

Willian Eduardo Pereira da Silva

**Localização de Falhas em Sistemas de  
Transmissão de Alta Tensão em Corrente  
Contínua**

São Carlos

Novembro, 2017

Willian Eduardo Pereira da Silva

# **Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão em Corrente Contínua**

Trabalho apresentado com o objetivo de Conclusão no Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação

Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Titular Denis V. Coury

São Carlos  
Novembro, 2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S7161 Silva, Willian Eduardo Pereira da  
Localização de faltas em sistemas de transmissão de  
alta tensão em corrente contínua / Willian Eduardo  
Pereira da Silva; orientador Denis Vinicius Coury. São  
Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2017.

1. HVDC. 2. Localização de faltas. 3. Transformada  
Wavelet. 4. Ondas Viajantes. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Willian Eduardo Pereira da Silva

Título: "Localização de faltas em sistemas de transmissão de alta tensão em corrente contínua"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado

em 27 / 11 / 2017,

com NOTA 10,0 (dez , zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Titular Denis Vinicius Coury - Orientador - SEL/EESC/USP*

*Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - SEL/EESC/USP*

*Mestre Eduardo Augusto Pereira Gomes - Doutorando - SEL/EESC/USP*

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino**

# Resumo

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar faltas em linhas de transmissão em alta tensão e corrente contínua, do inglês *High Voltage Direct Current* (HVDC), com a finalidade de localizar, com maior precisão, onde tais faltas ocorreram.

Para isso, a principal ferramenta matemática utilizada é Transformada *Wavelet*. Tal transformada permite a análise de diferentes componentes de frequência ao longo do tempo. Quando ocorre um distúrbio de qualquer natureza na linha de transmissão causa-se uma alteração no regime de funcionamento resultando em aumento ou decréscimo de energia no local da falta, e portanto surgem as chamadas ondas viajantes que se propagam da origem do problema até os terminais da linha. Tais ondas carregam diversas informações que podem ser aproveitadas sob correta análise e a Transformada *wavelet* é uma ferramenta importante para se extrair algumas informações destas ondas.

Para realização das análises e estudos serão utilizadas simulações de curto-circuito em linhas de transmissão modeladas no *software Simscape Power System*. Os algoritmos de localização serão elaborados e executados no *software* MATLAB. A Transformada *Wavelet* aplicada na onda será utilizada através da Toolbox correspondente do MATLAB.

**Palavras-chave:** HVDC, Localização de faltas, Transformada Wavelet, Ondas Viajantes

# Resumo

This Work has as a main goal to analyze faults in transmission lines in high voltage direct current (HVDC), intending to locate, precisely, where the faults occurred.

For that, the main mathematic tool used is the Wavelet Transform. This transform allows the analysis of different components of frequency over time. When a disturbance of any nature occurs along the transmission line, it causes an alteration in the operating regime resulting in an increase or decrease of the energy in the point of the fault, and, therefore emerges the travelling waves that propagate from the origin to the line terminals. This waves carries some informations that can be useful if correctly analyzed and the Wavelet Transform is an important tool to extract the necessary data.

For the realization of the studies and analysis, simulations of short circuits in modeled transmissions lines using the software Simscape Power System will be utilized. The location algorithm will be elaborated and executed on the software MATLAB. The Wavelet Transform applied to the signal will be used through the corresponding MATLAB toolbox.

**Keywords:** HVDC, Fault Location, Wavelet Transform, Travelling Waves

# Sumário

	<b>Lista de tabelas</b>	<b>6</b>
	<b>Lista de ilustrações</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Relevância do Tema	13
1.2	Abordagem principal e objetivos	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	Localização de faltas	16
2.1.1	Técnicas propostas para transmissão em corrente alternada	16
2.1.2	Técnicas propostas para linhas de transmissão em corrente contínua	18
<b>3</b>	<b>SISTEMAS ELÉTRICOS ANALISADOS</b>	<b>20</b>
3.1	Configuração do Sistema de Potência em Corrente Alternada	20
3.1.1	Modelagem da linha de transmissão CA	21
3.1.1.1	Parâmetros do sistema elétrico	21
3.1.2	Variações nas simulações das condições de faltas aplicadas ao circuito de transmissão em corrente alternada	24
3.2	Sistema Elétrico Analisado em Corrente Contínua	26
3.2.1	Configuração do Sistema de Potência	26
3.2.2	Parâmetros do Sistema Elétrico	26
3.2.3	Variações nas simulações das condições de faltas aplicadas ao circuito de transmissão em corrente contínua	27
<b>4</b>	<b>LOCALIZAÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET - ABORDAGEM TEÓRICA</b>	<b>29</b>
4.1	Ondas viajantes	29
4.2	Transformada Wavelet	30
4.3	Fundamentos básicos do método de localização de faltas	35
4.4	Algoritmo Localizador de Faltas	36
4.4.1	Aquisição dos dados	36
4.4.2	Transformação modal	38
4.4.3	Aplicação da Transformada Wavelet	40
4.4.3.1	Aplicação em sistemas CA	40
4.4.3.2	Aplicação em sistemas CC	41

4.4.4	Formulação para localização de faltas com dados provenientes de dois terminais da linha . . . . .	42
4.4.5	Determinação dos tempos de reflexão . . . . .	43
4.4.6	Cálculo da distância da falta envolvendo dados de dois terminais . . . . .	44
4.4.7	Formulação para localização de faltas com dados provenientes de um terminal da linha . . . . .	45
4.4.8	Cálculo da distância de falta - Algoritmo utilizado neste trabalho . . . . .	47
<b>5</b>	<b>LOCALIZAÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET - TESTES E RESULTADOS OBTIDOS . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados obtidos - Linha de Transmissão em Corrente Alternada .</b>	<b>49</b>
5.1.1	Dados de 2 terminais . . . . .	49
<b>5.2</b>	<b>Resultados alcançados utilizando-se dados provenientes de dois terminais - Linha de Transmissão em Corrente Contínua (HVDC) . .</b>	<b>57</b>
<b>5.3</b>	<b>Resultados alcançados utilizando-se dados provenientes de um terminal - Linhas de Transmissão em Corrente Contínua (HVDC) . . .</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>6.1</b>	<b>Considerações gerais sobre o algoritmo de localização de faltas . . .</b>	<b>76</b>
<b>6.2</b>	<b>Continuidade dos Testes e Implementação . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>78</b>

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados obtidos por Yi-Zhuang(2002) . . . . .	17
Tabela 2 – Parâmetros de sequência positiva da linha de transmissão de 440 kV . . . . .	23
Tabela 3 – Parâmetros de sequência zero da linha de transmissão de 440 kV . . . . .	23
Tabela 4 – Parâmetros equivalentes de geração e dados do Gerador 1 - Barra D . . . . .	23
Tabela 5 – Parâmetros equivalentes de geração e dados do Gerador 2 - Barra E . . . . .	23
Tabela 6 – Parâmetros da linha de transmissão de HVDC . . . . .	27
Tabela 7 – Faltas fase-terra (A-terra) com Resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	50
Tabela 8 – Faltas fase-terra (B-terra) com Resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	51
Tabela 9 – Faltas fase-terra (A-terra) com Resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	51
Tabela 10 – Faltas fase-terra (B-terra) com Resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	51
Tabela 11 – Faltas fase-fase-terra (AB-terra) com Resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	53
Tabela 12 – Faltas fase-fase-terra (AC-terra) com Resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	53
Tabela 13 – Faltas fase-fase-terra (AB-terra) com Resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	53
Tabela 14 – Faltas fase-fase-terra (AC-terra) com Resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	54
Tabela 15 – Faltas trifásica-terra (ABC-terra) com Resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	54
Tabela 16 – Faltas trifásica-terra (ABC-terra) com Resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	54
Tabela 17 – Faltas Fase-fase (AB) . . . . .	55
Tabela 18 – Faltas Fase-fase (AC) . . . . .	55
Tabela 19 – Faltas Trifásica (ABC) . . . . .	55
Tabela 20 – Falta fase-fase-terra (AB-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ amostrada em 1MHz. . . . .	56
Tabela 21 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	59
Tabela 22 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	59
Tabela 23 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	59
Tabela 24 – Falta Polo Positivo-terra (P-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	60
Tabela 25 – Falta Polo Positivo-terra (P-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	60
Tabela 26 – Falta Polo Positivo-terra (P-terra) com resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	61
Tabela 27 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	62
Tabela 28 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	62
Tabela 29 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de $200\Omega$ . . . . .	63
Tabela 30 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	71

Tabela 31 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	71
Tabela 32 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $200\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	71
Tabela 33 – Falta Polo Positivo terra (P-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	72
Tabela 34 – Falta Polo Positivo terra (P-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	72
Tabela 35 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $200\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	72
Tabela 36 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de $0\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	73
Tabela 37 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de $20\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	73
Tabela 38 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de $200\Omega$ - Algoritmo com dados apenas do terminal local. . . . .	73

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Carga de demanda - SE/CO comparação entre 2015 e 2010. Fonte: ONS	13
Figura 2 – Comparação entre o custo total para LT's em Ca e CC em função do comprimento. Fonte: Adaptado de Setreus, Bertling, 2008. . . . .	14
Figura 3 – Representação do sistema elétrico estudado . . . . .	20
Figura 4 – Silhueta de torre da linha de 440 kV. Fonte: Silva, 2003. . . . .	22
Figura 5 – Transposição ideal da linha. Fonte: Silva, 2003. . . . .	22
Figura 6 – Formas de onda de tensão para falta fase-terra aplicada a 40km da barra E. . . . .	24
Figura 7 – Formas de onda de corrente para falta fase-terra aplicada a 40km da barra E. . . . .	24
Figura 8 – Ambiente de simulação da falta em Corrente Alternada . . . . .	25
Figura 9 – Sistema HVDC referência. Bertho Junior, 2014. . . . .	26
Figura 10 – Sistema HVDC utilizado nos testes, com linhas de parâmetro distribuído. Adaptado do sistema de Bertho Junior, 2014. . . . .	27
Figura 11 – Exemplificação do surgimento de ondas viajantes. Fonte: Silva, 2003 . .	29
Figura 12 – Diagrama de Lattice para a falta. Fonte: Silva, 2003 . . . . .	30
Figura 13 – Comparação gráfica entre as transformadas de Fourier e Wavelet. Fonte: Silva, 2003. . . . .	31
Figura 14 – Processo de decomposição de um sinal em AMR. Fonte: Silva, 2003. . .	31
Figura 15 – Wavelet de Haar. Fonte: Matlab . . . . .	33
Figura 16 – Decomposição com filtros Passa Alta e Passa Baixa . . . . .	34
Figura 17 – Funções wavelets e escalar de Dabeuchies tipo dois. Fonte: Matlab . . .	34
Figura 18 – Coeficientes filtro Passa Baixa e Passa Alta. Fonte: Matlab . . . . .	35
Figura 19 – Sistema elétrico e diagrama de Lattice. Silva, 2003. . . . .	35
Figura 20 – Fluxograma do algoritmo de localização de faltas CA. . . . .	37
Figura 21 – Fluxograma do algoritmo de localização de faltas CC. . . . .	38
Figura 22 – Componentes modais de tensão no terminal E em situação faltosa. . . .	40
Figura 23 – Sinal aproximação 1 (a1) do modo aéreo 1 no terminal E em situação faltosa. . . . .	41
Figura 24 – Sinal detalhe 1 (d1) do modo aéreo 1 no terminal E em situação faltosa.	42
Figura 25 – Sinal aproximação 1 (a1) da tensão do polo positivo no Conversor 1 em situação faltosa. . . . .	43
Figura 26 – Sinal detalhe 1 (d1) da tensão do polo positivo no Conversor 1 em situação faltosa. . . . .	43
Figura 27 – a) Falta ocorrida na segunda metade da linha. b) Falta ocorrida na primeira metade da linha. Fonte: Adaptada de SILVA (2003). . . . .	45

Figura 28 – Coeficientes wavelet para uma falta fase A-terra a 80 km da barra E, com resistência de falta de $1m\Omega$ e ângulo de incidência de $0^\circ$ . . . . .	49
Figura 29 – Comparação entre as diferentes resistências de faltas na estimativa de distância em faltas fase A-terra . . . . .	52
Figura 30 – Comparação entre as diferentes resistências de faltas na estimativa de distância em faltas fase B-terra . . . . .	52
Figura 31 – Comparação entre diversos tipos de falta envolvendo a fase A . . . . .	56
Figura 32 – Comparação falta AB-terra com frequências de amostragem de 120kHz e 1MHz. . . . .	57
Figura 33 – Coeficientes wavelet para uma falta Polos Positivo-Negativo-terra a 50 km do conversor 1, com resistência de falta de $0\Omega$ . . . . .	58
Figura 34 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ causada a 40km do Conversor 1. . . . .	60
Figura 35 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ causada a 70km do Conversor 1. . . . .	61
Figura 36 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ causada a 100km do Conversor 1. . . . .	62
Figura 37 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ causada a 130km do Conversor 1. . . . .	63
Figura 38 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $0\Omega$ causada a 160km do Conversor 1. . . . .	64
Figura 39 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	64
Figura 40 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	65
Figura 41 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	65
Figura 42 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	66
Figura 43 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	66
Figura 44 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ . . . . .	67

Figura 45 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ .	67
Figura 46 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ .	68
Figura 47 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de $20\Omega$ .	68
Figura 48 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistências de falta de $20\Omega$ e $200\Omega$ .	69
Figura 49 – Média dos erros absolutos para faltas HVDC com dados de dois terminais.	69
Figura 50 – Erro relativo para diferentes distâncias de falta.	74

# Lista de Siglas e Abreviaturas

<i>A</i>	Sinal Aproximado após a Transformada Wavelet
<i>A – terra</i>	Falta envolvendo a Fase A e o terra
<i>a1</i>	Coefficiente Wavelet aproximado 1
<i>AB</i>	Falta envolvendo as Fases A e B
<i>AB – terra</i>	Falta envolvendo as Fases A, B e o terra
<i>ABC</i>	Falta envolvendo as Fases A, B e C
<i>ABC – t</i>	Falta envolvendo as Fases A, B, C e o terra
<i>AC</i>	Falta envolvendo as Fases A e C
<i>AC – terra</i>	Falta envolvendo as Fases A, B e o terra
<i>AMR</i>	Análise multi-resolução
<i>ATP</i>	Alternative Transients Program
<i>B – terra</i>	Falta envolvendo a Fase A e o terra
<i>BC</i>	Falta envolvendo as Fases B e C
<i>BC – terra</i>	Falta envolvendo as Fases A, B e o terra
<i>C – terra</i>	Falta envolvendo a Fase A e o terra
<i>CA</i>	Corrente Alternada
<i>CC</i>	Corrente Contínua
<i>CESP</i>	Companhia Energética de São Paulo
<i>CW</i>	Coefficientes Wavelet
<i>D</i>	Sinal Detalhado após a Transformada Wavelet
<i>d1</i>	Coefficiente Wavelet detalhado 1
<i>D1M1</i>	Detalhe 1 do modo aéreo 1
<i>db2</i>	Função Wavelet Dabeuchies tipo dois
<i>GPS</i>	Global Positioning System

<i>HVDC</i>	High Voltage Direct Current
<i>IGBTs</i>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<i>LT</i>	Linha de Transmissão
<i>Modo</i>	Modo terra após a transformação modal
<i>Modo<math>\alpha</math></i>	Modo aéreo 1 após a transformação modal
<i>Modo<math>\beta</math></i>	Modo aéreo 2 após a transformação modal
<i>MTDC</i>	Multi-terminal HVDC
<i>N – terra</i>	Falta envolvendo o polo negativo e o terra
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema
<i>P – terra</i>	Falta envolvendo o polo positivo e o terra
<i>PN</i>	Falta envolvendo o polo positivo e o negativo
<i>PN – terra</i>	Falta envolvendo o polo positivo, o negativo e o terra
<i>RNA</i>	Redes Neurais Artificiais
<i>RTDS</i>	Real Time Digital Simulator
<i>SE/CO</i>	Sudeste/Centroeste
<i>STFT</i>	Short-Time Fourier Transform
<i>sym3</i>	Função Wavelet symlet 3
<i>TC</i>	Transformador de Corrente
<i>TDF</i>	Transformada Discreta de Fourier
<i>TF</i>	Transformada de Fourier
<i>TFJ</i>	Transformada de Fourier Janelada
<i>TP</i>	Transformador de Potencial
<i>TW</i>	Transformada Wavelet
<i>TWC</i>	Transformada Wavelet Contínua
<i>TWD</i>	Transformada Wavelet Discreta
<i>VSC – HVDC</i>	Voltage Source Converter based HVDC

# 1 Introdução

O presente capítulo elucida os principais objetivos deste trabalho de conclusão de curso.

## 1.1 Relevância do Tema

A energia elétrica é um benefício que proporciona facilidades no cotidiano da população e indústrias além de fomentar o desenvolvimento econômico e tecnológico da sociedade. Com o aumento populacional e novos aparelhos eletrônicos a demanda por energia elétrica aumenta rapidamente, conforme mostra a Figura 1, onde é mostrada a comparação entre a demanda de energia nas regiões Sudeste/Centroeste (SE/CO) do Brasil entre 2010 e 2015, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

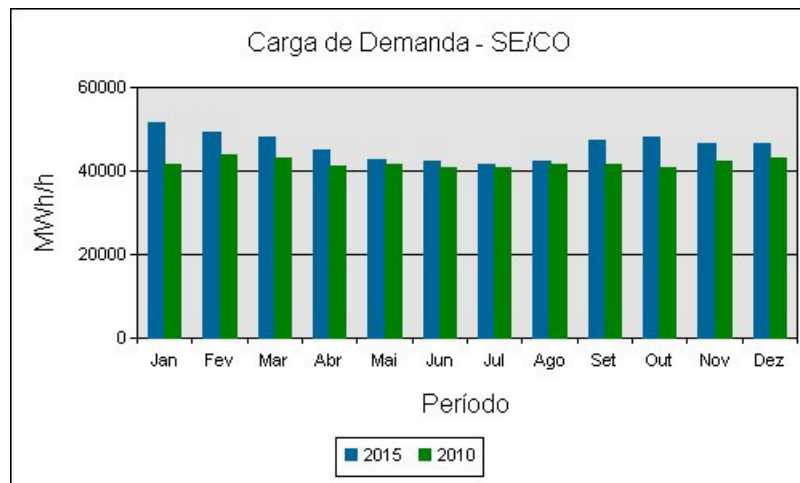


Figura 1 – Carga de demanda - SE/CO comparação entre 2015 e 2010. Fonte: ONS

Dado o aumento da demanda de energia elétrica pelo mundo há também a necessidade da ampliação dos sistemas de transmissão e distribuição. A utilização em larga escala de sistemas de transmissão e distribuição de energia em corrente alternada deve-se a algumas facilidades desta, por exemplo, o uso de transformadores (GÁRDOS, 2008). Contudo o uso de corrente contínua é conhecido desde o final do século XIX. Com o desenvolvimento tecnológico em semicondutores tornou-se possível a implementação de sistemas de transmissão em alta tensão e corrente contínua, do inglês *High Voltage Direct Current* (HVDC), baseados em conversores do tipo fonte de tensão, do inglês *Voltage Source Converter based HVDC* (VSC-HVDC).

Os VSCs permitem algumas aplicações até então inviáveis em sistemas HVDC clássicos, dentre elas destaca-se a implementação de redes HVDC com múltiplos terminais,

do inglês *multi-terminal HVDC* (MTDC). Além disso, a utilização de VSCs possibilita o controle independente da transferência das potências ativa e reativa nos conversores, conferindo aos sistemas em HVDC um importante papel no conceito de *smart grids*, já que o controle deste sistema facilita a automatização da rede. Ademais, tal método apresenta menores perdas na transmissão de energia em longas distâncias, facilita a integração de sistemas em diversas frequências, além de apresentar uma redução ainda mais expressiva nas perdas em cabos subterrâneos e submarinos, tornando assim o uso de HVDC mais viável economicamente para estas aplicações (REED ET AL, 2003)

Embora o uso de transmissão HVDC apresente diversas vantagens, em algumas aplicações o custo pode ser maior que a transmissão em corrente alternada (CA). Em CA, os custos se resumem basicamente às estações transformadoras, às torres, linhas de transmissão (condutores) e, para longas distâncias, compensadores. Em HVDC, o custo inicial do sistema é elevado devido aos conversores, porém as torres e as linhas são mais baratas em relação à transmissão CA para uma mesma potência, pois se utilizam menos condutores, demandando uma torre com área de servidão menor. Portanto, dependendo da distância o uso de HVDC pode ser mais viável economicamente do que o sistema CA, conforme presente na Figura 2.

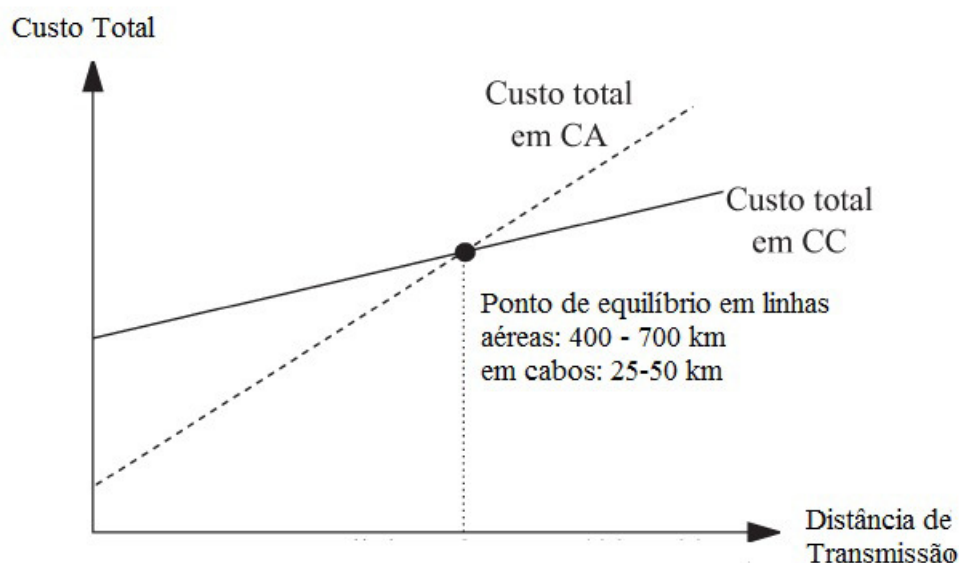


Figura 2 – Comparação entre o custo total para LT's em Ca e CC em função do comprimento. Fonte: Adaptado de Setreus, Bertling, 2008.

A proteção das linhas com transmissão em corrente contínua (CC) deve ter um alto índice de confiabilidade, além de considerar a não linearidade presente na operação dos conversores. Na ocorrência de uma falta é essencial que o sistema de proteção atue antes que os VSCs sejam danificados, uma vez que os elementos semicondutores que o compõe são vulneráveis a elevadas correntes de falta.

Uma falta é qualquer problema que faça com que a linha opere em uma situação estranha à nominal. Normalmente as faltas causam aumentos abruptos de corrente o que danificaria a linha e demais sistemas interligados a ela. As faltas podem ser causadas por componentes físicos como galhos de árvore, animais, ventos, entre outros. Há também faltas causadas por deterioração de componentes, como isoladores desgastados e cabos rompidos.

A localização de uma falta é imprescindível para o funcionamento confiável da linha, pois a falta deve ser corrigida o mais breve possível. Tomando como exemplo a linha de transmissão (LT) que liga as usinas de Santo Antônio e Jirau, no rio Madeira, em Porto Velho (Rondônia) até Araraquara (São Paulo), tem-se uma LT de aproximadamente 2500 quilômetros com transmissão em HVDC (ANEEL, 2008). Caso houvesse uma falta nesta linha sem um sistema de localização seria necessário percorrer toda a distância da linha, observando fisicamente a causa da falta. Tal processo poderia levar dias, representando um prejuízo energético e financeiro muito alto. Tal problema seria ainda maior caso os cabos fossem subterrâneos.

