

Lucas Tomaz Santana

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO BASEADA NA TEORIA DAS ONDAS
VIAJANTES E EM COMPONENTES DE ALTA FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
submetido ao Programa de Graduação
de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Prof. Mauricio Valencia
Ferreira da Luz, Dr.

Florianópolis
2018

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

Santana, Lucas Tomaz

Localização de faltas em linhas de transmissão baseada na teoria das ondas viajantes e em componentes de alta frequência / Lucas Tomaz Santana ; orientador, Mauricio Valencia Ferreira da Luz, 2018.
63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.


1. Engenharia Elétrica. 2. Linhas de Transmissão. 3. Faltas. 4. Transformada de Wavelet. I. Luz, Mauricio Valencia Ferreira da. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Lucas Tomaz Santana

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
BASEADA NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES E EM
COMPONENTES DE ALTA FREQUÊNCIA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Eletricista”, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 04 de julho de 2018



Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Mauricio V. Ferreira da Luz, Dr.
Professor da UFSC - Orientador



Eng.ª. Laura Eduarda Vieira Pereira Marques
Mestranda do LABPLAN/UFSC



Prof. Cristhian Becker Cares, M.Sc.
Professor da Universidade de Santiago do Chile (USACH)

Este trabalho é dedicado aos meus pais.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta uma metodologia de localização de faltas em uma linha de transmissão, baseada na análise de regimes transitórios e componentes de alta frequência provenientes de dois terminais de monitoramento. Inicialmente, realiza-se uma revisão bibliográfica e apresentam-se os principais conceitos envolvidos: ondas viajantes, domínio do tempo e da frequência, Transformada de Fourier, Transformada de Wavelet e as principais famílias de Wavelets. Os sinais de tensão com regimes transitórios são primeiramente decompostos em seus componentes modais e são transformados do domínio do tempo para o domínio da frequência através da Transformada de Wavelet, onde são detectados os instantes da chegada das ondas viajantes nos terminais para a posterior estimação do local de incidência do distúrbio. Objetivando validar o método, foram simulados no ATP faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas com distintas resistências de falta e em diferentes localizações. O processamento dos dados obtidos foi realizado no ambiente do Matlab para a consequente localização da falta.

Palavras-chave: Faltas, Linha de Transmissão, Wavelet, Transformada de Wavelet, Domínio da Frequência, Ondas Viajantes.

ABSTRACT

This work presents a fault localization methodology in a transmission line, based on the analysis of transient regimes and high frequency components from two monitoring terminals. Initially, a bibliographic review is made and the main concepts involved are presented: traveling waves, time and frequency domain, Fourier Transform, Wavelet Transform and the main wavelet families. Voltage signals with transient regimes are firstly decomposed into their modal components and are transformed from the time domain to the frequency domain through the Wavelet Transform, where the instants of the arrival of the traveling waves are detected at the terminals for subsequent location estimation incidence of the disorder. Aiming to validate the method, single-phase, biphasic, biphasic-earth and three-phase faults with different fault resistances were simulated in ATP and at different locations. The processing of the obtained data was done in the Matlab environment for the consequent location of the fault.

Keywords: Faults, Transmission Lines, Wavelet, Wavelet Transform, Frequency Domain, Traveling waves.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- TW – Transformada de Wavelet
- ATP – Alternative Transient Program
- TF – Transformada de Fourier
- TDF – Transformada Discreta de Fourier
- TFCT – Transformada de Fourier de Curto Tempo
- TJF – Transformada Janelada de Fourier
- TDJF – Transformada Discreta Janelada de Fourier
- TCW – Transformada Contínua de Wavelet
- TDW – Transformada Discreta de Wavelet
- LCC – Line Cable Constants
- AMR – Análise Multi Resolução

