALEN. *ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista*, 2002. Manual Guide.