As linhas HVDC são usualmente protegidas por relés de sub e sobretensão, sobrecorrente e diferenciais (LI ET AL, 2010). No tocante a localização há duas principais formas, com e sem comunicação. Com comunicação utilizam-se dados de ambos terminais da linha, o melhor opção para isso é o sistema de posicionamento global, do inglês *Global Positioning System* (GPS) e deve haver a sincronização entre os extremos da linha. Tal sistema está sujeito tanto a falha e interferências no GPS como a problemas na sincronização.

## 1.2 Abordagem principal e objetivos

Conforme o contexto apresentado, a presente proposta de trabalho visa analisar alguns métodos e técnicas, bem como o desenvolvimento e simulações computacionais para avaliação de algoritmos de localização para LT de dois terminais. O primeiro algoritmo se utiliza de dados de ambos terminais da linha, enquanto que o segundo utiliza dados de apenas um terminal. O ambiente de simulação das LTs e das faltas será o *Simscape Power System* e o processamento dos sinais obtidos será realizado em ambiente MATLAB.

## 2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem por objetivo apresentar alguns sistemas de localização de faltas, bem como elucidar alguns fundamentos necessários para o desenvolvimento e análise do algoritmo de localização.

### 2.1 Localização de faltas

A localização de faltas é útil e fundamental em sistemas de transmissão de energia, já que a localização contribui para a confiabilidade do sistema pois facilita e agiliza a remoção de uma falta. Portanto, há alguns estudos e sistemas em funcionamento de localização tanto para sistemas em corrente alternada (CA) quanto para sistemas CC.

#### 2.1.1 Técnicas propostas para transmissão em corrente alternada

Takagi et al. (1981) propuseram um método de localização com o uso de sinais e corrente de apenas um terminal, através da técnica da Transformada Discreta de Fourier (TDF) os sinais são filtrados para se obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime permanente. Esse algoritmo utiliza os componentes modais ao invés dos valores totais no cálculo da distância, como se trata de uma proposição para um sistema CA o fato de trabalhar com fasores facilita consideravelmente os cálculos. Esse trabalho tem como base o uso de quadripólos e como a equação obtida é não linear, utiliza-se o método de Newton-Raphson para as iterações.

Na publicação de Richards e Tan (1982) é apresentado um método de localização de faltas por estimação de parâmetros de um sistema dinâmico. As equações são simplificadas usando componentes simétricos e baseiam-se no modelo de linha de parâmetros concentrados, nos equivalentes de Thévenin para transitórios nos dois terminais e na desconhecida resistência de falta. A localização de faltas é tratada como um problema de estimação de parâmetros do sistema dinâmico, no qual os resultados do sistema físico são comparados com os vários modelos de parâmetros concentrados até que se obtenha uma combinação adequada.

Outro método de localização foi proposto por Morrison e Yang (1987) com base na equação diferencial da LT. A equação que estima distância da falta depende da tensão e da corrente instantânea de um dos terminais do sistema, e despreza o efeito da capacitância em paralelo.

Outra técnica de localização de faltas foi proposta por Yibin et al. (1997) usando a Transformada *Wavelet* (TW). Tal técnica faz uso das componentes de frequência fun-

damental do sistema, extraídas com o auxílio da TW. O algoritmo apresentou melhores resultados quando comparado a outro algoritmo cuja extração dos fasores fundamentais se davam por meio da Transformada de Fourier (TF).

A pesquisa de Magnago (1998) utiliza o método das ondas viajantes para localizar as faltas. Para a análise dos transitórios ele utilizou-se da TW obtendo assim o intervalo de tempo que uma onda viajante leva para se deslocar entre o ponto de falta e um terminal. Utilizando-se desse princípio e dessa ferramenta é possível localizar a falta com dados de dois terminais sincronizados via GPS quanto com dados de apenas um terminal. Este método foi proposto para linhas CA, mas também tem aplicações em linhas CC.

A TW é aplicada nos sinais disponíveis nos terminais e, através dos coeficientes *wavelet*, determina-se automaticamente se a falta envolve o terra e se ocorre na primeira ou na segunda metade da linha. Os resultados obtidos por Magnago (1998) através deste método são satisfatórios para as situações propostas e obteve um erro máximo de 1,3%.

Purushothama et al (2000) propuseram a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs) para auxiliar na localização de faltas. Usando dados registrados em um ou em ambos os terminais da LT. Os autores desenvolveram duas RNAs, a primeira utilizando a rede *Multiplayer Perceptron* convencional e, a segunda usando o conceito de *cross correlation* em cascata de Fahlman. As duas aplicações apresentam como saída a distância e a resistência de falta e são posteriormente comparadas com métodos analíticos convencionais.

Kim, Kim e Choi (2001) apresentam um método de localização de faltas em sistemas CA utilizando dados dos dois terminais sincronizados via GPS. O processamento utiliza a TW para analisar os transitórios presentes nas componentes fundamentais, as informações são analisadas *off-line*.

Em Yi-Zhuang (2002), a proposta é estimar inicialmente a distância da falta utilizando a teoria de ondas viajantes e compara com outra técnica chamada *Root-Music*, para analisar os transientes presentes no sinal da tensão. Esta técnica é baseada na propagação de ondas entre o ponto de falta e o terminal monitorado, quando uma perturbação atinge o local da falta esta é refletida para o terminal. Depois disso, a onda é refletida novamente para o ponto de falta e retorna para o terminal. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1 e são satisfatórios.

Tabela 1 – Resultados obtidos por Yi-Zhuang(2002)

Distância de falta [km]	d [km]
<b>10</b>	10,31
<b>30</b>	31,04
<b>60</b>	61,77
<b>100</b>	99,76
<b>171</b>	171,00

Silva, Oleskovicz e Coury (2004) utilizam a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) com dados provenientes em um ou nos dois terminais. Após obter os modos alfa e o modo terra através da transformada de *Clarke*, realiza-se a análise multirresolução da TWD. Através dos coeficientes *wavelet* obtidos caracteriza-se os instantes de reflexão das ondas viajantes da falta até o monitoramento. Os resultados foram satisfatórios e o método mostrou-se independente da impedância de falta, tipo de falta, ângulo de incidência e posição da falta. A frequência de amostragem foi de 120 kHz e 60 kHz.

Spoor e Zhu (2006) propõe um algoritmo que utiliza dados de um terminal e a teoria de ondas viajantes. A análise utiliza a transformação modal de *Clarke*, TWD e Transformada *Wavelet* Contínua (TWC). O algoritmo utiliza as polaridades dos coeficientes *Wavelet* são usados para confirmar a natureza e a localização da falta, assim como saber se a falta é sustentada ou de curta duração. Considerou-se o efeito dos transdutores na subestação. Os resultados mostraram que a TWC é mais robusta à presença de ruídos que a TWD, indetificando as ondas viajantes mais facilmente. Foi utilizada uma frequência de amostragem de 1,25 MHz.

Silva et al. (2010) desenvolveram uma metodologia que detecta, classifica e localiza faltas em transmissão a três terminais. A TWD foi utilizada para localização de faltas com o conceito de ondas viajantes e da frequência fundamental. O algoritmo pode trabalhar com dados de corrente ou tensão de um ou dos três terminais. Os resultados são apresentados com boa precisão e resposta rápida. Os resultados baseados em ondas viajantes independem da impedância de falta, tipo de falta, ângulo de incidência da falta, posição da falta e do efeito de acoplamento mútuo. Porém, mostrou-se sensível à ruídos abaixo de  $60dB$ , como também a combinação de alta resistência de falta com um baixo ângulo de incidência, pois gera ondas viajantes pequenas de difícil detecção. A técnica que utiliza componente fundamental apresentou precisão e velocidade de resposta satisfatórios, porém o desempenho é influenciado pela proximidade da falta nos terminais de medição, pelo acoplamento mútuo das linhas e para resistências de falta acima de  $100\Omega$ ; Utilizou-se uma frequência de amostragem de 240 kHz.

### 2.1.2 Técnicas propostas para linhas de transmissão em corrente contínua

Em sistemas de transmissão em corrente contínua, a localização é de grande importância para garantir a confiabilidade do sistema, principalmente em cabos subterrâneos ou submarinos cuja localização por inspeção física é de alta complexidade e custo. Estudos e pesquisas buscam formas de suprir tal necessidade, alguns são apresentados na presente seção.

Shang et al. (2001) propõem um método de proteção para linhas de transmissão HVDC monopolares, utilizando modelo de LT com parâmetros distribuídos. Os autores usam as ondas viajantes geradas pela presença de uma falta que produz mudanças abruptas

nos sinais de tensão e corrente, e se propagam através da LT e são refletidos em pontos de descontinuidade, essas mudanças são detectadas através do processamento dos sinais com TW. A detecção e localização das faltas é realizado através do módulo máximo de *Wavelet* e dados de um terminal, obtidos a uma frequência de amostragem de 80 kHz. Para se detectar a falta considera-se um valor máximo conhecido, o qual, se superado, indica a presença de uma falta. No processo de localização, tem-se a diferença de instantes de chegada das ondas viajantes refletidas do terminal e do ponto de falta. Os testes verificam faltas na linha HVDC, na estação retificadora e nas linhas CA próximas.

GANG et al. (2005) realizam a implementação da proteção em linhas de transmissão bipolares HVDC e, para detectar as ondas viajantes no sinal de tensão, utiliza-se da decomposição *Wavelet* Multirresolução para se decompor os sinais nos detalhes e aproximação. O trabalho analisa a energia distribuída nas diferentes bandas de frequência para se detectar as anomalias presentes no sistema. A frequência de amostragem utilizada é de 200 kHz.

(CHEN, XU e LI(2006) realizam a localização de faltas a partir de informação do monitoramento em um ou dois terminais, e utilizam como modelo o sistema HVDC *Zhouba Nanqiao* (Shangai). Para localização a partir de um terminal calcula-se a diferença entre os tempos de reflexão das ondas viajantes causadas pela falta. Para dois terminais considera-se a diferença dos tempos absolutos de chegada das ondas viajantes em ambos os terminais. Utiliza-se de transformadores de potencial (TP) e transformadores de corrente (TC) para detectar as ondas viajantes, este método requer uma frequência de amostragem elevada sendo igual ou superior a 1 MHz, além de uma estação repetidora na função e um filtro para as ondas. O uso de dados provenientes dos dois terminais é mais eficiente, porém depende da sincronização temporal.

YI-NING et al. (2011) utilizam a metodologia de ondas viajantes considerando a variação da velocidade de propagação das ondas em função da posição de falta para localizar as faltas em linhas CC. Este trabalho considera a mudança de velocidade de propagação em função da resistência, condutância, indutância e capacitância da linha, além da frequência dominante no instante da falta. O algoritmo determina a frequência dominante do transitório e localiza a posição da falta, os resultados obtidos para linhas de transmissão HVDC monopolar foram satisfatórios.

### 3 Sistemas Elétricos Analisados

Neste capítulo será apresentado os sistemas de simulação para as faltas em linhas de corrente alternada e corrente contínua. O objetivo deste capítulo é detalhar os sistemas estudados, bem como as faltas a serem aplicadas. Para tal, o *software SimPowerSystems*, ferramenta do MATLAB, foi empregado. As técnicas descritas são baseadas em simulações computacionais, bem como o sistema HVDC proposto. O sistema de transmissão em corrente alternada proposto possui parâmetros e considerações de um sistema real, inclusive foram consideradas as características dos condutores e as disposições geométricas nas torres de transmissão CA.

#### 3.1 Configuração do Sistema de Potência em Corrente Alternada

Observa-se na Figura 3 a representação do sistema elétrico estudado, o sistema é semelhante ao estudado por SILVA (2003), com o diferencial de possuir apenas uma LT e seu comprimento ser de 200 *km*.

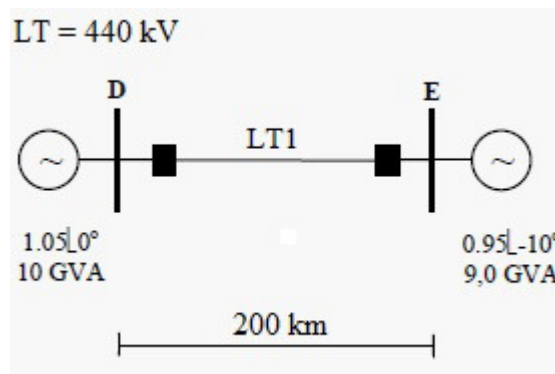


Figura 3 – Representação do sistema elétrico estudado

Há quatro tipos de faltas que podem ocorrer sobre as linhas de transmissão e, considerando as alternâncias entre as fases, totalizam onze tipos de faltas diferentes. As definições gerais de faltas em LT's trifásicas são:

- Algum condutor à terra (faltas fase-terra);
- Entre dois condutores à terra (faltas fase-fase-terra);
- Entre dois condutores (faltas fase-fase)
- Faltas trifásicas

Tais faltas foram implementadas no *software SimPowerSystems*.

### 3.1.1 Modelagem da linha de transmissão CA

A estrutura da linha de transmissão 440 kV, representada na Figura 4 é equivalente à um trecho de uma linha típica da CESP (Companhia Energética de São Paulo), presente entre as cidades de Araraquara - Bauru e Jupiá - Ilha Solteira (Silva, 2003). Os principais características da linha são apresentados abaixo conforme apresentado por SILVA (2003).

Condutor de fase: cabo Grosbeak

1. raio externo do condutor: 12,57 mm;
2. raio interno do condutor: 4,635 mm;
3. resistência em corrente contínua: 0,08998  $\Omega/km$ .

Cabos Pára-raios: EHS 3/8"

1. raio externo do condutor: 4,572 mm;
2. resistência em corrente contínua: 4,188  $\Omega/km$ .

Resistividade do solo

1.  $R_{solo}$ : 1000  $\Omega.km$ .

Flecha a meio vão

1. fase: 13,43m;
2. pára-raios: 6,4m

#### 3.1.1.1 Parâmetros do sistema elétrico

Para realizar as simulações do sistema elétrico proposto, utilizando o *software Simscape Power System* presente no MATLAB, adotaram-se considerações necessárias para os cálculos dos parâmetros da LT. Considera-se as características dos condutores e suas localizações geométricas nas torres de transmissão, conforme apresentado na Figura 4, representando uma torre de transmissão de circuito simples vertical tipo "VVV" com quatro condutores por fase. Optou-se por linhas transpostas, uma vez que a transposição compensa os desequilíbrios entre as fases causados pelas indutâncias e capacitâncias mútuas, cabos guarda, e multiplicidade de cabos (SILVA, 2003).

Uma transposição ideal ocorreria duas vezes, a primeira delas em exatamente um terço do comprimento de linha e a segunda em dois terços do comprimento da linha conforme representado na Figura 5. Porém, na prática a transposição é realizada em

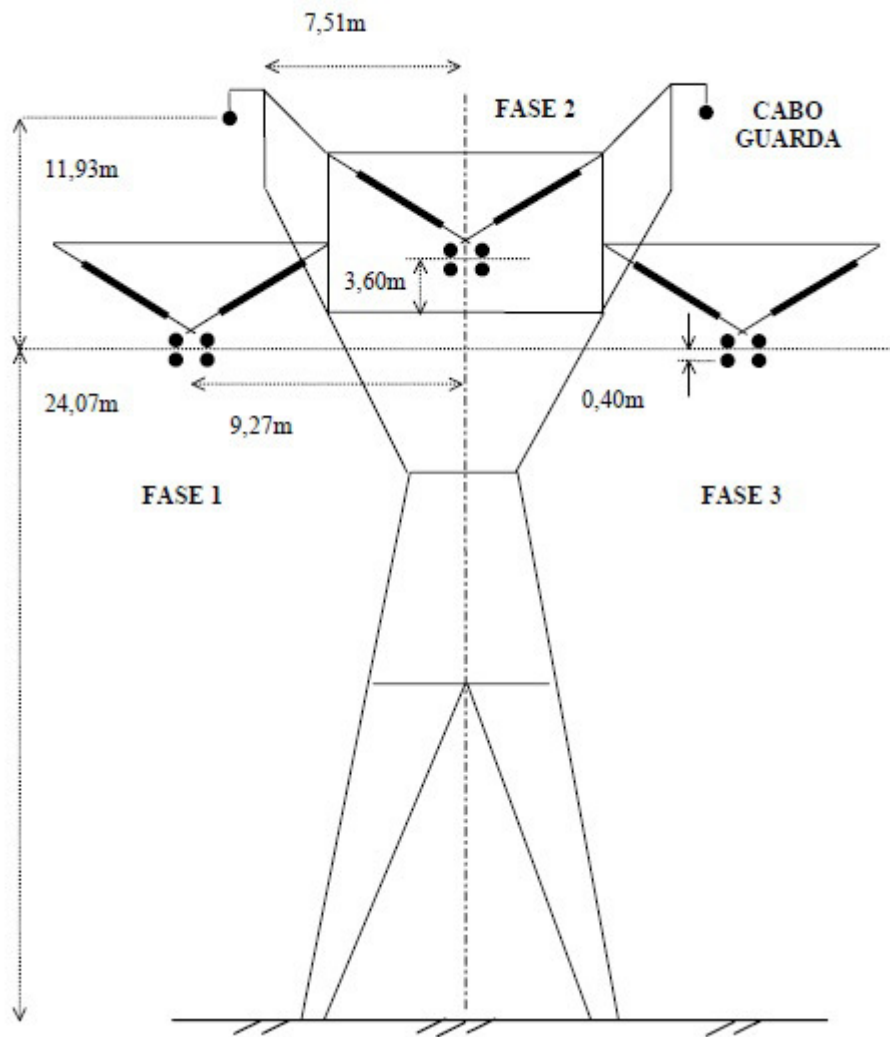


Figura 4 – Silhueta de torre da linha de 440 kV. Fonte: Silva, 2003.

locais fisicamente favoráveis, normalmente em subestações. Considera-se, porém, uma tranposição ideal, logo será a mesma indutância média para cada condutor.

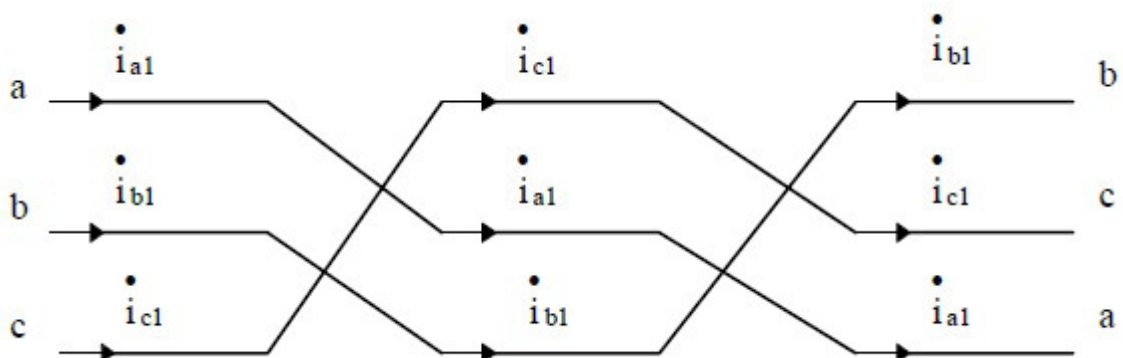


Figura 5 – Tranposição ideal da linha. Fonte: Silva, 2003.

A linha foi modelada com parâmetros distribuídos e constantes em relação à frequência, isso implica em não considerar os parâmetros da linha concentrados em um ponto, mas uniformemente distribuídos ao longo de toda LT. Através dos dados gerais dos cabos, distribuição geométrica na torre de transmissão e tranposição da LT, obtêm-se os parâmetros de sequência da linha. Os valores podem ser calculados a partir da teoria de linhas de transmissão, porém neste trabalho adotou-se os valores já obtidos por SILVA (2003), valores estes apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Parâmetros de sequência positiva da linha de transmissão de 440 kV

<b>R(ohms/km)</b>	3,853E-02
<b>L(mH/km)</b>	7,410E-01
<b>C(<math>\mu</math>F/km)</b>	1,570E-02

Tabela 3 – Parâmetros de sequência zero da linha de transmissão de 440 kV

<b>R(ohms/km)</b>	1,861E+00
<b>L(mH/km)</b>	2,230E+00
<b>C(<math>\mu</math>F/km)</b>	9,034E-03

Nas Tabelas 4 e 5, são apresentados os dados e parâmetros de barra, equivalentes aos terminais da linha de 440 kV da CESP (SILVA, 2003).

Tabela 4 – Parâmetros equivalentes de geração e dados do Gerador 1 - Barra D

$R_{POS}$ (ohms/km)	1,6982
$R_{ZERO}$ (ohms/km)	0,358
$L_{POS}$ (mH/km)	5,14E+01
$L_{ZERO}$ ( $\mu$ F/km)	1,12E+01
<b>Pot.(GVA)</b>	10
<b>Tensão (pu)</b>	1,05
<b>Ângulo (graus)</b>	0

Tabela 5 – Parâmetros equivalentes de geração e dados do Gerador 2 - Barra E

$R_{POS}$ (ohms/km)	1,7876
$R_{ZERO}$ (ohms/km)	0,4052
$L_{POS}$ (mH/km)	5,41E+01
$L_{ZERO}$ ( $\mu$ F/km)	1,23E+01
<b>Pot.(GVA)</b>	9
<b>Tensão (pu)</b>	0,95
<b>Ângulo (graus)</b>	-10

Os valores dos parâmetros calculado foram inseridos nos componentes de simulação do *software Simscape Power System* para descrever corretamente o sistema elétrico.

Através de uma simulação simples de uma falta fase-terra com ângulo de incidência  $0^\circ$  aplicada a 40km da barra E no instante  $t = 0,3s$ , obtemos as formas de onda das tensões e correntes no medidor na barra E, conforme apresentados nas Figuras 6 e 7.

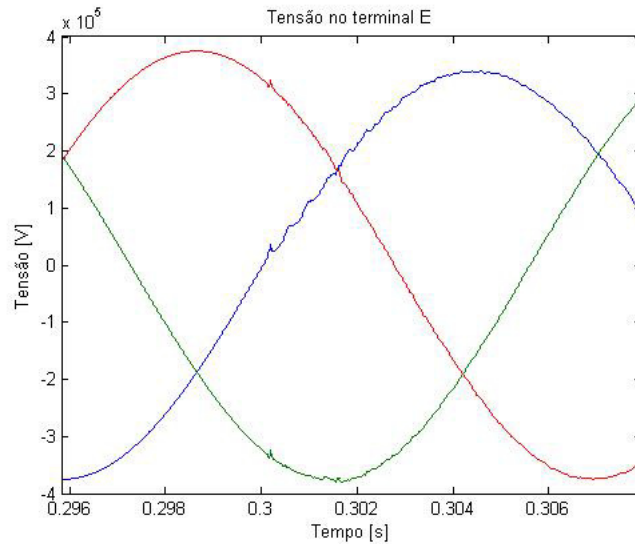


Figura 6 – Formas de onda de tensão para falta fase-terra aplicada a 40km da barra E.