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Lattice [9].	16
Figura 2: Transformada de Wavelet [11].	19
Figura 3: Exemplo de escala de uma Wavelet [11].	21
Figura 4: Exemplo de escalas da função seno [11].	21
Figura 5: Exemplos de pequena escala à esquerda e grande escala à direita [11].	22
Figura 6: Exemplo de translação de um sinal [11].	22
Figura 7: Decomposição de um sinal em amostras e detalhes [11]. ..	22
Figura 8: Processo de decomposição e downsampling [11].	23
Figura 9: Decomposição multi resolução de um sinal [11].	23
Figura 10: Sistema modelado no ATP.	26
Figura 11: Modelo de torre utilizado [19].	27
Figura 12: Disposição dos condutores da torre.	29
Figura 13: Aba principal do bloco Line Constants.	30
Figura 14: Esquema de transposição de cabos.	31
Figura 15: Simulação da falta.	31
Figura 16: Parâmetros da linha.	32
Figura 17: Tipos de faltas [22].	33
Figura 18: Exemplo de falta monofásica.	34
Figura 19: Exemplo de falta trifásica.	34
Figura 20: Diagrama de Lattice [9].	36
Figura 21: Coeficientes de uma falta monofásica.	40
Figura 22: Detalhes dos coeficientes relevantes de uma falta monofásica.	41
Figura 23: Coeficientes de uma falta monofásica.	42
Figura 24: Detalhes dos coeficientes relevantes de uma falta monofásica.	42
Figura 25: Coeficientes sobrepostos de uma falta monofásica no meio da linha.	43
Figura 26: Coeficientes de uma falta trifásica.	44
Figura 27: Coeficientes relevantes de uma falta trifásica.	44
Figura 28: Coeficientes de uma falta bifásica.	45
Figura 29: Coeficientes relevantes de uma falta bifásica.	46
Figura 30: Coeficientes relevantes de uma falta bifásica.	46
Figura 31: Coeficientes de falta bifásica com $R=1 \Omega$	54

Figura 32: Coeficientes de falta bifásica com $R=10 \Omega$	54
Figura 33: Coeficientes de falta bifásica com $R=50 \Omega$	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados do condutor fase.	28
Tabela 2: Dados do cabo OPGW	28
Tabela 3: Dados complementares.....	29
Tabela 4: Resultados de faltas bifásicas.	48
Tabela 5: Resultados de faltas trifásicas.....	49
Tabela 6: Resultados de faltas bifásicas com contato Terra.	50
Tabela 7: Resultados de faltas monofásicas.	51
Tabela 8: Variação das resistências de falta	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	14
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TCC	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1. ONDAS VIAJANTES.....	15
2.2. A TRANSFORMADA DE FOURIER.....	17
2.3. A TRANSFORMADA DE WAVELET	19
2.3.1. Escala.....	21
2.3.2. Translação.....	22
2.3.3. Componentes da Wavelet.....	22
2.3.4. Famílias de Wavelet	24
2.4. PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA.....	25
2.5. CONCLUSÃO.....	25
3. MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	26
3.1. O SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO	26
3.1.1. Modelagem da linha de transmissão.....	27
3.1.2. Parâmetros do sistema de dados complementares 29	
3.1.3. A falta e o método para a variação das distâncias das faltas31	
3.2. O ARQUIVO DE ENTRADA DO ATP	32
3.3. OS DIFERENTES TIPOS DE FALTA.....	33
3.3.1. As variações das simulações	33
4. A ANÁLISE DOS DADOS E LOCALIZAÇÃO DAS FALTAS	35
4.1. O PRINCÍPIO DO MÉTODO.....	35
4.2. AQUISIÇÃO DOS DADOS	37
4.3. TRANSFORMAÇÃO MODAL.....	37

4.4.	A TRANSFORMADA DE WAVELET.....	38
4.5.	A DETECÇÃO DA FALTA	39
5.	RESULTADOS OBTIDOS	47
5.1.	OS RESULTADOS OBTIDOS	47
5.2.	A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DAS FALTAS ...	52
6.	CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	57
	ANEXO - A: DATASHEET DOS CONDUTORES.	60
	ANEXO - B: DATASHEET OPGW.	62

INTRODUÇÃO

A análise da qualidade da energia elétrica é baseada em duas grandezas: frequência e tensão. A frequência de um sistema em condições normais de operação, no Brasil, é $60 \pm 0,5$ Hz. Já a tensão é analisada por três parâmetros: a forma de onda, a simetria entre as fases do sistema e magnitude da tensão.

