

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO ULISES IURINIC

**DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
SUBTRANSMISSÃO: UMA FORMULAÇÃO BASEADA NA
TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA**

Porto Alegre

2012

LEONARDO ULISES IURINIC

**DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
SUBTRANSMISSÃO: UMA FORMULAÇÃO BASEADA NA
TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2012

CIP - Catalogação na Publicação

Iurinic, Leonardo Ulises
DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
SUBTRANSMISSÃO: UMA FORMULAÇÃO BASEADA NA
TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA / Leonardo Ulises
Iurinic. -- 2012.
80 f.

Orientador: Arturo Suman Bretas.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-
RS, 2012.

1. Localização de Falhas. 2. Transitórios de Altas
Frequências. 3. Transformada Wavelet. 4. Ondas
Viajantes. 5. Sistemas Elétricos de Potência. I.
Bretas, Arturo Suman, orient. II. Título.

LEONARDO ULISES IURINIC

**DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
SUBTRANSMISSÃO: UMA FORMULAÇÃO BASEADA NA
TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University – Blacksburg, Estados Unidos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Telló, PUCRS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia.

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Março de 2012.

*En ti se halla oculto el Tesoro de los Tesoros ¡Oh! Hombre, concóete a ti mismo y
conocerás el universo y a los Dioses”.*

Hermes Trismegisto

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, pelo amor incondicional, por ter me ensinado os verdadeiros valores da vida, pelo suporte e apoio em todos os momentos, pelos conhecimentos transmitidos e a educação recebida.

Aos meus irmãos, Marcos e Analía, por trazer sempre alegria a minha vida, pelas profundas meditações, pelo apoio e amizade.

Ao Ezequiel R. Kaminski, Gabriela Cardoso, Cleonita S. Abeling e Gabriel Cardoso, por ter me recebido com tanta amabilidade e ajudado nos primeiros passos no Brasil, a meus avós Alcides, Erica, Edmundo, Ana e ao resto da minha família, por ter acreditado em mim.

À Liliana, por ter me ensinado a perceber a vida com outros olhos, pelo seu amor, amizade e compreensão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica desta Universidade, aos seus professores e funcionários por garantirem uma infraestrutura adequada para realizar este trabalho de pesquisa. Aos Profs. Dr. Arturo Suman Bretas, meu orientador e Dr. Roberto Chouhy Leborgne, pela confiança depositada em mim, pelo apoio, dedicação e por estimular meu crescimento profissional e pessoal sempre.

Ao Renato Gonçalves Ferraz e Mario Orlando Oliveira, exemplos de pessoas e verdadeira vocação de professor, pelo apoio incondicional, pela constante e inestimável ajuda na realização deste projeto.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Análise de Sistemas Elétricos de Potência; Daniel Gazzana, Felipe García, Gustavo Ferreira, Hernán Oviedo, Daphne Shwanz, Diomar Copetti Lima, Martin Rodriguez Paz e Denise Marzec pela eterna parceria, conversas e mates.

Aos meus amigos argentinos e brasileiros: Guillermo, Facundo, Viviana, Carolina, Mónica, Julián, Luis, Luciana, Natalia, Nestor, Miguel, José, Ingrid, em especial ao Roberto Cabral, Anselmo e Rafaela Dill, por terem tornado agradável e inesquecível a convivência em Porto Alegre e compartilhar a experiência de viver e estudar no Brasil.

Ao Povo Argentino, que está gravado no fundo do meu coração, e ao Povo Brasileiro, pela aceitação, exemplo e intercambio de experiências.

E, finalmente, as demais pessoas que contribuíram e incentivaram de alguma forma a realização deste trabalho.

À todos, o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

As faltas podem ocorrer em diversos componentes de um sistema elétrico de potência, dentre os quais as linhas de transmissão se destacam como elementos susceptíveis. Devido a suas dimensões físicas, ambiente de operação e interconexão com outros sistemas, a localização exata de uma falta em uma linha de transmissão não é trivial dificultando a tarefa das equipes de manutenção para recomposição do fornecimento de energia. Neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia computacional desenvolvida em ambiente MATLAB® para diagnóstico de faltas em linhas de transmissão baseada na análise de transitórios de alta frequência nas tensões do sistema. A abordagem desenvolvida neste trabalho inicialmente utiliza a equação de Park para achar a tensão zero, direta e em quadratura e posteriormente detectar a ocorrência da falta através do coeficiente de diferenças. Posteriormente, a teoria de ondas viajantes associada à transformada *wavelet* contínua são utilizadas objetivando determinar a frequência característica do sinal transitório, a qual é relacionada com o local da falta. Para validar o algoritmo de localização proposto foram realizadas diversas simulações de faltas com o programa ATP (*Alternative Transient Program*) utilizando dados de uma linha aérea real. A efetividade da abordagem proposta foi avaliada considerando a resistência de falta, o ângulo de incidência da falta e a impedância de curto-circuito do sistema. Os resultados promissores demonstraram a aplicabilidade da formulação proposta para localização faltas em linhas de transmissão aéreas utilizando medições oscilográficas digitais de apenas um terminal.

Palavras-chave: Localização de faltas, Ondas viajantes, Transitórios de altas frequências, Transformada *wavelet*, Sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

Faults can occur in several components of an electric power system, among which the transmission line stands out. Due to its physical dimensions, operating environment and interconnection systems, the exact transmission line fault location is non-trivial hindering maintenance crew system restoration. In this context, this work presents a computational methodology developed in MATLAB® environment for fault diagnosis on transmission lines based on voltage high frequency transient analysis. Thus, the approach adopted in this work use firstly the Park equations to find the zero, direct and quadrature voltage and then detect the fault occurrence through the difference coefficient. After, the traveling wave theory associated with continuous wavelet transform application is used for determining the characteristic frequency of the transient signal, which is correlated with the fault location. To validate the proposed fault location algorithm, several fault simulations were executed using ATP software using real overhead line data. The proposed fault location scheme performance was evaluated considering the fault resistance, inception fault angle and short-circuit impedance of the system. The promising results demonstrate the applicability of the proposed formulation for fault location in overhead transmission lines, using one terminal digital oscillographic measurement.

Keywords: Fault location, Travelling waves, High-frequencies transients, Wavelet transform, Electric power systems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivos Gerais	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	CONTRIBUIÇÕES	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA .	18
2.1	BASES DAS METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	18
2.1.1	Métodos Visuais	18
2.1.2	Métodos baseados na impedância aparente	19
2.1.3	Métodos Baseados nas Ondas Viajantes	22
2.1.4	Métodos de Altas Frequências	27
2.2	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO POR ONDAS VIAJANTES: UMA REVISÃO	28
2.3	MÉTODOS DE ALTA FREQUÊNCIA: UMA REVISÃO	33
2.4	CONSIDERAÇÕES	37
3	METODOLOGIA UTILIZADA	38
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	38
3.2	DETECÇÃO DO INSTANTE DE FALTA	38
3.3	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PELO MÉTODO DE ALTAS FREQUÊNCIAS	41
3.3.1	Construção da <i>Wavelet</i> Mãe	43
3.3.2	Análise tempo-frequência	46
3.4	FLUXOGRAMA COMPLETO	48
3.5	CONSIDERAÇÕES	50
4	ESTUDOS DE CASOS E RESULTADOS	51
4.1	CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS ANALISADOS	51
4.1.1	Sistema Equivalente e Gerador de Energia	52
4.1.2	Linhas de Transmissão	52
4.1.3	Carga	54
4.1.4	Diagrama de Faltas	54
4.2	SISTEMAS TESTE	54
4.2.1	Sistema 1	55
4.2.2	Sistema 2	56
4.2.3	Sistema 3	57
4.3	SIMULAÇÕES	57
4.3.1	Sistema 1	59
4.3.2	Sistema 2	59
4.3.3	Sistema 3	60
4.4	RESULTADOS DO SISTEMA 1	60
4.4.1	Utilização da Transformada de Fourier	60
4.4.2	Utilização da Transformada <i>Wavelet</i> Contínua	61
4.4.3	Utilização da Transformada <i>Wavelet</i> variando o ângulo de incidência da falta	64

4.5	RESULTADOS DO SISTEMA 2	67
4.5.1	Utilização da Transformada de Fourier.....	67
4.5.2	Utilização da Transformada <i>Wavelet</i> Contínua.....	67
4.6	RESULTADOS DO SISTEMA 3	68
4.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
5	CONCLUSÕES	73
5.1	CONTRIBUIÇÕES BIBLIOGRÁFICAS	74
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	76

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Circuito equivalente para faltas trifásicas em um sistema de transmissão com duas fontes, <i>G</i> e <i>H</i> . Fonte: (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2005).....	20
Figura 2	Circuitos (C1 e C2) ligados através de uma linha de transmissão monofásica com parâmetros distribuídos. Fonte (MIANO; MAFFUCCI, 2001).....	23
Figura 3	Diagrama de <i>Lattice</i> que representa o percurso da onda viajante produzida pela falta ao longo do comprimento da linha.	24
Figura 4	Transmissão e reflexão de uma onda numa descontinuidade da linha.	25
Figura 5	Interconexão simples de dois sistemas Fonte: (JOHNS, 1980).....	30
Figura 6	Fluxograma de localização de faltas utilizando a TWD. Fonte: (MAGNAGO; ABUR, 1998).....	33
Figura 7	Sistema de distribuição de energia elétrica radial. Fonte (BORGHETTI <i>et al.</i> , 2006).....	35
Figura 8	Superfícies de níveis dos coeficientes <i>wavelet</i> utilizada para melhorar a estimativa da frequência característica. Fonte (BORGHETTI, <i>e al.</i> , 2010).	37
Figura 9	Diagrama da transformada de Park e do bloco de detecção de transitórios.	39
Figura 10	Sistema de transmissão monofásico entre duas barras.	42
Figura 11	Sinal de tensão e segmento que será utilizado como WM.....	44
Figura 12	Sinal pronto para gerar a <i>Wavelet</i> Mãe.....	44
Figura 13	<i>Wavelet</i> Mãe finalizada.....	45
Figura 14	Gráfico em três dimensões do módulo quadrado dos coeficientes <i>wavelet</i> em função da escala e o deslocamento.	47
Figura 15	Vista superior da Figura 14 indicando o plano escala-deslocamento, as cores mais escuras indicam coeficientes <i>wavelet</i> maiores.....	47
Figura 16	Fluxograma para detecção do instante de falta.....	48
Figura 17	Fluxograma geral para LDF.....	49
Figura 18	Diagrama unifilar dos sistemas elétricos analisados.	51
Figura 19	Topologia das linhas utilizadas na modelagem, medidas em metros: a) Topologia da linha C. b) Topologia da linha G. c) Topologia das linhas HJL e MO. d) Topologia da linha PR.....	53
Figura 20	Diagrama de faltas: a) Falta trifásica; b) Falta monofásica; c) Falta bifásica; d) Falta bifásica a terra.....	54
Figura 21	Interligação de blocos realizada no ATPDraw para simular os Sistemas 1 e 3.....	55
Figura 22	Interligação de blocos realizada no ATPDraw para simular o Sistema 2.....	56
Figura 23	Erro % na distância utilizando a transformada rápida de Fourier, ângulo de incidência 0°.	61
Figura 24	Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 0°, $\tau = 2 \times 10^{-4}$	62
Figura 25	Curvas de nível do módulo ao quadrado da transformada <i>wavelet</i> para uma falta a 10 km.	63
Figura 26	Erro % na distância utilizando a TWC, sem e com correções.....	63

Figura 27 Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 45°, sem e com correções.	65
Figura 28 Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 90°, sem e com correções.	66
Figura 29 Erro % na distância utilizando a TWC para distintos ângulos de incidência da falta.	66
Figura 30 Erro % na distância utilizando a transformada rápida de Fourier, ângulo de incidência 0°.	67
Figura 31 Erro % na distância utilizando a TWC, sem correções.....	68
Figura 32 Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 0°.....	69
Figura 33 Módulo da transformada de Fourier da tensão modal 1 em uma janela de 1,04 ms, falta trifásica sólida a 5 km.	69
Figura 34 Módulo da transformada de Fourier da tensão modal 1 em uma janela de 1,04 ms, falta trifásica sólida a 60 km.	70
Figura 35 Erro % na distância utilizando a TWC depois da detecção, com correções.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Relação entre ρ_{RV1} , ρ_{RV2} e n_p	42
Tabela 2	Dados do condutor utilizado no modelo.....	53
Tabela 3	Valores dos parâmetros utilizados no ATP para modelar as linhas.....	53
Tabela 4	Comprimentos dos trechos de linhas para os Sistema 1 e 3	56
Tabela 5	Comprimentos dos trechos de linhas para o Sistema 2.....	57
Tabela 6	Resumo dos casos simulados no Sistema 1	59
Tabela 7	Resumo dos casos simulados no Sistema 2.	60
Tabela 8	Resumo dos casos simulados no Sistema 3.	60
Tabela 9	Resultados para todos os tipos e resistências de falta.....	61
Tabela 10	Resultados para todos os tipos e resistências de falta, $\tau=2 \times 10^{-4}$	62
Tabela 11	Resultados para todos os tipos e resistências de falta, $\tau=1 \times 10^{-4}$	62
Tabela 12	Resultados para todos os tipos e resistências de falta, com correções.....	63
Tabela 13	Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 45° , sem correções.....	64
Tabela 14	Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 45° , com correções.....	64
Tabela 15	Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 90° , sem correções.....	65
Tabela 16	Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 90° , com correções.....	65
Tabela 17	Resultados para faltas trifásicas sólidas.....	67
Tabela 18	Resultados para faltas trifásicas sólidas, sem correções.....	68
Tabela 19	Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 0° , com correção.....	68
Tabela 20	Coefficiente n_p calculado para coincidir com x_R	71
Tabela 21	Distâncias corrigidas.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

AF: Altas Frequências

CEEE-D: Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica

CW: Coeficientes *Wavelet*

LDF: Localização De Falhas

LT: Linha de Transmissão

OV: Ondas Viajantes

SEP: Sistemas Elétricos de Potência

TF: Transformada de Fourier

TRF: Transformada Rápida de Fourier

TW: Transformada *Wavelet*

TWC: Transformada *Wavelet* Contínua

TWD: Transformada *Wavelet* Discreta

WM: *Wavelet* Mãe

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potências (SEP) encontram-se permanentemente expostos à ocorrência de faltas que podem gerar distúrbios eletromagnéticos associados a uma grande variedade de causas, sendo as mais comuns: ruptura de isoladores, falha de equipamentos, descargas atmosféricas e árvores ou animais em contato com partes eletrificadas do sistema. Considerando que as faltas são eventos estocásticos, é necessário adotar medidas corretivas para que o defeito não seja propagado para outros pontos do sistema, denominando a este procedimento como proteção. A proteção do SEP pode ocasionar a desconexão do trecho ou seção faltosa visando minimizar os danos tanto dos equipamentos quanto do sistema restante, assim esta ação deve ser realizada de forma rápida e confiável (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

Para proteger as linhas de transmissão de energia elétrica, suas extremidades geralmente são equipadas com dispositivos de proteção (relés e disjuntores), os quais detectam as faltas através da identificação de condições anormais de operação. As grandezas mais comuns que indicam anormalidade são os sinais de tensão e corrente, os quais são medidos usualmente nos pontos de instalação dos equipamentos de proteção ou nos limites apropriados das zonas de proteção¹. A partir da detecção de uma falta, os relés devem enviar um sinal de abertura aos correspondentes disjuntores para isolar a linha afetada do sistema restante (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

Durante a ocorrência de uma falta permanente, a atuação dos dispositivos de proteção implica no desligamento prolongado de uma parte do sistema, podendo produzir um impacto negativo nos indicadores de qualidade de energia elétrica². Visando restabelecer o fornecimento de energia elétrica uma equipe de manutenção deverá reparar a linha o mais rápido possível após a atuação das proteções. Este processo de restauração de energia é otimizado através da utilização de um método preciso de Localização de Faltas (LDF).

O local de uma falta pode ser estimado por meio de medições de tensões e correntes realizadas nas diferentes subestações ou em pontos do sistema. Ao longo da história foram registrados diferentes métodos que podem ser classificados em forma genérica como métodos de impedância aparente e Ondas Viajantes (OV). A escolha do método depende das

¹A responsabilidade de proteção de uma porção do sistema de potência é definida pela zona de proteção, sendo esta região definida por uma linha imaginária vista no diagrama do sistema (PHADKE; THORP, 1988)

² Os indicadores de qualidade de energia elétrica servem para representar quantitativamente o desempenho do sistema elétrico de uma concessionária de energia. Os mais comumente utilizados são denominados com as siglas: EDT, DIC, DEC, DMIC, FEC, FIC (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005).

circunstâncias do local, o número de linhas terminando em uma subestação, o comprimento de cada linha, sua acessibilidade nas diferentes estações do ano e o impacto das interrupções de curto ou longo prazo (STRINGFIELD; MARIHAT; STEVENS, 1957).

As técnicas denominadas de Altas Frequências (AF) consistem em uma extensão dos métodos de OV. Devido aos recentes avanços na tecnologia de aquisição de dados e processamento digital de sinais, estas técnicas se tornaram viáveis e de muito interesse por parte dos engenheiros, principalmente por apresentar imunidade a certos fenômenos que afetam aos métodos baseados na impedância aparente (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010). Por outro lado, nas usinas e subestações dos SEP atuais é comum a presença de oscilógrafos digitais para a monitoração das grandezas elétricas de correntes e tensões (MORETO; ROLIM, 2010). As medições efetuadas por estes equipamentos podem ser realizadas com altas frequências de amostragem, podendo ser armazenadas e utilizadas posteriormente para resolver o problema de LDF.

O SEP pode ser dividido em duas partes: A transmissão e a distribuição. Do sistema de transmissão pode ser classificado o sistema de subtransmissão, o qual compreende entre outros o conjunto de linhas e subestações que conectam as barras da rede básica de transmissão ou de geradores às subestações de distribuição, em tensões típicas iguais ou superiores a 69 kV e inferiores a 230 kV (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002). Pode ser considerada como o ponto intermediário entre a transmissão e distribuição de um SEP, sendo de vital importância restaurar seu funcionamento em caso de acontecer um desligamento devido a uma falha. As linhas dos sistemas de subtransmissão podem apresentar uma configuração radial, onde geralmente se dispõe de somente um oscilógrafo no terminal alimentador. É por isso que o desenvolvimento de técnicas de LDF utilizando dados provenientes de um terminal se mostram interessantes.

Assim, neste trabalho se analisa a proposta de (BORGHETTI *et al.*, 2006; BORGHETTI *et al.*, 2008; BORGHETTI *et al.*, 2010), classificada como técnica de AF, para localizar barras faltosas em sistemas de distribuição. Esta técnica é estendida para determinar a distância da falta em uma Linha de Transmissão (LT) de configuração radial com medições de um terminal. Por outro lado, esta proposta é complementada com um algoritmo para detecção do instante de falta, o qual consiste em uma aplicação do método proposto por (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011).

1.1 OBJETIVOS

Considerando as vantagens que apresentam os métodos de AF e os benefícios disponíveis no uso de oscilógrafos digitais e ferramentas matemáticas para análise de sinais digitais, esta dissertação de mestrado tem os seguintes objetivos:

1.1.1 Objetivos Gerais

- Estender a metodologia proposta por (BORGHETTI *et al.*, 2006; BORGHETTI *et al.*, 2008; BORGHETTI *et al.*, 2010), para localizar faltas barras em falta da distribuição, para localizar faltas ao longo do comprimento inteiro de linhas de subtransmissão.
- Construir uma metodologia de detecção e localização de faltas para sistemas de subtransmissão através da unificação da proposta estendida de (BORGHETTI *et al.*, 2006; BORGHETTI *et al.*, 2008; BORGHETTI *et al.*, 2010) e do método proposto por (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011).

1.1.2 Objetivos específicos

- Complementar a proposta de LDF para detectar o instante de ocorrência da falta.
- Comparar a utilização da TWC, utilizada na metodologia proposta, com a Transformada de Fourier (TF).
- Analisar a influência de diferentes tipos de falta no método estendido de LDF.
- Analisar a influência da impedância da fonte do sistema na determinação do local da falta.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

A LDF em linhas de transmissão deve ser feita de maneira rápida e precisa objetivando diminuir o tempo de reparo do sistema elétrico. Nesse sentido, este trabalho apresenta relevância dentro do contexto atual e tem sido abordado tanto na análise teórica quanto na construção prática, dando ênfase aos métodos baseados em OV e AF. A abordagem realizada em (BORGHETTI *et al.*, 2010) para localizar barras faltosas em sistemas de distribuição, foi estendida para localizar faltas no comprimento total de linhas de

subtransmissão. Aliás, esta proposta para LDF foi complementada com o algoritmo de detecção de frentes de ondas apresentado em (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011), sendo utilizado para definir o instante de início do transitório de alta frequência. A TWC originalmente utilizada para determinar a distância da falta foi comparada com a TF e finalmente foi analisada a influência da impedância equivalente do sistema na determinação do local da falta.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em quatro partes além do Capítulo introdutório.