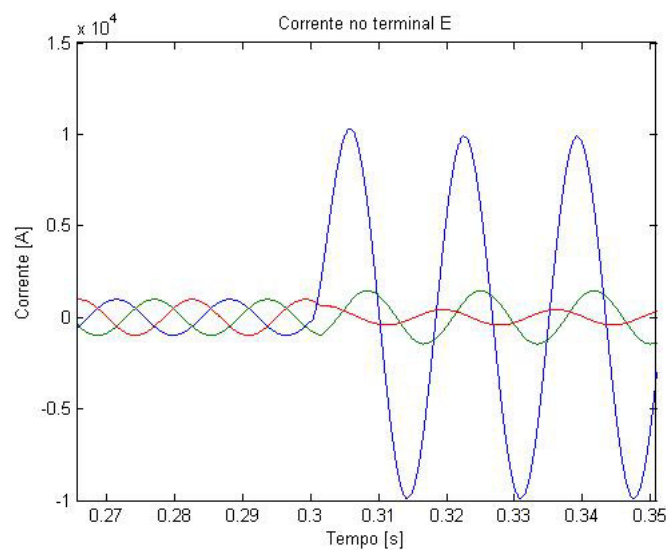


Figura 7 – Formas de onda de corrente para falta fase-terra aplicada a 40km da barra E.

### 3.1.2 Variações nas simulações das condições de faltas aplicadas ao circuito de transmissão em corrente alternada

Os dados dos sinais faltosos foram obtidos através do *software* de simulação, considerando-se os vários tipos diferentes de falta e para dois valores de resistência de falta. O modelo de simulação é apresentado na Figura 8, os blocos L1 e L2 representam a LT antes e após o ponto de falta, respectivamente.

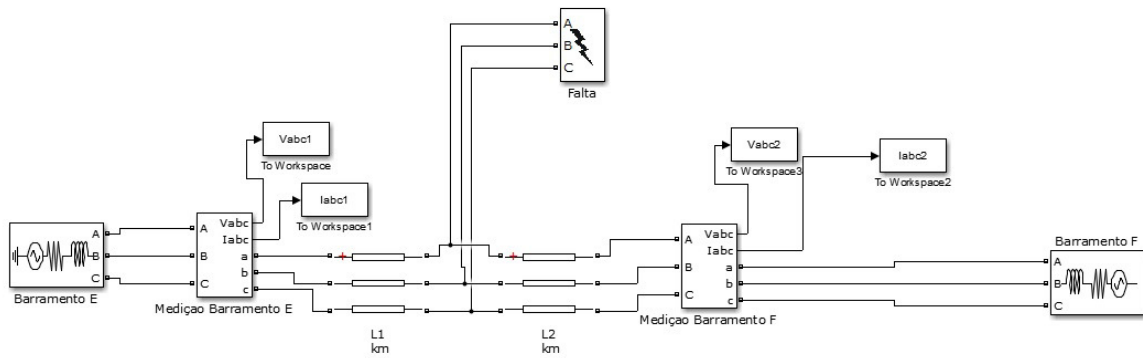


Figura 8 – Ambiente de simulação da falta em Corrente Alternada

As variações consideradas são descritas a seguir:

a) Tipos de faltas aplicadas:

- Fase-terra (A-terra e B-terra);
- Fase-Fase-terra (AB-terra e AC-terra);
- Fase-Fase (AB, AC);
- Trifásica (ABC).
- Trifásica-terra (ABC-terra).

b) Distâncias em que as faltas foram aplicadas entre os barramentos E e F:

- 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 km (referência barramento E).

c) Ângulo de incidência de falta:

- 0 graus.

d) Resistências de faltas consideradas:

- 0 e 200 ohms.

Como resposta da simulação de cada situação de falta, obtêm-se os valores de correntes trifásicas amostrados em relação aos barramentos E (gerador 1) e F (gerador 2). O arquivo de dados descrevendo cada situação de falta é apresentado pelo software a um intervalo de amostragem de  $8,33 \mu\text{s}$ , o que corresponde a uma frequência amostral de 120 kHz, frequência esta estabelecida pelo usuário de acordo com suas necessidades.

Não serão abordados outras resistências de falta e outros ângulos de incidência, uma vez que a localização de faltas em rede CA tem por objetivo testar o algoritmo em uma outra abordagem. Ademais, segundo SILVA (2003) não houve mudanças significativas para outros valores de resistência de faltas e ângulo de incidência de falta

## 3.2 Sistema Elétrico Analisado em Corrente Contínua

Neste capítulo será apresentado o sistema HVDC simulado, além das faltas a serem aplicadas. Analogamente ao sistema CA, as simulações computacionais são realizadas no *software SimPowerSystems*.

### 3.2.1 Configuração do Sistema de Potência

Para realizar as simulações computacionais, foi utilizado o modelo VSC-HVDC apresentado por BERTHO JUNIOR ET AL (2014). O sistema é composto, em suma, por dois sistemas CA equivalentes e os respectivos conversores, interligados por uma linha de transmissão VSC-HVDC, conforme apresentado na Figura 9.

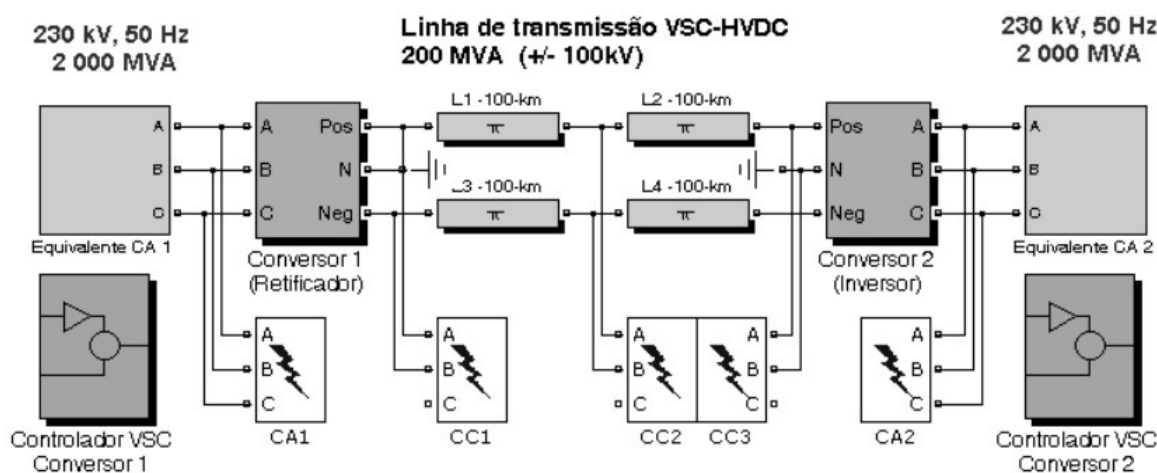


Figura 9 – Sistema HVDC referência. Bertho Junior, 2014.

Os conversores são de três níveis compostos por IGBTs, são conectados à rede CA através de um transformador, a fim de equilibrar os níveis de tensão entre a rede CC e CA. Nos lados CA são utilizados um reator série e um filtro a fim de diminuir os harmônicos injetados na rede. No lado CC, há um filtro para terceiro harmônico e capacitores e indutores para melhor a qualidade da retificação (BERTHO JUNIOR, 2014).

Há quatro tipos de faltas que podem ocorrer nas linhas HVDC, as definições gerais de faltas em linhas DC são faltas polo positivo-terra, faltas polo negativo-terra, faltas polo positivo-negativo e faltas polo positivo-negativo-terra. As faltas foram simuladas e analisadas no *software SimPowerSystems*.

### 3.2.2 Parâmetros do Sistema Elétrico

A linha de transmissão CC possui 200 km de extensão. Para realizar as simulações do sistema elétrico HVDC proposto, através das ferramentas presentes no MATLAB-*Simulink*, adotaram-se os mesmo parâmetros de linha propostos por BERTHO JUNIOR

ET AL., parâmetros esses que são propícios para o sistema de controle já implementado na biblioteca do *SimPowerSystems*.

Um diferencial do modelo de linha utilizado neste trabalho é o uso de LT modelada com parâmetros distribuídos constantes em relação à frequência em detrimento ao modelo *pi* de várias seções, conforme apresentado na Figura 10. Tal escolha implica em não considerar os parâmetros da linha concentrados alguns pontos, mas sim uniformemente distribuídos ao longo da LT tornando a simulação mais condizente com a realidade no tocante à ondas viajantes. Os parâmetros para os modelos de linha são apresentados na Tabela 6 sendo iguais aos parâmetros da linha de modelo *pi* utilizado por BERTHO JUNIOR ET AL., porém, em um modelo de parâmetros distribuídos.

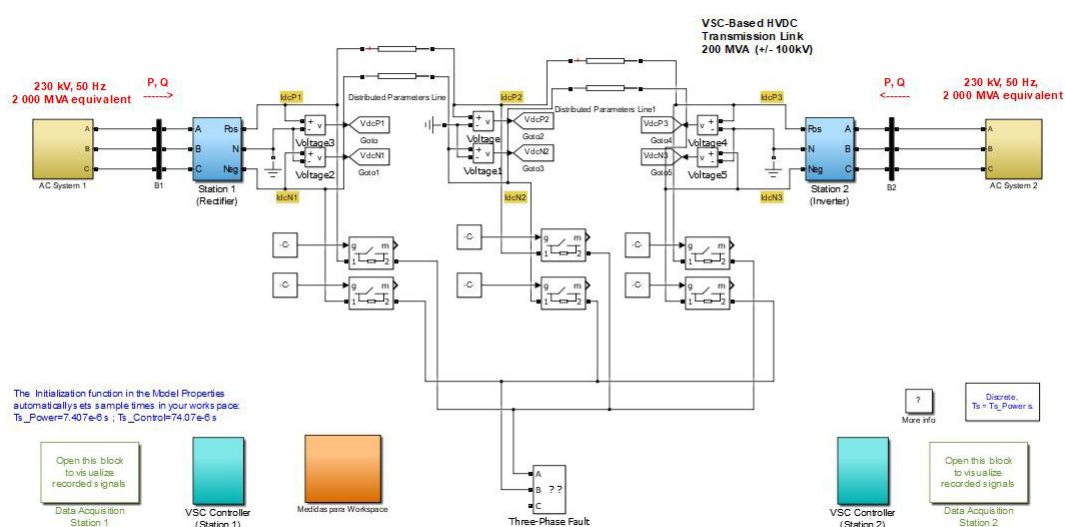


Figura 10 – Sistema HVDC utilizado nos testes, com linhas de parâmetro distribuído. Adaptado do sistema de Bertho Junior, 2014.

Tabela 6 – Parâmetros da linha de transmissão de HVDC

<b>R(ohms/km)</b>	1,3900E-02
<b>L(H/km)</b>	1,590E-04
<b>C(μF/km)</b>	2,310E-01

Os parâmetros descritos foram inseridos nas linhas de transmissão HVDC no *software Simscape Power System* de forma a simular o sistema tal qual em condições reais.

### 3.2.3 Variações nas simulações das condições de faltas aplicadas ao circuito de transmissão em corrente contínua

Os dados dos sinais faltosos foram obtidos via simulação, considerando-se os diversos tipos diferentes de falta e duas resistências de falta diferentes. As variações consideradas são descritas a seguir:

a) Tipos de faltas aplicadas:

- Polo positivo-terra (P-terra)
- Polo positivo-negativo-terra (P-N-terra)
- Polo positivo-negativo (P-N)

b) Distâncias em que as faltas foram aplicadas entre os conversores:

- 40, 70, 100, 130, 160 km (referência Conversor 1).

c) Resistência de faltas consideradas:

- 0, 20 e 200 ohms.

Cada situação de falta apresenta como resposta os valores de corrente e tensão dos polos positivos e negativos em cada conversor. O arquivo de dados descrevendo cada situação de falta é apresentado a uma frequência de amostragem de 135 kHz, ou seja, um intervalo de amostragem de 7,4074  $\mu$ s.

A localização de faltas será realizada *offline*, então o tipo de falta será conhecido no momento da aplicação do algoritmo proposto.

## 4 Localização de faltas utilizando a Transformada Wavelet - Abordagem Teórica

Nesta seção será abordado o problema de localização de faltas em linhas de transmissão em corrente alternada e em corrente contínua fundamentado na teoria de ondas viajantes e da Transformada *Wavelet*. Haverá também a descrição técnica das técnicas que compõem o algoritmo desenvolvido.

### 4.1 Ondas viajantes

Uma onda viajante surge quando há uma falta ou distúrbio na LT. Caso ocorra uma falta no ponto  $d$  a uma distância  $d$  do terminal A, sendo a falta localizada entre os terminais A e B, haverá uma onda viajante que inicialmente irá do ponto  $d$  para o terminal A, no terminal A esta onda é refletida e retorna ao ponto  $d$ , reflete-se em  $d$  novamente e retorna ao ponto A e assim sucessivamente até que, pelas perdas associadas à LT, se atenuem. Semelhantemente haverá outra onda viajante que irá para o terminal B e será refletida entre o terminal e o local da falta até que se atenuem completamente (HEDMAN, 1978). Uma exemplificação está presente na Figura 11.



Figura 11 – Exemplificação do surgimento de ondas viajantes. Fonte: Silva, 2003

Uma ferramenta didática utilizada para analisar e exemplificar as ondas viajantes é o diagrama de Lattice. No exemplo presente na Figura 12 consta uma falta tal qual descrita no parágrafo anterior, desconsiderando-se as refrações causadas no ponto de falta.

Do diagrama de Lattice apresentado na Figura 12 é importante notar duas características. A inclinação das retas do ponto  $d$  para A e do ponto  $d$  para B é igual, ou seja, a velocidade de propagação é igual em toda a LT uma vez que a velocidade depende apenas dos parâmetros físicos da linha e, neste caso, a LT é homogênea. Como os parâmetros são, em geral, conhecidos é possível estimar a velocidade  $v$  de propagação através de 4.1.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

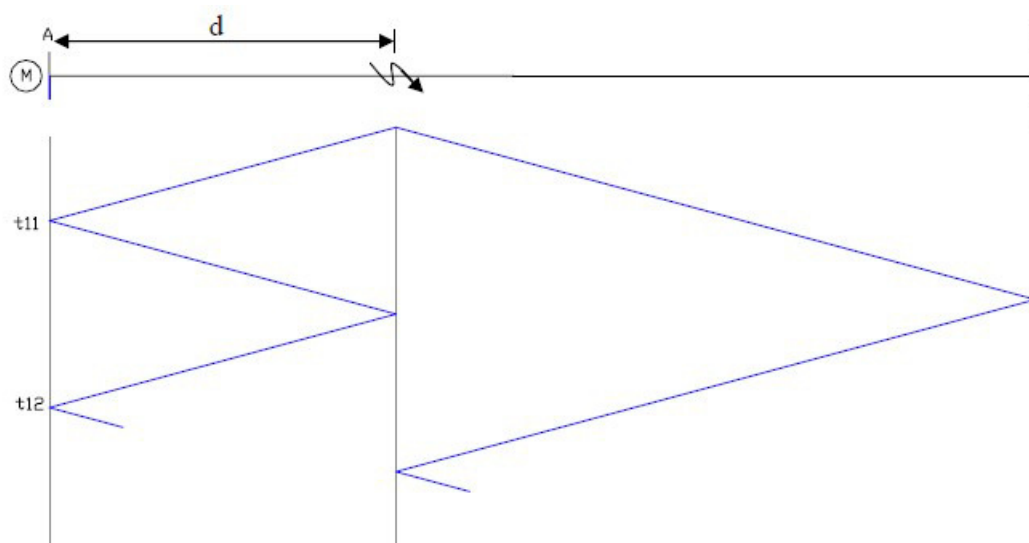


Figura 12 – Diagrama de Lattice para a falta. Fonte: Silva, 2003

Os parâmetros necessários são a indutância ( $L$ ) e a capacitância ( $C$ ) da LT, com eles a velocidade é estimada e, como é possível ver na Figura 12, há os tempos de reflexão no terminal A ( $t_{11}$  e  $t_{12}$ ) em que está o medidor, portanto com a variação do tempo e com a velocidade é possível estimar a distância de ocorrência da falta.

## 4.2 Transformada Wavelet

Uma transformada muito utilizada na engenharia elétrica é a transformada de Fourier. Contudo, a série de Fourier requer periodicidade das funções envolvidas no tempo, ou seja, as funções base (senos e cossenos) usadas na análise de Fourier estão situadas precisamente na frequência, entretanto existem para todo o tempo.

Caso haja um transitório durante um intervalo pequeno este contribuirá para a transformada de Fourier como uma parte do sinal, porém, como a transformada clássica de Fourier determina a média durante todo o tempo do sinal, a localização do transitório é perdida.

Uma solução comumente utilizada é a adaptação criada por Dennis Gabor conhecida como Transformada de Fourier Janelada (TFJ), conhecida em inglês por *Short-Time Fourier Transform* (STFT) que mapeia o sinal unidimensional em duas dimensões: tempo e frequência. Como a janela amostral é fixa, caso haja uma alta resolução da frequência obtêm-se uma resolução pobre para o tempo, e caso a resolução seja boa no tempo, esta será baixa para a frequência (KIM e AGGARWAL, 2000).

Para suprir esta deficiência, utiliza-se a Transformada *Wavelet*, que é uma técnica de “janelamento” variável, ou seja, permite o uso de uma janela de tempo maior para

analisar os dados de baixa frequência com maior precisão, e uma pequena janela para informações de alta frequência tal qual pode ser visto na Figura 13 (MISITI et al., 1997).

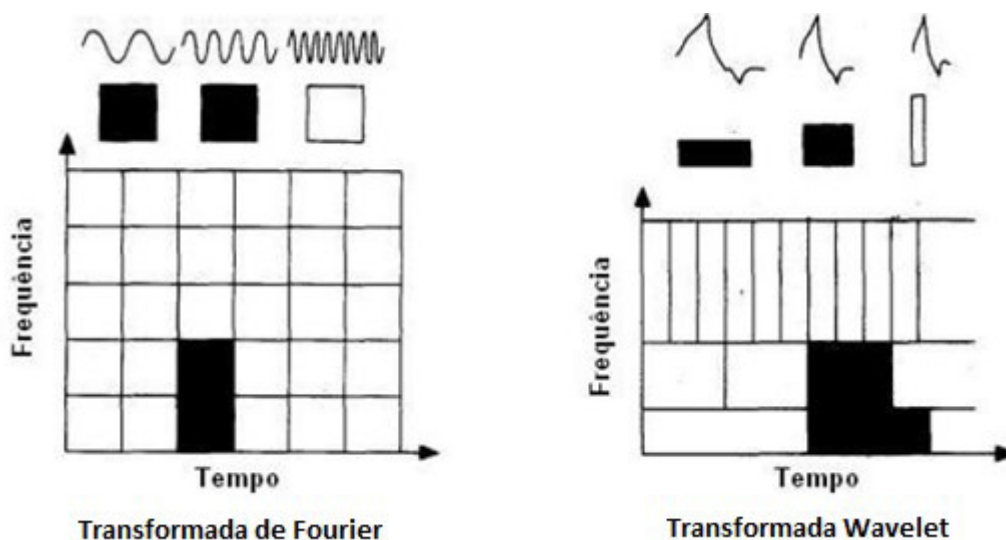


Figura 13 – Comparação gráfica entre as transformadas de Fourier e Wavelet. Fonte: Silva, 2003.

O tema *Wavelets*, é formado pela união de ideias em campos como física, matemática, ciência da computação e engenharia e suas características e utilidades continuam a despertar interesses em diversas áreas. A *Wavelet* recebe esse nome como uma abreviação informal de “pequena onda”, no sentido de ser de curta duração com energia finita.

A primeira menção a *Wavelets* apareceu do apêndice de A. Haar, em 1909 (LIMA, 2002). As chamadas *Wavelets* de Haar possuem suportes compactos mas não são continuamente diferenciáveis, limitando a sua utilização.

Para obter esta amostragem o sinal é decomposto por filtros passa-altas e passa-baixas várias vezes tal qual esquematizado na Figura 14, sendo o número de vezes o nível da transformada, tal análise é chamada de análise multi-resolução (AMR). Esta análise trabalha dividindo o espectro do sinal em sub-bandas de frequência, para tratar cada sub-banda separadamente.

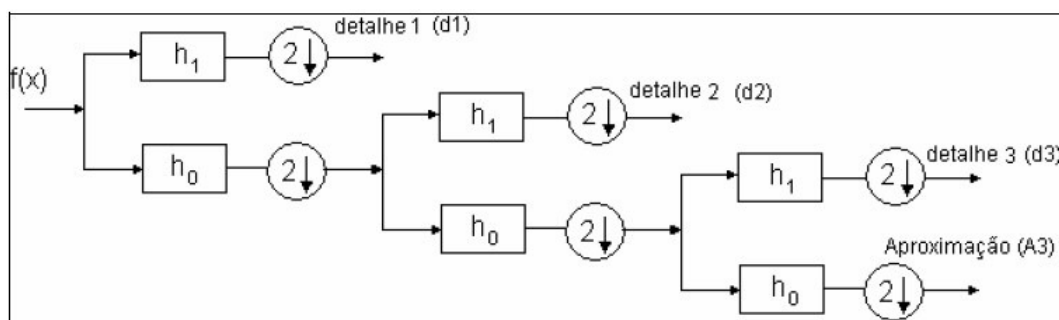


Figura 14 – Processo de decomposição de um sinal em AMR. Fonte: Silva, 2003.

A idéia base da TW é de analisar os dados de um sinal com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência.

Das variadas aplicações da TW destaca-se a compressão de imagens (TW em duas dimensões) e a análise de dados. No tocante a análise de dados destaca-se o trabalho de Santoso et al. (1996) que realizou a decomposição de um sinal ruidoso em uma versão atenuada. Huang et al. (1998) mostram que a TW foi a melhor ferramenta utilizada no monitoramento de transientes de um sinal.

O uso de coeficientes *Wavelet* em análise multi-resolução (AMR) foi apresentado por Gaouda et al. (1999) relacionando os coeficientes à energia de um sinal distorcido. O uso de Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) é apresentado por Poisson et al. (1999) como o método mais seguro na detecção de afundamentos de tensão, flickers e transitórios. Ademais, Santoso et al. (2000) mostram um método que permite a classificação precisa vem como as características destes eventos no plano tempo-frequência através da união da TF com a TW.

A TW é semelhante a TF, sendo uma das ferramentas matemáticas úteis na obtenção de dados de um sinal. Entretanto a TW possibilita a decomposição do sinal a partir de uma única função em diferentes escalas com níveis diferentes de resolução, enquanto que a TF apresenta uma representação global do sistema.

Uma definição apresentada por Faria (1997) é que as funções *wavelets* (usualmente denotadas por  $\Psi(t)$ ) são definidas como um conjunto de funções obtidas através de operações matemáticas de translação e escalonamento da função escala, além disso, possuem propriedades particulares que as tornam adequadas para ser base para a decomposição de outras funções.

Uma função é considerada uma *wavelet* se e somente se:

1.  $\Psi(t) \in L^2(\mathfrak{R})$ , ou seja, a função pertença ao espaço das funções de quadrado integrável, logo, pertença ao espaço das funções de energia finita de tal forma que satisfaça a equação 4.2.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (4.2)$$

2. Que sua TF ( $\Psi(\omega)$ ) satisfaça a condição de admissibilidade conforme a equação 4.3

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4.3)$$

Segue da condição de admissibilidade que  $\lim_{\omega \rightarrow 0} \Psi(\omega) = 0$  ou seja,  $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$ . Geometricamente, tal condição estabelece que o gráfico de  $\Psi(t)$  deve oscilar e possuir a área acima do eixo  $t$  igual à área abaixo do eixo a fim de anular a integral.