Porém, nem sempre o sistema elétrico opera em condições normais. Fenômenos como alterações de tensão, interrupções, distorções harmônicas, flutuações de tensão, transitórios oscilatórios ou impulsivos, ruídos, são causados por descargas atmosféricas, correntes de magnetização dos transformadores, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores, sobre carregamento devido às expansões do sistema, ou ainda pelos efeitos capacitivos e de chaveamento em linhas de transmissão, que são fenômenos de natureza aleatória ou intrínsecos do sistema [1].

Um distúrbio pode degradar a performance e diminuir a vida útil de equipamentos elétricos e eletrônicos presentes em todas as partes do sistema elétrico, podendo inclusive cessar o fornecimento de energia para cidades inteiras, prejudicando de maneira incalculável a vida de milhões de pessoas em diversos aspectos, uma vez que os sistemas de transmissão são os mais susceptíveis às faltas [2].

Percebe-se que o rápido reparo de uma situação de distúrbio ocorrido em uma linha de transmissão pode representar uma grande economia para a sociedade, que se torna cada vez mais dependente da energia elétrica. Pode-se destacar, também, um aumento na competição do mercado de energia causado pela desestatização do setor elétrico, forçando com que as empresas invistam em técnicas capazes de diminuir seus custos e aumentar o padrão de qualidade [3].

O equipamento responsável pela detecção de faltas é o relé de proteção. Eles podem ser desde dispositivos eletromecânicos, que têm suas operações baseadas em interações eletromagnéticas, até modernos relés numéricos microprocessados, que possuem arquitetura completamente digital com o uso de microprocessadores. Os relés digitais estão evoluindo gradativamente e tornando as outras categorias obsoletas.

As principais características do relé digital são a integração digital, que permite a comunicação remota de diversos dispositivos; o auto-monitoramento, que indica defeitos no *software* ou hardware do relé e emite mensagens de alerta; a flexibilidade de implementação de diversas funções em um único equipamento, como monitoramento, medição e controle e a programabilidade, que permite a inclusão de lógicas de proteção personalizadas [4].

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo o estudo de uma lógica de implementação computacional, para possível aplicação em um relé digital de proteção, visando a localização de faltas em uma linha de transmissão.

À vista disso, será então apresentado, neste trabalho, o emprego da Transformada de Wavelet (TW) para a localização de faltas ocorridas em uma linha de transmissão, em que as formas de onda de tensão e seus componentes de alta frequência serão analisados. Para aplicação da técnica proposta, simulou-se uma linha de transmissão com parâmetros reais acometidos por faltas, no *software* Alternative Transient Program (ATP). Já o algoritmo de localização foi implementado no *software* Matlab.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TCC

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

No segundo capítulo são apresentados conceitos fundamentais sobre a teoria das ondas viajantes e a análise de um sinal no domínio da frequência, necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

No terceiro capítulo é apresentada a modelagem da linha de transmissão em que as simulações de faltas serão realizadas.

No quarto capítulo está descrita a técnica implementada para a localização de faltas a partir dos dados obtidos do capítulo 3.

No quinto capítulo são apresentados os principais resultados do trabalho.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões decorrentes e, por último, propostas algumas melhorias para continuidade do trabalho.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordada uma fundamentação teórica composta pelos principais conceitos relativos às Ondas Viajantes, Domínio do Tempo, Domínio da Frequência, Transformada de Fourier, Transformada de Wavelet, utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