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre distintas metodologias para LDF em SEP. Enfatiza a evolução dos métodos baseados em OV e AF, descrevendo ainda o fenômeno físico das OV em LT.
- O Capítulo 3 apresenta a formulação matemática da metodologia proposta para detecção de transitórios de altas frequências e LDF.
- O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso baseado em um sistema de transmissão real. Mostra a forma em que foram modelados os componentes do sistema, bem como os resultados das simulações realizadas.
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa realizada e as sugestões para trabalhos futuros.

2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

As metodologias para localizar faltas são fundamentais para as equipes encarregadas da manutenção, pois estas devem realizar sua tarefa minimizando os inconvenientes causados aos consumidores de energia. A técnica de LDF é selecionada de acordo com diversos fatores tais como: a velocidade de localização, precisão e robustez do método, o custo e requerimentos de manutenção associados aos dispositivos e habilidades requeridas pelo operador responsável. Por estas razões, para a LDF em SEP, são utilizados vários artifícios no desenvolvimento de técnicas adequadas às diferentes necessidades, tais como dispositivos sinalizadores em diferentes pontos do sistema, oscilógrafos de tensões e correntes, medições de frentes de ondas viajantes e métodos de ressonância, de acordo com o tipo da linha, aérea ou subterrânea. (AIEEE COMMITTEE REPORT, 1956). Sendo assim, este capítulo apresenta as bases das principais metodologias de LDF em SEP, enfatizando os métodos que empregam sinais de alta frequência devido às ondas viajantes resultando em fenômenos transitórios, que é o foco principal desta dissertação.

2.1 BASES DAS METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Em qualquer sistema, uma inspeção visual é quase sempre a primeira opção que surge quando se pretende localizar uma falta. No caso dos SEP também é possível localizar as faltas por meio das medições de tensões e correntes, as quais são realizadas nas diferentes subestações existentes. A seguir, serão descritas brevemente os principais métodos para LDF, começando pela inspeção visual e continuando pelos métodos que utilizam medições, os quais podem ser classificados em: baseados na impedância aparente e Ondas Viajantes (OV). Neste último, existem os métodos denominados de alta frequência, que consistem em uma extensão dos métodos por OV (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOŁOWSKI, 2010).

Adicionalmente às metodologias de LDF citadas, existem aplicações baseadas em inteligência artificial para detectar e localizar faltas em SEP, sendo as mais utilizadas: Técnicas de Sistemas Especialistas, Redes Neurais Artificiais, Sistemas de Lógica *Fuzzy* e Algoritmos Genéticos (GRACIA; MAZÓN; ZAMORA, 2005).

2.1.1 Métodos Visuais

Existem diversas metodologias propostas para localizar faltas em SEP. As mais primitivas consistem em inspeções visuais as quais podem ser realizadas tanto a pé quanto

utilizando diferentes meios de transporte. Em linhas longas, geralmente são instalados dispositivos que auxiliam na localização, tais como chaves seccionadoras que permitem reenergizar a linha por partes e localizar as faltas permanentes dentro de uma seção particular (STRINGFIELD; MARIHAT; STEVENS, 1957). Outras vezes são instalados fusíveis especiais nas bases metálicas das torres para aproveitar parte da corrente de falta que se deriva à terra, a qual fundirá o dispositivo mais próximo à falta gerando um sinal visível. Ligações telefônicas realizadas por testemunhas ou consumidores sem energia também são de grande ajuda na hora de limitar a zona a ser inspecionada. A precisão obtida com a inspeção visual pode ser ou não alta, dependendo da causa que originou a falta. Ainda, a velocidade de localização é razoável apenas para linhas curtas e acessíveis, podendo ser necessárias horas e até dias, considerando a influência das condições climáticas e o custo associado à equipe de manutenção (STRINGFIELD; MARIHAT; STEVENS, 1957).

2.1.2 Métodos baseados na impedância aparente

Os métodos baseados na impedância aparente consistem em calcular a impedância vista desde um ou mais terminais do sistema, por meio das medições das componentes fundamentais de tensão e corrente (ZIMMERMAN; COSTELLO, 2005). O valor desta impedância indicará se existe alguma falta na linha, permitindo nesse caso determinar a distância em que a falha se encontra. Este método é muito utilizado na prática e está bem consolidado, portanto serão explicadas as bases do seu funcionamento apresentando as principais referências neste assunto, sendo mostradas apenas as equações para faltas trifásicas em linhas equilibradas.

Dada a Figura 1, que representa a sequência positiva de um sistema de transmissão, o valor da impedância aparente Z_{FG} , medida no terminal local G durante a falta¹, é dada por:

$$Z_{FG} = \frac{V_G}{I_G} = mZ_L + R_F \frac{I_F}{I_G}. \quad (2.1)$$

Estas grandezas são medidas empregando as componentes fundamentais calculadas a partir de uma janela de dados², onde V_G é a tensão e I_G é a corrente medida no terminal G , Z_L é a

¹ Pelo teorema da superposição, o sistema durante a falta pode ser considerado como a soma de um sistema pre-falta e outro puramente faltoso (TAKAGI *et al.*, 1981).

² Em uma janela de dados, uma nova amostra se encontra disponível quando a mais antiga é descartada, assim um novo valor é incluído nos cálculos (PHADKE; THORP, 1988).

impedância da linha, R_F é a resistência de falta, I_F é a corrente derivada na falta e m a distância unitária da falta em relação ao terminal local G .

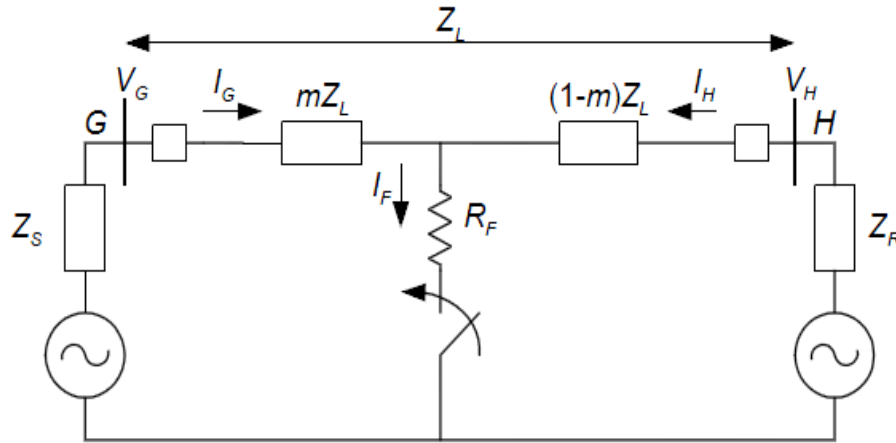


Figura 1. Circuito equivalente para faltas trifásicas em um sistema de transmissão com duas fontes, G e H . Fonte: (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2005).

Assim, o local da falta pode ser determinado isolando a variável m da equação (2.1), conforme:

$$m = \frac{Z_{FG}}{Z_L} - R_F \frac{I_F}{I_G \cdot Z_L}, \quad (2.2)$$

cuja solução é direta para a condição em que a resistência de falta é igual (ou muito próxima) a zero.

No caso geral, quando existe uma resistência de falta considerável, os valores desta resistência e da relação I_F/I_G introduzem um erro na equação (2.2), já que são valores desconhecidos. Além disso, a relação I_F/I_G adiciona uma componente reativa à resistência de falta, que dificulta a estimativa da distância (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2005). Os diferentes métodos de LDF baseados na impedância consistem basicamente em diferentes formas de reduzir o efeito da resistência de falta. A precisão com que a localização é realizada depende diretamente das simplificações que foram assumidas no método.

De acordo com (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2005), uns dos primeiros algoritmos desenvolvidos para diminuir o erro associado à resistência de falta foi o método da Reatância Simples. Este método consiste em calcular a

distância de falta por meio das componentes imaginárias das impedâncias Z_{FG} e Z_L , como se mostra na seguinte expressão:

$$m = \frac{\text{imag}(Z_{FG})}{\text{imag}(Z_L)}. \quad (2.3)$$

O erro cometido nesta determinação é zero somente se a R_F também é zero ou se I_G e I_F se encontram em fase.

Visando melhorar o método da reatância simples, diferentes pesquisadores têm proposto utilizar a mudança da corrente devida à falta³ (ΔI_G) para eliminar a influência da corrente de carga. Segundo (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2005), os trabalhos mais representativos baseiam-se na ideia de reescrever a equação (2.1) da seguinte forma:

$$Z_{FG} = mZ_L \cdot I_G + R_F \frac{\Delta I_G}{d_s}, \quad (2.4)$$

onde d_s é o fator de distribuição:

$$d_s = \frac{Z_H + (1-m)Z_L}{Z_H + Z_L + Z_G} = |d_s| \angle \beta. \quad (2.5)$$

Multiplicando (2.4) pelo conjugado de ΔI_G , e desconsiderando a relação $\Delta I_G/d_s$, a distância de falta pode ser estimada isolando m e extraindo a parte imaginária:

$$m = \frac{\text{imag}(V_G \cdot \Delta I_G^*)}{\text{imag}(Z_L \cdot I_G \cdot \Delta I_G^*)}. \quad (2.6)$$

Segundo (TAKAGI *et al.*, 1982), para a condição em que a linha é suficientemente curta⁴ e os fatores de distribuição de corrente vistos a partir de ambos os terminais têm o mesmo argumento (sistema homogêneo), a equação (2.6) não apresenta erros significativos. Nesse trabalho, a equação (2.6) ainda é estendida para outros tipos de faltas, propondo também uma forma de compensar os erros cometidos em linhas mais longas e cabos aéreos aterrados. Este método é mais conhecido na prática como método de Takagi, existindo também um método de Takagi modificado (ZIMMERMAN; COSTELLO, 2005; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2005), que utiliza a corrente de sequência zero ao invés de ΔI_G e um ângulo de compensação para não usar a corrente pré-falta.

³ As mudanças devido à falta consistem nas grandezas do sistema puramente faltoso (TAKAGI *et al.*, 1981).

⁴ Em (TAKAGI *et al.*, 1982) se considera uma linha suficientemente curta quando $\tanh(\gamma x) \approx \gamma x$, onde γ é a constante de propagação da linha e x é a distância considerada.

No trabalho proposto por (ERIKSSON; SAHA; ROCKFELLER, 1985), é necessário conhecer os valores das impedâncias da fonte tanto do terminal local como do terminal remoto, obtendo-se a expressão geral da forma:

$$m^2 - mK_1 + K_2 - R_F K_3 = 0, \quad (2.7)$$

onde K_1 , K_2 , e K_3 são valores complexos que dependem das impedâncias de fonte, a impedância da linha e os valores medidos de tensão e corrente no terminal local:

$$K_1 = \frac{V_G}{I_G Z_L} + 1 + \frac{Z_S}{Z_L}, \quad (2.8)$$

$$K_2 = \frac{V_G}{I_G Z_L} \left(\frac{Z_H}{Z_L} + 1 \right), \quad (2.9)$$

$$K_3 = \frac{\Delta I_G}{I_G Z_L} \left(\frac{Z_S + Z_H}{Z_L} + 1 \right). \quad (2.10)$$

Para isolar m , a equação (2.7) é separada em sua parte real e sua parte imaginária, obtendo assim duas equações com duas incógnitas. A desvantagem deste enfoque é a necessidade de conhecer os valores exatos das impedâncias de fonte, resultando em erros significativos devido à incerteza destes valores.

Em geral, o mesmo princípio para localizar faltas com medições de um terminal pode ser utilizado com medições a partir de dois terminais. Estes se mostram mais precisos em geral, pois os efeitos da resistência de falta, as condições de carga e os valores das impedâncias de fonte podem ser eliminados. Para realizar a estimativa, os dados devem ser transmitidos e reunidos em um ponto de forma sincronizada ou não, dependendo da metodologia proposta. Existem vários trabalhos onde são analisadas estas metodologias (GIRGIS; HART; PETERSON, 1992; NOVOSEL, 1996; IZYKOWSKI *et al.*, 2006; THREEVITHAYANON; HOONCHAREON, 2010).

2.1.3 Métodos Baseados nas Ondas Viajantes

Considerando um modelo de linha de transmissão mais próximo da realidade, isto é, com seus parâmetros distribuídos ao longo da linha, chega-se à conclusão de que qualquer fenômeno eletromagnético presente na linha se propaga como uma onda viajante. Em linhas monofásicas existe apenas um modo de propagação, com uma impedância característica e velocidade de propagação. Entretanto, em linhas trifásicas existem no mínimo dois modos diferentes de propagação, com suas respectivas impedâncias características e velocidades de onda. Com este conhecimento, é possível desenvolver relés que utilizem este fenômeno de

propagação para detectar a presença de uma falta e determinar sua localização (PHADKE; THORP, 1988).

Para descrever o fenômeno das OV, inicialmente será considerado o caso de uma linha monofásica ideal, considerando os parâmetros distribuídos da linha ao longo do seu comprimento. A Figura 2 mostra a interligação de dois circuitos mediante uma linha monofásica ideal, salientando que tanto a tensão como a corrente são funções do tempo e da distância.

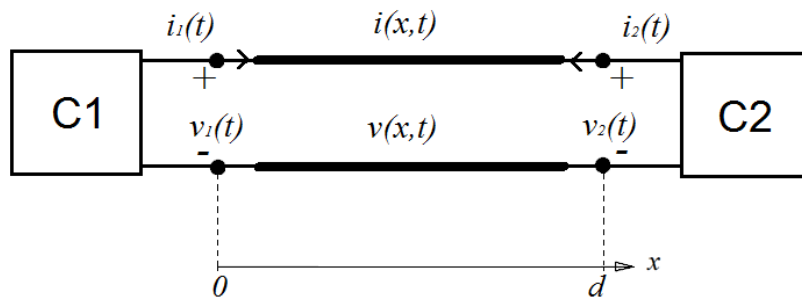


Figura 2. Circuitos (C1 e C2) ligados através de uma linha de transmissão monofásica com parâmetros distribuídos. Fonte (MIANO; MAFFUCCI, 2001)

Conforme (MIANO; MAFFUCCI, 2001), as equações que governam este circuito são dadas por:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (2.11)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (2.12)$$

onde L e C são a indutância e capacitância definidas positivas, respectivamente. A partir das equações (2.11) e (2.12) é possível obter duas equações desacopladas, conforme as expressões (2.13) e (2.14):

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = 0. \quad (2.14)$$

As equações (2.13) e (2.14) possuem a forma de equações de onda, suas soluções também são soluções para as equações (2.11) e (2.12), e na forma de d'Alembert consistem na superposição de duas ondas que percorrem a linha em sentidos opostos:

$$v(x,t) = v^+(t - x/c + \alpha^+) + v^-(t + x/c + \alpha^-), \quad (2.15)$$

$$i(x,t) = i^+(t - x/c + \alpha^+) + i^-(t + x/c + \alpha^-), \quad (2.16)$$

onde:

$c = 1/\sqrt{LC}$ \longrightarrow Velocidade de propagação da onda;

$v^+ e i^+$ \longrightarrow Ondas progressivas;

$v^- e i^-$ \longrightarrow Ondas regressivas.

A importância das equações (2.15) e (2.16) consiste no fato de que qualquer variação temporal dos parâmetros de operação na linha será propagada em forma de onda através desta, e uma falta resulta justamente em uma mudança repentina das condições de tensão e corrente em algum ponto da linha de transmissão, a qual pode ser entendida como uma função degrau injetada naquele ponto (JONHS, 1980). A propagação da onda produzida pela falta pode ser visualizada utilizando o diagrama de *Lattice* mostrado na Figura 3 (ZANETTA,2003). O eixo horizontal representa o tempo e o vertical representa a posição da onda na linha de transmissão. A Figura 3 indica o fluxo em uma linha de comprimento L com uma falta localizada no ponto x , onde a velocidade de movimentação da onda é constante. É importante salientar que a falta produz duas ondas, uma que viaja para o terminal A e outra para o terminal B, os quais representam o terminal local e remoto⁵, respectivamente.

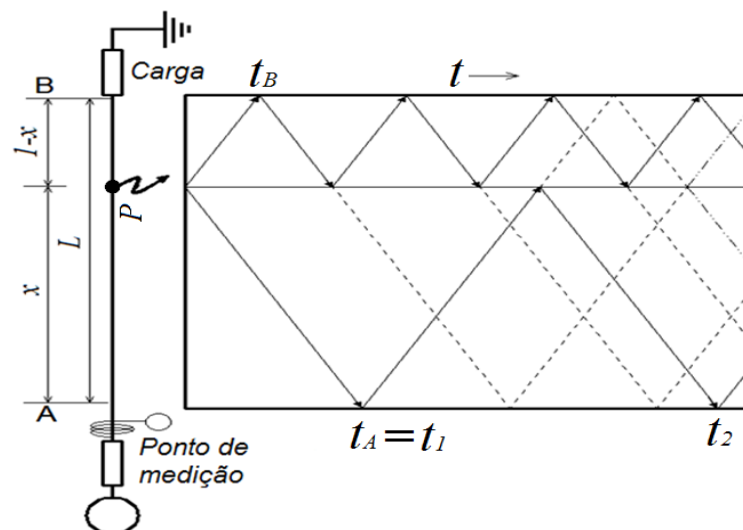


Figura 3. Diagrama de *Lattice* que representa o percurso da onda viajante produzida pela falta ao longo do comprimento da linha.

⁵ Considera-se como terminal local aquele cujo dispositivo de medição está sendo considerado, e terminal remoto a qualquer outra barra considerada no estudo.

Uma descontinuidade consiste em um ponto onde as características físicas da linha mudam, produzindo a modificação de qualquer onda que chega nesse ponto. A Figura 4 ilustra uma frente de onda de tensão no processo de atravessar uma destas descontinuidades, mostrando que uma parte é refletida e a outra é transmitida segundo o coeficiente de reflexão (ρ_{RV}) e transmissão (ρ_{TV}), respectivamente. No caso monofásico, os coeficientes mencionados são funções dos valores relativos entre as impedâncias características Z_1 e Z_2 , como mostrado nas equações (2.17) e (2.18) (ZANETTA JR, 2003):

$$\rho_{RV} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.17)$$

$$\rho_{TV} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (2.18)$$

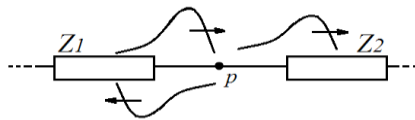


Figura 4. Transmissão e reflexão de uma onda numa descontinuidade da linha.

Assim, sendo V uma onda de tensão que incide na descontinuidade P , $V^* \rho_{RV}$ será a parte refletida e $V^* \rho_{TV}$ a parte transmitida (linhas de traço, Figura 3).

Os mesmos conceitos expostos para linhas monofásicas são válidos para linhas polifásicas, no entanto, as equações deverão ser tratadas na forma matricial ao invés de escalar. De acordo com (ARAÚJO; NEVES, 2005), as equações (2.13) e (2.14), escritas no domínio da frequência para linhas polifásicas, são dadas por:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V^{ph}(x, \omega) = P(\omega) \cdot V^{ph}(x, \omega), \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} I^{ph}(x, \omega) = Q(\omega) \cdot I^{ph}(x, \omega), \quad (2.20)$$

onde:

$V^{ph}(x, \omega)$ \longrightarrow Tensões de fase em função da distância x e frequência ω ;

$I^{ph}(x, \omega)$ \longrightarrow Correntes de fase em função da distância x e frequência ω .

As matrizes $P(\omega)$ e $Q(\omega)$ são compostas pelas matrizes unitárias representativas da topologia dos condutores na linha:

$$P(\omega) = Z_f(\omega) \cdot Y_f(\omega), \quad (2.21)$$

$$Q(\omega) = Y_f(\omega) \cdot Z_f(\omega), \quad (2.22)$$

onde:

$Z_f(\omega)$ \longrightarrow Matriz $i \times i$ de impedância série da linha;

$Y_f(\omega)$ \longrightarrow Matriz $i \times i$ de admitância em paralelo da linha,

sendo i , o número de fases da linha. Passando as equações (2.19) e (2.20) para o domínio do tempo, é possível observar que tanto as tensões quanto as correntes são identificadas como equações de onda, porém encontram-se na forma matricial indicando os acoplamentos entre as distintas fases.

De acordo com (ARAÚJO; NEVES, 2005), é possível criar um novo conjunto de tensões (V^m) e correntes (I^m), denominadas modais, as quais obedecem também às equações (2.19) e (2.20) e que se relacionam com as variáveis de fase (V^{ph} , I^{ph}). Nestas, para simplificar a notação, as variáveis x , ω para tensões e correntes, e ω para as outras matrizes foram omitidas:

$$V^m = T_V \cdot V^{ph}, \quad (2.23)$$

$$I^m = T_I \cdot I^{ph}, \quad (2.24)$$

onde:

T_V \longrightarrow Matriz de transformação modal para tensões;

T_I \longrightarrow Matriz de transformação modal para correntes.