Atualmente existem várias funções *wavelets* que, geralmente, levam o nome de seus criadores. O exemplo mais simples foi proposto em 1909 pelo matemático Alfred Haar conforme representado pela Figura 15 e equação 4.4 (HAAR, 1910).

$$f(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq t < 0,5 \\ -1, & \text{se } 0,5 \leq t \leq 1,0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.4)$$

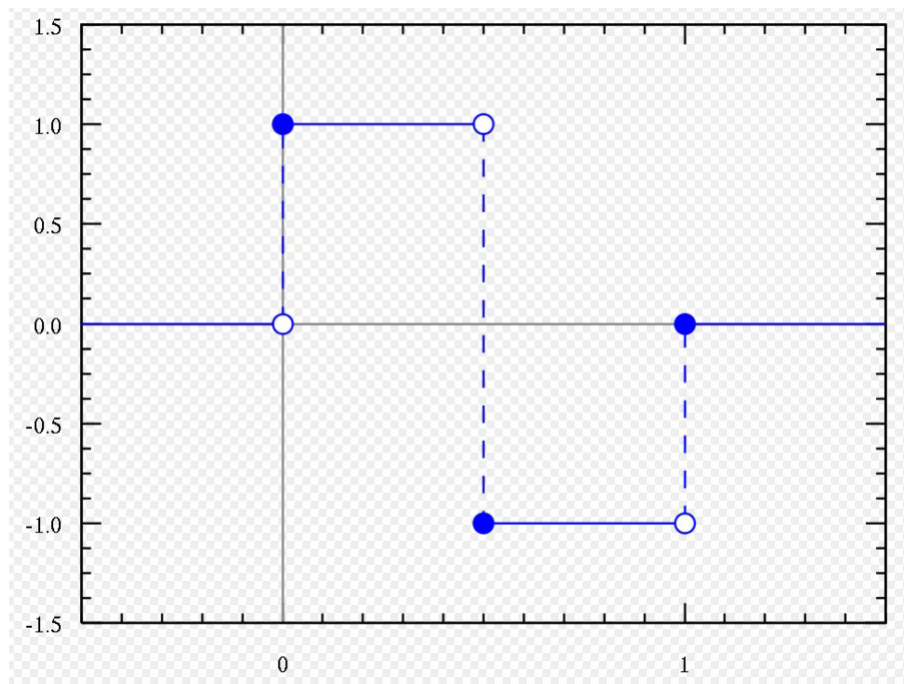


Figura 15 – Wavelet de Haar. Fonte: Matlab

Uma função *wavelet* muito utilizada é a *wavelet* de Daubechies uma vez que esta é uma função ortonormal, facilitando assim o uso de AMR que trabalha dividindo o espectro em sub-bandas de frequência a fim de tratar cada sub-banda separadamente, permitindo assim uma eficiente extração de detalhes contidos nestes sinais (PARENTONI, 2006).

A base teórica da AMR parte da utilização de duas funções inter-relacionadas, uma chamada de “função escalamento” e outra denominada “função *wavelet*”. A partir dessas funções pode-se decompor qualquer sinal  $f \in L^2(\mathfrak{R})$  em uma soma de  $n$  termos ponderados das funções *wavelet* e escalamento, obtendo-se assim a equação 4.5 (BURRUS, 1998).

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k)\phi_k(x) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{-\infty} d_j(k)\Psi_{j,k}(x) \quad (4.5)$$

Os parâmetros  $d_j(k)$  são os coeficientes *wavelet*, e  $c(k)$  é o sinal de mais baixa resolução. É possível trabalhar somente com os coeficientes presentes na definição das funções *wavelet* e escalamento a fim de se obter uma maior eficiência computacional. Estes

coeficientes compõem um filtro passa-altas relacionado com a função *wavelet* ( $h[n]$ ) e outro filtro passa-baixas, relacionado com a função escalamento ( $g[n]$ ) (PARENTONI, 2006).

O processo de apenas um nível da filtragem é representado por dois filtros conforme mostra a Figura 16. O sinal original  $S$ , é filtrado pelos dois filtros complementares que fornecem as versões aproximadas e detalhadas, sendo aquele através do filtro passa baixa e este através do filtro passa alta. Contudo, para uma amostra digital, teríamos o dobro de dados em relação ao sinal  $S$ ; caso o sinal tivesse 100 amostras por exemplo, as versões  $D$  e  $A$  teriam também 100 amostras, totalizando 200 amostras (SILVA, 2003).

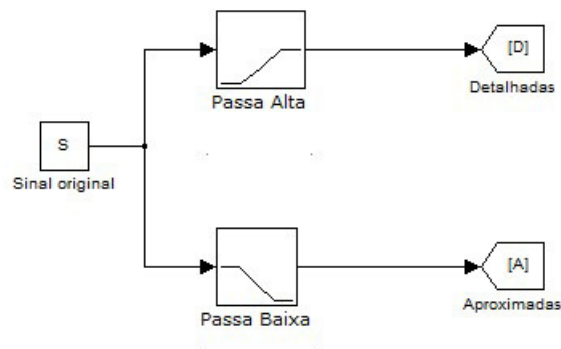


Figura 16 – Decomposição com filtros Passa Alta e Passa Baixa

Para solucionar este problema, introduz-se um operador para diminuir o número de amostras, tal operador denomina-se *downsampling*. Tal operador considera dados intercalados, sendo assim, considera o primeiro dado, rejeita o segundo dado, e assim por diante, portanto reduz pela metade o número de amostras de  $D$  e  $A$ .

Através das bibliotecas presentes no software MATLAB, pode-se observar algumas propriedades da função *wavelet* Dabeuchies tipo dois (db2) presentes na Figura 17 bem como seus coeficientes de decomposição *wavelet* na Figura 18.

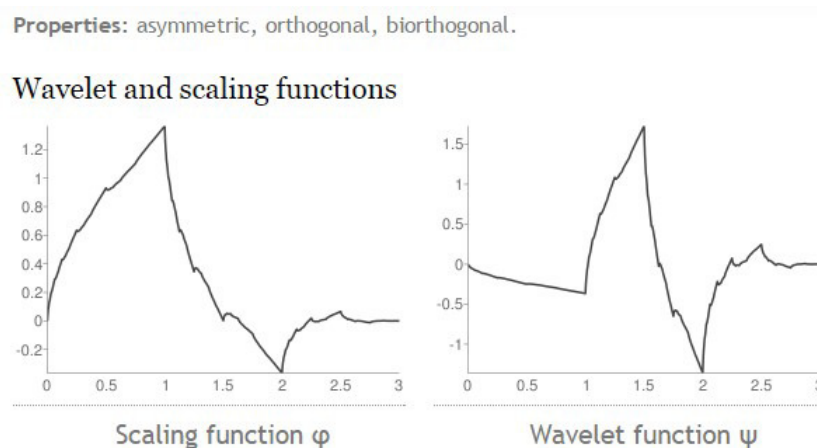


Figura 17 – Funções wavelets e escalar de Dabeuchies tipo dois. Fonte: Matlab

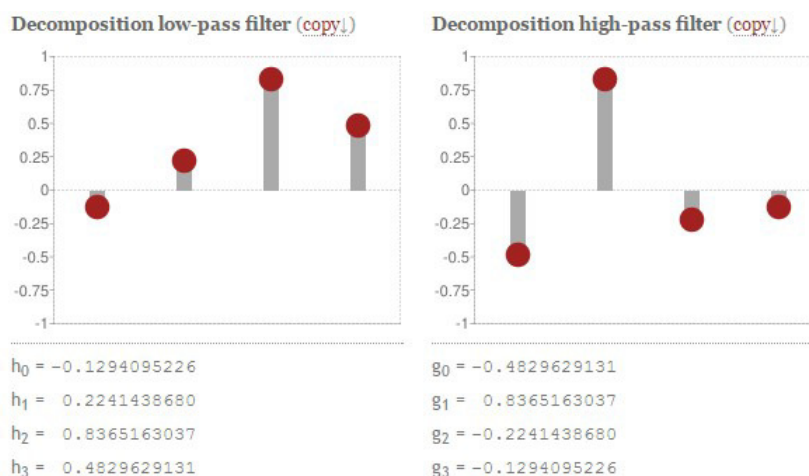


Figura 18 – Coeficientes filtro Passa Baixa e Passa Alta. Fonte: Matlab

### 4.3 Fundamentos básicos do método de localização de faltas

Para uma melhor compreensão, considera-se uma LT monofásica de comprimento  $l$ , conectando a barra A à barra B, com uma impedância característica  $Z_c$ , a velocidade de propagação da corrente é dada por  $v$ , tal qual apresentado na Figura 19 em conjunto com o diagrama de *Lattice*.

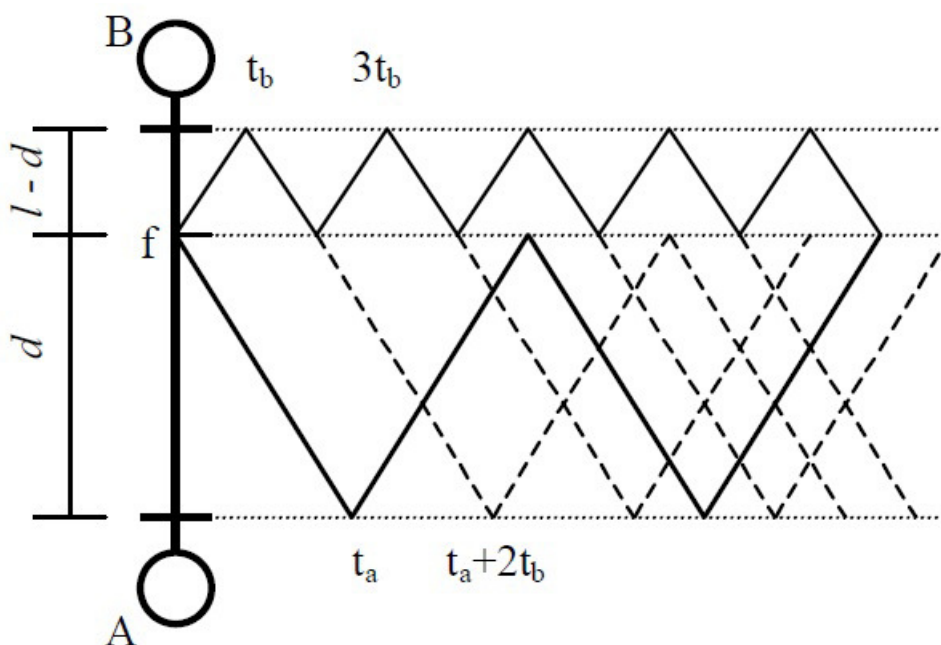


Figura 19 – Sistema elétrico e diagrama de Lattice. Silva, 2003.

Na ocorrência de uma falta no ponto localizado a uma distância  $d$  da barra A surgirá uma abrupta injeção de corrente (corrente de falta) e tensão no ponto da falta, conforme a teoria de ondas viajantes. Esta injeção será transmitida pela LT junto com o sinal fundamental até os dois terminais das linhas, a partir do ponto de falta. Para

as ondas viajantes os terminais da linha são pontos de descontinuidade, portanto as ondas se refletem nesses pontos e retornam ao local de falta onde haverá novas reflexões e assim sucessivamente até que se alcance o regime permanente de falta. Os medidores localizados nos terminais da linha identificarão abruptas mudanças em alguns intervalos, coincidindo com o tempo de excursão desses sinais entre o ponto faltoso e os terminais. Determinando-se o intervalo de tempo de identificação dos sinais entre o ponto de falta e os terminais, e utilizando a velocidade de propagação das ondas ( $v$ ), velocidade esta que é função dos parâmetros da linha, a distância pode ser estimada. Alguns métodos, como a correlação cruzada, computam os sinais das ondas viajantes; na aplicação *wavelet* o sinal medido é analisado diretamente (SILVA, 2003).

O algoritmo utiliza componentes de alta frequência gerados pela falta, portanto não necessitam de técnicas de filtragem. Serão utilizados os componentes modais de tensão, em detrimento aos valores de fase, que serão decompostos em dois níveis através da análise multiresolução AMR.

## 4.4 Algoritmo Localizador de Faltas

Nesta seção é descrito o algoritmo de localização de faltas a partir de componente de alta frequência gerados pela situação de falta. O algoritmo visa determinar os tempos de viagem das ondas de tensão do ponto de falta até ambos terminais da linha. Como ferramenta na localização dos tempos será aplicado a análise multiresolução *wavelet* (AMR) com dois níveis de decomposição.

A Figura 20 exibe o fluxograma do algoritmo localizador de faltas para redes CA, enquanto que a Figura 21 apresenta o fluxograma do algoritmo localizador de faltas em redes CC. O primeiro estágio é a obtenção dos dados digitalizados de tensão e corrente registrados nos dois terminais, através de registradores digitais de faltas de alta frequência, dados estes devidamente sincronizados e com sistema de comunicação eficiente até o terminal remoto que processará o algoritmo, conforme será explanado.

### 4.4.1 Aquisição dos dados

Os algoritmos operam com dados dos dois terminais da linha de transmissão, para isso é importante ressaltar que é necessária a comunicação e sincronização temporal entre os medidores.

Para sincronização de dados, propõe-se o uso do GPS conforme apresentado em (KIM et al., 2001), no qual um sinal de referência temporal fica disponível nos diversos pontos da rede elétrica, possibilitando a sincronização dos dados entre os terminais da linha. Em ambos terminais, cada amostra será armazenada no tempo real em que foi obtida através da referência obtida do GPS via satélite. Segundo a literatura, o erro máximo

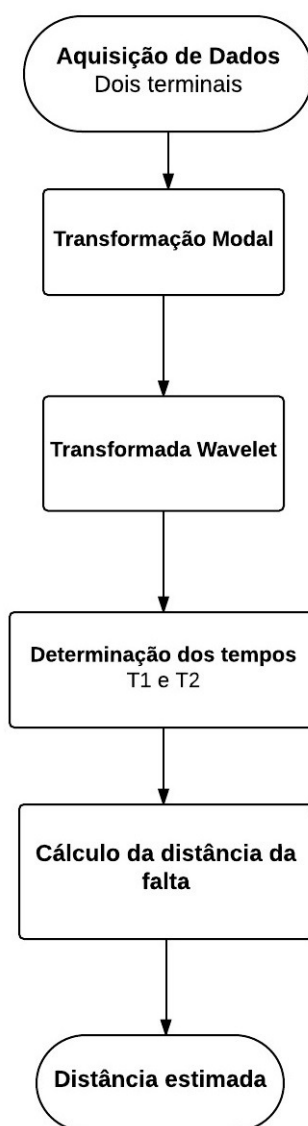


Figura 20 – Fluxograma do algoritmo de localização de faltas CA.

que este método introduz é de  $1 \mu\text{s}$ , correspondendo a aproximadamente 300 metros de imprecisão na estimativa da distância de falta, para a frequência de amostragem adotada (SILVA, 2003).

Para resolver o problema de comunicação para transferência dos dados entre os terminais, emprega-se um meio que não necessite de alta velocidade e canais contínuos, já que o localizador pode operar *offline*. Portanto a comunicação pode ser feita via rádio, satélite, ou outros meios.

Não será empregado filtros nos dados, já que o método baseia-se em componentes de alta frequência. A precisão do algoritmo está relacionada com a taxa de amostragem utilizada, na bibliografia constam trabalhos com taxas variando de 100 kHz até dezenas de megahertz (MHz). Neste trabalho a frequência de amostragem utilizada é de 120 kHz.

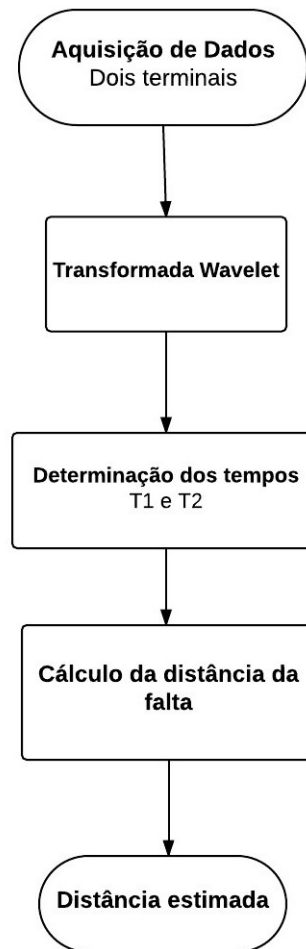


Figura 21 – Fluxograma do algoritmo de localização de faltas CC.

#### 4.4.2 Transformação modal

Nas LTs há o acoplamento mútuo entre os condutores, tal fenômeno está presente também em transmissão em corrente contínua, mas é mais perceptível em transmissão trifásica, uma vez que se verifica que perturbações de alta frequência podem aparecer em fases não faltosas. Portanto, para se utilizar o método das ondas viajantes em sistemas trifásicos devem-se decompor os sinais no domínio do tempo em seus componentes modais.

Tal transformada permite tratar o sistema trifásico como um sistema com três circuitos monofásicos, facilitando sua análise e isolando interferências magnéticas. Os valores das fases A, B e C são transformados no modo terra (modo 0) e em dois modos aéreos (modo  $\alpha$  e modo  $\beta$ ), sendo esses três modos desacoplados entre si. O modo zero possui impedância característica e velocidade de propagação diferente dos demais.

Para sistemas trifásicos podem-se utilizar as transformações modais de Clarke, já que, na modelagem do sistema, as LTs são totalmente transpostas. A matriz de transfor-

mação de Clarke (T) é definida pela equação 4.6.

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Os sinais de fase são transformados em seus componentes modais conforme a equação 4.7 para tensão.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

E para corrente, tal qual a equação 4.8.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Sendo  $V_{0,\alpha,\beta}$  e  $I_{0,\alpha,\beta}$  os vetores modais de tensão e corrente e,  $V_{a,b,c}$  e  $I_{a,b,c}$  os vetores de fase da tensão e corrente.

As velocidades de propagação do modo terra ( $v_0$ ) e do modo aéreo 1 ( $v_1$ ) são dadas respectivamente pelas equações 4.9 e 4.10.

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (4.9)$$

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (4.10)$$

Sendo  $L_0$  e  $C_0$  a indutância e a capacitância de sequência zero da LT e  $L_1$  e  $C_1$  a indutância e a capacitância de sequência positiva da LT.

Neste trabalho, a transformação modal tem por objetivo desacoplar os sinais trifásicos de tensão. Após o desacoplamento dos sinais de tensão, o algoritmo utiliza os sinais dos modos aéreos 1 (modo 1). Os sinais do modo 1 estão presentes em todos os tipos de falta, portanto será utilizado para determinação dos tempos de viagem dos sinais e para o cálculo da distância de falta.

Conforme apresentado por SILVA (2003) a utilização do sinal do modo terra para calcular a distância da falta em situações que envolvem o terra não se mostraram efetivos, uma vez que estes sinais não caracterizavam bem as ondas viajantes nos terminais, logo são insuficientes para localização das faltas.

Para a falta fase-terra com ângulo de incidência  $0^\circ$  aplicada a a 40km da barra E no instante  $t = 0,3s$  já descrita, a transformação modal das tensões no terminal E seria dada pela Figura 22.

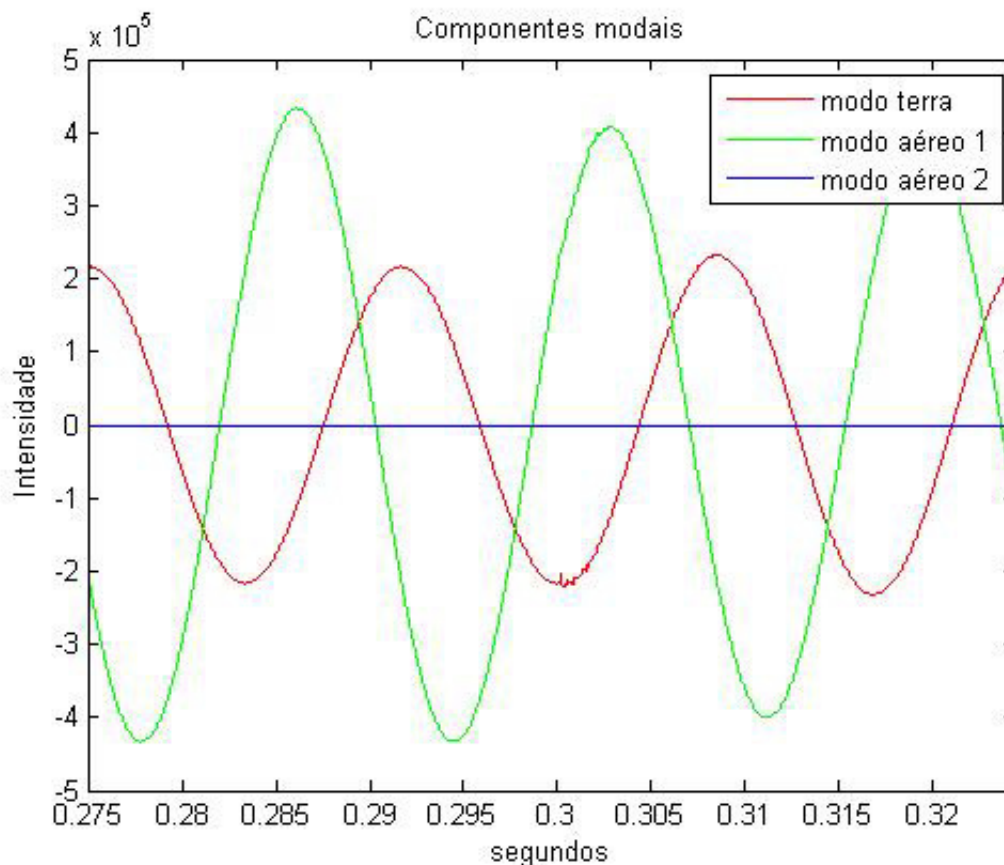


Figura 22 – Componentes modais de tensão no terminal E em situação faltosa.

A transformação modal é utilizada apenas na localização de faltas em sistemas CA, uma vez que nas linhas CC trabalha-se diretamente com os cabos de polo positivo e negativo.

### 4.4.3 Aplicação da Transformada Wavelet

A TW identifica precisamente discontinuidades sobre formas de ondas, logo mostra-se capaz de detalhar as discontinuidades causadas nos terminais pelas ondas viajantes de um sistema faltoso. Ao detectar os instantes de reflexão, a TW possibilita estimar os tempos que ocorreram as reflexões e, conseqüentemente, estimar a distância da falta.

#### 4.4.3.1 Aplicação em sistemas CA

Os sinais modais, de tensão de ambos terminais, modo aéreo 1 são decompostos através da AMR *wavelet*, utilizando como wavelet mãe a *symlet3* (*sym3*), conforme proposto

por SILVA (2003). A escolha se deu através da comparação desta *wavelet* mãe com as *wavelets* das famílias *Daubechies* da ordem 2 à 10 e *Symlet* da ordem 2 à 8 (SILVA, 2003).

Após a decomposição dos sinais modais obtêm-se dois resultados, os coeficientes *wavelet* aproximados 1 (**a1**) e detalhados 1 (**d1**), o sinal a1 corresponde aos componentes de baixa frequência (até 60kHz) do modo aéreo 1, enquanto que o sinal d1 corresponde aos componentes de alta frequência dos sinais de alta frequência (de 60kHz até 120kHz) do modo aéreo 1. Para a falta fase-terra com ângulo de incidência  $0^\circ$  aplicada a a 40km da barra E no instante  $t = 0,3s$ , os sinais a1 e d1 da decomposição AMR *wavelet* do modo aéreo 1 do componente modal de tensão no terminal E são dados respectivamente pelas Figuras 23 e 24. É importante notar que é possível recuperar o sinal do modo aéreo 1 integralmente através da re-amostragem dos sinais a1 e d1 em uma frequência duas vezes menor que a frequência de amostragem original e somando os sinais.