2.1. ONDAS VIAJANTES

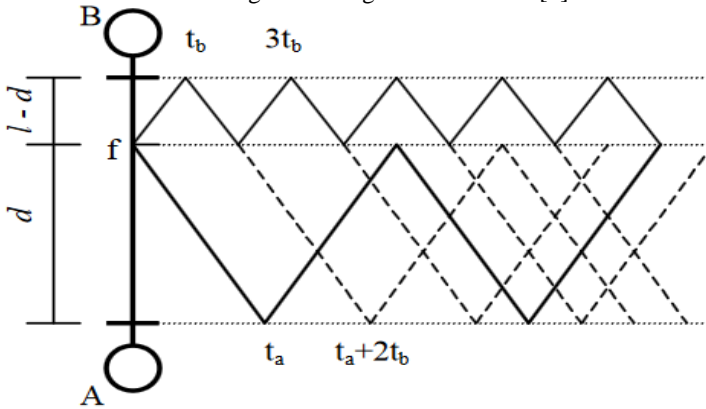
Ondas viajantes são ondas de tensão e corrente que viajam de um extremo de uma linha de transmissão para o outro. São sinais de alta frequência gerados por mudanças súbitas em um sistema de potência.

Quando uma tensão é imposta em um lado da linha, ela não aparecerá instantaneamente do outro lado. Isso é causado pelo comportamento transiente de indutores e capacitores que estão presentes na linha de transmissão, a qual pode não possuir fisicamente indutores e capacitores, porém os efeitos indutivos e capacitivos de fato existem. Logo, ao impor uma tensão em um extremo da linha, esta cresce gradativamente à medida que se propaga em direção à extremidade oposta [5].

Uma falta incidente em uma linha de transmissão gerará tanto ondas viajantes de corrente como de tensão. Essas ondas viajarão até encontrar uma descontinuidade, como uma falta, ou uma barra do sistema.

Nesse ponto, a onda irá refletir e refratar, gerando novas ondas que se propagarão no sistema. O diagrama de Lattice da Figura 1 ilustra o processo.

Figura 1: Diagrama de Lattice [9].



Uma acurada extração e caracterização de um instante transiente de uma onda viajante é crucial para a proteção de sistemas baseados na teoria das ondas viajantes e a detecção de faltas. As características básicas de uma onda viajante transiente podem ser resumidas como [6]:

- As características de uma onda mudam repentinamente com a chegada de novas ondas viajantes às barras do sistema;
- A magnitude da mudança depende da magnitude da tensão imposta pela falta no instante em que ela ocorre. Para as ondas posteriores, também é necessário levar em conta os coeficientes de reflexão e refração na descontinuidade da linha e suas características próprias de atenuação;
- A polaridade da mudança súbita depende da polaridade da tensão de falta no instante em que ela ocorre e da natureza da descontinuidade da linha de transmissão.

2.2. A TRANSFORMADA DE FOURIER

A Transformada de Fourier (TF) é uma excelente ferramenta para caracterizar um sinal no domínio da frequência. A Transformada de Fourier separa um sinal nas suas sinusóides que o constituem em diferentes frequências [7].

A Transformada Discreta de Fourier (TDF), versão adequada para implementação digital de hardware, é definida por:

$$TDF X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{\left(\frac{-i2\pi kn}{N}\right)} \quad (2.1)$$

Em que $x(n)$ é a sequência de amostras de um sinal contínuo $x(t)$ extraídos a cada período para N amostras. A TDF produz uma sequência de valores $X(k)$, em que suas magnitudes correspondem às componentes de frequência discreta.

Da derivação da Equação 2.1, percebe-se que o sinal de entrada $x(n)$ requer periodicidade, repetindo-se a cada N amostras.

Esta representa a grande desvantagem da análise de Fourier: no domínio do tempo, a informação da frequência é perdida e no domínio da frequência, a informação temporal é perdida. A análise simultânea de ambos os domínios não é possível. Não se pode saber o momento em que um evento no domínio da frequência ocorreu.

Para situações como a transmissão de sinais, nas quais as propriedades do sinal não variam muito ao longo do tempo, a Transformada de Fourier é apropriada. Sinais ditos assim são denominados de sinais estacionários. Já os sinais que apresentam variação temporal são denominados de não-estacionários, sendo este o objeto de estudo deste trabalho. Estes demandam, simultaneamente, de informações dos domínios do tempo e da frequência.