Finalmente, as equações (2.19) e (2.20) tornam-se:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V^m = T_V^{-1} \cdot P \cdot T_V \cdot V^m, \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} I^m = T_I^{-1} \cdot Q \cdot T_I \cdot I^m, \quad (2.26)$$

onde duas hipóteses são necessárias: T_V e T_I existem e são não singulares e, tanto $T_V^{-1} P T_V$ como $T_I^{-1} Q T_I$, são matrizes diagonais. Considerando que os autovalores das matrizes P e Q são os mesmos, as equações de onda no domínio modal podem ser expressas da seguinte maneira:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V^m = \gamma^2 \cdot V^m, \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} I^m = \gamma^2 \cdot I^m, \quad (2.28)$$

onde:

$$\gamma^2 \longrightarrow \text{Matriz diagonal de autovalores } \gamma_i^2.$$

Assim, γ_i é a constante de propagação do modo i , constituído por um número complexo:

$$\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i, \quad (2.29)$$

onde:

$$\alpha_i \longrightarrow \text{Constante de atenuação do modo } i;$$

$$\beta_i \longrightarrow \text{Constante de fase do modo } i.$$

Por fim, pode ser calculada a velocidade de propagação v_i das ondas para cada modo na frequência ω como:

$$v_i = \frac{\omega}{\beta_i}. \quad (2.30)$$

Uma vez que a velocidade depende da frequência, a forma de onda das tensões e correntes, compostas por mais de uma componente de frequência, será distorcida enquanto a onda realiza sua transmissão pela linha (MIANO; MAFFUCCI, 2001).

Todos os métodos de LDF por OV baseiam seu funcionamento no conhecimento da velocidade em cada modo, dada por (2.30), e na detecção dos momentos em que as frentes de onda atingem os terminais, como mostrado na Figura 3. Através do conhecimento da velocidade e do tempo é possível determinar uma distância, a qual corresponde, neste caso, à distância desde o terminal local até a falta.

2.1.4 Métodos de Altas Frequências

Voltando à Figura 3, na medida em que passa o tempo a onda gerada pela falta irá se propagando no sistema, sendo refletida várias vezes no ponto da falta e nos outros terminais até ser atenuada e levar o sistema a um estado estacionário. Este transitório de alta frequência, o qual pode ser medido em qualquer ponto do sistema, possui um conteúdo espectral característico de acordo com a localização da falta, a qual pode ser localizada utilizando alguma ferramenta matemática de análise tempo-frequência, como a TF ou as Transformadas *Wavelets* (TW) (LATHI, 1968; MALLAT, 2008).

2.2 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO POR ONDAS VIAJANTES: UMA REVISÃO

A ideia de localizar faltas em linhas elétricas através do fenômeno das OV surgiu em tempos anteriores a 1940. Esta ideia foi conduzida mediante a tecnologia disponível naquela época, utilizando complicados sistemas de fotografias sobre oscilógrafos com raios catódicos e sinais de rádio, como relatado por (STEVENS; STRINGFIELD, 1948). Já em 1956 foram desenvolvidas diversas técnicas para LDF baseadas no fenômeno das OV, tais como injeção de pulsos de tensão e detecção de suas reflexões (método do radar), detecção da frequência de ressonância da linha faltosa correspondente à distância da falta, ou a detecção das ondas produzidas pela falta e suas reflexões para determinar sua distância (AIEEE COMMITTEE REPORT, 1956; STEVENS; STRINGFIELD, 1948). Desde então, os métodos de LDF baseados nas OV foram classificados como dos tipos *A*, *B*, *C* e *D*, de acordo com seu modo de operação, desenho ou construção particular.

De acordo com (STRINGFIELD; MARIHAT; STEVENS, 1957), o tipo *A* consiste em identificar a diferença de tempo entre a chegada da onda produzida pela falta e a sua reflexão no ponto de falta, com este tempo e o conhecimento da velocidade de propagação se determina a distância da falta. No tipo *B* são necessários dois terminais de medição onde um contador de tempo começa a funcionar quando no terminal mais próximo à falta é detectada a chegada de uma onda produzida pela falta; quando a outra onda é detectada no terminal mais distante, envia-se um sinal para parar o contador e transmitir as medições para um ponto comum e assim determinar a distância até a falta. O tipo *D* funciona de forma semelhante ao tipo *B*, porém os contadores de tempo operam de forma sincronizada e são parados quando as frentes de onda atingem os respectivos terminais. O tipo *C* funciona segundo o mesmo princípio do radar onde um pulso ou série de pulsos de tensão são aplicados à linha desenergizada e, através da medição das suas reflexões no ponto de falta, pode-se realizar uma estimativa da distância até a falta. Porém, o tipo *C*, serve apenas para faltas permanentes. Existe ainda um método mais recente denominado tipo *E*, o qual utiliza o mesmo princípio do tipo *C*, porém aproveitando o transitório criado quando a linha é reenergizada pelo fechamento do disjuntor (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2005; NAZY; SADEH; NIAZY, 2010).

A partir de 1960, a nova tecnologia dos computadores digitais começou a substituir as funções antes realizadas por fiações de circuitos analógicos em uma subestação, já que mediante um computador foi possível dispor de quase toda a informação necessária para controlar diversos equipamentos do sistema, tais como reguladores, disjuntores, capacitores e

reatores *shunt*. Começou a ser desenvolvida a ideia de utilizar o computador digital na tarefa de proteção e oscilografia automática, transformando a casa de controle em uma sala de computadores (ROCKEFELLER, 1969). Os avanços nesta tecnologia digital chamaram a atenção dos engenheiros de proteção dando início aos algoritmos de proteção digitais (VITINS, 1978). Porém, naquela época, os algoritmos baseados em OV não podiam ser implementados completamente mediante tecnologia digital, devido às elevadas frequências de amostragem necessárias, (PHADKE; THORP, 1988).

Embora na década de 1980 ainda não fosse possível utilizar inteiramente a tecnologia digital para tratar as OV, este fenômeno adquiriu grande interesse na área de detecção de faltas e proteção de SEP, dando lugar a trabalhos que posteriormente inspiraram técnicas de LDF. Assim, (JOHNS, 1980) descreve um sistema de detecção de faltas direcional que aproveita o fenômeno das OV para detectar faltas dentro de uma zona de proteção, oferecendo a possibilidade de operar as proteções em tempos menores do que meio ciclo da frequência fundamental.

Primeiramente, (JOHNS, 1980) considera uma linha de transmissão monofásica sem perdas e dois pontos de monitoração nos terminais R e S, como mostra a Figura 5. No relé do terminal R são extraídas as componentes superpostas⁶ de tensão e corrente, $v_{fR}(t)$ e $i_{fR}(t)$, respectivamente, as quais estão linearmente relacionadas pela impedância característica da linha Z_0 :

$$v_{fR}(t) = Z_0 \cdot i_{fR}(t). \quad (2.31)$$

Pela relação (2.31) e as soluções das equações de onda (2.15) e (2.16), podem ser calculadas as ondas progressivas e regressivas e constituir dois sinais especiais:

$$2v(t)^- = S_{1R}(t) = v_{fR}(t) - R_0 \cdot i_{fR}(t), \quad (2.32)$$

$$2v(t)^+ = S_{2R} = v_{fR}(t) + R_0 \cdot i_{fR}(t), \quad (2.33)$$

onde R_0 consiste em uma resistência interna do relé que reproduz a impedância característica Z_0 e os sinais S_{1R} e S_{2R} são utilizados para realizar a detecção. Em condições normais, os sinais S_{1R} e S_{2R} se mantêm nulos, atingindo valores maiores a zero depois da ocorrência de uma falta. Se o sinal S_{2R} atinge o limiar antes que S_{1R} , a falta encontra-se a montante, caso contrario a falta está localizada a jusante. Assim, mediante um canal de comunicação até o

⁶ As componentes superpostas são as grandezas do sistema puramente faltoso, as quais consistem na diferença das tensões e correntes antes e durante a falta. Na prática se pode obter retrasando o sinal completo por um múltiplo inteiro do período fundamental ($T=1/f_0$) do sistema (JOHNS, 1980).

relé instalado no terminal S, o qual funciona de maneira análoga ao do terminal R, determina-se a localização da falta dentro ou fora da zona de proteção.

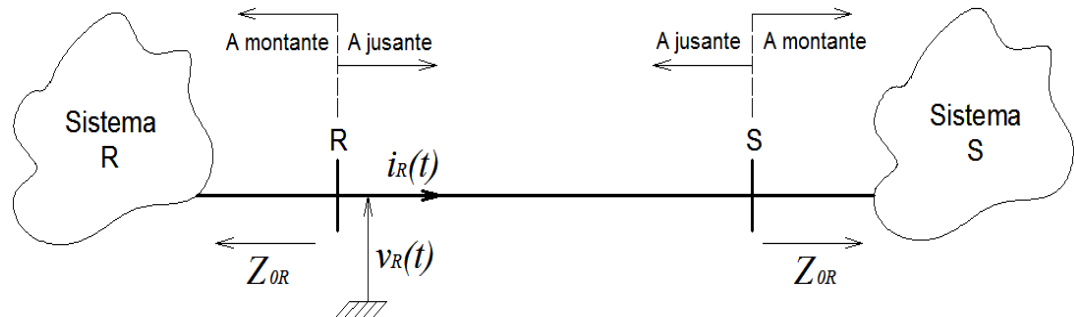


Figura 5. Interconexão simples de dois sistemas Fonte: (JOHNS, 1980)

O trabalho de (JOHNS, 1980) estende a metodologia para sistemas trifásicos por meio da transformação modal, analisando importantes considerações práticas baseadas em testes em laboratório, incluindo uma breve análise para detectar faltas de alta impedância.

Os sinais dados por (2.32) e (2.33) são a base para um sistema de proteção a distância desenvolvido por (MCLAREN; CROSSLEY, 1983), focado em determinar a distância da falta pela correlação cruzada entre estes. A diferença de tempo dada por mudanças similares entre os sinais S_1 e S_2 medidos em um terminal indica o dobro do tempo de viagem da onda desde a falta até o relé. As semelhanças entre S_1 e S_2 são identificadas pela correlação cruzada⁷, cujos máximos sinalizam os tempos necessários para determinar o local da falta.

Alguns anos depois, (SHEHAB-ELDIN; MCLAREN, 1988) estenderam a metodologia anterior visando resolver vários problemas relacionados às faltas entre fases e terra, somando os resultados de duas correlações cruzadas entre os sinais S_1 e S_2 realizadas com atrasos de tempos diferentes. Assim os problemas para diferenciar as reflexões provenientes de terminais remotos foram resolvidos. Também foi proposto um fator de compensação dependente do ângulo instantâneo da fase faltosa, este magnifica os valores da correlação mantendo a confiabilidade do método quando a falta ocorre em tensões próximas à zero. Ainda, foi utilizada a componente DC⁸ da correlação para detectar faltas muito próximas ao terminal de medição. Todos os resultados foram obtidos mediante sistemas simulados.

⁷ De acordo com (MCLAREN; CROSSLEY, 1983), a correlação cruzada discreta Φ mede a correlação entre uma seção do sinal amostrado Y com outro sinal X retrasado em função de τ : $\Phi_{XY}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{X(k\Delta t + \tau)Y(k\Delta t)\}$.

⁸ Se um sinal possui componente DC, então sua transformada de Fourier incluirá uma componente de frequência zero.

Segundo (ROBERTSON *et al.*, 1996), na década de 1990 observou-se um grande avanço na tecnologia digital, permitindo sua utilização plena para trabalhar com sinais transitórios de altas frequências, já que os sinais digitais têm características que facilitam a automatização e simplificam a aquisição de dados. Assim, técnicas matemáticas avançadas de decomposição tempo-frequência, começaram a formar parte das ferramentas da engenharia de proteção. A TW foi a mais característica, datando as primeiras referências relevantes sobre sua utilização em SEP em 1994 (CASTRO FERNÁNDEZ; ROJAS, 2002). Em 1996 (ROBERTSON *et al.*, 1996) introduz a TW como uma poderosa ferramenta para capturar e analisar transitórios nos sistemas de potência, analisando suas potenciais aplicações na identificação de características especiais em medições de tensão e corrente.

A TW consiste basicamente na decomposição de uma função em versões dilatadas, contraídas e deslocadas de uma função particular chamada de *Wavelet* Mãe (WM), cujo resultado é uma função de duas variáveis chamadas de “escala” e “deslocamento”. Os valores desta função são chamados de Coeficientes *Wavelets* (CW), e a soma ponderada destes coeficientes permite a reconstrução da função que foi decomposta. A TW pode ser dividida em dois grupos, a saber: a TWC e a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). A primeira utiliza valores reais de escalas e deslocamentos, enquanto que a segunda usa valores inteiros. A TWD foi desenvolvida quase exclusivamente utilizando escalas binárias⁹ e deslocamentos diádicos¹⁰, pois apresenta grandes vantagens computacionais (MALLAT, 1989; MALLAT, 2008; OLIVEIRA, 2007; ROBERTSON *et al.*, 1996).

A TW, em particular a TWD, também pode ser utilizada na detecção e localização de faltas como mostra (MAGNAGO; ABUR, 1998), onde são propostas duas metodologias para localizar faltas em uma linha de transmissão. Na primeira, são utilizadas medições de sinais provenientes de dois terminais sincronizados pela tecnologia de geo-posicionamento por satélite (GPS). Utilizando uma WM *Daubechies4* e detectando a aparição de coeficientes na primeira escala, é possível determinar a distância até a falta mediante a seguinte equação relacionada com a Figura 3:

$$x = \frac{L - v_i \cdot (t_A - t_B)}{2}, \quad (2.34)$$

⁹ Escala (a) que varia segundo a potência de dois: $a=2^n$; $n=0, 1, 2, \dots$

¹⁰ Deslocamentos (u) dependentes da escala segundo: $u=m2^n$; $n=0, 1, 2, \dots$ e $m=0, 1, 2, \dots$

onde:

- x —→ Distância até a falta;
- L —→ Comprimento total da linha;
- v_i —→ Velocidade de onda no modo i ;
- t_A —→ Tempo de chegada da onda no terminal A;
- t_B —→ Tempo de chegada da onda no terminal B.

Na segunda metodologia são monitorados sinais somente em um extremo da linha, possibilitando unicamente a identificação da chegada da primeira frente de onda e as suas reflexões. Quando a falta não envolve à terra (faltas fase-fase ou trifásicas) não haverá reflexões significativas provenientes do terminal remoto, sendo possível estimar a distância da falta (x) medindo apenas o intervalo de tempo t_d , existente entre dois picos consecutivos dos coeficientes *wavelets* da primeira escala conforme:

$$x = \frac{v \cdot t_d}{2}, \quad (2.35)$$

onde:

- v —→ Velocidade da onda no modo i .

Já quando a falta envolve uma conexão à terra, os sinais no terminal de monitoração conterão reflexões significativas provenientes do terminal remoto. Ainda, analisando o diagrama de *Lattice* da Figura 3, é possível observar que se a falta está localizada na segunda metade da linha, a segunda frente de onda a atingir o terminal de medição provirá do terminal remoto e desta forma a distância da falta é determinada conforme:

$$x = \frac{v \cdot (2 \cdot \tau - t_d)}{2}, \quad (2.36)$$

onde:

- τ —→ Tempo para percorrer a linha completa na velocidade v_i .

No entanto, a segunda frente de onda a atingir o extremo de medição virá diretamente do ponto faltoso quando a falta estiver localizada na primeira metade da linha. Neste caso a distância deverá ser calculada pela equação (2.36). O fluxograma desta metodologia é mostrado na Figura 6.

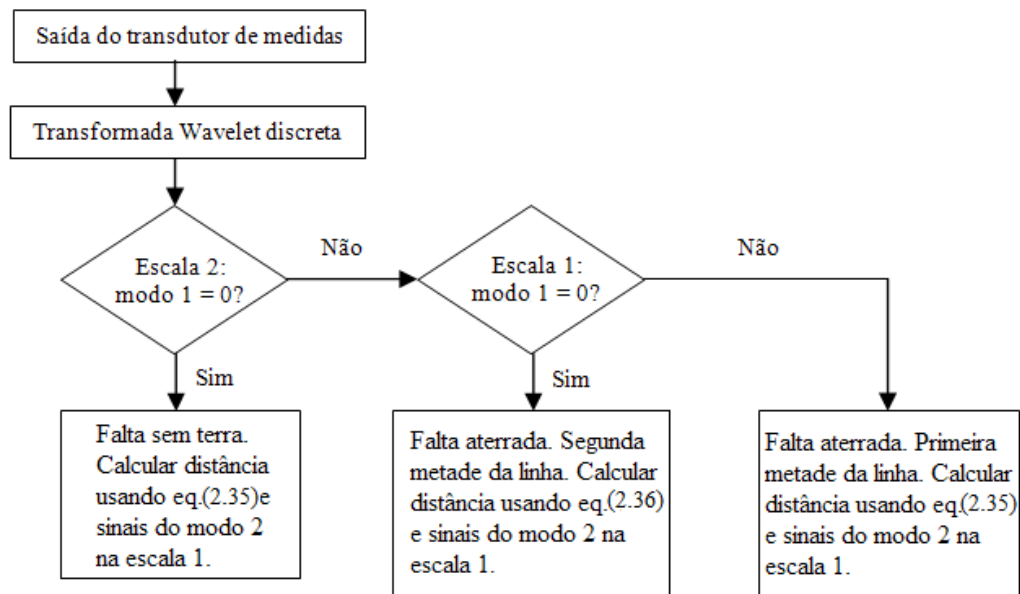


Figura 6. Fluxograma de localização de faltas utilizando a TWD. Fonte: (MAGNAGO; ABUR, 1998)

Uma limitação desta metodologia é que a TWD possui uma pobre discriminação ao ruído quando aplicada a dados digitais. A mesma adiciona componentes nas escalas de altas frequências que dificultam a identificação das frentes de onda, provocando desta maneira elevados erros de quantificação. Estes problemas são diminuídos mediante a utilização da TWC (SPOOR; GUO ZHU, 2006), a qual é utilizada nos métodos de alta frequência.

2.3 MÉTODOS DE ALTA FREQUÊNCIA: UMA REVISÃO

As metodologias que empregam as frentes de OV para a LDF possuem as seguintes limitações importantes: se uma falta ocorre no momento em que a tensão está próxima a zero não se geram componentes significativas de OV, e no caso de faltas localizadas nas proximidades do terminal remoto, a diferença de tempo entre a chegada da onda e a sua reflexão no terminal remoto é tão pequena que não podem ser detectadas de forma separada (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010). Diante desta limitação, a seguinte questão é colocada: se a localização de faltas não precisa ser realizada em tempo real, existem metodologias que analisem um intervalo de tempo mais abrangente, ao invés de tentar identificar apenas as primeiras frentes de onda? A resposta é sim, sendo justificada com os seguintes trabalhos.

O trabalho proposto por (SWIFT, 1979) analisa o conteúdo espectral nas tensões e correntes produzidas por faltas em linhas de transmissão. No momento da ocorrência da falta

serão induzidas componentes de alta frequência nos sinais devido ao fenômeno das OV, estas frequências terão valores entre um máximo e um mínimo, dependendo do valor da impedância de fonte:

$$f_{\min} = \frac{v}{4x}, \quad (2.37)$$

$$f_{\max} = \frac{v}{2x}, \quad (2.38)$$

onde:

x —→ Distância até a falta;

v —→ Velocidade da onda (aproximadamente 300000 km/s).

O trabalho de (SWIFT, 1979) indica claramente que existe um conteúdo espectral de alta frequência característico para a localização da falta, porém o autor considera estas frequências como fontes de ruído que afetam diretamente o funcionamento dos relés baseados na impedância. Este trabalho forneceu indícios sobre como projetar filtros adequados para acondicionar os sinais usados nos relés daquele tempo.

De acordo com (BO; JOHNS; AGGARWAL, 1997), a partir de 1995 começaram a existir importantes avanços na área de proteção baseadas na detecção de componentes de alta frequência, os quais mostraram ser insensíveis ao tipo de falta, seu valor de resistência, ângulo de início e parâmetros da fonte do sistema. Assim, (BO; JOHNS; AGGARWAL, 1997) apresentam uma nova metodologia baseada na detecção das frentes de onda para localizar faltas, com a característica particular de utilizar um sistema de filtragem para detectar apenas a faixa de AF. Já (BO; WELLER; REDFERN, 1999) descreve o método de forma mais completa utilizando sinais de tensão provenientes de um transformador capacitivo e sendo testado em um sistema de três cargas pontuais repartidas em uma linha de transmissão. Os erros associados à localização da falta se mostraram diretamente proporcionais à frequência de amostragem utilizada, enquanto que em situações práticas se mostra principalmente afetado por ruídos de fundo ou efeito corona.

Em 1999, (MAGNAGO; ABUR, 1999) identificam o grande potencial das técnicas de alta frequência na LDF em sistemas de distribuição e desenvolvem um método para identificar a lateral faltosa em um sistema radial ramificado, onde posteriormente se aplica algum método baseado na impedância para determinar a distância até a falta. O método utiliza a TWD para decompor o sinal medido em várias escalas, calculando depois a energia associada a cada escala de acordo com:

$$s = [WTC_i^T \times WTC_i], \quad (2.39)$$

onde:

- s → Energia associada aos coeficientes das escalas;
 WTC_i → Coeficiente *wavelet* da escala i .