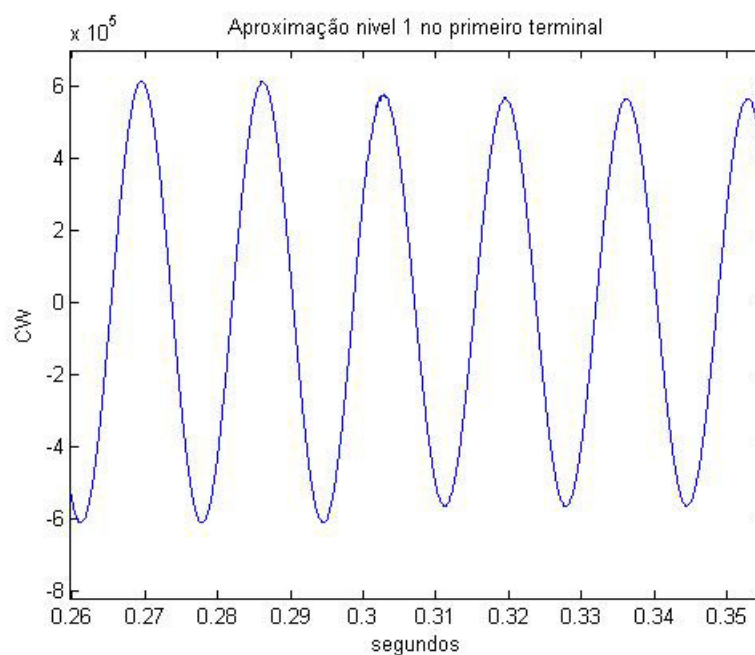


Figura 23 – Sinal aproximação 1 (a1) do modo aéreo 1 no terminal E em situação faltosa.

Nota-se na Figura 24 há alguns picos a partir de  $0,3s$ . Tais picos são causados pelas ondas viajantes geradas na situação de falta.

#### 4.4.3.2 Aplicação em sistemas CC

Os sinais de tensão do polo positivo de ambos terminais são decompostos através da AMR *wavelet*, utilizando como *wavelet* mãe a *symlet3* (sym3), tal qual realizado nos sistemas CA, conforme proposto por SILVA (2003).

Após a decomposição dos sinais de tensão obtêm-se dois resultados, os coeficientes *wavelet* aproximados 1 (**a1**) e detalhados 1 (**d1**), o sinal a1 corresponde aos componentes de

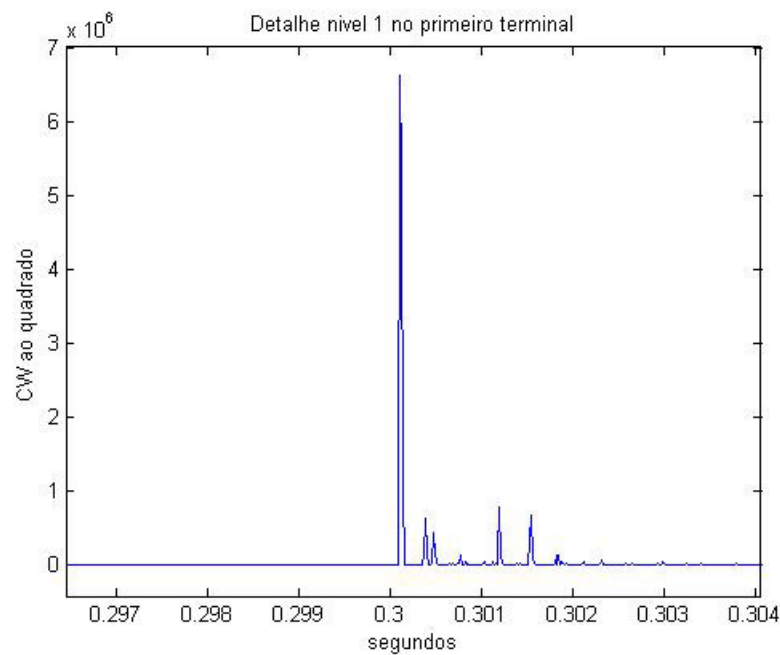


Figura 24 – Sinal detalhe 1 (d1) do modo aéreo 1 no terminal E em situação faltosa.

baixa frequência( até 67,5kHz), o sinal d1 equivale aos componentes de alta frequência (de 67,5kHz até 135kHz). Para uma falta polo positivo-negativo-terra (P-N-terra) aplicada a 80 km do Conversor 1 no instante  $t = 4,1$ s, os sinais a1 e d1 ao quadrado da decomposição AMR *wavelet* da tensão no polo positivo do Conversor 1 são dados respectivamente pelas Figuras 25 e 26. Tal qual explicitado na falta CA, o sinal e tensão do polo positivo no Conversor 1 pode ser recuperado integralmente através da re-amostragem dos sinais a1 e d1 em uma frequência duas vezes menor que a frequência de amostragem original e somando os dois sinais.

#### 4.4.4 Formulação para localização de faltas com dados provenientes de dois terminais da linha

Caso as etapas anteriores tenham sido executadas corretamente, o algoritmo conhece os sinais de detalhe 1 do modo 1 referentes aos dois terminais para os sistemas CA, bem como os sinais de detalhe 1 das tensões dos polos positivos nos dois conversores para os sistemas CC. Analisando estes sinais, pode-se determinar os tempos de reflexão da primeira onda viajante em ambos os terminais, assim é possível estimar a distância de falta. Esta técnica é de fácil aplicação e não envolve muitos cálculos. A única desvantagem, conforme já foi mencionado, é a sincronização e transmissão dos dados, resultando em um aumento dos custos.

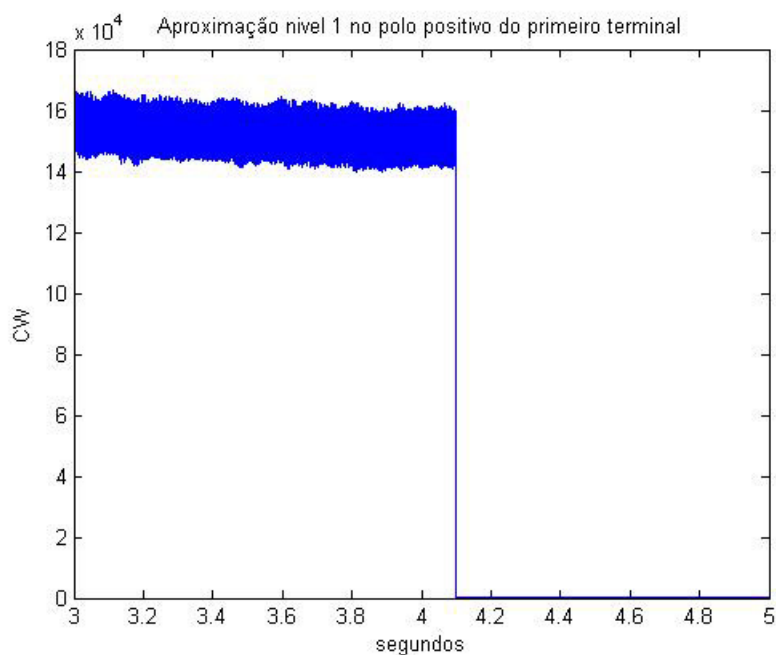


Figura 25 – Sinal aproximação 1 (a1) da tensão do polo positivo no Conversor 1 em situação faltosa.

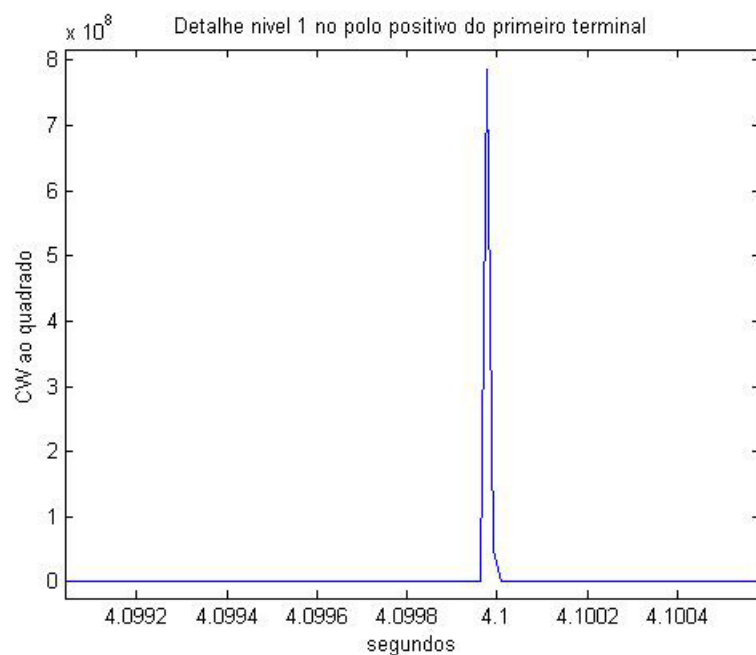


Figura 26 – Sinal detalhe 1 (d1) da tensão do polo positivo no Conversor 1 em situação faltosa.

#### 4.4.5 Determinação dos tempos de reflexão

Para o cálculo da distância da falta a partir de dados dos dois terminais, é necessário identificar os tempos de chegada das ondas viajantes em ambos terminais. O tempo  $t_a$  corresponde ao tempo de chegada da primeira onda viajante na barra E (faltas CA) ou no

Conversor 1 (faltas CC), enquanto que o tempo  $t_b$  corresponde ao tempo de chegada da primeira onda viajante no terminal F (faltas CA) ou Conversor 2 (faltas CC).

O algoritmo de localização de ambos os tempos de reflexão, possui dois passos definidos. Utiliza-se os sinais de detalhe 1, esses sinais apresentam os coeficientes *wavelet* de alta frequência, então alguns ruídos de baixa intensidade aparecem ao longo do sinal, o que induziria um ponto de reflexão falso. Para resolver este problema, todo o sinal é subtraído de um limiar de segurança, esse valor é definido empiricamente para os diferentes tipos de falta.

Após subtrair o limiar de ruídos, o próximo passo consiste em localizar o primeiro pico no sinal. Para facilitar a localização dos picos, os coeficientes *wavelet* são elevados ao quadrado, conforme proposto por SILVA (2003). Assim, os picos presentes nas Figuras 24 e 26 são definidos e encontrados precisamente no tempo. O processo é realizado para os dois terminais.

#### 4.4.6 Cálculo da distância da falta envolvendo dados de dois terminais

Considerando que  $t_a$  e  $t_b$  (Figura 19) correspondem ao tempo dos picos iniciais dos coeficientes *wavelets* de detalhe 1 do modo aéreo 1 (D1M1) para os sinais registrados nas barras E e F respectivamente, para a simulação em corrente alternada. Ou, no caso em corrente contínua,  $t_a$  e  $t_b$  correspondem ao tempo dos picos iniciais dos coeficientes de detalhe 1 da tensão no polo positivo no Conversor 1 e no Conversor 2, respectivamente; então, o cálculo do atraso entre os tempos de detecção da falta nos dois terminais é dado pela equação 4.11, conforme apresentado por MAGNAGO (1998).

$$t_d = t_b - t_a \quad (4.11)$$

Uma vez determinado  $t_d$ , a distância entre o ponto da falta e o terminal E é calculada pela equação 4.12.

$$d = \frac{l - v_{m1}t_d}{2} \quad (4.12)$$

Sendo  $l$  o comprimento (em quilômetros) da linha de transmissão,  $v_{m1}$  é a velocidade de propagação do modo aéreo 1 (em km/s) e  $d$  é a distância estimada (em quilômetros) da falta em relação ao barramento E.

Na simulação HVDC,  $v_{dc}$  corresponde à velocidade de propagação calculada pelo método de linhas longas com perdas, logo:

$$v_{dc} = \frac{1}{\sqrt{L_{dc} \times C_{dc}}} \quad (4.13)$$

Sendo  $L_{dc}$  e  $C_{dc}$  a indutância dos condutores e a capacitância dos condutores, respectivamente.

#### 4.4.7 Formulação para localização de faltas com dados provenientes de um terminal da linha

Esta seção apresenta os fundamentos para o algoritmo de localização de falta com a técnica que utiliza dados somente do terminal local, as abordagens serão feitas para faltas em sistemas CA e CC.

Esta abordagem se torna mais econômica, já que faz uso dos sinais registrados em apenas um terminal da linha e não precisa de comunicação entre os terminais, porém também é mais robusta matematicamente.

Devido a carência do tempo medido no barramento teórico, os tempos medidos terão relação com a primeira reflexão de onda no terminal local. Ou seja, o cálculo para localização da falta baseia-se no tempo de reflexão das ondas viajantes entre o ponto da falta e o terminal referência.

Para o correto funcionamento da técnica para qualquer falta é a necessidade de distinguir se a falta ocorreu na primeira ou segunda metade da linha, pois alguns efeitos podem interferir nas análises tal qual apresentado nas Figuras 27a e 27b. (Silva, 2003)

Para faltas que ocorreram na segunda metade da linha, verifica-se que as reflexões ocorridas no terminal remoto são percebidas no terminal local em  $2t_b + t_a$  antes mesmo da reflexão que ocorreu no próprio terminal local. Tal efeito é totalmente diferente ao percebido na falta ocorrida no primeiro terminal da linha, pois o segundo sinal percebido é aquele presente em  $3t_a$ .

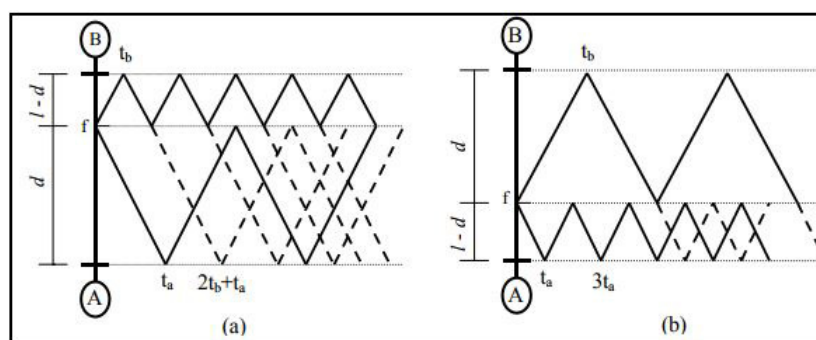


Figura 27 – a) Falta ocorrida na segunda metade da linha. b) Falta ocorrida na primeira metade da linha. Fonte: Adaptada de SILVA (2003).

Será apresentado as formulações e conceitos completos para localização de falta com dados de apenas um terminal, incluindo os conceitos de pré localização, única diferença entre este método e o que se utiliza dos dados de ambos terminais é na formulação matemática, uma vez que a forma de obtenção de dados e a velocidade de propagação das ondas na linha são idênticas.

É necessário destacar que as abordagens matemáticas aqui apresentadas não serão

utilizadas totalmente no algoritmo proposto. A simulação da falta é feita com a abertura de uma chave simulando o rompimento dos cabos de forma que as reflexões do terminal remoto não são percebidas significativamente no terminal local.

Utilizando como base a Figura 27, nota-se que ao calcular o intervalo de tempo ( $t_d = t_2 - t_1$ ) entre as duas primeiras ondas percebidas no barramento local (barramento A), teríamos:

$$\left. \begin{array}{l} t_{s(a)} = 2t_b + t_a - t_a = 2t_b \\ t_{d(b)} = 3t_a - t_a = 2t_a \end{array} \right\} 2t_b = 2t_a \Rightarrow t_b = t_a \Leftrightarrow l - d \quad (4.14)$$

A pré localização é feita baseado na comparação da diferença entre os tempos das reflexões iniciais revelados pela TW, obtendo-se a diferença entre os tempos de propagação em relação ao meio da linha coberta pelo localizados. (ABUR E MAGNAGO, 2000)

Uma abordagem mais direta é dizer que quanto maior a distância da falta maior será o delta entre os tempos de propagação das primeiras reflexões mostradas pela TW. Caso esse valor seja maior que a diferença dos tempos de reflexão para a metade da linha, a falta estará alocada na segunda metade, por outro lado, caso o tempo seja menor a falta ocorreu na primeira metade. Tal sub-rotina pode ser formulada da seguinte forma:

$$t_{m0} = \frac{l}{2 \times v_{m0}} \quad (4.15)$$

$$t_{m1} = \frac{l}{2 \times v_{m1}} \quad (4.16)$$

$$t_{l/2} = |t_{m0} - t_{m1}|; t_{dm} = |t_1 - t_3| \quad (4.17)$$

$$t_{dm} > t_{l/2} \Leftrightarrow 2^a \text{ metade} \quad (4.18)$$

$$c.c. \Leftrightarrow 1^a \text{ metade} \quad (4.19)$$

sendo  $t_{m0}$  e  $t_{m1}$  são os tempos com relação a velocidade dos modos terra e aéreo 1, para sistemas CC faz-se a mesma analogia apresentada para dados de dois terminais ( $t_{dc}$ ). De acordo com SILVA (2003) esta técnica mostra-se em eficaz, porém apresenta alguns erros em casos de faltas próximas a metade da linha.

#### 4.4.8 Cálculo da distância de falta - Algoritmo utilizado neste trabalho

Como já explicado, para as simulações realizadas não foi observado reflexões do terminal remoto durante o transitório da falta. Assim, para os sistemas HVDC, mede-se o tempo entre os dois primeiros picos consecutivos dos coeficientes *wavelets*  $V_{dc1}$ , referentes ao sinal de tensão CC medido no terminal 1, e conhecendo a velocidade de propagação ( $v_{dc}$ ), pode-se estimar a distância da falta. Portanto, a distância é calculada através da Equação 4.20, onde  $d$  é a distância da falta em km,  $v_{dc}$  é a velocidade de propagação da onda no sistema HVDC e  $t_d$  a diferença entre os dois picos consecutivos dos coeficientes *wavelets*. (Apatado para HVDC de SILVA, 2003)

$$d = \frac{v_{dc} \times t_d}{2} \quad (4.20)$$

A Figura 19 auxilia na descrição da equação da distância e do tempo  $t_d$ :

$$t_d = 3t_a - t_a \quad (4.21)$$

$$t_d = 2t_a \quad (4.22)$$

$$d = v \times 2t_a \quad (4.23)$$

Como  $2t_a$  representa o tempo de reflexão entre o terminal local e o ponto de falta e deste para o terminal local novamente, é necessário que se divida por 2 para se obter o tempo de reflexão entre o terminal local e o ponto de falta. Por consequência chegamos na Equação 4.24.

$$d = \frac{v \times 2t_a}{2} = v \times t_a \quad (4.24)$$

Embora não será utilizada no algoritmo proposto, será apresentado as equações para as faltas que se percebe a influência do terminal remoto no terminal local. Conforme supracitado, é feito a pré determinação de qual metade da linha a falta ocorreu, depois o cálculo da distância da falta é calculado por:

- faltas na primeira metade da linha utiliza-se a Equação 4.20;
- para faltas na segunda metade da linha, tem-se a Equação 4.25.

$$d = l - \frac{v_{dc} \times t_d}{2} \quad (4.25)$$

sendo  $d$  a distância da falta em km,  $l$  o comprimento da linha de transmissão (também em km),  $v_{dc}$  a velocidade de propagação da onda no sistema HVDC e  $t_d$  a diferença entre os dois picos consecutivos dos CW's.

## 5 Localização de faltas utilizando a Transformada Wavelet - Testes e resultados obtidos

O algoritmo de localização completo foi implementado no *software* MATLAB e testado usando-se dados obtidos através de simulações do *software* *SimPowerSystems* que é uma das ferramentas do *Simulink*, presente no MATLAB. Como descrito no Capítulo 4, foram considerados vários tipos de faltas CA entre os barramentos E e F, com diferentes resistências de faltas. Também no Capítulo 4, foram especificadas alguns tipos de faltas em HVDC com diferentes resistências de falta entre o Conversor 1 e o Conversor 2.

O sistema elétrico CA considerado na Figura 3 apresenta para o modo aéreo 1 (m1) uma velocidade de propagação de  $2,9318 \times 10^5 km/s$  e para o modo terra (m0) uma velocidade de propagação de  $2,228 \times 10^5 km/s$ , sendo o passo de amostragem de  $8,33\mu s$  ( $120kHz$ ). Os sinais do modo 1 são decompostos em dois níveis tendo como *wavelet-mãe* a Symlet3 (Sym3). Os sinais dos coeficientes *wavelet* (CW) de detalhe 1 do modo aéreo 1 (m1) são utilizados na localização da falta. É importante mencionar que para o cálculo das distâncias foram empregados apenas os sinais de tensão nos terminais E e F.

O sistema CC apresentado na Figura 9 apresenta para as ondas viajantes nos condutores uma velocidade de propagação de  $1,650 \times 10^5 km/s$ . Os sinais dos CW de detalhe 1 das tensões de polo positivo são decompostos em dois níveis tendo como *wavelet-mãe* a Symlet3 (Sym3). Tal qual na localização de faltas em corrente alternada, será utilizado apenas os sinais de tensão.

Os resultados serão apresentados através de tabelas e gráficos. O erro percentual relativo apresentado é calculado em relação ao comprimento total das LT (200km), sendo calculado pela equação 5.1.

$$\epsilon_{rel}(\%) = \left| \frac{d_{estimado} - d_{real}}{l_{LT}} \right| \times 100\% \quad (5.1)$$

O erro absoluto e o erro médio total são calculados através das equação 5.2 e 5.3, sendo  $N$  o número de situações consideradas,  $d_{estimado}$  a distância calculada pelo algoritmo,  $d_{real}$  a distância real da falta e  $l_{LT}$  o comprimento da linha. As equações dos erros são similares às utilizadas por SILVA (2003).

$$\epsilon_{abs}(km) = |d_{estimado} - d_{real}| \quad (5.2)$$

$$\epsilon_{medio} = \frac{\sum_1^N \epsilon_{rel}(\%)}{N} \quad (5.3)$$

## 5.1 Resultados obtidos - Linha de Transmissão em Corrente Alternada

### 5.1.1 Dados de 2 terminais

Este trabalho tem por objetivo testar os algoritmos localizadores para sistemas de transmissão em HVDC. Entretanto, foi realizado testes de uma adaptação do algoritmo para um sistema CA a fim de se ter uma referência consistente, a saber o trabalho de Silva (2003). Como o foco do trabalho é o sistema HVDC, o algoritmo para localização usando dados apenas de um terminal foi aplicado apenas para este tipo de transmissão.

Assumindo que os sinais de tensão nos barramentos E e F estão corretamente sincronizados via GPS, uma falta fase A-terra é simulada a  $80km$  da barra E, com um ângulo de incidência zero graus e resistência de falta de  $1,0m\Omega$  (praticamente uma falta franca). A Figura 28 apresenta os CWs de detalhe 1 do modo 1 obtidos nos barramentos E e F. Para o exemplo supracitado, o primeiro pico dos CWs na barra E ocorreu em  $t_E = 0,300267s$  e, na barra F em  $t_F = 0,300400s$ . Logo,  $t_d = 0,133333ms$ . Substituindo  $t_d$  na equação 4.12, tem-se uma distância estimada de  $80,4544km$

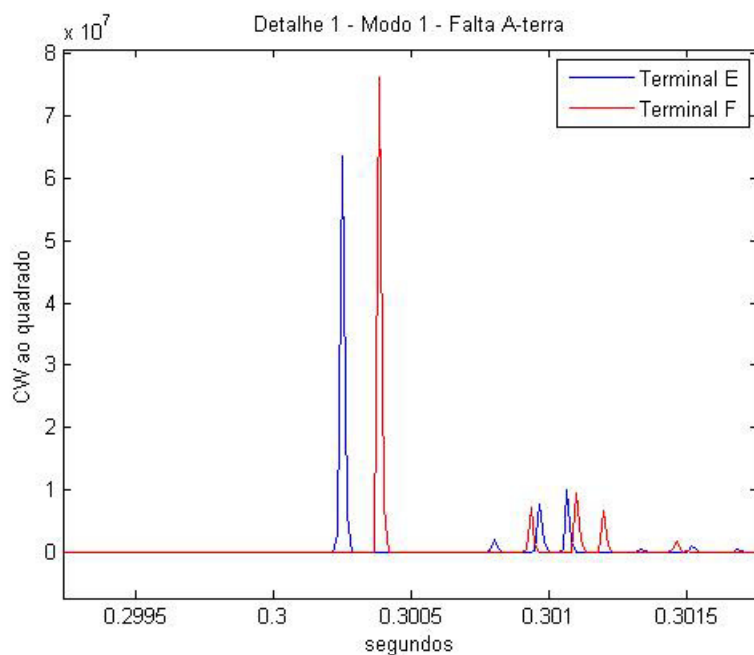


Figura 28 – Coeficientes wavelet para uma falta fase A-terra a  $80 km$  da barra E, com resistência de falta de  $1m\Omega$  e ângulo de incidência de  $0^\circ$

As tabelas que apresentam os resultados obtidos pelo algoritmo de localização mostram os seguintes parâmetros:

(i) a distância real, ou seja, o ponto exato em que a falta foi aplicada em relação ao barramento E;

- (ii) a distância estimada, que é a localização calculada pelo algoritmo;
- (iii) o erro absoluto calculado conforme a equação 5.2;
- (iv) o erro relativo ou percentual observado, calculado através da equação 5.1;
- (v) na parte inferior é apresentado o erro médio total, calculado segundo a equação 5.3.