Com o intuito de corrigir o problema encontrado, uma adaptação da Transformada de Fourier foi desenvolvida para analisar apenas uma parte do sinal por vez, onde uma janela, que desliza sobre o sinal, fornece informações sobre tempo e frequência. Essa técnica é chamada de janela deslizante e a nova transformada é denominada de Transformada de Fourier de Curto Tempo (TFCT), Transformada Janelada de Fourier (TJF) e sua versão discretizada, nomeada Transformada Discreta Janelada de Fourier (TDJF) é dada por:

$$TDJF(k, m) = \sum_{n=0}^{n-1} x(n) w(n - m) e^{\left(\frac{-i2\pi kn}{N}\right)} \quad (2.2)$$

Em que $w(n-m)$ é a forma mais simples de representação de uma função de janela retangular.

$$w(n - m) = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq (n - m) \leq (N - 1) \\ 0 & \text{para os demais casos} \end{cases} \quad (2.3)$$

Para cada janela $w(n-m)$ a TDJF produz uma sequência de valores complexos $TDJF(k,m)$ para $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

A TDJF mapeia o sinal nas duas dimensões de tempo e frequência. Ela proporciona informação sobre intervalos de tempo em que o sinal apresenta grandes magnitudes de frequência, e em quais frequências um evento ocorre.

Havendo a necessidade de focar uma região problemática específica, a largura da janela é diminuída para uma análise mais detalhada, enquanto que a largura da janela pode ser aumentada quando não forem detectados problemas. Logo, com a escolha certa do tamanho da janela, consegue-se analisar um sinal simultaneamente no domínio do tempo e frequência, sendo esta capaz de identificar distúrbios de tensão.

O grande problema da TJF é que a precisão da transformada depende do tamanho da janela, e uma vez definido, ela será a mesma para todas as frequências a serem analisadas, limitando sua precisão. Diminuir o tamanho da janela aumentará a precisão de localização de transitórios de curto tempo, mas diminuirá consideravelmente a resolução de frequência [8].

2.3. A TRANSFORMADA DE WAVELET

A ideia básica da Transformada de Wavelet (TW) é a análise simultânea dos domínios do tempo e da frequência de um sinal, porém com escalas variáveis de tempo e frequência. A janela de análise não é mais fixa, como a apresentada na TJF. A TW decompõe o sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução, a partir de uma única função. Diferentemente da TF que fornece uma representação global do sinal, a TW apresenta representações locais no domínio do tempo e da frequência de um dado sinal.

Figura 2: Transformada de Wavelet [11].



A técnica consiste em analisar o sinal mediante o deslocamento no tempo e da variação de escalas em janelas determinadas com base em funções denominadas wavelets mães, as quais são caracterizadas por serem irregulares, de curta duração e valor médio nulo, fomentando a divisão do sinal original em diferentes escalas de resolução. Já na análise de Fourier, as janelas são representadas por senoides, cuja duração é ilimitada, são regulares e previsíveis, o que permite apenas que o sinal seja particionado em diferentes frequências, perdendo a informação temporal.

A transformada contínua de Wavelet (TCW) é definida como a soma ao longo do tempo do sinal multiplicado por versões escaladas e deslocadas da função Wavelet.

Matematicamente, a TCW de um sinal $x(t)$ com respeito a uma Wavelet Mãe $g(t)$ é definida por [7]:

$$TCW(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.4)$$

Onde a é o parâmetro de dilatação ou fator escala e b é o fator translação, ambas as variáveis contínuas no tempo. Desta forma, o sinal original $x(t)$ é, então, mapeado em uma nova função bidimensional pelos

fatores a e b através da TCW. Vale salientar que um coeficiente $TCW(a,b)$ representa o quão bem o sinal $x(t)$ e a Wavelet Mãe escalada e transladada se assemelham, e que o conjunto de todos os coeficientes associados a um sinal em particular são a representação deste através da Wavelet Mãe escolhida.