O valor calculado por meio da equação (2.39) é comparado com uma base de dados de energias, obtidas mediante simulações de faltas sobre o sistema em questão. O ramal faltoso é considerado aquele cuja energia calculada mediante simulações coincide com a determinada pelas medições. Apesar de ser este um grande avanço, a necessidade de conhecer detalhadamente o sistema para realizar as simulações significa um grande custo na obtenção dos dados, os quais sendo erróneos produziriam resultados não satisfatórios. Além disso, se a configuração do sistema mudar, todas as simulações devem ser realizadas novamente, implicando um grande custo de tempo.

A proposta de (BORGHETTI *et al.*, 2006) também consiste em identificar o ramal faltoso em um sistema de distribuição radial, porém usando um método determinístico, baseado na TWC dos sinais de tensão. Este trabalho não indica como detectar a ocorrência da falta, sendo preciso combinar esta abordagem com alguma outra para detectar o transitório e gravar digitalmente a forma da onda.

Assumindo uma topologia de alimentador principal com algumas laterais, como a ilustrada na Figura 7, são identificados distintos caminhos onde pode percorrer uma onda.

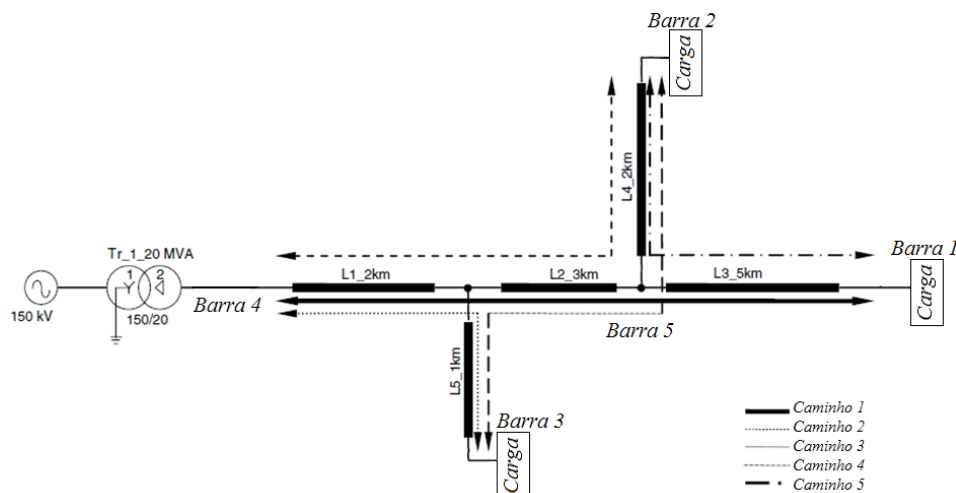


Figura 7. Sistema de distribuição de energia elétrica radial. Fonte (BORGHETTI *et al.*, 2006)

Para cada caminho corresponde um comprimento L_p , que combinado com a velocidade de onda para algum modo determinado (v_i) e um coeficiente n_p irá definir uma frequência característica para esse percurso, conforme:

$$f_{p,m} = \frac{v_i}{n_p \cdot L_p}. \quad (2.40)$$

Cada extremidade é caracterizada por um determinado coeficiente de reflexão de tensão. As extremidades onde é conectado um transformador podem ser consideradas como circuitos abertos, cujo coeficiente de reflexão é de +1; as extremidades correspondentes a uniões entre duas ou mais linhas são caracterizadas por ter coeficientes de reflexão negativos; o coeficiente de reflexão da extremidade onde ocorre a falta é considerado -1, pois a falta terá valores muito baixos em comparação com a impedância característica da linha à montante da falta. Contudo, dependendo do sinal dos coeficientes existentes entre duas extremidades, o valor n_p será 2 quando tiver o mesmo sinal ou 4 quando possuir sinais distintos.

Com base na equação (2.40) e as considerações acima citadas, a cada barra do sistema serão associadas duas frequências, uma no caso de existir uma falta na barra (f_{CF}) e outra no caso contrario (f_{SF}). O espectro do sinal transitório de tensão devido à ocorrência de uma falta em uma das barras do sistema, estará constituído por máximos locais nas frequências f_{SF} , características às barras sem falta, com um outro máximo correspondente na frequência f_{CF} , característica da barra faltosa. Para analisar este espectro, o autor aplica a TWC aos sinais digitais de tensão medidos durante a falta utilizando uma WM tipo Morlet¹¹, calculando posteriormente a energia correspondente a cada escala, como foi mostrado em (2.39). Cada escala é relacionada com uma frequência em Hz correspondente à frequência central da função *wavelet* escalada, gerando uma relação de energia-frequência. Os valores picos desta relação energia-frequência são agora utilizados em lugar do espectro para identificar a barra faltosa, obtendo-se resultados mais precisos.

A maximização dos coeficientes *wavelet* está relacionada à similaridade entre o sinal e a WM, portanto (BORGHETTI *et al.*, 2008) utiliza a primeira parte do sinal transitório para construir a WM e obter desta maneira grandes melhorias na identificação das frequências características. Já (BORGHETTI, *et al.*, 2010) apresenta um método para diminuir o erro associado à estimação da distância, o qual consiste em medir a diferença de tempo existente entre dois máximos locais dos CW na volta da frequência característica, recalculando a frequência característica como:

¹¹ De acordo com (OLIVEIRA, 2007) esta *wavelet* apresenta as melhores propriedades de preenchimento do plano tempo-frequência com relação a todas as *wavelets* contínuas.

$$fc = \frac{1}{\Delta t}. \quad (2.41)$$

A Figura 8 mostra como exemplo uma situação na qual foi detectada uma frequência característica de 2,162 MHz. Neste exemplo, é realizada uma análise dos CW na faixa de $\pm 0,25$ MHz na volta desta frequência que permite identificar um tempo de 0,4425 μ s entre os máximos locais, o qual corresponde a uma frequência de 2,26MHz diminuindo desta maneira o erro.

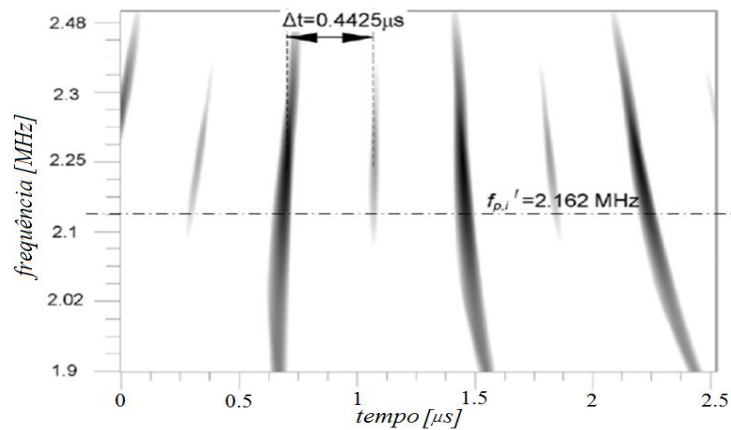


Figura 8. Superfícies de níveis dos coeficientes *wavelet* utilizada para melhorar a estimativa da frequência característica. Fonte (BORGHETTI, *et al.*, 2010).

2.4 CONSIDERAÇÕES

Nesta revisão bibliográfica foram apresentados os trabalhos e publicações mais relevantes sobre diferentes métodos de LDF em SEP, desenvolvidos ao longo de mais de meio século. Por mostrarem-se pouco sensíveis aos tipos e resistências de falta, é possível verificar que os métodos de OV apresentam vantagens em relação aos métodos baseados na impedância aparente. Além disso, os métodos de alta frequência mostram-se insensíveis ao ângulo de incidência e tipo de falta, possibilitando identificar facilmente os ramais faltosos pela análise do conteúdo espectral de tensões e correntes. Assim, no seguinte capítulo será descrita uma metodologia proposta para detectar transitórios e determinar a distância da falta em uma linha de transmissão.

3 METODOLOGIA UTILIZADA

A revisão apresentada no Capítulo 2 mostrou uma classificação geral das metodologias para LDF junto com a evolução dos métodos baseados no fenômeno das OV e AF. Neste capítulo será apresentada a proposta para localizar barras faltosas em sistemas de distribuição radiais realizada por (BORGHETTI *et al.* 2006; BORGHETTI *et al.* 2008; BORGHETTI *et al.* 2010), a qual será estendida para localizar faltas em linhas de transmissão. A proposta de (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011) servirá para detectar a ocorrência das faltas, complementando a abordagem de localização.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente nas usinas e subestações dos SEP é comum a presença de oscilógrafos para a monitoração das grandezas elétricas como correntes e tensões (MORETO; ROLIM, 2010). As medições realizadas por estes equipamentos são armazenadas em forma digital e podem ser utilizadas para resolver o problema de LDF. A abordagem proposta por (BORGHETTI *et al.* 2006; BORGHETTI *et al.* 2008; BORGHETTI *et al.* 2010) foi desenvolvida para localizar uma barra faltosa em um sistema de distribuição radial e nesta dissertação é proposta uma extensão dessa abordagem para a determinação da distância da falta em uma LT, a partir de sinais de tensão gravados em um oscilógrafo digital.

A determinação do transitório eletromagnético devido à ocorrência de uma falta é um dado fundamental para a aplicação da metodologia de LDF proposta por (BORGHETTI *et al.* 2006; BORGHETTI *et al.* 2008; BORGHETTI *et al.* 2010). Porém, estes trabalhos partem da consideração que o momento da ocorrência da falta é conhecido, deste modo a metodologia de LDF é complementada com a proposta de (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011) para detectar o instante da ocorrência da falta.

3.2 DETECÇÃO DO INSTANTE DE FALTA

Os dispositivos digitais de medição registram os sinais de tensão em tempo real, entrando no modo de gravação somente quando uma condição anormal é detectada. Um método que determine o instante de ocorrência da falta e habilite o modo de gravação dos sinais se faz necessário. As faltas causam distorções na forma de onda de tensão e corrente com respeito às condições pré-falta, tais como a mudança das magnitudes e ângulo de fase. Consequentemente a determinação do instante em que se inicia o transitório devido à falta

comumente é realizado por comparação das amostras atuais com amostras do passado, (PHADKE; THORP, 1988; MACÊDO; COURRY, 2003; BENMOUYAL; MAHSEREDGIAN, 2001). Neste trabalho será utilizado o algoritmo proposto por (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011), que permite monitorar as três fases por meio de um sinal a partir da transformação de Park¹. A transformação de Park permite relacionar variáveis em um marco de referência estático com um marco de referência rotatório, encontrando sua principal aplicação na análise de máquinas elétricas, convertendo indutâncias variáveis, para indutâncias constantes em uma referência rotativa com velocidade síncrona (KUNDUR, 1994).

Como mostrado na Figura 9, os sinais de entrada no bloco de detecção são as tensões de fase em função do tempo ($v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$), realizando a transformação de Park serão obtidas as tensões zero, direta e em quadratura ($v_0(t)$, $v_d(t)$, $v_q(t)$). Tanto a componente de eixo direto como em quadratura podem ser usadas para detectar transitórios, entretanto será utilizada somente a tensão de eixo direto para detectar o momento inicial do transitório, de acordo ao trabalho de (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011).

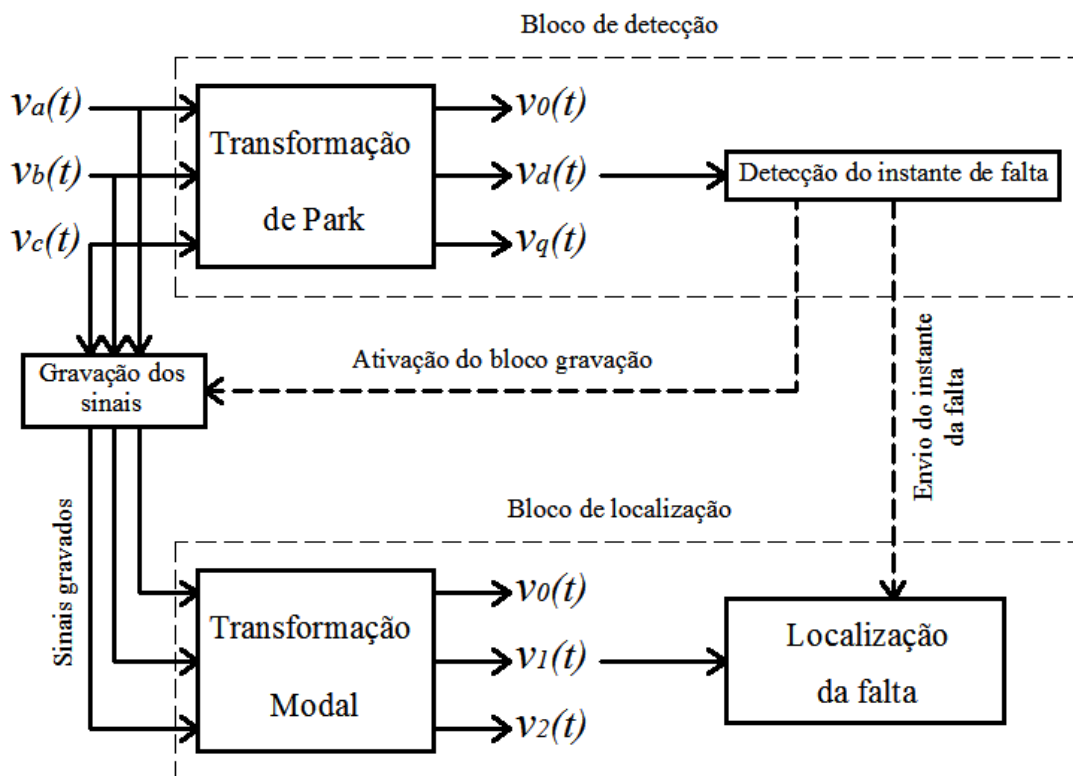


Figura 9 Diagrama da transformada de Park e do bloco de detecção de transitórios.

¹ O nome de Transformada de Park foi adotado devido à consagração do trabalho realizado por R. H. Park, que desenvolveu uma teoria generalizada para análise de máquinas elétricas rotativas (PARK, 1929).

Segundo (KUNDUR, 1994), a transformada de Park permite converter as variáveis de fase de acordo com:

$$\begin{bmatrix} v_0(t) \\ v_d(t) \\ v_q(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos(\omega_r t) & \cos\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\omega_r t) & \sin\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

onde:

- ω_r \longrightarrow Frequência de referência, indicando a velocidade angular do marco de referência [rad/s];
- $v_0(t)$ \longrightarrow Tensão zero [V];
- $v_d(t)$ \longrightarrow Tensão de eixo direto [V];
- $v_q(t)$ \longrightarrow Tensão de eixo em quadratura [V].

Conforme (3.1), sendo as tensões de fase senoidais com frequência ω_r e desfasadas em 120° , as tensões v_d e v_q estarão compostas apenas por uma componente DC. Ao existir uma componente de frequência diferente de ω_r em uma das tensões de fase, os espectros das tensões v_d e v_q terão componentes de frequência além da componente DC. A partir da tensão v_d esta característica é usada para detectar transitórios que caracterizam às faltas.

Segundo (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011), a detecção da falta é realizada através do coeficiente de diferença,

$$c_{dif}(n) = \frac{v_d(n) - v_d(n-1)}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

onde:

- v_d \longrightarrow Tensão no eixo direto;
- n \longrightarrow Número da amostra;
- Δt \longrightarrow Período de amostragem;
- c_{dif} \longrightarrow Coeficiente de diferença.

Quando não existem componentes de frequências distintas de ω_r , este coeficiente possui valores nulos, do contrario existem oscilações em v_d e v_q que causarão um c_{dif} diferente

de zero. Devido à existência de ruídos e pequenas diferenças em ω_r identificadas na prática, o c_{dif} não chegará a ser zero em condições normais precisando da determinação de algum limiar (k). Ainda, obtém-se uma detecção mais robusta utilizando o $(c_{dif})^2$, já que os coeficientes relacionados com condições normais serão mantidos com um valor baixo, enquanto os relacionados com transitórios de alta frequência serão amplificados (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011).

3.3 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PELO MÉTODO DE ALTAS FREQUÊNCIAS

Conforme analisado no Capítulo 2, de acordo com Borghetti *et al.* (2006) cada barra em um sistema de distribuição radial se encontra caracterizado por um determinado coeficiente de reflexão de tensão, incluindo o ponto faltoso. Estendendo este conceito a uma LT, são considerados apenas dois terminais e o ponto da falta.

O sinal analisado provirá da transformação modal exposta na revisão do Capítulo 2. No caso de linhas simétricas ou totalmente transpostas é possível utilizar a matriz de Clarke² como matriz de transformação modal:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

onde:

v_0 → Tensão de modo 0;

v_1 → Tensão de modo 1;

v_2 → Tensão de modo 2.

Para a análise de transitórios considerando linhas aéreas com um plano de simetria vertical é possível utilizar a transformação de Clarke sem erros significativos (PRADO *et al.*, 2005; FARIA; MENDEZ, 1997). Por conseguinte neste trabalho será utilizada a tensão de modo 1 segundo a equação (3.3) de acordo ao utilizado em (BORGHETTI, *et al.*, 2010).

As componentes de alta frequência induzidas devido à ocorrência de uma falta terão valores característicos segundo:

$$f_{CT} = \frac{v_i}{n_p \cdot x}, \quad (3.4)$$

² A transformação de Clarke também é conhecida como transformação $\alpha\beta\gamma$, serve para levar os valores de fase para um marco de referência estático ortogonal.

onde:

- f_{CT} → Frequência característica teórica;
- x → Distância até a falta;
- v_i → Velocidade da onda no modo i , aproximadamente 300.000 km/s;
- n_p → Coeficiente que depende dos valores relativos entre os coeficientes de reflexão dos terminais local e remoto.

Conforme a Figura 10 e a Tabela 1, o coeficiente n_p poderá assumir valores iguais a 2 ou 4, segundo sejam os valores dos coeficientes de reflexão de tensão (ρ_{RV}) nas barras do sistema (BORGHETTI *et al.*, 2006).

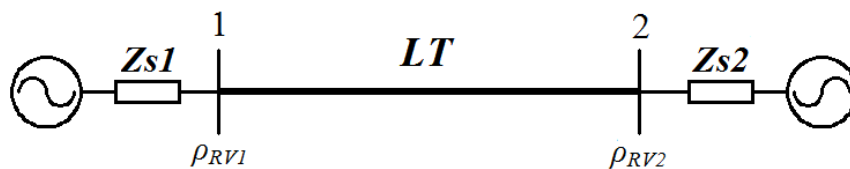


Figura 10. Sistema de transmissão monofásico entre duas barras.

Tabela 1. Relação entre ρ_{RV1} , ρ_{RV2} e n_p .

ρ_{RV1}	Terminal	ρ_{RV2}	Terminal	n_p
Local		Remoto		
+1		-1		4
-1		+1		4
+1		+1		2
-1		-1		2

De acordo com (SWIFT, 1979), se os valores dos coeficientes de reflexão se encontram no intervalo $-1 \leq \rho_{RV} \leq +1$, o valor de n_p poderá assumir outros valores dentro do seguinte intervalo: $2 \leq n_p \leq 4$, dando lugar a uma faixa de frequências entre um máximo e um mínimo conforme:

$$f_{CT\max} = \frac{v_i}{2 \cdot x}, \quad (3.5)$$

$$f_{CT\min} = \frac{v_i}{4 \cdot x}. \quad (3.6)$$

Neste trabalho o coeficiente de reflexão do ponto faltoso é considerado próximo a -1, pois a resistência de falta terá valores muito baixos em comparação com a impedância característica da linha, e o ponto de monitoração com um coeficiente de reflexão igual a 1, já que a impedância de curto-circuito do sistema pode ser considerada maior em relação à linha, assim para este caso n_p será 4. Esta consideração corresponde a um sistema com baixa capacidade de curto-circuito, de acordo com um elevado valor do SIR³ (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 1999).

A partir dos sinais de tensão gravados após a detecção de uma falta, é possível identificar a frequência característica utilizando a energia de cada escala da TWC. Visando ressaltar as frequências características devidas à falta e minimizar as que não interessam, a WM utilizada na transformação é inferida do próprio sinal analisado, finalmente a distância de falta pode ser determinada isolando x na equação (3.4).

3.3.1 Construção da *Wavelet Mãe*

A maximização dos CW está relacionada à similaridade entre o sinal e a WM, portanto é possível uma identificação mais eficiente da frequência característica utilizando parte do sinal transitório como WM (BORGHETTI *et al.* 2008). Para usar uma função como WM esta deve cumprir com as condições de admissibilidade (MALLAT; 2008), possuindo um valor médio igual a zero e suporte compacto⁴ no tempo.

Sendo $v[t]$ um sinal discreto do transitório a ser analisado (tensão do modo 1), obtém-se $v_w[t]$ como parte de $v[t]$, desde a ocorrência da falta até o tempo correspondente à mínima frequência esperada, este tempo pode ser obtido segundo:

$$T_s = \frac{1}{f_{c_{\min}}}. \quad (3.7)$$

A Figura 11 ilustra o processo usando um sinal de tensão.