Ressalta-se que todas as faltas terão ângulo de incidência de  $0^\circ$ , já que segundo SILVA (2003) os resultados são semelhantes para ângulos variados.

Para melhor exemplificar, na Tabela 7 observa-se que a terceira linha representa uma falta do tipo fase-terra (A-terra) causada a  $40,0km$  da barra E. A distância estimada foi de  $38,92km$ , representando um erro absoluto de  $1,08km$  e um erro percentual de  $0,54\%$ .

Os primeiros resultados serão os das faltas francas ( $0\Omega$ ) Fase-Terra e as faltas fase A-terra e fase B-terra são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente. As faltas fase A-terra e B-terra com resistência de falta de  $200\Omega$  têm seus resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10 respectivamente.

Tabela 7 – Faltas fase-terra (A-terra) com Resistência de falta de  $0\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	16,93	3,07	1,534
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,477</b>

Os gráficos presentes nas Figuras 29 e 30, cujo eixo  $x$  contém as distâncias de falta das respectivas Tabelas e cujo eixo  $y$  apresenta o erro percentual, apresentam que a resistência de falta pouco interfere na estimativa de localização, conforme apresentado por SILVA (2003).

Os próximos resultados apresentados serão os de falta de baixa impedância ( $1,0m\Omega$ ) Fase-Fase-Terra. As faltas AB-terra e fase AC-terra são apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente. As faltas AB-terra e AC-terra, com resistência de falta de  $200\Omega$ , têm seus resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14, respectivamente.

Com os resultados já apresentados verifica-se que as estimativas de distâncias das

Tabela 8 – Faltas fase-terra (B-terra) com Resistência de falta de  $0\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

Tabela 9 – Faltas fase-terra (A-terra) com Resistência de falta de  $200\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	16,93	3,07	1,534
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,477</b>

Tabela 10 – Faltas fase-terra (B-terra) com Resistência de falta de  $200\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

faltas monofásicas e bifásicas envolvendo a terra são idênticas, logo pode-se concluir, por hora, que as faltas fase-terra e fase-fase-terra apresentam resultados similares independentes de quais fases sejam e praticamente independentes das resistências de faltas.

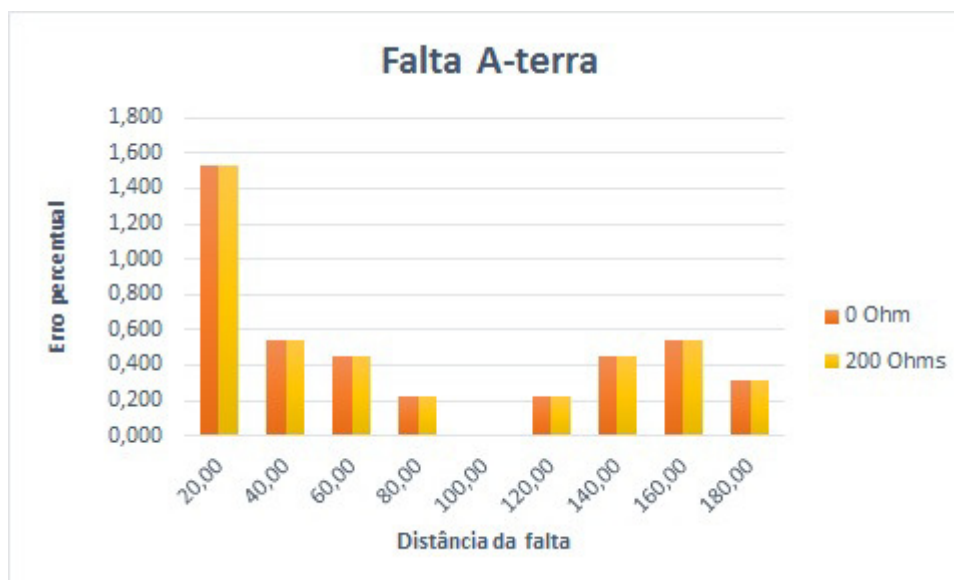


Figura 29 – Comparação entre as diferentes resistências de faltas na estimativa de distância em faltas fase A-terra



Figura 30 – Comparação entre as diferentes resistências de faltas na estimativa de distância em faltas fase B-terra

Os próximos resultados apresentados são das faltas trifásicas aterradas (ABC-t), falta esta que é a mais rara de ocorrer sem sistemas de transmissão, já que as fases são afastadas por vários metros. Os resultados das faltas de baixa impedância e de resistência de falta de 200Ω do tipo ABC-t são apresentados nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

Através das tabelas de 8 à 16, nota-se que o algoritmo encontra os mesmos resultados para as faltas que envolvem a terra, independente de quais fases sejam e das impedâncias de aterramento.

As próximas análises serão das faltas sem envolvimento da terra. Os resultados obtidos para as faltas fase-fase AB e AC e das faltas trifásicas sem a terra (ABC) são apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19, respectivamente. Destaca-se que praticamente não há variação da impedância de falta nessas simulações, uma vez que esta refere-se a impedância

Tabela 11 – Faltas fase-fase-terra (AB-terra) com Resistência de falta de  $0\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

Tabela 12 – Faltas fase-fase-terra (AC-terra) com Resistência de falta de  $0\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

Tabela 13 – Faltas fase-fase-terra (AB-terra) com Resistência de falta de  $200\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

entre as fase e a terra.

A Figura 31 mostra que os valores obtidos para os cinco tipos diferentes de fase envolvendo a fase A são os mesmos, tirando apenas uma única exceção. Pode-se concluir

Tabela 14 – Faltas fase-fase-terra (AC-terra) com Resistência de falta de  $200\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

Tabela 15 – Faltas trifásica-terra (ABC-terra) com Resistência de falta de  $0\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

Tabela 16 – Faltas trifásica-terra (ABC-terra) com Resistência de falta de  $200\Omega$

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

então que, independente das fases em que ocorre as faltas os resultados são praticamente idênticos. Tal fato é explicado pela transformação modal, já que os sinais trifásicos são transformados em sinais de modos aéreos e terra e qualquer distúrbio em qualquer fase

Tabela 17 – Faltas Fase-fase (AB)

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

Tabela 18 – Faltas Fase-fase (AC)

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

Tabela 19 – Faltas Trifásica (ABC)

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,37	0,63	0,313
40,00	38,92	1,08	0,540
60,00	60,91	0,91	0,454
80,00	80,45	0,45	0,227
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,55	0,45	0,227
140,00	139,09	0,91	0,454
160,00	161,08	1,08	0,540
180,00	180,63	0,63	0,313
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,341</b>

apresentará um distúrbio no modo aéreo 1 (m1) que é o sinal tratado com a TW.

Uma única simulação será realizada para uma amostragem superior aos  $120kHz$ . A Tabela 20 contém os resultados de uma falta AB-terra, com resistência de falta de  $0\Omega$

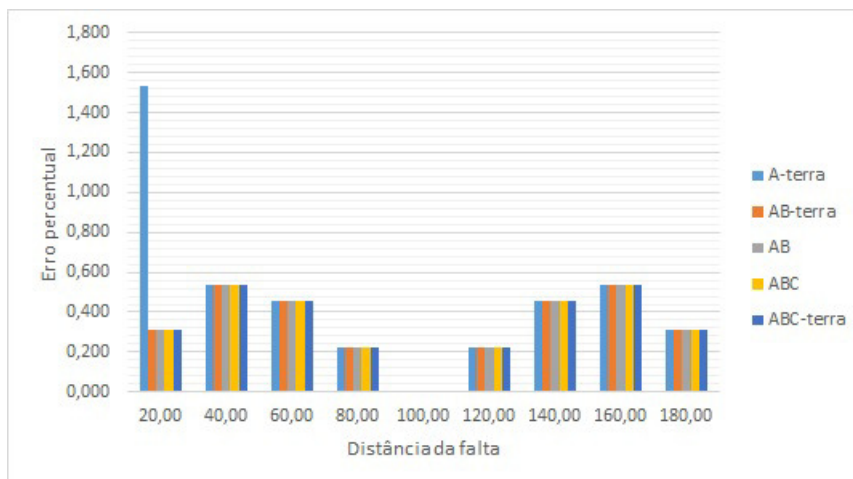


Figura 31 – Comparação entre diversos tipos de falta envolvendo a fase A

amostrados em 1MHz. Nota-se que a precisão da localização aumentou consideravelmente. O gráfico na Figura 32 compara os resultados da mesma falta para a amostragem de 120kHz e 1MHz, sendo os números do eixo *x* as distâncias de falta correspondentes na Tabela 20 e o eixo *y* contém os erros (%).

Tabela 20 – Falta fase-fase-terra (AB-terra) com resistência de falta de 0Ω amostrada em 1MHz.

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
20,00	19,96	0,33	0,020
40,00	40,19	0,10	0,095
60,00	60,13	0,13	0,063
80,00	80,06	0,06	0,032
100,00	100,00	0,00	0,000
120,00	119,94	0,06	0,032
140,00	139,87	0,13	0,063
160,00	159,81	0,10	0,095
180,00	180,04	0,33	0,020
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,047</b>

O valor de amostragem de 1 MHz foi utilizado a título de pesquisa, uma vez que em uma situação real, fora do ambiente de simulação, seria oneroso com a tecnologia vigente.

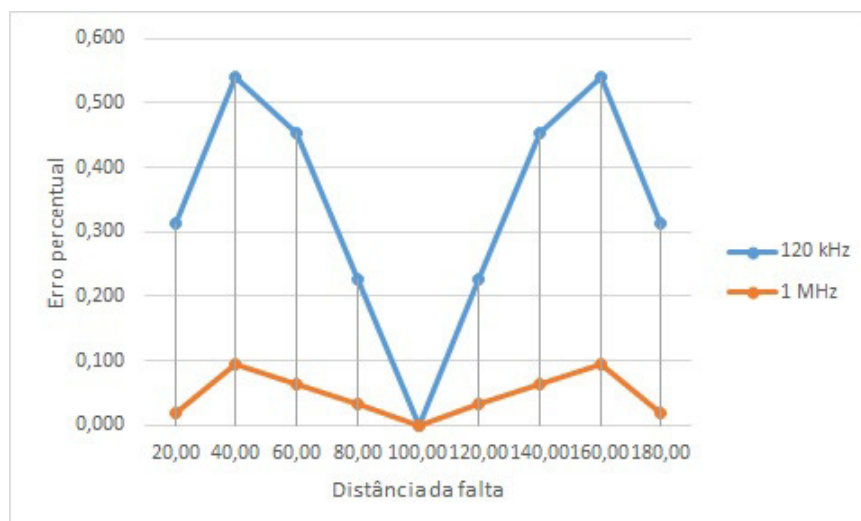


Figura 32 – Comparação falta AB-terra com frequências de amostragem de 120kHz e 1MHz.

## 5.2 Resultados alcançados utilizando-se dados provenientes de dois terminais - Linha de Transmissão em Corrente Contínua (HVDC)

Assumindo que os sinais de tensão nos conversores 1 e 2 estão corretamente sincronizados via GPS, uma falta polo positivo-negativo-terra é simulada a  $50km$  do conversor 1 em  $4,1s$ , com resistência de falta de  $0\Omega$ . A Figura 33 apresenta os CWs de detalhe 1 das tensões do polo positivo obtidos nos conversores 1 e 2. Para o exemplo supracitado, o primeiro pico dos CWs no conversor 1 ocorreu em  $t_{c1} = 4,100281s$  e, na barra F em  $t_{c2} = 4,100888s$ . Logo,  $t_d = 0,607407ms$ . Substituindo  $t_d$  na equação 4.12, tem-se uma distância estimada de  $49,8875km$ .

As tabelas que apresentam os resultados obtidos pelo algoritmo de localização mostram os seguintes parâmetros:

- (i) a distância real, ou seja, o ponto exato em que a falta foi aplicada em relação ao conversor 1;
- (ii) a distância estimada, que é a localização calculada pelo algoritmo;
- (iii) o erro absoluto calculado conforme a equação 5.2;
- (iv) o erro relativo ou percentual observado, calculado através da equação 5.1;
- (v) na parte inferior é apresentado o erro médio total, calculado segundo a equação 5.3.

Para melhor exemplificar, na Tabela 21 observa-se que a terceira linha representa uma situação faltosa do tipo polo positivo-negativo-terra causada a  $70,0km$  do conversor 1. A distância estimada foi de  $38,92km$ , representando um erro absoluto de  $1,08km$  e um

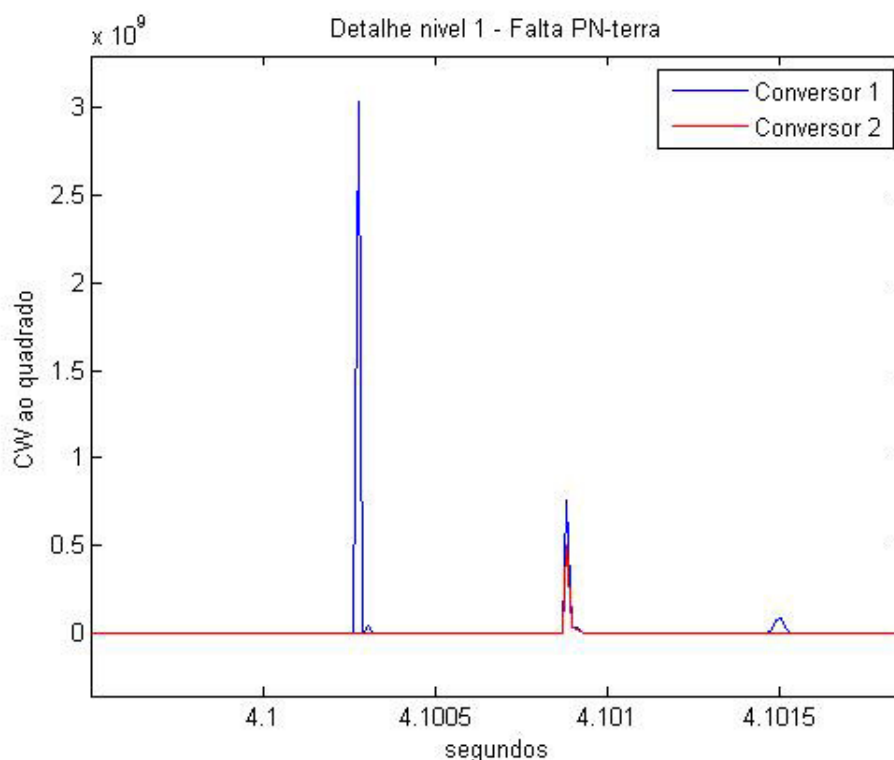


Figura 33 – Coeficientes wavelet para uma falta Polos Positivo-Negativo-terra a 50 km do conversor 1, com resistência de falta de  $0\Omega$ .

erro percentual de 0,54%.

O primeiro resultado será o da falta com baixa resistência ( $0\Omega$ ) polo positivo-negativo-terra apresentado na Tabela 21. A falta polo positivo-negativo-terra com resistência de falta de  $20\Omega$  têm seus resultados apresentados na Tabelas 22 e a falta de  $200\Omega$  têm seus resultados apresentados na Tabelas 23. Diferentemente das faltas CA que se optou por uma falta franca e uma resistência de falta considerada elevada ( $200\Omega$ ), para as faltas em HVDC uma resistência mais baixa foi utilizada, no valor de  $20\Omega$ .

Os gráficos 34, 35, 36, 37 e 38 apresentam os sinais de detalhe 1 (d1) dos coeficientes *wavelet* ao quadrado das faltas polo positivo-negativo-terra com resistência de falta de  $0\Omega$ . Como esperado, para as faltas antes do meio da linha o pico é percebido primeiro no Conversor 1, na falta causada exatamente no centro da linha os picos são coincidentes no tempo para os dois conversores, enquanto que para as faltas causadas na segunda metade da linha o pico é notado primeiro no Conversor 2.

Os gráficos das Figuras 39, 40, 41 e 42 mostram os coeficientes *wavelet* ao quadrado do detalhe 1 (d1) na tensão, para faltas PN-terra, com resistência de falta de  $20\Omega$ . Os tempos percebidos são praticamente coincidentes com os tempos percebidos para falta franca. Entretanto, percebe-se diferença na intensidade dos coeficientes e, principalmente, no padrão dos picos de reflexão. A diferença de resistência de falta causa diferentes

Tabela 21 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

Tabela 22 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

Tabela 23 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $200\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

dissipações das energias nas ondas viajantes, resultando no fenômeno destacado.

Analogamente, para comparação das intensidades dos coeficientes, as Figuras 43, 44, 45, 46 e 47, representam o mesmo tipo de falta, porém com resistência de  $200\Omega$ . As distâncias estimadas foram praticamente as mesmas, porém as intensidades dos coeficientes mudaram, tal qual observado nas faltas de  $0\Omega$  e  $20\Omega$ . A Figura 48 facilita a comparação das diferentes intensidades para as resistências de falta de  $20\Omega$  e  $200\Omega$ . Percebe-se a diferença das grandezas nos eixos  $y$ , porém, ao notarmos o eixo  $x$ , percebe-se que os tempos dos picos são praticamente idênticos.

Tal qual visto nas faltas em corrente alternada, a variação da impedância de falta pouco mudou as distâncias estimadas pelo algoritmo. Os resultados apresentados nas Tabelas 24, 25 e 26 correspondem às faltas de Polo Positivo-terra com resistência de falta de  $0\Omega$ ,  $20\Omega$  e  $200\Omega$ , respectivamente.

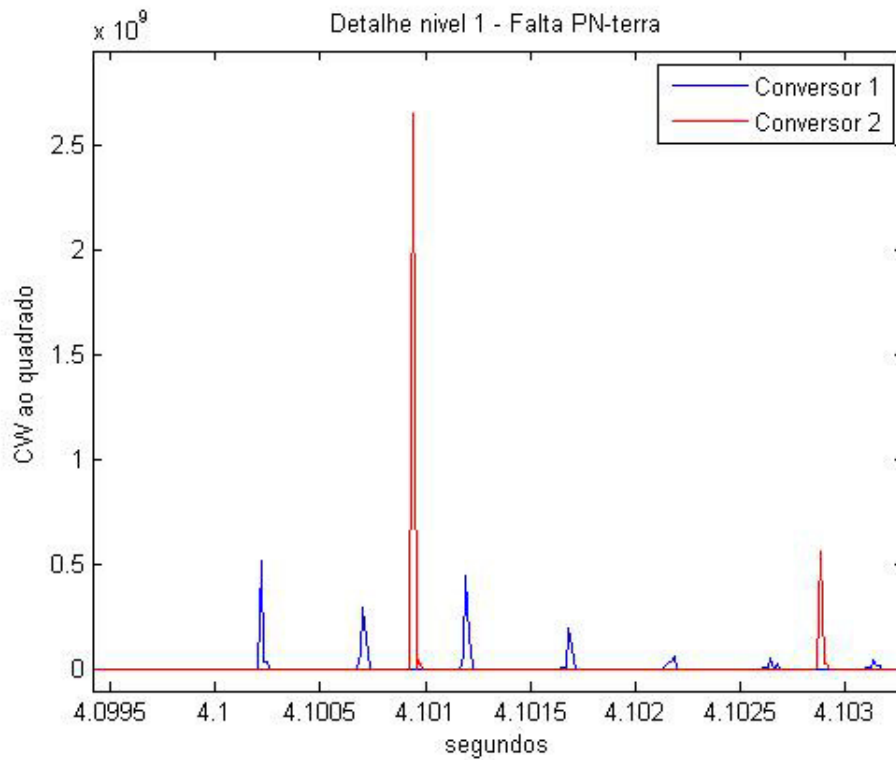


Figura 34 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$  causada a 40km do Conversor 1.

Tabela 24 – Falta Polo Positivo-terra (P-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

Tabela 25 – Falta Polo Positivo-terra (P-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

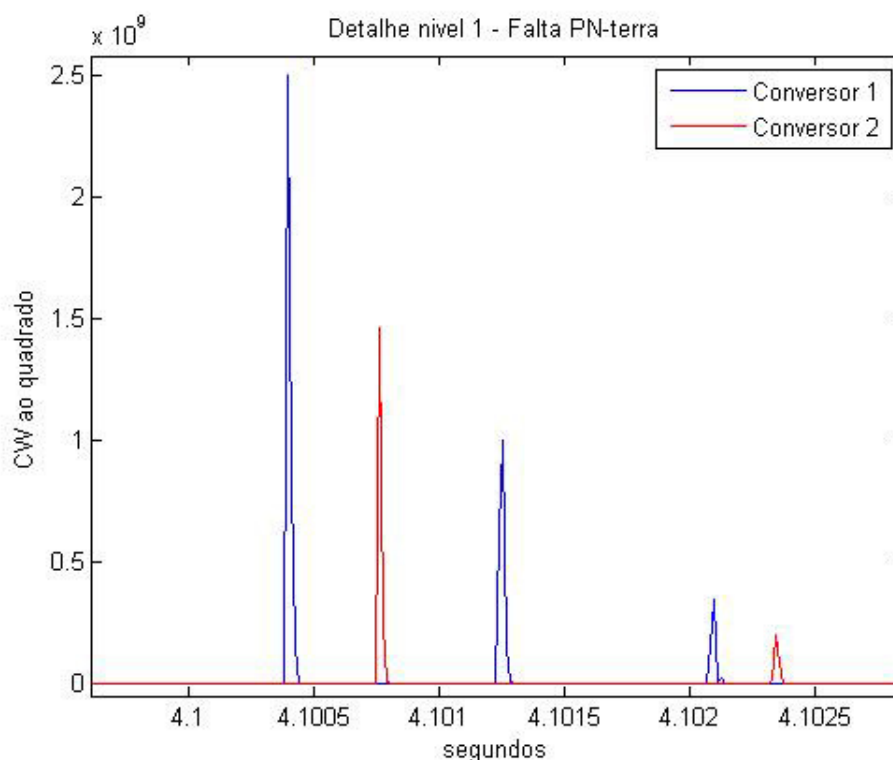


Figura 35 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$  causada a 70km do Conversor 1.

Tabela 26 – Falta Polo Positivo-terra (P-terra) com resistência de falta de  $200\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

Os próximos resultados apresentados são das faltas Polo Positivo-Negativo, sendo as Tabelas 27, 28 e 29 os resultados das faltas com resistência de falta de  $0\Omega$ ,  $20\Omega$  e  $200\Omega$ , respectivamente.