³ O *Source Impedance Ratio* (SIR) indica a relação entre a impedância de fonte do sistema e a impedância da linha, definido matematicamente da seguinte forma: $\left| \frac{Z_S}{Z_L} \right|$.

⁴ Uma função possui suporte compacto se a mesma é definida em um espaço limitado e fechado, muitas vezes definido como “suporte” de um certo conjunto A.

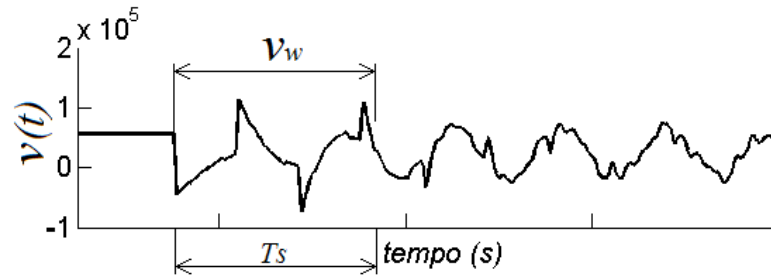


Figura 11 Sinal de tensão e segmento que será utilizado como WM

A Figura 12 mostra o sinal $v_w[t]$ normalizado com respeito ao seu valor máximo absoluto e deslocado para atingir a condição de valor médio igual à zero através de:

$$v_{wn}[t] = \frac{v_w[t] - \bar{v}_w[t]}{\max[|v_w[t]|]}, \quad (3.8)$$

onde $\bar{v}_w[t]$ representa o valor médio do sinal e 'max' o valor máximo.

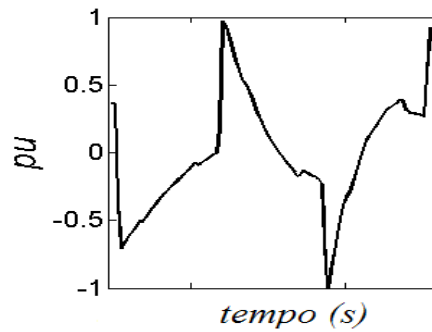


Figura 12 Sinal pronto para gerar a Wavelet Mãe.

Posteriormente, a WM é construída como uma série de sucessivas repetições da função $v_{wn}[t]$ multiplicadas por um decaimento exponencial, conforme:

$$\psi_1[t] = \left\{ \sum_{q \in \mathbb{N}} [v_w[t + qTs] + v_w[t - qTs]] \right\} e^{-\tau t^2}, \quad (3.9)$$

onde:

$$v_{wn}[t] = \begin{cases} v_{wn}[t] & 0 \leq t \leq Ts \\ 0 & t < 0; t > Ts \end{cases} \quad (3.10)$$

$q \longrightarrow 1, 2, 3, \dots, Q;$

$\tau \longrightarrow$ Constante de decaimento,

e Q é escolhido segundo o seguinte critério:

$$Q = \left\lfloor \frac{Nf}{N} \right\rfloor, \quad (3.11)$$

onde:

- Nf \longrightarrow Número de amostras do sinal a ser analisado $v[t]$;
 N \longrightarrow Número de amostras do fragmento para construir a WM $\bar{v}_w[t]$.
 $\lfloor x \rfloor$ \longrightarrow Função chão, $\max \{m \in \mathbb{Z} | m \leq x\}$.

Desta forma, finalmente uma WM similar à mostrada na Figura 13 é obtida:

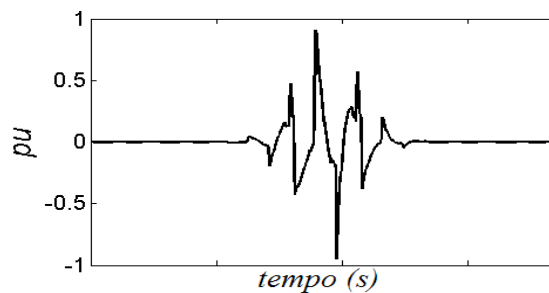


Figura 13 Wavelet Mãe finalizada

A WM que foi gerada no procedimento anterior não possui uma expressão matemática, devendo ser utilizada a interpolação para realizar as dilatações e contrações segundo escalas arbitrárias. De acordo com (CLAASEN; MECKLENBRÄUKER, 1983), esta interpolação pode ser realizada a partir da seguinte equação:

$$\psi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \psi_1[n \cdot \Delta t] \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\Delta t}(t - n \cdot \Delta t)\right)}{\frac{\pi}{\Delta t}(t - n \cdot \Delta t)} \quad (3.12)$$

onde:

- Δt \longrightarrow Período de amostragem;
 n \longrightarrow Número de amostra (número natural);
 t \longrightarrow Valor de tempo a ser interpolado (número real);
 ψ_1 \longrightarrow Wavelet mãe discreta;
 $\psi(t)$ \longrightarrow Wavelet mãe contínua;

Utilizando a interpolação é possível converter a função discreta em contínua, possibilitando realizar a TWC sem inconvenientes. Para realizar a construção destes passos se realiza uma interpolação da WM para cada escala a ser analisada, arranjando os resultados em

uma matriz denominada pela letra W . As linhas desta matriz correspondem às escalas e as colunas aos valores de tempo.

3.3.2 Análise tempo-frequência

Para analisar o transitório de tensão devido à falta e identificar a frequência característica, a TWC é aplicada utilizando a WM inferida do próprio sinal. A TW de uma função v resulta nos CW, e segundo (MALLAT, 2008) esta operação pode ser escrita como um produto de convolução:

$$C(a, u) = v * \bar{\psi}_a(u), \quad (3.13)$$

onde C são os coeficientes dependentes da escala (a) e o deslocamento (u), e:

$$\bar{\psi}_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{-t}{a} \right). \quad (3.14)$$

O produto de convolução (3.13) pode ser expressa no domínio da frequência:

$$C(a, u) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \hat{v}(\omega) \cdot \hat{\bar{\psi}}_a(\omega) \right\}, \quad (3.15)$$

onde \mathcal{F}^{-1} indica a transformada inversa de Fourier, mostrando que a TW funciona como a função de transferência de um filtro passa-faixas.

Para realizar a operação indicada por (3.15) se trabalha sobre a matriz de *wavelets* escaladas W e o sinal discreto v [t]. Primeiramente se realiza a operação (3.14) para cada linha da matriz W obtendo a matriz \bar{W} , logo se utiliza a Transformada Rápida de Fourier (TRF) para cada linha, obtendo a matriz $F\bar{W}$. Efetuando a TRF do sinal se realiza a operação (3.15), resultando na matriz C que representa a distribuição dos CW no plano escala-tempo, possibilitando uma visualização em três dimensões como se ilustra na Figura 14.

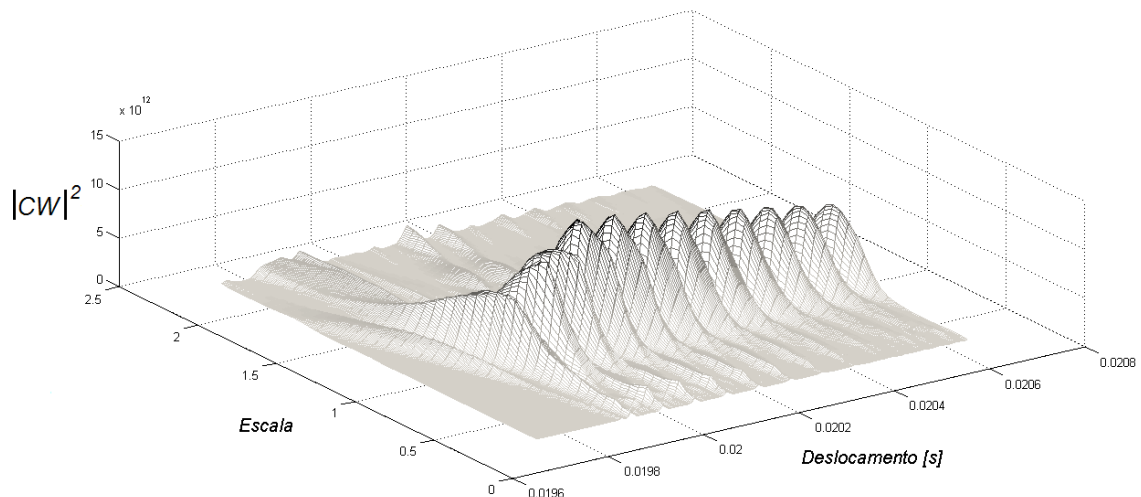


Figura 14 Gráfico em três dimensões do módulo quadrado dos coeficientes *wavelet* em função da escala e o deslocamento.

Visando identificar a frequência característica a partir da matriz C , a energia em função da escala é calculada de acordo com:

$$E[a] = \sum_{n=0}^{N-1} (C[a, u])^2, \quad (3.16)$$

onde:

$N \longrightarrow$ Número de colunas de C .

A expressão (3.16) indica a influência de cada escala no sinal, analisando o máximo absoluto desta função se identifica a escala característica. Para isolar a distância da equação (3.4) se deve estimar a frequência correspondente à escala característica, dada pela frequência pico da TF da função *wavelet* da escala característica. (Máximo da TF da linha correspondente à escala característica na matriz W).

De acordo com (BORHETTI *et al.* 2010), a frequência característica será corrigida medindo o tempo existente entre os máximos locais dos CW na volta da frequência característica, recalculando a frequência como:

$$fc = \frac{1}{\Delta t}. \quad (3.17)$$

Assim, na Figura 15 se indica com uma linha de traços a escala característica que possibilita realizar a correção descrita em (3.17).

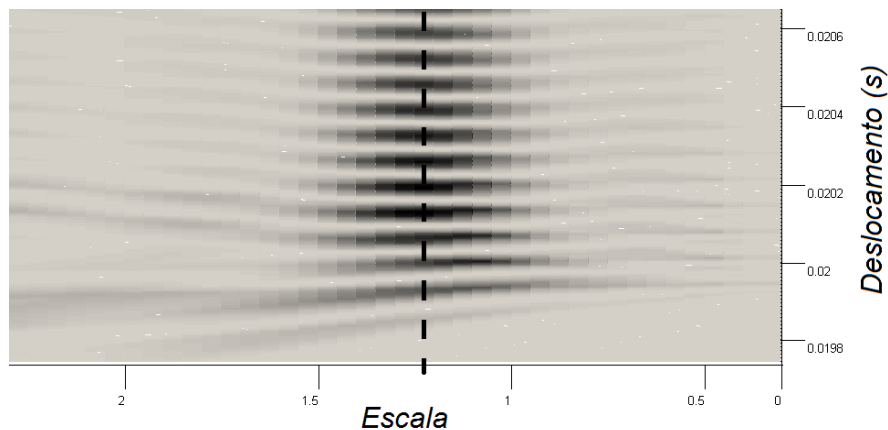


Figura 15. Vista superior da Figura 14 indicando o plano escala-deslocamento, as cores mais escuras indicam coeficientes *wavelet* maiores.

3.4 FLUXOGRAMA COMPLETO

Todas as operações indicadas acima são resumidas nas seguintes ilustrações. A Figura 16 mostra o fluxograma para realizar a detecção do instante de ocorrência da falta. A Figura 17 mostra os passos a seguir para determinar a distância da falta utilizando os sinais de tensão do modo 1 e o instante de falta obtido na detecção (n), o tempo T_s corresponde ao período da mínima frequência esperada devido à ocorrência de uma falta (frequência característica de uma falta ao final da linha).

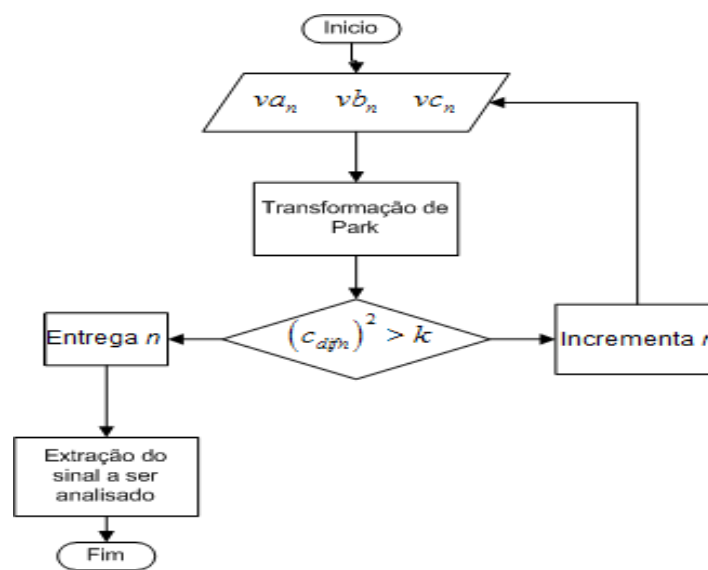


Figura 16. Fluxograma para detecção do instante de falta.

As variáveis de entrada são as tensões de fase atuais indicadas com o subíndice n , as quais são utilizadas para realizar a transformação de Park e calcular o c_{dif} mediante a tensão de eixo direto e uma amostra do passado. O $(c_{dif})^2$ é comparado com um limiar k para determinar se existe ou não um transitório de alta frequência característico das OV devido às faltas. No caso de uma falta ser detectada o algoritmo devolve o valor de n e começa o processo de gravação dos sinais de tensão, no caso contrário, passa a analisar o próximo instante incrementando o valor de n .

Neste trabalho o valor de k foi determinado em forma empírica visando não detectar os sinais de ruído inerentes da simulação. Este valor depende do período de amostragem Δt e possui o valor indicado por:

$$k = \frac{0,2}{(\Delta t)^2}. \quad (3.18)$$

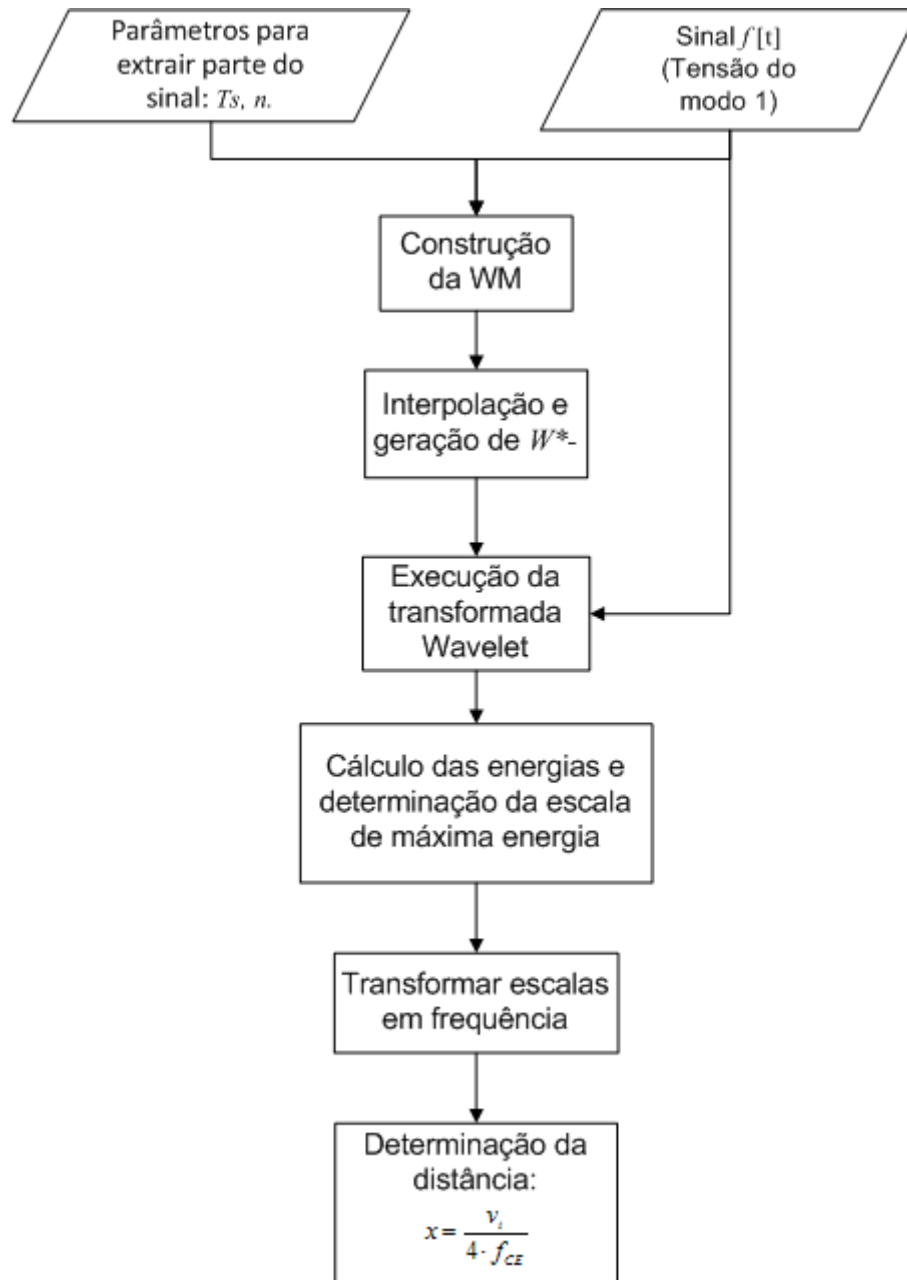


Figura 17. Fluxograma geral para LDF.

3.5 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foi apresentada e estendida para sistemas de transmissão uma metodologia usada na literatura para localizar barras faltosas em sistemas de distribuição, a qual se baseia na TWC utilizando parte do próprio sinal analisado para construir a WM. Também foi apresentado um método para detectar o início do transitório devido à falta baseado na transformação de Park, o qual se mostrou interessante por monitorar três fases com apenas um sinal. O Capítulo seguinte apresentará os estudos de caso, avaliando a robustez do método para localizar faltas em uma LT composta por diferentes configurações topológicas e transposições.

4 ESTUDOS DE CASOS E RESULTADOS

No Capítulo 3 foi apresentada uma metodologia para LDF em LT baseada na identificação da frequência característica f_c de um sinal de alta frequência utilizando a TWC, destacando as equações e a estrutura do método. Este Capítulo mostra os estudos de caso a partir de três sistemas de subtransmissão baseados na metodologia apresentada no Capítulo 3, para isto são descritos primeiramente os modelos dos componentes do sistema utilizado, seguido da apresentação e análise de resultados.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS ANALISADOS

Foram modelados três sistemas teste de 69 kV mediante o programa ATP (BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007), utilizando uma combinação entre a interface gráfica ATPDraw e a modificação dos cartões de entrada. Os estudos de caso são baseados em três sistemas de transmissão radiais que alimentam uma carga equilibrada de 13 MVA, conforme a Figura 18, onde Z_{cc} é a impedância de curto-circuito, LT é a linha de transmissão trifásica e Z_{cg} é a impedância da carga.

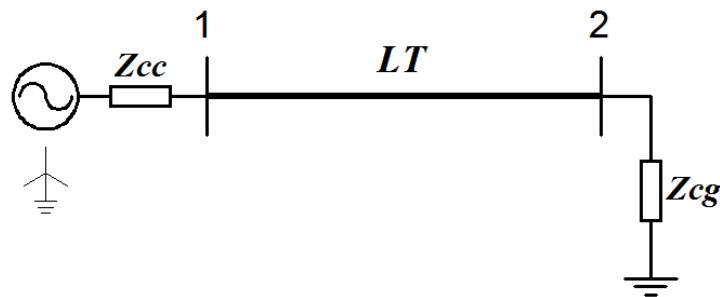


Figura 18. Diagrama unifilar dos sistemas elétricos analisados.

A ocorrência de uma falta em um SEP inicia um evento transitório eletromagnético devido ao fenômeno das OV. Os eventos transitórios são representados por faixas de frequências características que vão desde poucos hertz até vários mega-hertz. A modelagem mais adequada é desenvolvida para responder à faixa específica das frequências que caracterizam o fenômeno a ser estudado. O ATP possui vários modelos pre-estabelecidos, os quais para este trabalho foram escolhidos e ajustados segundo (MARTINEZ-VELASCO, 2010).

4.1.1 Sistema Equivalente e Gerador de Energia

O sistema equivalente encarregado de fornecer energia à carga foi modelado como uma fonte de tensão trifásica ideal e uma impedância de curto-circuito (Z_{cc}) associada, esta impedância foi calculada segundo:

$$Z_{cc} = \frac{(U_L)^2}{S_{cc}}, \quad (4.1)$$

onde:

U_L → Tensão de linha em kV;
 S_{cc} → Potência de curto-circuito em MVA.

4.1.2 Linhas de Transmissão

A abordagem proposta para LDF consiste em detectar frequências características produzidas pelo fenômeno das OV, é por isso que o modelo deve levar em conta a natureza distribuída dos parâmetros da linha. Os parâmetros elétricos da linha dependem tanto da constituição física desta, como sendo os materiais empregados e a disposição dos condutores, quanto da frequência de excitação do sistema. Conseqüentemente neste trabalho será utilizado um modelo de linha com parâmetros distribuídos e dependentes da frequência, denominado comumente como “modelo Jmartí”, desenvolvido em (MARTI, 1982). Este modelo aproxima as impedâncias características e constantes de propagação por meio de funções racionais, representando a limitação da utilização de uma matriz de transformação modal constante para uma mudança de base dos dados resultados do domínio modal para o domínio das fases. Uma matriz de transformação modal constante é uma aproximação para linhas não simétricas, entretanto para linhas aéreas com simetria horizontal esta consideração não apresenta erros significativos (PRADO *et al.*, 2005; FARIA, MENDEZ, 1997).

Diferentes modelos de LT se encontram disponíveis no ATP e neste trabalho foram utilizados cinco blocos “Jmartí” nomeados com as letras C, G, HJL, MO e PR. A topologia de cada trecho de linha é mostrada na Figura 19 e faz parte dos dados de entrada dos blocos de simulação empregados no ATPDraw. A linha é constituída somente de um tipo de condutor, cujos dados físicos são apresentados na Tabela 2. O restante das informações necessárias para configurar os blocos das linhas é mostrado na Tabela 3, e as matrizes de impedância e admitância unitárias dos diferentes trechos se apresentam no Apêndice.

Tabela 2. Dados do condutor utilizado no modelo.

Condutor	Raio [mm]	Resistência [Ω/km]	Reatância própria 60Hz [Ω/km]
CAA QUAIL 2/0 AWG	5,675	0,5773	0,41

Tabela 3. Valores dos parâmetros utilizados no ATP para modelar as linhas.

Parâmetro	Valor
Resistividade do solo	200 Ωm
Frequência inicial	0,005 Hz
Décadas	10
Pontos por décadas	20
Frequência de transformação modal	30 kHz
Frequência da rede	60 Hz

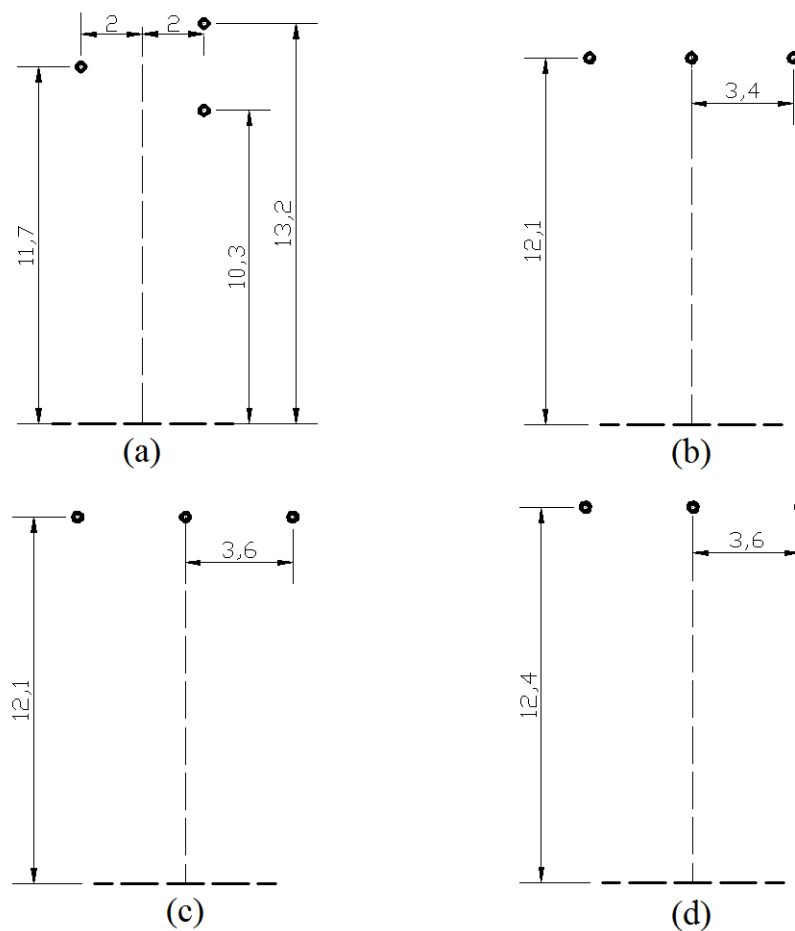


Figura 19. Topologia das linhas utilizadas na modelagem, medidas em metros: a) Topologia da linha C. b) Topologia da linha G. c) Topologia das linhas HJL e MO. d) Topologia da linha PR

4.1.3 Carga

Para sistema teste, a carga conectada ao final da linha consiste em um conjunto de impedâncias constantes ligadas em estrela com valores de $485+j69 \Omega$. No programa ATP, esta impedância resulta em uma corrente aproximada de 110 A no terminal 1, conforme Figura 18, resultando em uma potência média de 13 MVA.

4.1.4 Diagrama de Faltas

As faltas em LT podem ser definidas como uma falha total ou parcial no sistema que produz uma descontinuidade no fornecimento de energia elétrica. As faltas consideradas neste trabalho são as causantes de curto-circuitos e podem ser modeladas por meio da inserção de uma impedância relativamente baixa em um determinado ponto do sistema. De acordo com (GRAINGER; STEVENSON, 1996), os curto-circuitos nos SEP podem ser classificados como trifásicos, monofásico, bifásicos e bifásicos a terra, como se ilustra na Figura 20.

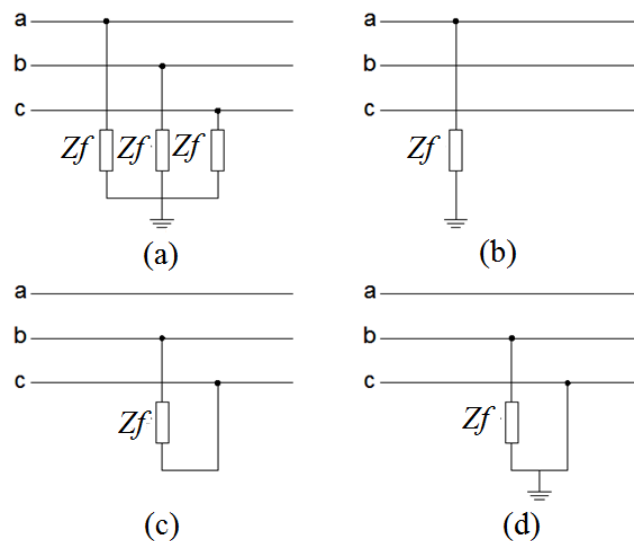


Figura 20. Diagrama de faltas: a) Falta trifásica; b) Falta monofásica; c) Falta bifásica; d) Falta bifásica a terra

Nos estudos de caso foram utilizadas quatro impedâncias de falta com valores resistivos de 0, 10, 20 e 30Ω .

4.2 SISTEMAS TESTE

Os estudos de caso foram efetuados com base em um sistema de subtransmissão real pertencente à Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D). Conforme

o diagrama unifilar da Figura 18, este sistema conecta a primeira barra denominada como CHA2, a um sistema de cargas localizado na barra 2, denominada como ARE(P-1). Com uma tensão nominal de linha de 69 kV, o sistema transmite uma potência média de 13 MVA através de 28,9 km. Neste trabalho foi utilizado o sistema original denominando-o como Sistema 3, e duas variações denominadas como Sistema 1 e Sistema 2. Os modelos de carga e faltas são iguais para todos os sistemas, como foram anteriormente descritos.

4.2.1 Sistema 1

Este sistema é igual ao original (Sistema 3) a menos do valor da impedância de fonte Z_{cc} , a qual foi calculada para uma potência de curto-circuito de 100 MVA. Esta impedância é calculada por (4.1), considerando sua parte resistiva como uma décima parte da reatância indutiva, chegando à seguinte matriz de impedâncias de curto-circuito Z_{cc} :

$$Z_{cc} = \begin{bmatrix} 4,7 + j47,6 & 0 & 0 \\ 0 & 4,7 + j47,6 & 0 \\ 0 & 0 & 4,7 + j47,6 \end{bmatrix} \Omega. \quad (4.2)$$

A Linha de Transmissão (LT) possui um comprimento de 28.9 km, sendo constituída por cinco trechos de linhas segundo as topologias mostradas na Figura 19 e três transposições de fases. A Figura 21 mostra o modelo do sistema realizado no ATPDraw, indicando a ligação entre os componentes do sistema mediante blocos representativos. Além disso, na Tabela 4 se mostra a sequência de ligação dos trechos de linhas, seus comprimentos e a localização das transposições.

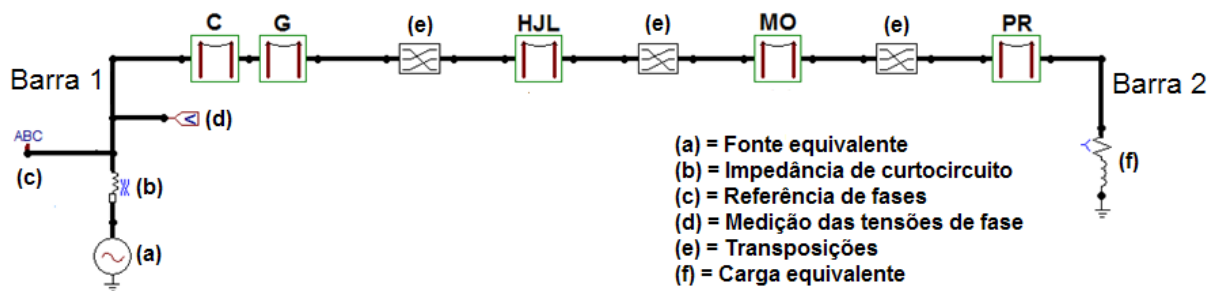


Figura 21. Interligação de blocos realizada no ATPDraw para simular os Sistemas 1 e 3.

Tabela 4. Comprimentos dos trechos de linhas para os Sistema 1 e 3

Trecho de Linha	Comprimento [km]
Barra 1	-
C	2,275
G	2,563
Transposição de fases	-
HJL	9,194
Transposição de fases	-
MO	9,169
Transposição de fases	-
PR	5,721
Barra 2	-

4.2.2 Sistema 2

Este sistema possui as mesmas características do Sistema 1 no que diz respeito à impedância de curto-circuito Z_{cc} , entretanto possui um comprimento de 60 km ao invés de 28,9 km, com oito trechos de linhas e seis transposições de fases. A Figura 22 ilustra o modelo utilizado no ATPDraw enquanto que na Tabela 5 se indicam os comprimentos dos trechos de linhas e o local das transposições.

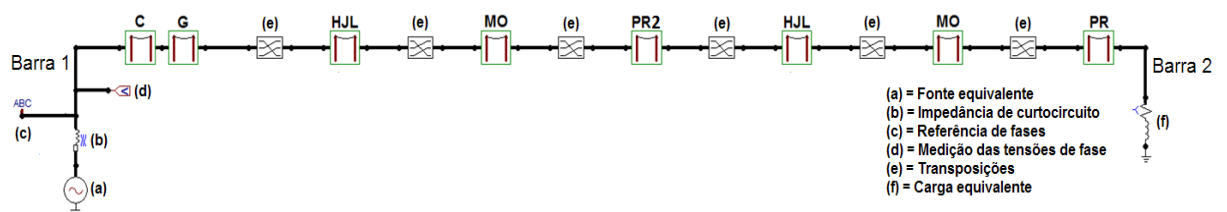


Figura 22. Interligação de blocos realizada no ATPDraw para simular o Sistema 2.

Tabela 5. Comprimentos dos trechos de linhas para o Sistema 2

Trecho de Linha	Comprimento [km]
Barra 1	-
C	2,275
G	2,563
Transposição de fases	-
HJL	9,194
Transposição de fases	-
MO	9,169
Transposição de fases	-
PR	10,721
Transposição de fases	-
HJL	9,194
Transposição de fases	-
MO	9,169
Transposição de fases	-
PR	7,715
Barra 2	-

4.2.3 Sistema 3

Este sistema foi modelado com os dados originais fornecidos pela CEEE-D, os quais são idênticos aos do Sistema 1, exceto pela impedância de curto-circuito Z_{cc} . Neste caso foi utilizada uma fonte de tensão constante de 69 kV (tensão de linha) em série com as seguintes impedâncias de sequência sub-transitórias:

$$Z_{S_0}'' = (1,576 + j5,878)\Omega \quad (4.3)$$

$$Z_{S_{\pm}} = (1,4192 + j7,878)\Omega \quad (4.4)$$

4.3 SIMULAÇÕES

Os três SEP acima descritos foram simulados utilizando o ATP, a modelagem foi realizada com a interface gráfica deste programa chamada de ATPdraw. Através desta interface o sistema em questão pode ser facilmente descrito pela interligação de blocos

representativos dos elementos até criar o modelo completo do sistema. No momento de executar a simulação se gera automaticamente um arquivo de entrada, utilizado pelo ATP para calcular as variáveis de interesse resultantes da simulação. Quando se utilizam modelos de linhas com parâmetros distribuídos, é importante que o passo de integração de tempo seja menor do que o tempo mínimo necessário para uma onda percorrer totalmente uma linha (definida por um bloco), é por isso que o passo de integração foi fixado em $0,5\mu\text{s}$.

As simulações resultaram em vetores de tensão em função do tempo, os quais foram posteriormente processados utilizando a ferramenta computacional Matlab[®] (The Mathworks, Inc., 1999). Mediante este programa foi possível utilizar a interpolação linear para amostrar os sinais resultantes das simulações com uma frequência de 500 kHz, cujo valor corresponde à frequência de amostragem do oscilógrafo. Após este processo de amostragem são testados os algoritmos de detecção e LDF para avaliar seus desempenhos através dos resultados obtidos.

Os resultados apresentados são resumidos a um valor de erro em função da distância, calculado de acordo com (ZIMMERMAN; COSTELLO, 2005) pela seguinte equação:

$$ed = \left| \frac{x_R - x_D}{L} \right| 100\%, \quad (4.5)$$

onde:

- x_R —→ Distância real à falta;
- x_D —→ Distância determinada pelo algoritmo de LDF;
- L —→ Comprimento total da linha.

Objetivando conter pelo menos dois ciclos da frequência mínima esperada, todos os estudos foram realizados em janelas de 1,04 ms a partir do instante de detecção da falta, utilizando sempre sinais de tensão provenientes do modo 1 (primeiro modo aéreo). Uma vez que a f_C foi determinada a partir do algoritmo de LDF, a distância de falta foi calculada mediante a seguinte equação:

$$x = \frac{v}{n_p \cdot f_C}, \quad (4.6)$$

onde f_C é determinada pela TF e pela TWC, o coeficiente n_p é igual a 4 e a velocidade de propagação v é considerada igual à velocidade da luz (300.000 km/s).

4.3.1 Sistema 1

Neste sistema foram simulados quatro tipos de faltas com quatro valores diferentes de resistências, cada falta foi situada em uma sucessão de seis pontos a partir da barra 1 mostrada na Figura 18 e foram aplicadas em forma individual. Depois foi variado o tempo de inserção da falta, também denominado ponto de incidência da falta, pela mudança do ângulo de fase da fonte de tensão. Os casos simulados encontram-se resumidos na Tabela 6.

Tabela 6. Resumo dos casos simulados no Sistema 1

Distância de falta desde a barra 1 [km]	Fases faltosas	Resistência de falta [Ω]	Ângulo de incidência [graus]
5			
10			
15	ABC; AC; BCT;	0; 10; 20; 30	0; 45; 90; 135; 180
20	CT		
25			
28,9			

Inicialmente, a detecção do instante da chegada das componentes de altas frequências foi realizada pelo algoritmo da transformação de Park. Posteriormente, a f_c foi determinada por duas abordagens objetivando comparação: pelo módulo máximo da TF e pela escala de máxima energia da TWC, utilizando a WM proposta.

4.3.2 Sistema 2

Neste sistema foram simuladas faltas trifásicas sólidas¹ localizadas em quatro pontos, segundo a Tabela 7. A frequência característica f_c também foi determinada utilizando o módulo máximo da TF e a escala de máxima energia da TWC com a WM proposta.

¹ São denominadas como faltas sólidas às faltas cuja impedância de falta é igual a zero.

Tabela 7. Resumo dos casos simulados no Sistema 2.

Distância de falta desde a barra 1 [km]	Fases faltosas	Resistência de falta [Ω]	Ângulo de incidência [graus]
15			
28,9	ABC	0	0
45			
60			

4.3.3 Sistema 3

Neste sistema foram simuladas faltas sólidas localizadas em uma sucessão de seis pontos contados a partir da barra 1 mostrada na Figura 18. Neste caso foi utilizada somente a TWC para a estimativa de f_c . Os casos simulados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resumo dos casos simulados no Sistema 3.

Distância de falta desde barra 1 [km]	Fases faltosas	Resistência de falta	Ângulo de incidência
5			
10			
15	ABC	0	0
20			
25			
28,9			

4.4 RESULTADOS DO SISTEMA 1

4.4.1 Utilização da Transformada de Fourier

Após a detecção, a f_c foi extraída como sendo a frequência correspondente ao módulo máximo da TF do sinal de tensão do modo 1. Para isso foi aproveitado o algoritmo da TRF disponível no Matlab[®], anulando a componente DC do espectro a fim de não interferir nos resultados. Variando o valor da resistência de falta e variando o tipo de falta foram registradas idênticas respostas, conseqüentemente foi necessária unicamente a Tabela 9 para mostrar todos os resultados. Nesta tabela se indicam as distâncias reais, as distâncias estimadas e os

erros calculados para todos os casos simulados com um ângulo de incidência das faltas de 0° . Os resultados da Tabela 9 são visualizados claramente por meio da Figura 23, onde são apresentados os erros calculados utilizando a expressão (4.2) em função da distância de falta real.

Tabela 9. Resultados para todos os tipos e resistências de falta.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
5	46,6	143
10	10,4	1,4
15	15,5	1,7
20	18,6	4,8
25	23,3	5,9
28,9	31,1	7,6

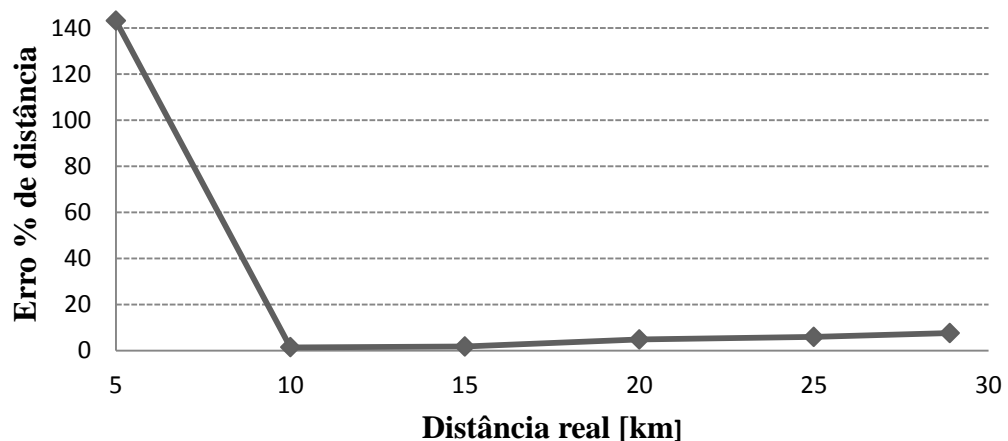


Figura 23. Erro % na distância utilizando a transformada rápida de Fourier, ângulo de incidência 0° .

4.4.2 Utilização da Transformada *Wavelet* Contínua

Os resultados apresentados foram alcançados mediante a f_C obtida a partir da aplicação do algoritmo de TWC explicado no Capítulo 3. Inicialmente f_C é determinada realizando uma TF da WM na escala de máxima energia e encontrando a frequência correspondente ao módulo máximo. Em segundo lugar, o valor desta frequência pode ser corrigido utilizando-se a diferença de tempo entre os módulos dos CW na escala de máxima energia, como se ilustra na Figura 25.

A determinação da WM a partir do sinal transitório pode ser efetuada com diferentes valores do parâmetro τ , o qual controla a variância da envolvente gaussiana. Na Tabela 10 e Figura 24 são mostrados os resultados com um τ de 2×10^{-4} e na Tabela 11 os resultados com um τ de 1×10^{-4} .

Tabela 10. Resultados para todos os tipos e resistências de falta, $\tau=2 \times 10^{-4}$.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
5	5,2	0,7
10	10,3	1,4
15	15,5	1,7
20	18,6	4,8
25	23,3	5,9
28,9	23,3	19,4

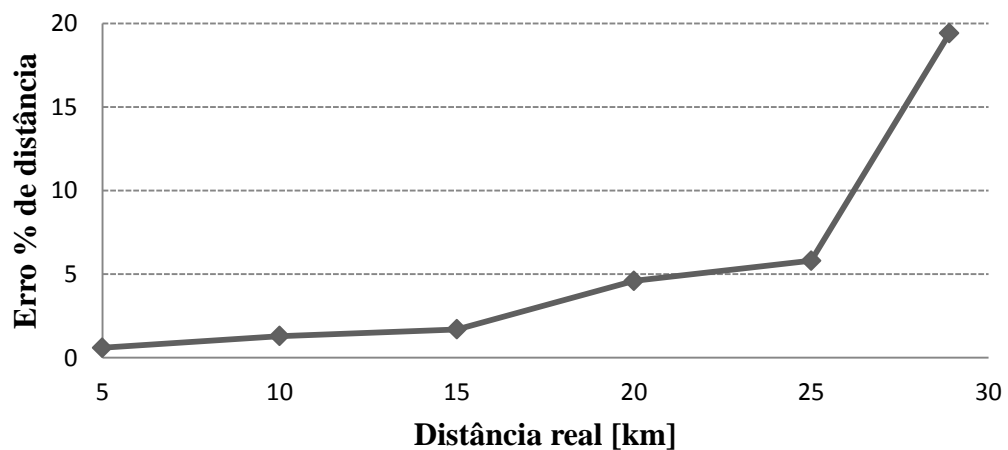


Figura 24. Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 0° , $\tau = 2 \times 10^{-4}$.