Semelhante às simulações realizadas e ao algoritmo utilizado para as faltas em corrente alternada, os resultados das faltas HVDC também são idênticos para as faltas causadas nas mesmas distâncias independente do tipo de falta. Tal fato pode ser visualizado na Figura 49, que contém a média dos erros absolutos obtidos para as faltas a LT HVDC utilizando dados de ambos terminais.

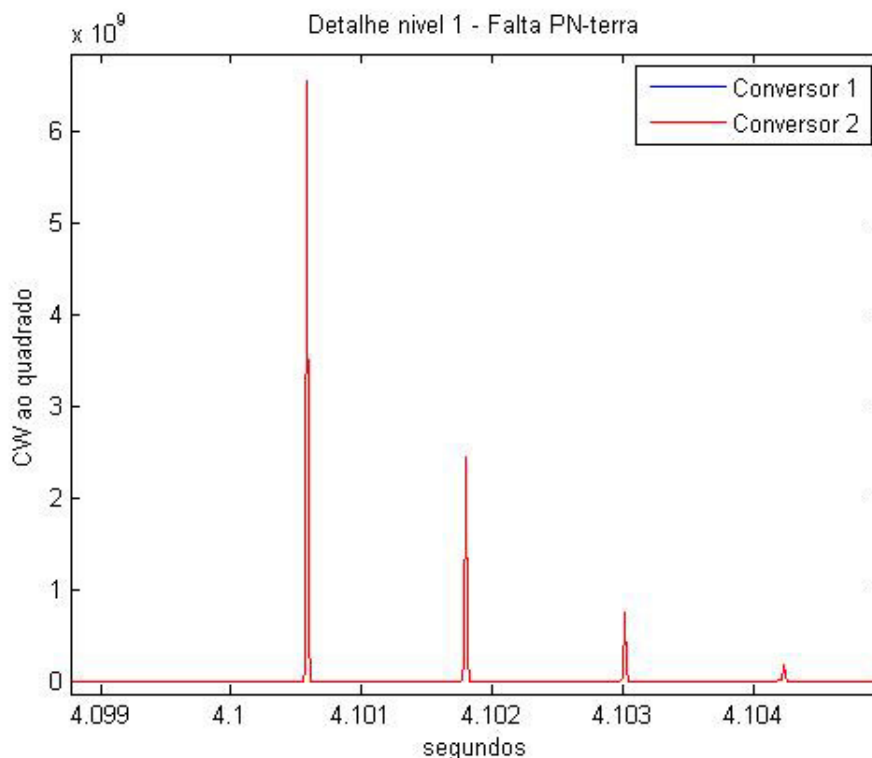


Figura 36 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$  causada a 100km do Conversor 1.

Tabela 27 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de  $0\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

Tabela 28 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

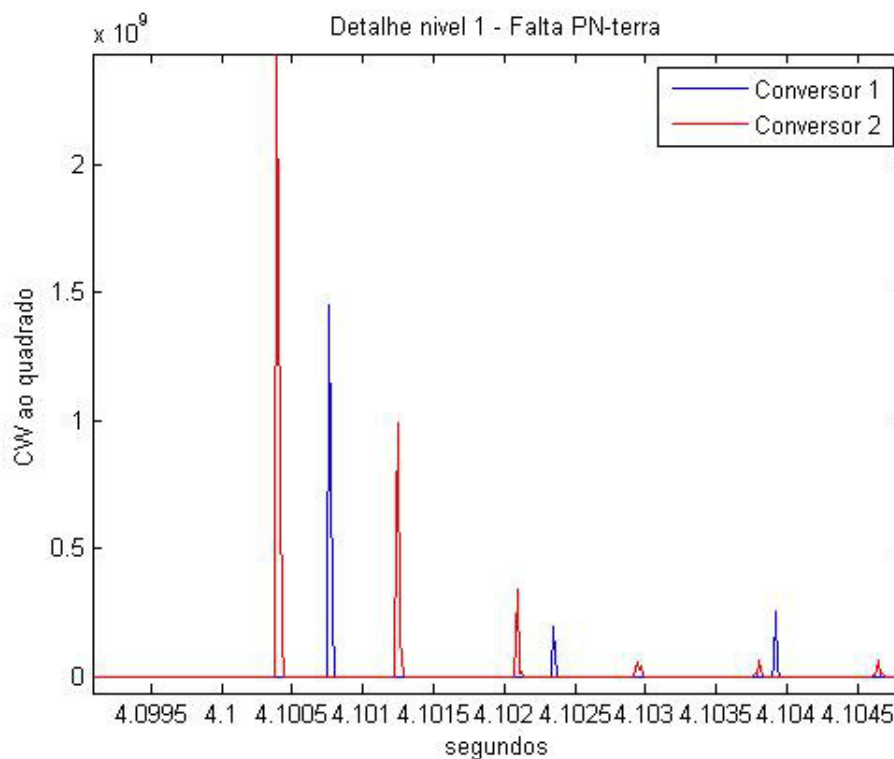


Figura 37 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$  causada a 130km do Conversor 1.

Tabela 29 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de  $200\Omega$ .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,11	0,11	0,055
70,00	69,44	0,56	0,278
100,00	100,00	0,00	0,000
130,00	130,56	0,56	0,278
160,00	159,89	0,11	0,055
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,133</b>

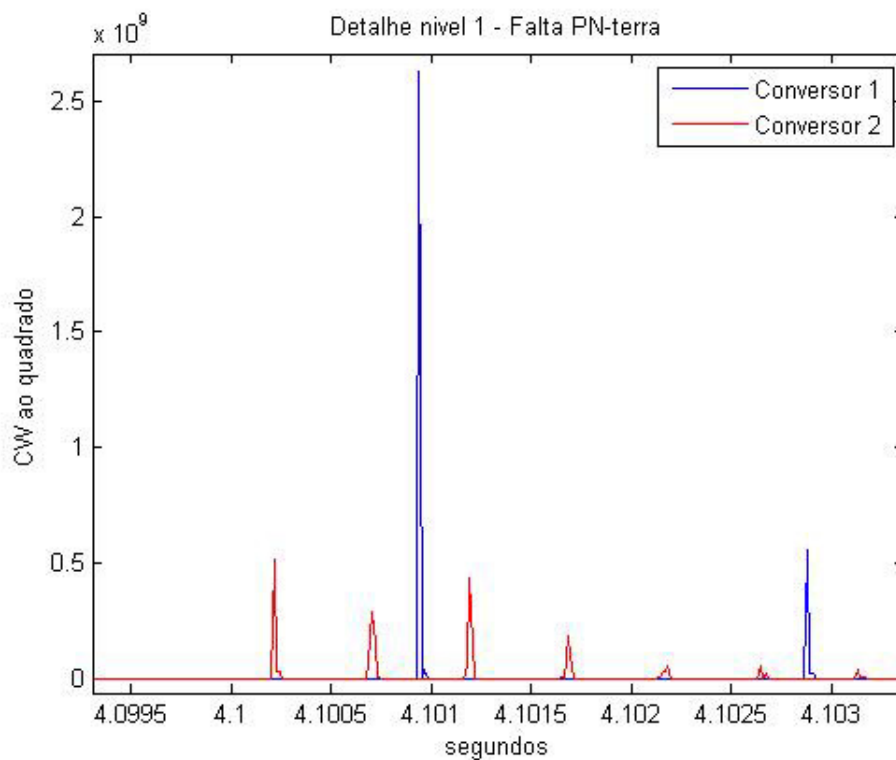


Figura 38 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$  causada a 160km do Conversor 1.

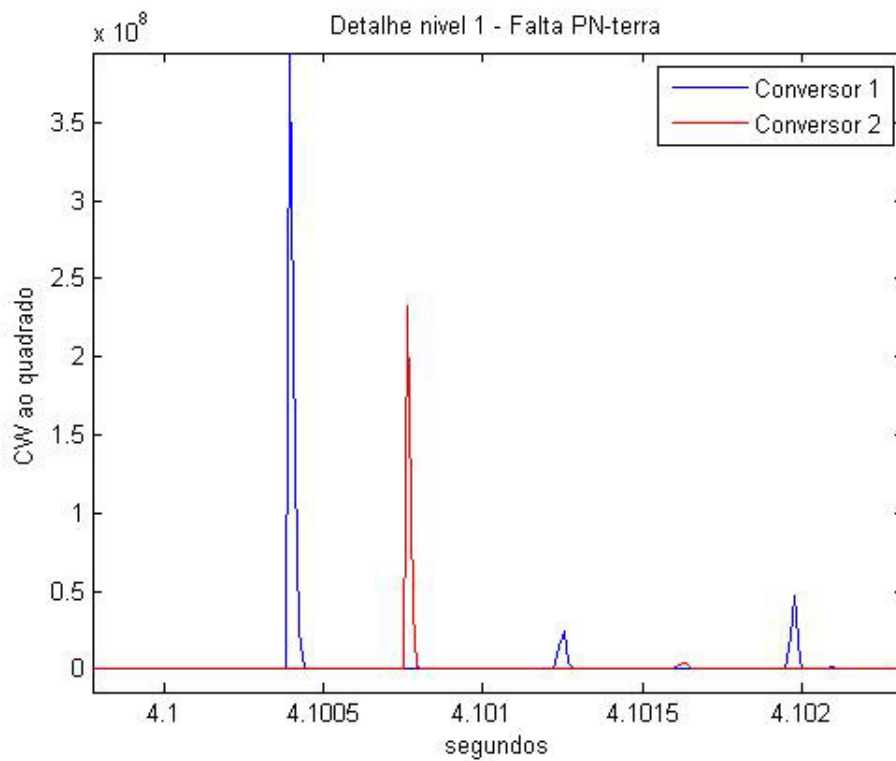


Figura 39 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

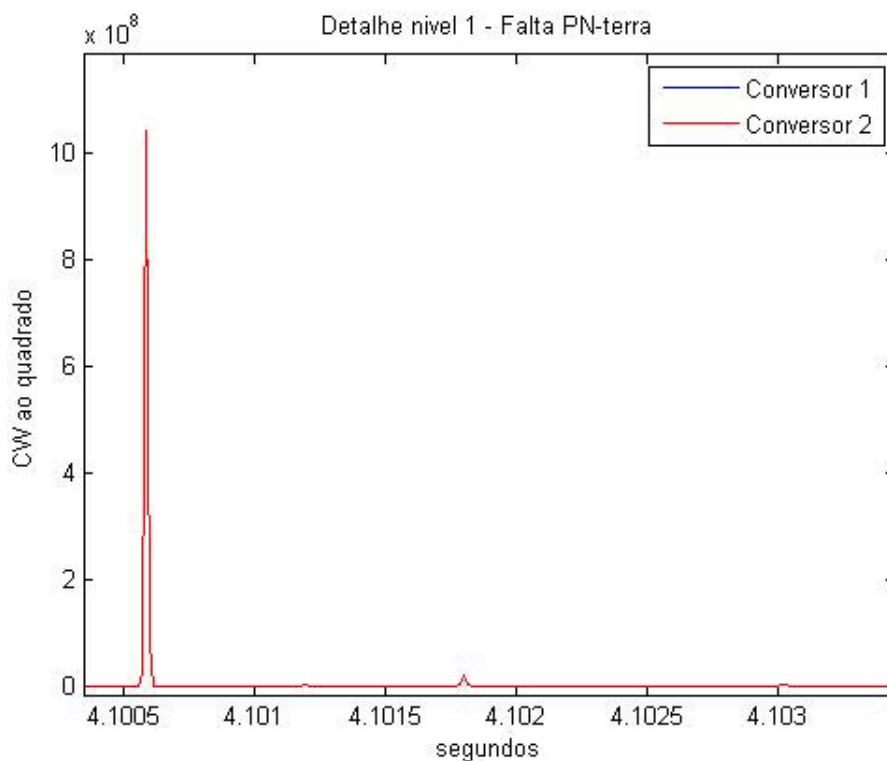


Figura 40 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

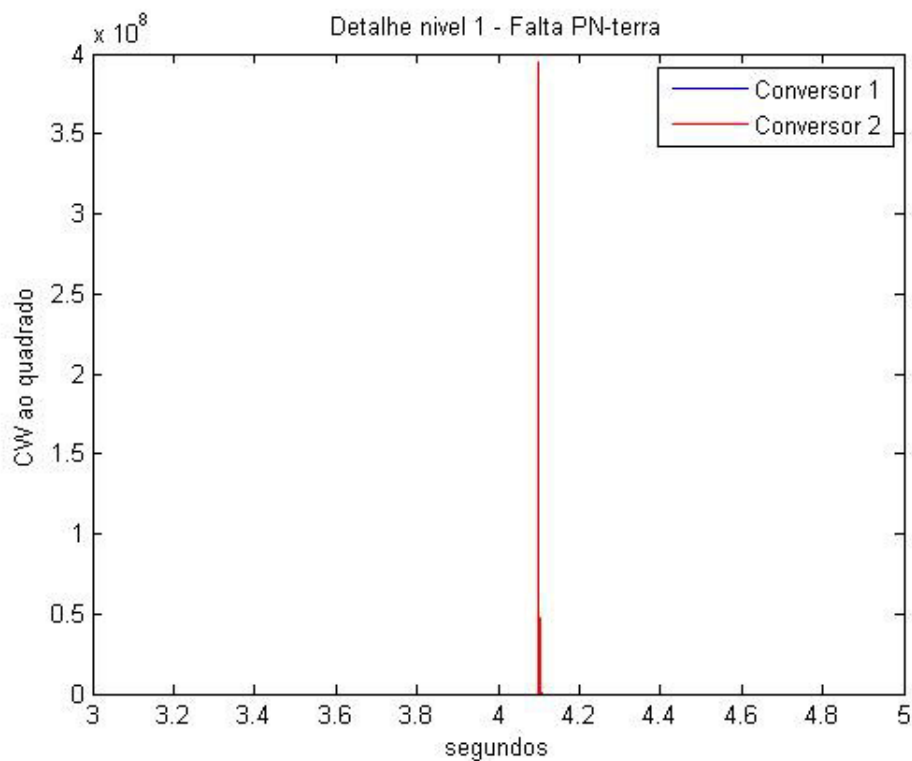


Figura 41 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

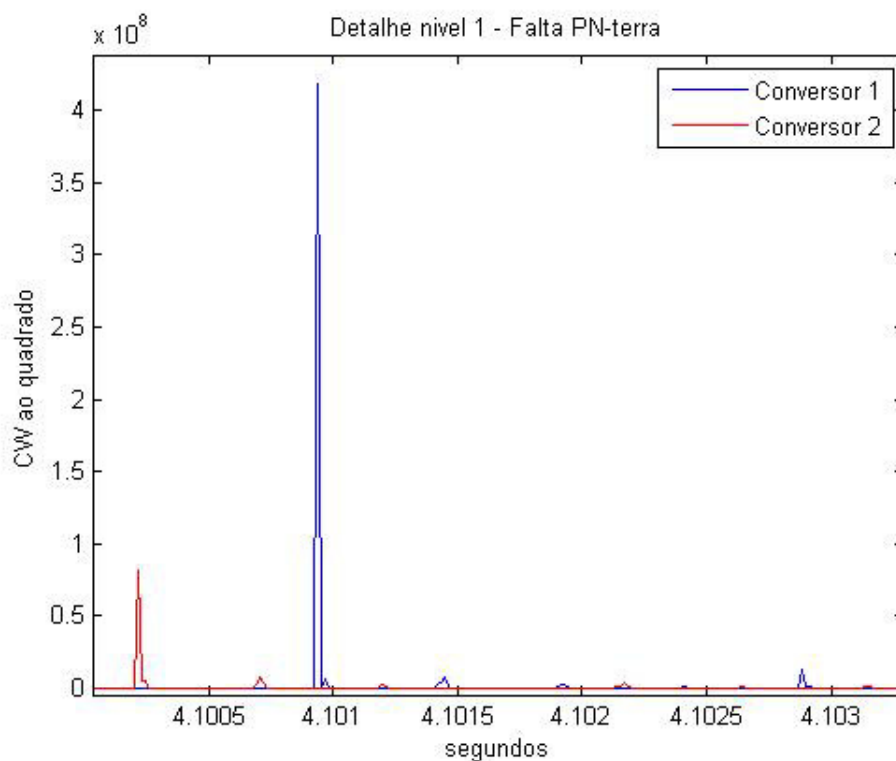


Figura 42 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

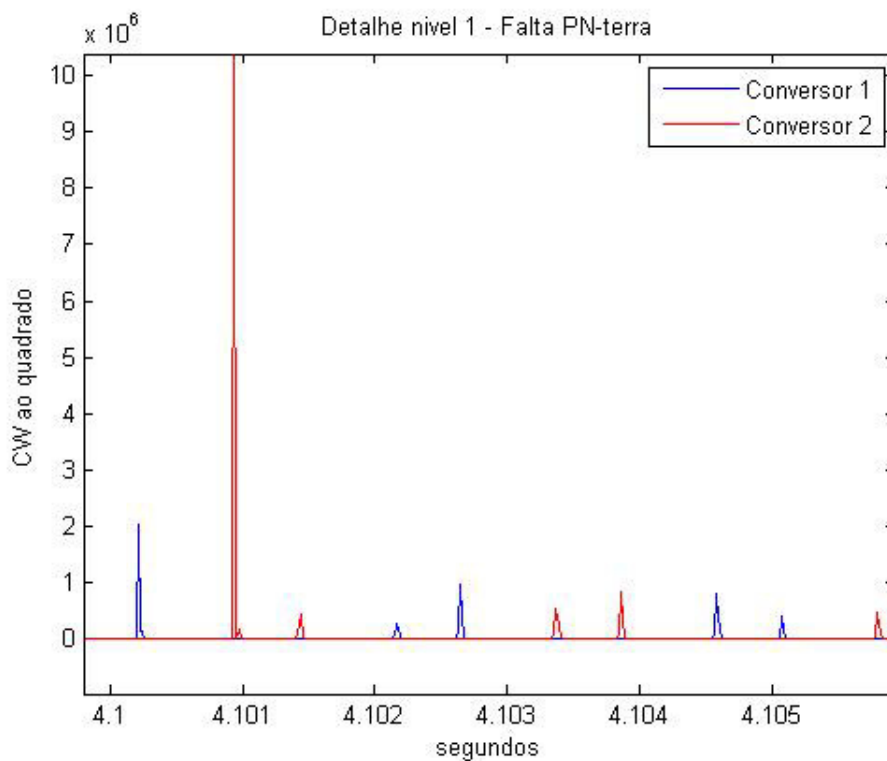


Figura 43 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

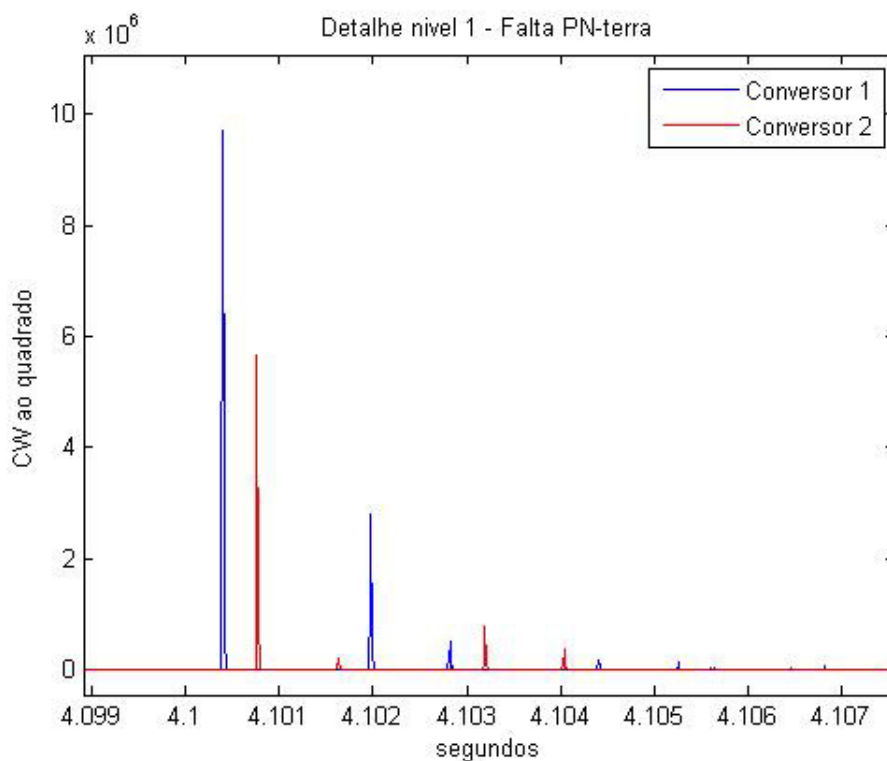


Figura 44 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

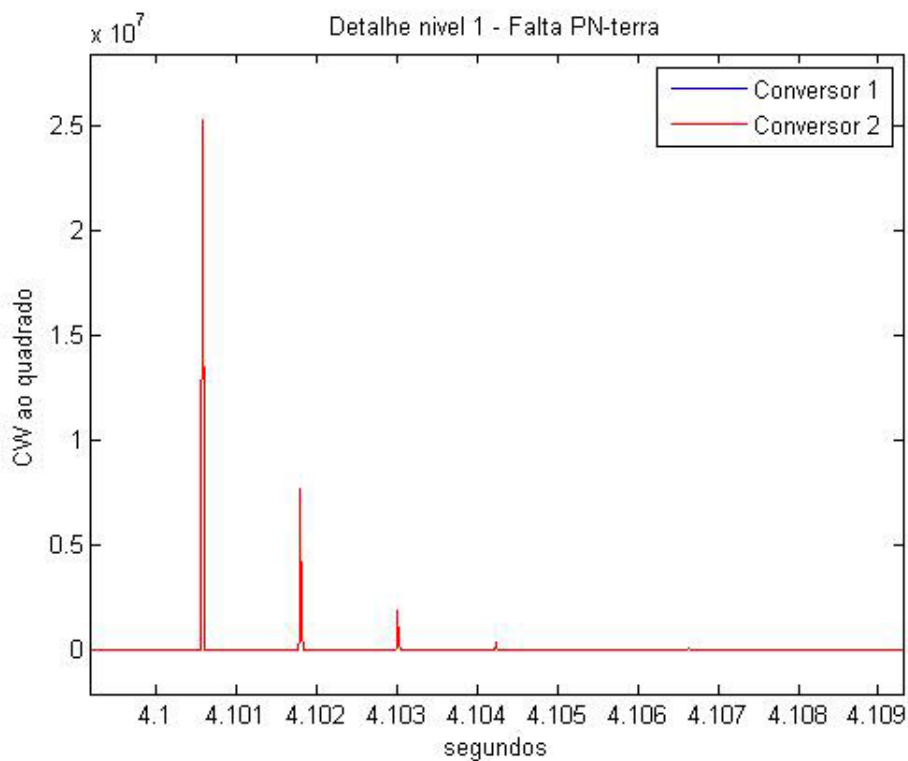


Figura 45 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

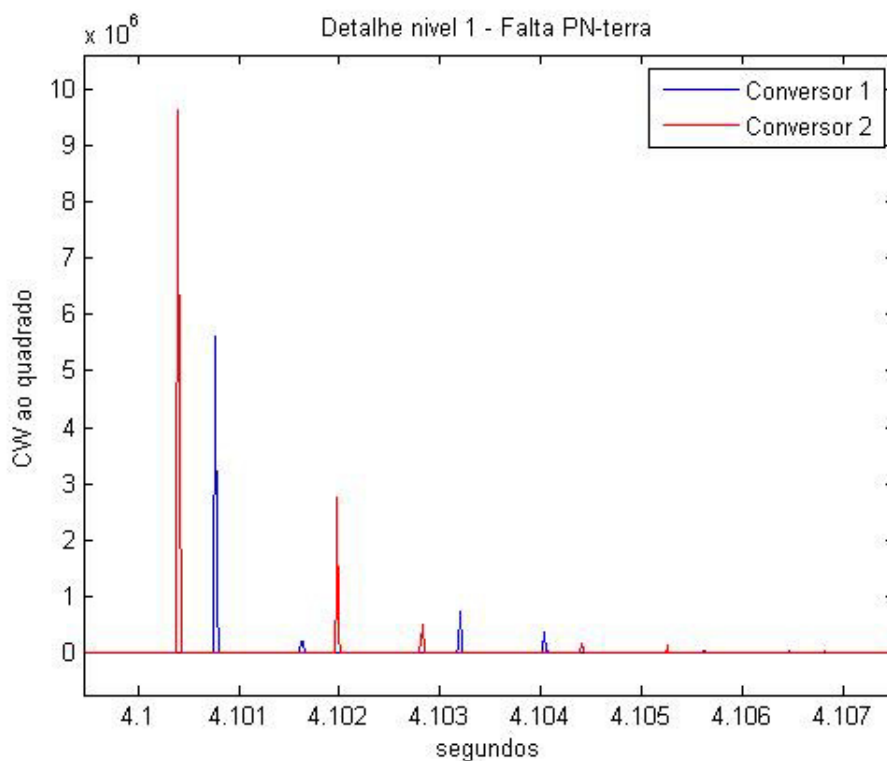


Figura 46 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

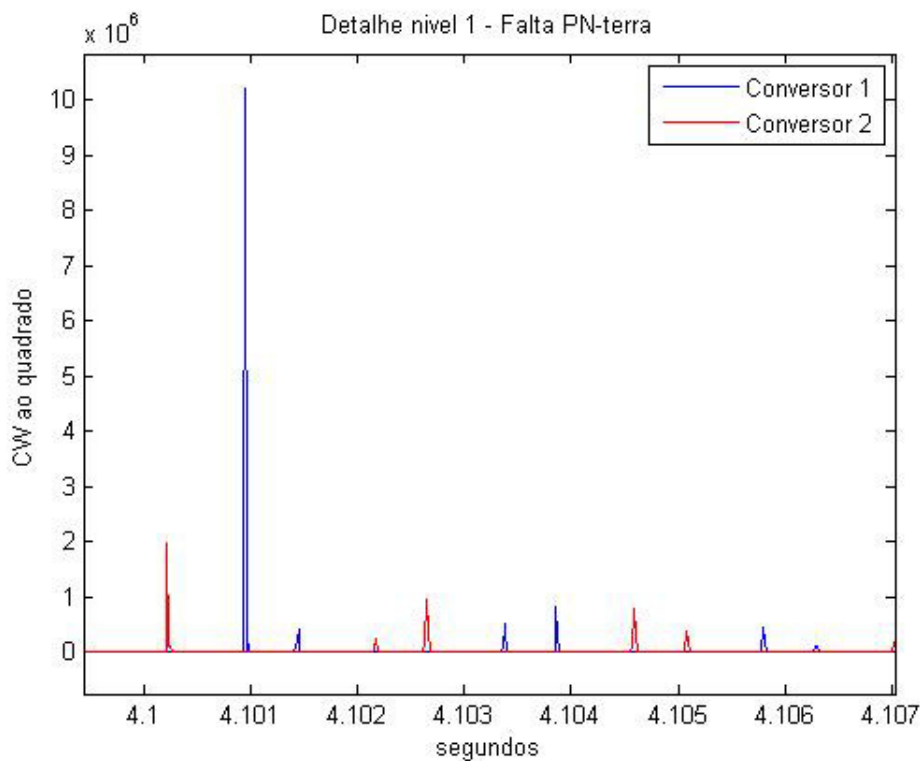


Figura 47 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$ .

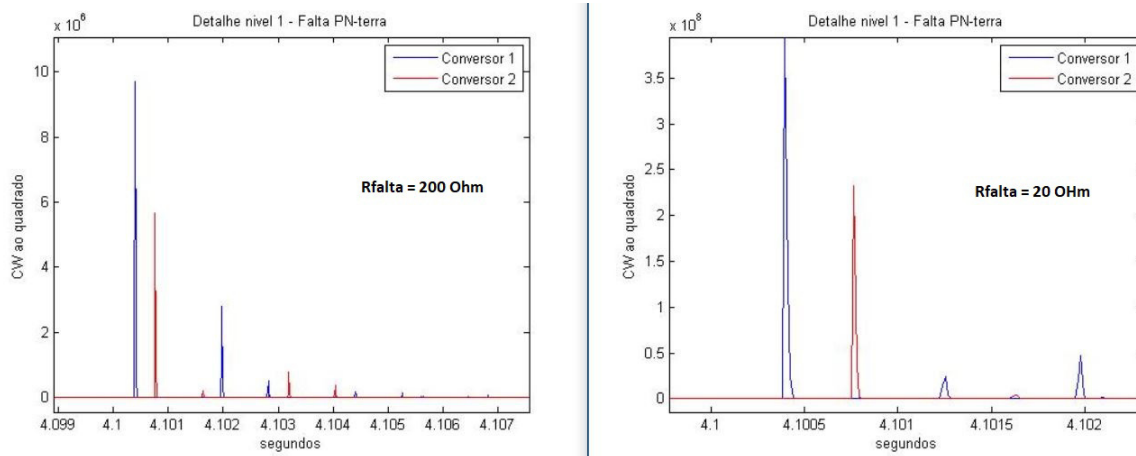


Figura 48 – Coeficientes wavelet ao quadrado do sinal de detalhe 1 (d1) para faltas Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistências de falta de  $20\Omega$  e  $200\Omega$ .

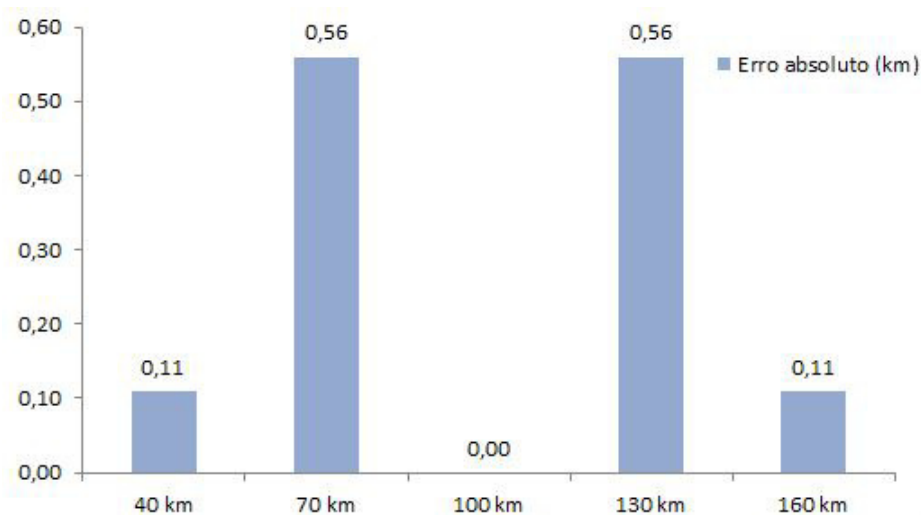


Figura 49 – Média dos erros absolutos para faltas HVDC com dados de dois terminais.

### 5.3 Resultados alcançados utilizando-se dados provenientes de um terminal - Linhas de Transmissão em Corrente Contínua (HVDC)

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao algoritmo localizador que utiliza dados apenas do terminal local. Os tipos de faltas, distâncias de faltas, impedâncias aparentes, condutores e as simulações são as mesmas utilizadas para o algoritmo com dados de dois terminais.

Até a etapa de captação de dados o algoritmo é idêntico aos demais, a diferenciação se dá na utilização da Equação 4.20, que é específica para dados apenas do terminal local. No algoritmo, o tempo  $t_d$  é calculado pela diferença entre os dois picos dos CW's no terminal local.

Para o entendimento dos cálculos será apresentado o detalhamento das etapas de cálculo de uma falta polo positivo-negativo-terra simulada a  $50km$  do conversor 1 em 4,1s de simulação, com impedância de falta de  $0\Omega$ . A Figura 33 apresenta os CWs de detalhe 1 ( $d1$ ) das tensões obtidos nos Conversores 1 e 2, entretanto, apenas os dados do Conversor 1 serão utilizados neste algoritmo.

O primeiro pico dos CWs no Conversor 1 ocorreu em  $t_{c1} = 4,100281s$  o segundo pico foi percebido em  $t_{c2} = 4,100887s$ , portanto  $t_d = 0,000606s$ . Aplicando a Equação 4.20 e sabendo que  $v_{dc}$  é igual a  $1,650 \times 10^5 km/s$ , calcula-se que  $d = 50,02km$ . É importante notar que o segundo pico percebido no instante  $t_{c2} = 4,100887s$  é praticamente coincidente com o pico de CW do conversor 2 utilizado no primeiro algoritmo, que foi percebido em  $t_{c2} = 4,100888s$ . A precisão deste exemplo mostra a eficácia do algoritmo para este caso, serão apresentados os resultados das demais simulações.

As tabelas que apresentam os resultados obtidos pelo algoritmo de localização mostram os seguintes parâmetros:

- (i) a distância real, ou seja, o ponto exato em que a falta foi aplicada em relação ao conversor 1;
- (ii) a distância estimada, que é a localização calculada pelo algoritmo;
- (iii) o erro absoluto calculado conforme a equação 5.2;
- (iv) o erro relativo ou percentual observado, calculado através da equação 5.1;
- (v) na parte inferior é apresentado o erro médio total, calculado segundo a equação 5.3.

Para melhor exemplificar, na Tabela 30 observa-se que a segunda linha apresenta uma situação faltosa do tipo polo positivo-negativo-terra causada a  $40,0km$  do conversor 1 (terminal local). A distância estimada foi de  $40,19km$ , representando um erro absoluto de  $0,19km$  e um erro percentual de  $0,095\%$ .

O primeiro resultado será o da falta com baixa impedância de falta ( $0\Omega$ ) polo positivo-negativo-terra cujo resultado é apresentado na Tabela 30. O resultado da falta polo positivo-negativo-terra com impedância de falta ( $20\Omega$ ) é apresentado na Tabela 31, enquanto que os resultados para falta com impedância de falta  $200\Omega$  estão na Tabela 32. Novamente, percebe-se que os valores são praticamente os mesmos para diferentes impedâncias de falta. Os CW's da falta causada a  $40km$  do Conversor 1 são vistos na Figura 34, com destaque para os coeficientes *wavelet* utilizados no algoritmo (Conversor 1).

Tabela 30 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Tabela 31 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Tabela 32 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $200\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Abs. (km)	Erro (%)
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Os resultados idênticos reforçam o fato percebido nas simulações com dados de dois terminais, a variação da impedância de falta pouco altera a determinação da localização

das faltas. Os resultados apresentados nas Tabelas 33, 34 e 35 correspondem à faltas de polo Positivo-terra com resistência de falta de  $0\Omega$ ,  $20\Omega$  e  $200\Omega$ , respectivamente.

Tabela 33 – Falta Polo Positivo terra (P-terra) com resistência de falta de  $0\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

<b>Distância Real (km)</b>	<b>Distância Estimada (km)</b>	<b>Erro Abs. (km)</b>	<b>Erro (%)</b>
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Tabela 34 – Falta Polo Positivo terra (P-terra) com resistência de falta de  $20\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

<b>Distância Real (km)</b>	<b>Distância Estimada (km)</b>	<b>Erro Abs. (km)</b>	<b>Erro (%)</b>
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Tabela 35 – Falta Polo Positivo-Negativo-terra (PN-terra) com resistência de falta de  $200\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

<b>Distância Real (km)</b>	<b>Distância Estimada (km)</b>	<b>Erro Abs. (km)</b>	<b>Erro (%)</b>
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Os próximos resultados apresentados são das faltas Polo Positivo-Negativo sendo as Tabelas 36, 37 e 38 os resultados das faltas com resistência de falta de  $0\Omega$ ,  $20\Omega$  e  $200\Omega$ , respectivamente.

Tal qual foi percebido nos outros dois algoritmos, os resultados são praticamente idênticos para os diferentes tipos de faltas e para as impedâncias de  $0\Omega$ ,  $20\Omega$  e  $200\Omega$ . Um fato importante pode ser verificada na Figura 50, a precisão do algoritmo diminui para maiores distâncias de falta em relação ao terminal local.

Tabela 36 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de  $0\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

<b>Distância Real (km)</b>	<b>Distância Estimada (km)</b>	<b>Erro Abs. (km)</b>	<b>Erro (%)</b>
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Tabela 37 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de  $20\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

<b>Distância Real (km)</b>	<b>Distância Estimada (km)</b>	<b>Erro Abs. (km)</b>	<b>Erro (%)</b>
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

Tabela 38 – Falta Polo Positivo-Negativo (PN) com resistência de falta de  $200\Omega$  - Algoritmo com dados apenas do terminal local.

<b>Distância Real (km)</b>	<b>Distância Estimada (km)</b>	<b>Erro Abs. (km)</b>	<b>Erro (%)</b>
40,00	40,19	0,1892	0,095
70,00	70,32	0,324	0,162
100,00	100,46	0,4561	0,228
130,00	131,30	1,2965	0,648
160,00	162,27	2,2723	1,136
<b>Erro médio (%)</b>			<b>0,454</b>

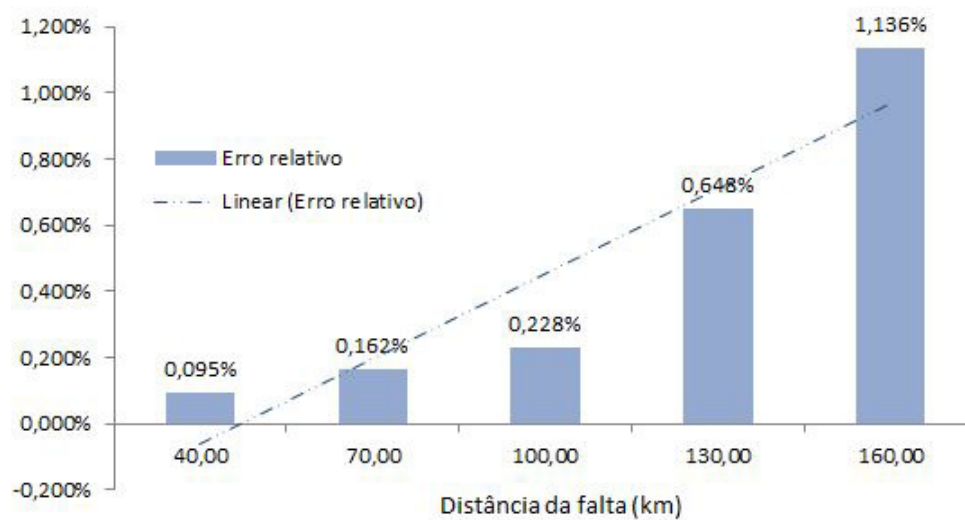


Figura 50 – Erro relativo para diferentes distâncias de falta.

## 6 Conclusões

Este trabalho apresenta o uso e implementação de algoritmos de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes e utiliza como principal ferramenta a Transformada *Wavelet* (análise multi-resolução *wavelet*). O primeiro algoritmo apresentado faz uso de dados registrados em dois terminais da linha de transmissão, enquanto que o outro algoritmo utiliza apenas dados do terminal local. A técnica foi testada utilizando-se de diversas situações de faltas simuladas através do *software SimPowerSystems* presente no MATLAB.

Com relação a utilização de dados dos dois terminais, a técnica apresentou erros relativos abaixo do considerado aceitável pela literatura e uma excelente precisão na localização de faltas em linhas de transmissão de extra alta tensão, e tal afirmação baseia-se nos resultados obtidos dos testes realizados. Constata-se como vantagem na utilização de dados de dois terminais erros abaixo do aceitável e a possibilidade de aplicação do algoritmo para sistemas CA e HVDC, embora necessite um meio de comunicação e sincronização entre os terminais e uma alta taxa amostral. Os erros médios percentuais ficaram em aproximadamente 0,34% nas faltas em corrente alternada e em aproximadamente 0,13% nas faltas em sistemas HVDC.

Os resultados também confirmam que a técnica não é significativamente influenciada pela distância de falta, no entanto, nota-se que as faltas mais próximas ao centro da linha possuem resultados mais precisos. O tipo de falta, resistência de falta, e diferentes fases (caso CA) pouco influenciam nos resultados.

A partir dos resultados, pode-se afirmar também que a taxa de amostragem influi diretamente na precisão dos resultados.

Destaca-se também que as diferentes simulações via *SimPowerSystems* apresentaram os mesmos valores de estimativas de falta para distâncias de falta iguais. Os valores de tensão, os módulos dos coeficientes *wavelets*, os valores de corrente medidos foram diferentes entre si, porém o ambiente de simulação reproduz de forma semelhante as faltas, resultando em resultados iguais, mesmo que se altere a resistência de falta, o tipo de falta e em quais fases ou polos a falta ocorreu. Isso se dá pelo fato do MATLAB e suas ferramentas usarem de modelagens matemáticas fixas, portanto os resultados devem ser coincidentes, contrastando com um ensaio em um sistema real.

Outra observação importante a respeito das simulações, é que os erros são iguais para distâncias complementares de falta, ou seja, faltas nas quais a soma das distâncias de faltas sejam iguais ao comprimento total da LT.

Para as faltas localizadas com dados de apenas um terminal, verificou-se o aumento do erro conforme aumentava a distância de falta. Além disso o erro médio para as distâncias estimadas foi superior ao método com dados de ambos algoritmos. Tal fato é coerente uma vez que menos dados são utilizados, embora se elimine os possíveis erros por sincronização de informações em um sistema real.

## 6.1 Considerações gerais sobre o algoritmo de localização de faltas

A estimação da localização da falta em uma linha de transmissão em corrente alternada e, principalmente, em sistemas HVDC são de extrema importância, já que permite uma rápida determinação da natureza da falta, facilitando a reparação da linha e a restauração do funcionamento do sistema. Destaca-se a importância da localização de faltas em sistemas HVDC subterrâneos, cuja inspeção física é de maior dificuldade, logo uma estimativa precisa facilita a restauração da LT.

A rapidez na determinação de uma situação de falta é imprescindível para uma operação econômica e confiável do sistema de potência, principalmente com os padrões atuais exigidos no tocante a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Os algoritmos propostos mostraram-se eficientes na estimativa da localização das faltas, apresentando erros abaixo dos limites propostos na literatura.

É importante destacar que os resultados foram obtidos em ambientes de simulação e cabe algumas considerações em relação a um sistema real. Os parâmetros das linhas são simulados a valores constantes, porém as indutâncias e capacitâncias da linha são funções da frequência, e em um uma situação de falta surgem harmônicos de diferentes espectros de frequência que impactam diretamente esses valores e, conseqüentemente, a velocidade de propagação da onda viajante. Ou seja, em um sistema real o próprio efeito da falta impacto no resultado do algoritmo.

## 6.2 Continuidade dos Testes e Implementação

Apesar das vantagens já relatadas sobre a metodologia e o algoritmo, os testes foram realizados apenas para faltas causadas na linha de transmissão entre os dois terminais de monitoramento, ou seja, na zona primária de ambos relés. Uma outra limitação apresentada foi a escolha de apenas um *software* de simulação (*Sim Power System*), uma vez que as simulações são feitas por padrões matemáticos, conforme o funcionamento do MATLAB.

Algumas frentes de pesquisa, testes e implementação podem ser seguidas como continuidade deste trabalho. Uma possibilidade é a simulação com outros *softwares* capazes de simular faltas, tal qual o *Alternative Transients Program* (ATP). Caso disponível,

simulações usando *Real Time Digital Simulator* (RTDS) seriam interessantes, uma vez que praticamente eliminariam as simulações invariáveis do *Sim Power System*.

Pode-se optar também por adicionar terminais, e verificar a eficiência do uso de ondas viajantes e transformada *wavelet* para sistemas com três ou mais terminais. Pode-se verificar o funcionamento do algoritmo para faltas causadas fora da LT, como por exemplo em um ramo CA antes dos Conversores.

## 7 Referências Bibliográficas

ANEEL; ANEXO 6G-GC; LOTE LG-CC; Transmissão associada das usinas do Rio Madeira. Linha de Transmissão N° 600 kV CC Coletora Porto Velho – Araraquara 2. Características e Requisitos Básicos das Instalações de Transmissão. ANEEL, 2008.

BERTHO JUNIOR, R. et al.; Análise espectral das tensões e correntes durante a ocorrência de faltas em uma linha HVDC. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2014, Belo Horizonte. **Anais**.

CHEN, P.; XU, B.; LI, J.; A traveling wave based gault locating system for HVDC transmission lines. In: Power System Technology, 2006.

GANG, W. et al. Transiente based protection for HVDC lines using wavelet multiresolution signal decomposition. In: Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES.

GÁRDOS, R.; Transmissão de Energia Elétrica a Longa Distância com Linhas CA Segmentadas por Equipamentos B2B-VSC [Rio de Janeiro] 2008 (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2008). Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

GEDMAN, D. E.; Teoria das Linhas de Transmissão II. Tradução: Farret, F. A., Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1978.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. (2000). Wavelet transforms in power systems: Part I General introduction to the wavelet transforms. Power engineering Journal, v. 14, n. 2, p 81-87, Apr.

KIM, G.-T.; KIM, H.-S.; CHOI, H.-Y. Wavelet transform based power transmission line fault location using gps for accurate time synchronization. In: Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE.

LIMA, P. C. Wavelets: Teoria, Algoritmos e Aplicações. Belo Horizonte: Departamento de Matemática - ICEX - UFMG, p. 2002.

MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Fault Location Using Wavelets. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998. MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G. and POGGI, J.-M. (1997). Wavelet Toolbox: User's Guide. Natick; MA: The MathWorks, 626 p.

MORRISON, L. F.; YANG, Q. Fault location on high voltage transmission lines using solid state disturbance recorders. IEEE/CSEE Joint Conference on High Voltage

Transmission in China, p. 154-160, 1987.

PARENTONI, M. F. da C. Localização de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão em três terminais – Abordagem baseada em decomposição wavelet. Universidade Federal de Itajubá, Dezembro 2006.

PURUSHOTHAMA, G. K.; NARENDRANATH, A U.; THUKARAM, D.; PARTHASARATHY, K. (2000). ANN applications in fault locators. ELSEVIER Electrical Power and Energy Systems, v.23, p. 491-506, jun.

REED, G.; PAPE, R.; TAKEDA, M.; Advantages of Voltage Sourced Converter (VSC) Based Design Concepts for FACTS and HVDC-Link Applications. IEEE, 2003.

RICHARDS, G. G.; TAN, O. T. (1982). An accurate fault location for transmission lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-101, n.4, p. 945-949, apr.

SETREUS, J.; Bertling, I.; Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems. Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAFS '08. Proceedings of the 10th International Conference on Rincon, 2008.

SHANG, J.; BERTLING, I. Introduction to hvdc technology for reliable electrical power systems. In: Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008.

SILVA, MURILO da.; Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e Transformada Wavelet. Universidade de São Paulo, 2008.

SILVA, M. D. et al. Combined solution for fault location in three-terminal lines based on wavelet transforms. Generation, Transmission Distribution, IET, v. 4, n. 1, p. 94-103, January 2010. ISSN 1751-8687.

SPOOR, D. J.; ZHU, J. Improved Single Ended Traveling Wave Fault Location Algorithm Based On Experience With Conventional Substation Transducers, 2006.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. (1981). A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part I – Fourier Transformation method. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-100, n.3, mar.

Y.P. LI, D.G. WANG, A. P. HU, Senior Member, IEEE, W. WANG, Z.Q. YAO. Real-time Simulation Study on HVDC Control and Protection. IEEE, 2010.

YI-ZHUANG, H.; XIAOLIN, Q.; MINGCHAO, X. A New Fault Location Method. IEEE, 2002.