Tabela 11. Resultados para todos os tipos e resistências de falta, $\tau=1 \times 10^{-4}$.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
5	5,2	0,7
10	10,3	1,4
15	15,5	1,7
20	18,6	4,8
25	23,3	5,9
28,9	31,1	7,6

O valor τ de 1×10^{-4} apresentou erros menores para faltas localizadas no final da linha, de modo que este valor foi escolhido para analisar o restante dos casos simulados. Na Tabela 12 e Figura 26 apresentam-se os valores da Tabela 11 corrigidos, esta correção se realiza mediante a diferença de tempo Δt existente entre os módulos máximos dos CW localizados na escala de máxima energia.

Tabela 12. Resultados para todos os tipos e resistências de falta, com correções.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
5	5,1	0,35
10	9,9	0,35
15	15	0
20	19,5	1,7
25	24,9	0,35
28,9	28,8	0,35

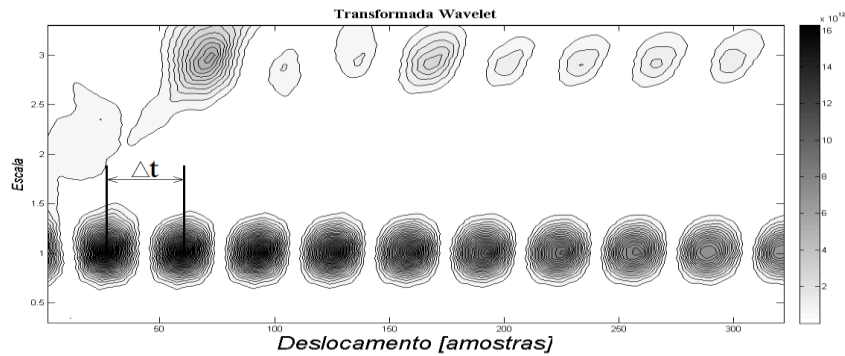


Figura 25. Curvas de nível do módulo ao quadrado da transformada *wavelet* para uma falta a 10 km.

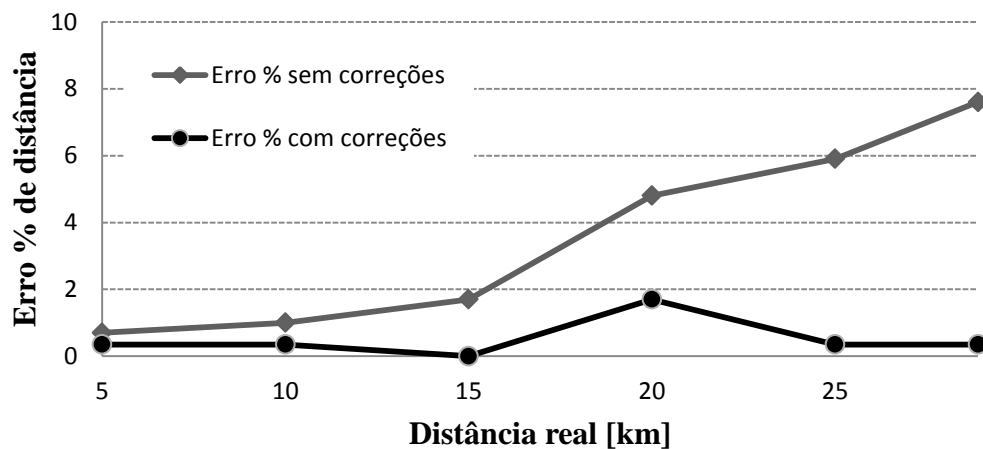


Figura 26. Erro % na distância utilizando a TWC, sem e com correções.

4.4.3 Utilização da Transformada *Wavelet* variando o ângulo de incidência da falta

A literatura menciona que uma das vantagens dos métodos de AF no que diz respeito aos demais é a sua insensibilidade ao ângulo de incidência da falta, para verificar esta afirmação foram inseridas faltas trifásicas sólidas com ângulos de 45, 90, 135 e 180 graus em relação à tensão da fase A.

Considerando um ângulo de incidência de 45°, na Tabela 13 são mostradas as distâncias de faltas determinadas pelo algoritmo sem as correções e na Tabela 14 os valores corrigidos. Na Figura 27 são apresentados os valores dos erros em função da distância de falta com e sem correções.

Tabela 13. Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 45°, sem correções.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % em distância
5	4,6	1,2
10	10,4	1,2
15	13,3	5,8
20	18,6	4,6
25	23,3	5,8
28,9	31,1	7,6

Tabela 14. Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 45°, com correções.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % em distância
5	4,8	0,7
10	9,9	0,35
15	14,4	2
20	19,5	1,7
25	24,3	2,4
28,9	28,2	2,4

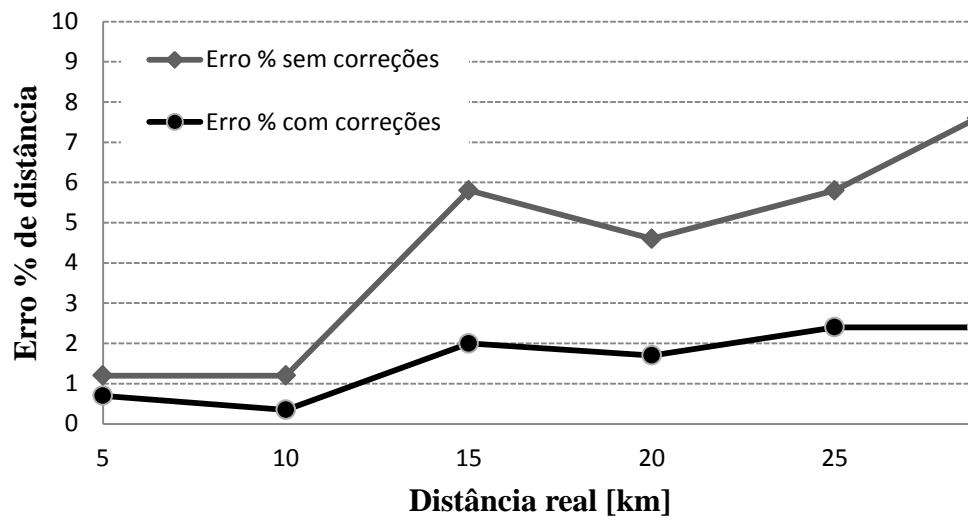


Figura 27. Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 45°, sem e com correções.

A Tabela 15, a

Tabela 16 e a Figura 28 apresentam os resultados para o ângulo de incidência de 90°.

Tabela 15. Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 90°, sem correções.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
5	4,9	0,3
10	33,3	80
15	15,5	1,9
20	18,6	4,6
25	23,3	5,8
28,9	31,1	7,6

Tabela 16. Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 90°, com correções.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
5	5	0
10	10,3	1
15	15	0
20	20,1	0,35
25	24,9	0,35
28,9	28,8	0,35

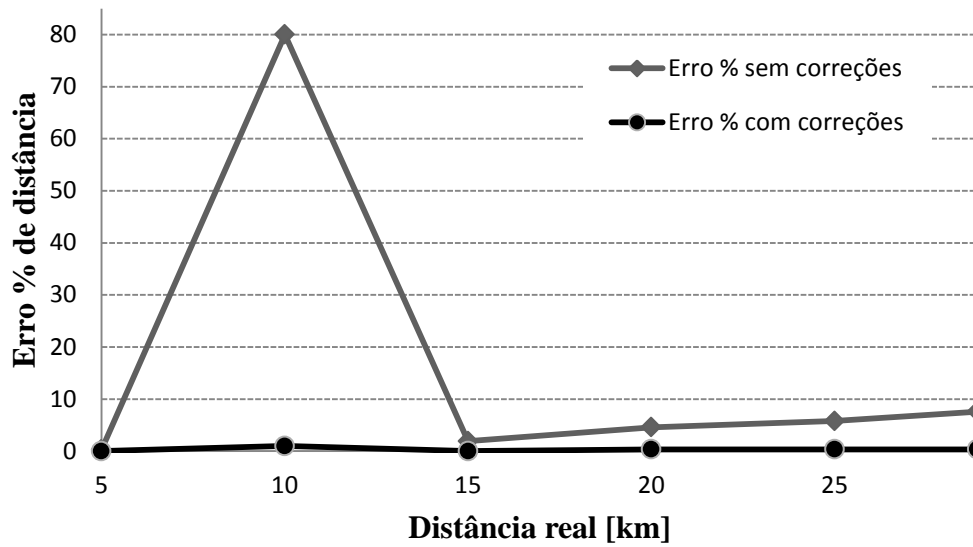


Figura 28. Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 90° , sem e com correções.

Os resultados obtidos para ângulos de incidência de 135° foram idênticos aos obtidos com um ângulo de 45° e os resultados com um ângulo de 180° foram iguais aos obtidos com um ângulo de 0° .

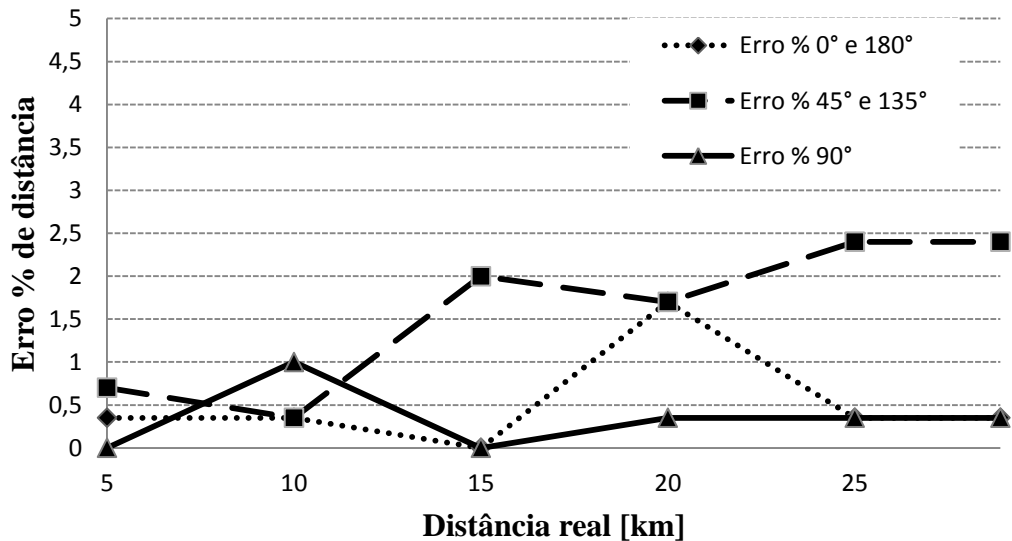


Figura 29. Erro % na distância utilizando a TWC para distintos ângulos de incidência da falta.

4.5 RESULTADOS DO SISTEMA 2

4.5.1 Utilização da Transformada de Fourier

A f_C foi determinada a partir do módulo máximo da TF do sinal utilizando o algoritmo de TRF. A Tabela 17 e a Figura 30 apresentam os resultados para faltas trifásicas sólidas, utilizando um ângulo de incidência da falta de 0° .

Tabela 17. Resultados para faltas trifásicas sólidas.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
15	15,5	0,8
28,9	31,1	3,7
45	46,6	2,7
60	46,6	22,3

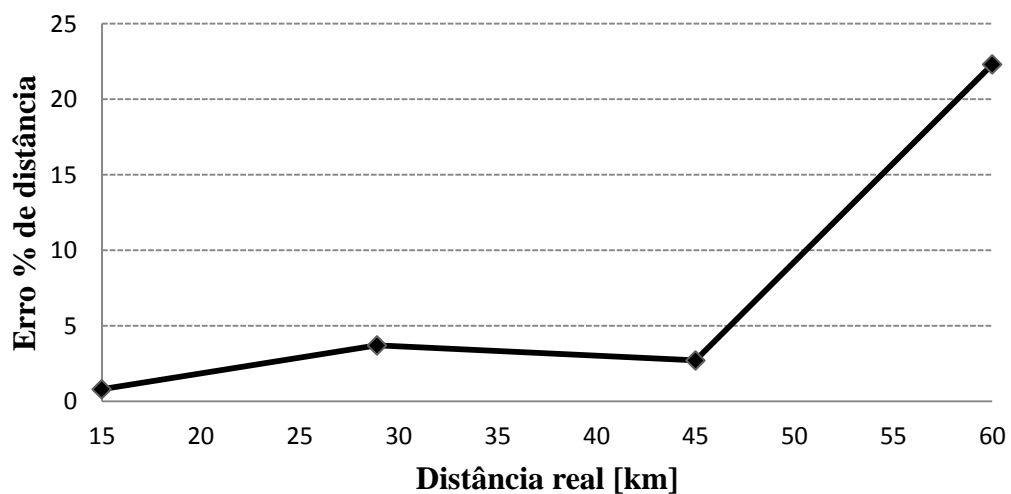


Figura 30 Erro % na distância utilizando a transformada rápida de Fourier, ângulo de incidência 0° .

4.5.2 Utilização da Transformada *Wavelet* Contínua

Neste caso foi determinada a f_C utilizando o algoritmo da TWC com um τ de 3×10^{-4} . A Tabela 18 e a Figura 31 mostram os resultados para faltas trifásicas sólidas.

Tabela 18 Resultados para faltas trifásicas sólidas, sem correções.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	Erro % na distância
15	15	0
28,9	30	1,8
45	45	0
60	60,1	0,2

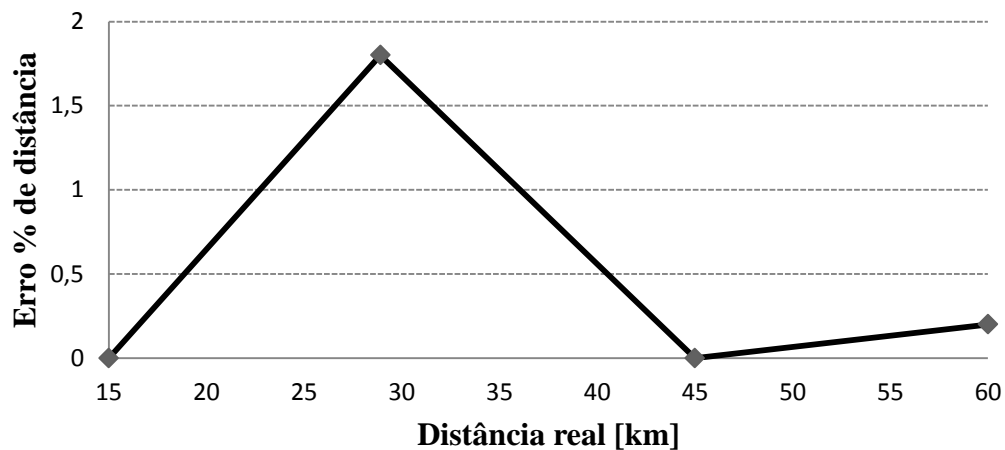


Figura 31. Erro % na distância utilizando a TWC, sem correções.

4.6 RESULTADOS DO SISTEMA 3

Este sistema é idêntico ao Sistema 1, porém possui outro valor de impedância de curto-circuito. Neste caso a f_C foi determinada unicamente pela TWC, sem analisar o caso empregando a TRF. A Tabela 19 e a Figura 32 mostram os erros obtidos na determinação da distância de falta mediante a correção da f_C . Ainda, na Tabela 19 é possível apreciar uma linha a mais que apresenta as frequências características estimadas.

Tabela 19. Resultados para faltas trifásicas sólidas, ângulo de incidência 0° , com correção.

Distância real [km]	Distância determinada [km]	f_C estimada [kHz]	Erro % na distância
5	4,8	15,625	0,7
10	8,4	8,928	5,5
15	12	6,25	10,4
20	16,5	4,545	12,1
25	21,6	3,472	11,8
28,9	24,9	3,012	13,9

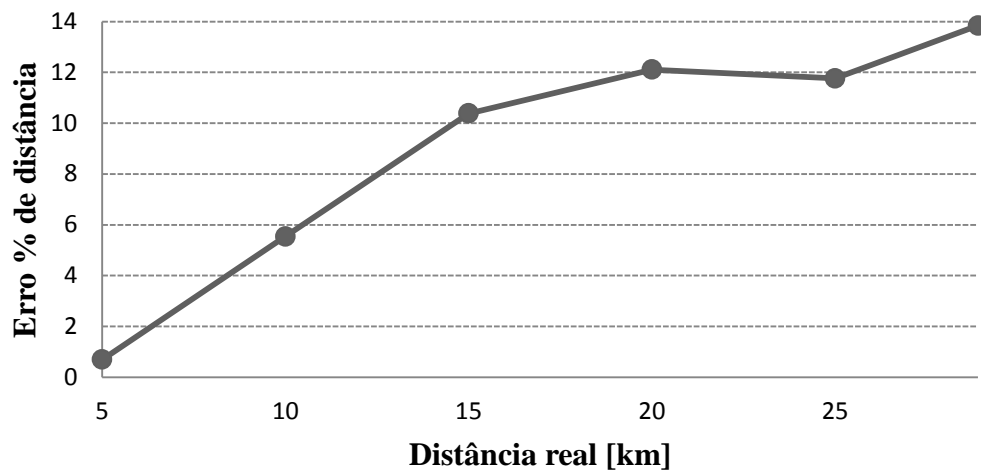


Figura 32. Erro % na distância utilizando a TWC, ângulo de incidência 0° .

4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No Sistema 1 foram simulados rigorosamente todos os tipos de faltas com o ângulo de incidência de 0° . No primeiro caso a f_c foi determinada como a frequência correspondente ao módulo máximo na TF realizada em uma janela de 1,04 ms a partir do tempo de detecção da falta. Os erros observados para faltas localizadas a 5 km possuem um valor elevado, conforme pode ser observado na Figura 23. Para analisar em forma mais detalhada as faltas ocorridas a 5 km, a Figura 33 mostra o módulo do espectro da tensão de modo 1 para uma falta trifásica sólida. É possível notar uma componente elevada na frequência de 1,6 kHz que causa as inferências errôneas. O seguinte valor máximo corresponde à frequência de 14,47 kHz representando uma distância de 5,18 km, o qual conduz a um erro de 0,6 %. O erro aumenta gradativamente conforme a distância vai aumentando, tornando-se considerável para faltas localizadas a 20 km, e acentuam-se mais para faltas a 25 km e 28,9 km.

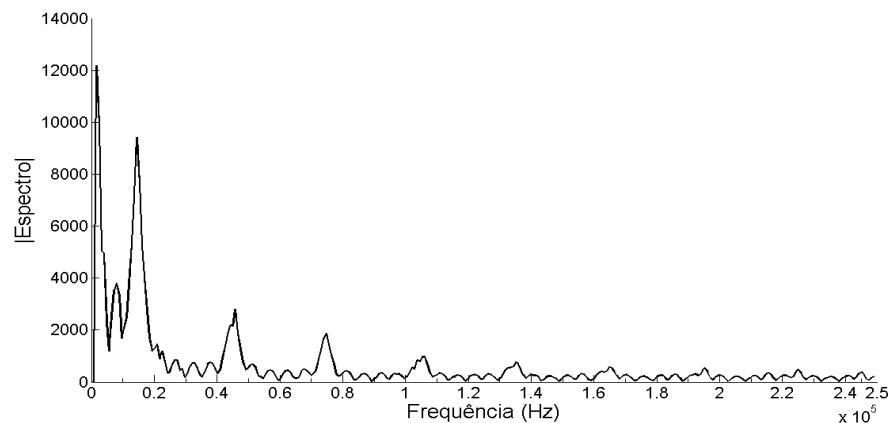


Figura 33. Módulo da transformada de Fourier da tensão modal 1 em uma janela de 1,04 ms, falta trifásica sólida a 5 km.

Para determinar a f_c no segundo caso foi utilizado o algoritmo baseado na TWC, utilizando-se dois valores de τ correspondentes a 2×10^{-4} e 1×10^{-4} . Verificou-se que para esse sistema é melhor usar o valor de 1×10^{-4} , pois apresentou melhores resultados. No caso da falta localizada a 5 km a utilização da TWC apresentou melhores resultados comparados com a TF e apesar de apresentar erros parecidos com a TF para os demais casos, a TWC permite realizar correções mediante a análise do gráfico dos CW. As correções efetuadas permitem uma diminuição considerável dos erros, como foi mostrado na Figura 26, o qual representa uma grande vantagem em relação à utilização da TF. Devido à invariância dos resultados no que diz respeito ao tipo de falta e resistência de falta, no último caso foram analisadas unicamente faltas trifásicas sólidas variando os ângulos de incidência. Para ângulos de incidência de 0° , 45° , 90° , 135° e 180° da fase A, todos os erros se mostraram menores do que 2,4 %, podendo concluir que o método é pouco sensível ao ângulo de incidência da falta.

O erro obtido na determinação da falta localizada a 60 km é elevado, na Figura 34 é analisado o módulo da TF para uma falta trifásica sólida nesse ponto. A f_c visualizada na Figura 34 é de 1,608 kHz e não parece ser consequência da existência de componentes DC elevadas. Por outro lado a utilização da TWC possibilitou reduzir os erros cometidos para um valor aceitável, inclusive sem recorrer às correções.

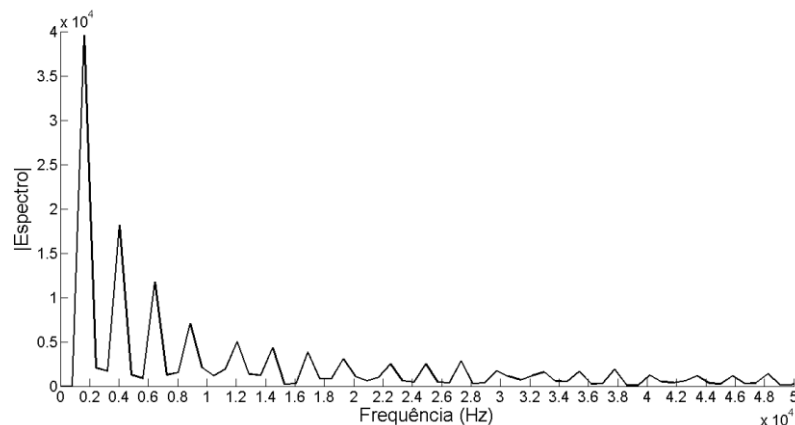


Figura 34. Módulo da transformada de Fourier da tensão modal 1 em uma janela de 1,04 ms, falta trifásica sólida a 60 km.

No Sistema 3 utilizou-se apenas a TWC para identificar a f_c , entretanto foram registrados erros particularmente elevados. Visando analisar a origem destes resultados errôneos, na Figura 35 são apresentadas as curvas correspondentes às frequências máximas e mínimas esperadas dadas pelas seguintes equações:

$$f_{\max} = \frac{300.000 \text{ km/s}}{2 \cdot x_R}, \quad (4.7)$$

$$f_{\min} = \frac{300.000 \text{ km/s}}{4 \cdot x_R}, \quad (4.8)$$

onde x_R é a distância real à falta. As f_C identificadas pela abordagem da TWC também são apresentadas na Figura 35.

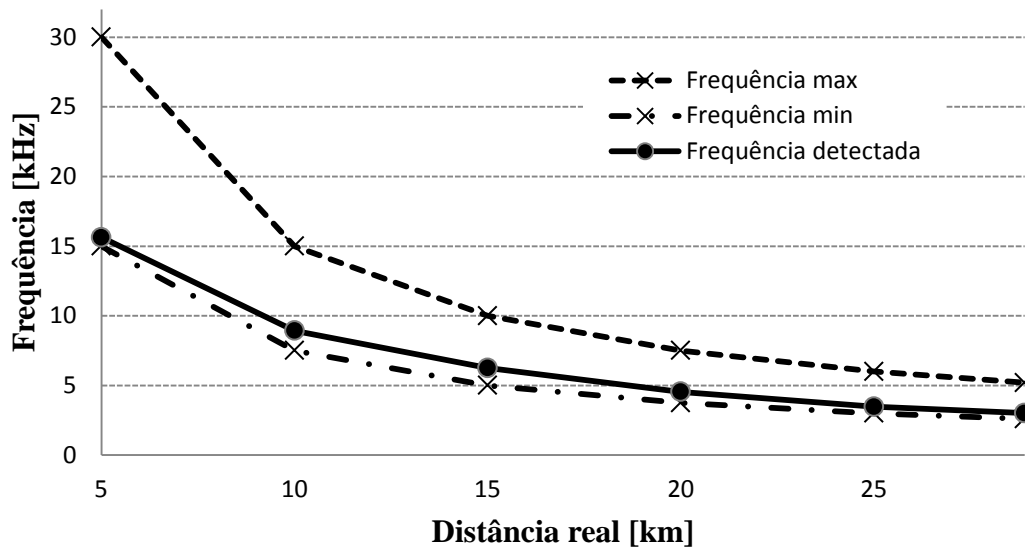


Figura 35 Erro % na distância utilizando a TWC depois da detecção, com correções.

A curva obtida pelas frequências características determinadas mediante a TWC está localizada justamente entre as curvas de frequência mínima e máxima. Utilizando a equação de distância em função da f_C :

$$n_p = \frac{300000 \text{ km/s}}{f_C \cdot x_R}, \quad (4.9)$$

é isolado o coeficiente n_p . Estes coeficientes são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20. Coeficiente n_p calculado para coincidir com x_R

Distância real [km]	f_C estimada [kHz]	n_p
5	15,625	3,84
10	8,928	3,36
15	6,25	3,2
20	4,545	3,3
25	3,472	3,45
28,9	3,012	3,44

O valor médio entre os coeficientes n_p calculados por (4.9) e apresentados na Tabela 20 é de 3,4. Utilizando este coeficiente ao invés do valor 4 proposto inicialmente, é possível diminuir consideravelmente os erros cometidos na determinação da distância, como se mostra na Tabela 21.

Tabela 21 Distâncias corrigidas

Distância determinada [km]	Erro % na distância
5,6	2
9,9	0,35
14,1	3,1
19,4	2
25,4	1,3
29,3	2

Este último resultado mostra que a impedância de curto-circuito do sistema tem uma influência sobre o coeficiente n_p .

5 CONCLUSÕES

Nos últimos anos, os avanços na tecnologia de aquisição de dados tornaram viável a utilização de ferramentas matemáticas avançadas para análise de sinais na resolução do problema de LDF. Do mesmo modo, a existência de oscilógrafos digitais nas subestações dos SEP se torna cada vez mais comum, fornecendo aos engenheiros a possibilidade de dispor imediatamente de um pacote de amostras de tensões e correntes em função do tempo. Este conjunto de dados pode ser armazenado e tratado com qualquer *software* que possibilite a sua análise, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência ou ambos. Neste sentido, os métodos de LDF baseados no fenômeno das OV tornaram-se interessantes nos últimos tempos, especialmente os fundamentados na análise tempo-frequência. .

Este trabalho apresentou uma revisão bibliográfica das principais técnicas de LDF em SEP, enfatizando o desenvolvimento histórico dos métodos baseados no fenômeno das OV e AF. Além disso, foi proposta uma extensão da abordagem de LDF para sistemas de distribuição radiais baseada em AF, desenvolvida em (BORGHETTI *et al.*, 2006; BORGHETTI *et al.*, 2008; BORGHETTI *et al.*, 2010), para determinar o instante e a distância de faltas em LT utilizando medições de um terminal. O conhecimento do instante de ocorrência da falta foi realizado utilizando o algoritmo apresentado em (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011), baseado na transformação de Park para determinar o instante de chegada das frentes de onda devido à falta.

Objetivando avaliar a metodologia de LDF proposta, foi modelado um sistema de transmissão real mediante o programa ATP, e os resultados das simulações foram processados com o MATLAB onde foram aplicados os algoritmos para detecção e LDF. Assim, após a análise dos resultados apresentados nesta dissertação, é possível realizar as seguintes conclusões respeito ao tópico abordado:

- A abordagem proposta em (BORGHETTI *et al.*, 2010) para localizar barras faltosas baseada na TWC utilizando uma WM inferida do próprio sinal analisado, pode ser estendida de uma forma simples para determinar a distância da falta em uma LT.
- O algoritmo de (LOPES; FERNANDES; NEVES, 2011) para detectar chegada de uma frente de onda devida a uma falta se mostrou eficiente, detectando todas as faltas e complementando adequadamente os resultados da metodologia de LDF. Este método se mostrou fácil de programar no computador,

apresentando a vantagem de utilizar apenas um sinal para monitorar as três fases.

- A utilização da TWC para detectar a f_C apresentou riqueza de detalhes pela inclusão do tempo nos resultados, permitindo realizar correções que diminuiriam consideravelmente os erros em respeito à determinação da f_C por meio da TF.
- Analisando os sinais de tensão no modo 1, o método mostrou resultados idênticos para todos os tipos e resistências de falta. No entanto, foi identificada uma leve influência com a mudança do ângulo de incidência da falta, porém se tratou de uma variação pequena que não se torna significativa.
- As f_C devidas às faltas foram afetadas pelo valor da impedância de fonte do sistema. Porém foi mostrado que a f_C poderia ser corrigida modificando o valor do coeficiente n_p .
- O algoritmo se mostrou eficiente em relação às diferentes configurações de LT, não precisando diferenciar entre faltas em uma ou outra metade da linha.
- O tipo de falta não parece ser uma variável representativa no método de LDF proposto.

5.1 CONTRIBUIÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

Como contribuições bibliográficas resultantes deste trabalho estão os seguintes artigos aceitos para publicação em congressos internacionais:

- IURINIC L. U.; BRETAS A. S.; GUIMARÃES E. S. Continuous-Wavelet Transform Fault Location Algorithm Inferred From Faulty Signal. In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010.
- IURINIC L. U.; BRETAS A. S.; GUIMARÃES E. S.; MARZEC D. P. Analysis of Single-ended Traveling-wave Fault-location based on continuous-wavelet transform. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 11, 2012, Birmingham. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A complexidade do tema tratado neste trabalho levou à inviabilidade temporal para abordar todos os fenômenos relacionados com a temática desta dissertação, por conseguinte são realizadas as seguintes sugestões para continuar com esta pesquisa:

- Deduzir a dependência que existe entre os valores de impedância de curto-circuito do sistema e a frequência característica devido a uma falta.
- Analisar a influência sobre a determinação da distância utilizando diferentes frequências de amostragem.
- Analisar a influência do carregamento do sistema na LDF pela abordagem proposta.
- Testar a metodologia de LDF proposta perante a ocorrência de faltas de alta impedância.
- Avaliação do algoritmo utilizando dados reais.
- Avaliar a possibilidade de utilizar outras WM e ferramentas de análise tempo-frequência, como por exemplo, a Transformada S ou distribuições quadráticas de tempo-frequência (como por exemplo as classes de Cohen).
- Avaliar a influência dos transformadores de tensão para aquisição das amostras.
- Realizar uma comparação com métodos baseados na impedância aparente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL, PRODIST. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8: qualidade de energia elétrica, Seção 8.0: Introdução e Conceituação.** Brasília, DF, 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_20122005_R0.pdf>. Acesso em: 01 Jan. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** Brasília, DF, 2002. Disponível em: <http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_1edicao/atlas/aspectos_institucionais/10_2_configuracao.html>. Acesso em: 15 Jun. 2011.

AIEEE COMMITTEE REPORT. Bibliography and Summary of Fault Location Methods. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and Systems, Part III**, New York, v. 74, n. 3, p.1423-1428, Jan. 1956.

BENMOUYAL, G.; MAHSEREDGIAN, J. A Combined Directional and Faulted Phase Selector Element Based on Incremental Quantities. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 16, n. 4, p.478-484, Oct. 2001.

BO, Z. Q.; JOHNS, A. T.; AGGARWAL, R. K. A Novel Fault Locator Based on the Detection of Fault Generated High Frequency Transients. In: DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 6., 1997, Nottingham. **Proceedings...** Nottingham: IET Digital Library, 1997. p.197-200.

BO, Z. Q.; WELLER, G.; REDFERN, M. A. Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, Nottingham, v. 146, n. 1, p.73-79, Jan. 1999.

BONEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative Transients Program: ATP-EMTP**, 2007. (Programa de computador)

BORGHETTI, A. et al. Continuous-Wavelet Transform for Fault Location in Distribution Power Networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients. **IEEE Transactions on Power System**, Piscataway, v. 23, n. 2, p.380-388, May 2008.

BORGHETTI, A. et al. Integrated use of Time Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Networks: theory and experimental validation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 25, n. 4, p.3139-3146, Out. 2010.

BORGHETTI, A. et al. On the Use of Continuous-Wavelet Transform for Fault Location in Distribution Power Systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Lausanne, v. 28, p.608-617, Mar. 2006.

CASTRO FERNÁNDEZ, R. M. de; ROJAS, H. N. D. An Overview of Wavelet Transforms Application in Power Systems. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 14., 2002, Sevilla. **Proceedings...** Sevilla: Courran Associates, 2002. p.1-7.

CLAASEN, T. A. C. M.; MECKLENBRÄUKER, W. F. G. The Aliasing Problem in Discrete-Time Wigner Distributions. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, Piscataway, v. 31, n. 5, p.1067-1072, Oct. 1983.

DE ARAÚJO A. E. A.; NEVES W. L. A. **Cálculo de Transitórios eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

ERIKSSON, L.; SAHA, M.; ROCKFELLER, G. D. An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote-end Infeed. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 104, n. 2, p.424-36, Feb. 1985.

FARIA, J. A. B.; MENDEZ, J. H. B. Modal Analysis of Untansposed Bilateral Three-phase lines; a perturbation approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 12, n. 1, p.497-504, Jan. 1997.

GIRGIS A. A.; HART, D. G.; PETERSON, W. A New Fault Location Technique for Two- and Three-terminal lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 7, n. 1, p.98-107, Jan. 1992.

GRACIA, J.; MAZÓN, A. J.; ZAMORA, I. Best ANN Structures for Fault Location in Singleand Double-Circuit Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n.4, p.2389-2395, Oct. 2005.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Analisis de Sistemas de Potencia**. Neucalpan de Juárez: McGraw-Hill, 1996.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE A. G. **Power System Relaying**. Baldock: Research Studies Press and John Wiley & Sons, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines**: Std. C37.114. New York: IEEE, 2005.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines**: Std. C37.113. New York: IEEE, 1999.

JONHS, A. T. New Ultra-high-speed Directional Comparison Technique for the Protection of E. H. V. Transmission Lines. **IEE Proceedings on Generation, Transmition and Distribution**, Piscataway, v. 127, n. 4, p.228-239, July 1980.

KUNDUR, P; **Power System Stability and Control**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.

LATHI, B. P. **Communication Systems**. New York: John Wiley, 1968.

LOPES, F. V.; FERNANDES JR. D.; NEVES, W. L. A. Fault Location on Transmission Lines Based on Travelling Waves, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 10., 2011, Delf. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2011.

MACÊDO, R. A.; COURY, D. V. Um Esquema Completo para Proteção Rápida de Linhas de Transmissão com o uso de Equações Diferenciais. **Revista Controle e Automação**, Campinas, v. 14, n. 2, p.176-183. abr-jun. 2003.

MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Fault Location Using Wavelets. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 13, n. 4, p.1475-1480, Oct. 1998.

MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. A New Fault Location Technique for Radial Distribution Systems Based on High Frequency Signals In: POWER & ENERGY SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1999. p.426-431.

MALLAT STÉPHANE. **A Wavelet Tour of Signal Processing**. Burlington: Academic Press, 2008.

MALLAT, S. G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the wavelet representation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, New York, v. 11, n. 7, p.674-693, July 1989.

MARTI, J. R. Accurate Modeling of Frequency-dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 101, n. 1, p.147-157, Jan. 1982.

MARTINEZ-VELASCO J. A. **Power System Transients: Parameter Determination**. New York: CRC, 2010.

MCLAREN, P. G.; CROSSLEY, P. A. Distance Protection Based on Travelling Waves. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 102, n. 9, p.2971-2983, 1983.

MIANO G.; MAFFUCCI A. **Transmission Lines and Lumped Circuits**. San Diego: Academic Press, 2001.

MORETO, M.; ROLIM, J. G. Análise Automática De Oscilografias em Sistemas Elétricos de Potência. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 21, n. 4, p.347-362, jul-ago. 2010.

NIAZY, I.; SADEH, J.; NIAZY, E. Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines Using Fault Clearing Transients Independent of Line Parameters, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 25., 2010, Hangzhou. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010. p.1-6.

NOVOSEL, D. et al. Unsynchronized Two-terminal Fault Location Estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 11, n.1, p.130-138, Jan. 1996.

OLIVEIRA, H. M. de. **Análise de Sinais para Engenheiros: uma abordagem via wavelets.** Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

PARK, R. H. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines, Generalized Method of Analysis – Part I. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v. 48, n. 3, p.716-730, July 1929.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems.** Baldock: Research Studies Press, 1988.

PRADO, A. J. et al. Non-transposed three-phase line analyses with a single real transformation matrix, In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2005, San Francisco. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2005. p.119-125.

ROBERTSON, D. C. et al. Wavelets and Electromagnetic Power System Transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 11, n. 2, p.1050-1058, Apr. 1996.

ROCKEFELLER, G. D. Fault Protection with a Digital Computer. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 88, n. 4, p.438-462, Apr. 1969.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. **Fault Location on Power Network.** New York: Springer-Verlag, 2010.

SHEHAB-ELDIN, E.; MCLAREN, P. Travelling Wave Distance Protection-problem Areas and Solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 3, p.894-902, July 1988.

SPOOR, D.; GUO ZHU, J. Improved Single-Ended Traveling-Wave Fault Location Algorithm Based on Experience With Conventional Substation Transducers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 3, p.1714-1720, July 2006.

STEVENS, R. F.; STRINGFIELD, T. W. A Transmission Line Fault Locator Using Fault-generated Surges. **AIEE Transactions**, New York, v. 67, p.1169-1179, July 1948.

STRINGFIELD, T. W.; MARIHAT, D. J.; STEVENS, R. F. Fault location methods for overhead lines. **Power Apparatus And Systems, Part III. Trans. Of The American Institute of Electrical Engineer.** New York, v. 76, p.518-530, Apr. 1957.

SWIFT, G. W. The Spectra of Fault-induced Transients, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 98, n. 3, p.940-947, May 1979.

TAKAGI, T. et al. Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 101, n. 8, p.2892-2898, Aug. 1982.

TAKAGI, T. et al. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: part 1 – fourier transformation method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 100, n.3, p.1316-1323, Mar. 1981.

THE MATHWORKS, **Matlab.** 1999. (Programa de computador)

THREEVITHAYANON, W.; HOONCHAREON, N. Fault Data Synchronization Using Wavelet for Improving Two-terminal Fault Location Algorithm, In: POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE, 2010, Chengdu. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010.

VITINS, M. A Correlation Method for Transmission Line Protection. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 97, n. 5, p.1607-1617, Sept. 1978.

ZANETTA, JR. L. G. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: USP, 2003.

ZIMMERMAN, K.; COSTELLO, D. Impedance-based Fault Location Experience, In: ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS, 58., 2005, Texas. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2005. p.211-226.

APÊNDICE: MATRIZES DE IMPEDÂNCIA E ADMITÂNCIA UNITÁRIAS DOS TRECHOS DE LINHAS UTILIZADOS

As matrizes de impedância e admitância para cada um dos trechos de linhas foram calculadas utilizando o programa LINE CONSTANT que forma parte do ATP. Estas são apresentadas a continuação para uma frequência de 60 Hz.

MATRIZES DE IMPEDÂNCIA

Trecho C

$$Z = 10^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,26 & 0,58 + j568 \\ 0,58 + j4,26 & 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,26 \\ 0,58 + j4,568 & 0,58 + j4,26 & 6,35 + j9,26 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

Trecho G

$$Z = 10^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,44 & 0,58 + j3,92 \\ 0,58 + j4,44 & 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,44 \\ 0,58 + j3,92 & 0,58 + j4,44 & 6,35 + j9,26 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

Trecho HJL e MO

$$Z = 10^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,4 & 0,58 + j3,88 \\ 0,58 + j4,4 & 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,4 \\ 0,58 + j3,88 & 0,58 + j4,4 & 6,35 + j9,26 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

Trecho PR

$$Z = 10^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,395 & 0,58 + j3,87 \\ 0,58 + j4,395 & 6,35 + j9,26 & 0,58 + j4,395 \\ 0,58 + j3,87 & 0,58 + j4,395 & 6,35 + j9,26 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

MATRIZES DE ADMITÂNCIA**Trecho C**

$$Y = j10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 2,8 & -0,425 & -0,609 \\ -0,425 & 2,7 & -0,459 \\ -0,609 & -0,459 & 2,73 \end{bmatrix} \frac{\Omega^{-1}}{km}$$

Trecho G

$$Y = j10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 2,69 & -0,569 & -0,288 \\ -0,569 & 2,78 & -0,569 \\ -0,288 & -0,569 & 2,69 \end{bmatrix} \frac{\Omega^{-1}}{km}$$

Trecho HJL e MO

$$Y = j10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 2,68 & -0,535 & -0,277 \\ -0,535 & 2,76 & -0,535 \\ -0,277 & -0,535 & 2,68 \end{bmatrix} \frac{\Omega^{-1}}{km}$$

Trecho PR

$$Y = j10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 2,673 & -0,553 & -0,278 \\ -0,553 & 2,76 & -0,553 \\ -0,278 & -0,553 & 2,68 \end{bmatrix} \frac{\Omega^{-1}}{km}$$