Analogamente à TF e TDF, a Transformada de Discreta Wavelet (TDW) é a transformada correspondente à TCW para funções discretas, implementável em um ambiente computacional. A TDW de uma função f é representada pela equação:

$$TDW(m, k) = \frac{1}{\sqrt{(a_0^m)}} \sum_n x(n) g\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2.5)$$

Em que $g()$ é a Wavelet Mãe e os parâmetros de escala a e de translação b são funções de um parâmetro m , em que $a=a_0^m$ e $b=nb_0 a_0^m$ dando origem a "Wavelet Filhas" e K é uma variável que se refere à uma amostra particular do sinal.

O parâmetro de escala gera uma escala geométrica, como por exemplo $1, 1/(a_0), 1/(a_0^2)$ em diante. Assim, a TDW fornece uma cobertura logarítmica de frequência, em contraste à cobertura uniforme de frequência da TDJF.

Pode-se perceber que a TDW depende de dois parâmetros, a e b , que correspondem, respectivamente, às informações da escala e tempo, respectivamente. Tal equação decompõe a função em uma superposição de Wavelet mãe, sendo os coeficientes desta superposição obtidos pela TDW da função.

A TDW fornece uma representação esparsa para muitos sinais naturais. Em outras palavras, as características importantes de muitos sinais naturais são capturadas por um subconjunto de coeficientes TDW que é tipicamente muito menor que o sinal original. Isso "comprime" o sinal. Com a TDW, sempre acaba-se com o mesmo número de coeficientes que o sinal original, mas muitos dos coeficientes podem estar próximos de zero [9].

Segundo [10], as Wavelets para análise de sinais com características marcantes de variação de amplitude, ondas viajantes ou interrupções melhor que qualquer outro método, podendo ser comparado com as redes neurais, fornecendo, até mesmo, resultados mais coerentes em problemas que envolvem qualidade de energia.

2.3.1. Escala

Escalar uma onda significa comprimi-la ou estendê-la. Quanto maior for a escala, menos comprimida a onda fica [11].

Figura 3: Exemplo de escala de uma Wavelet [11].

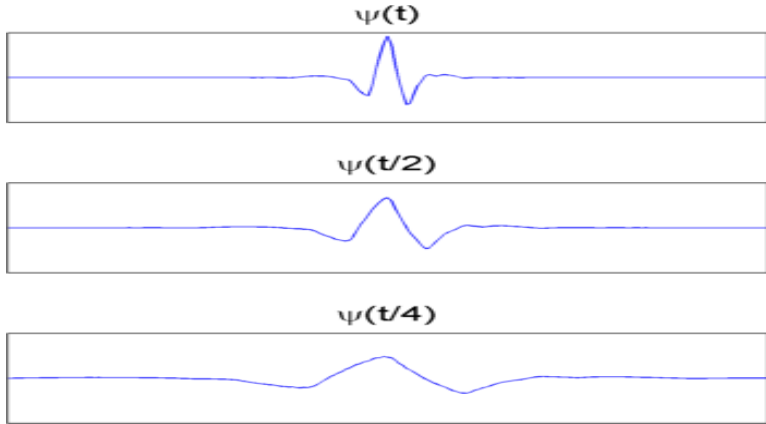


Figura 4: Exemplo de escalas da função seno [11].

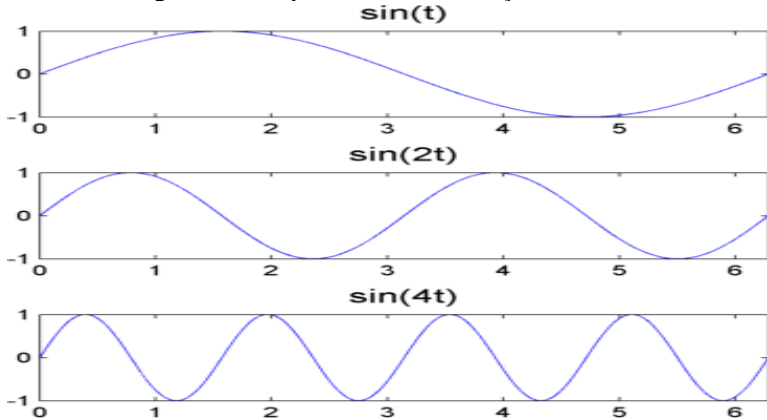


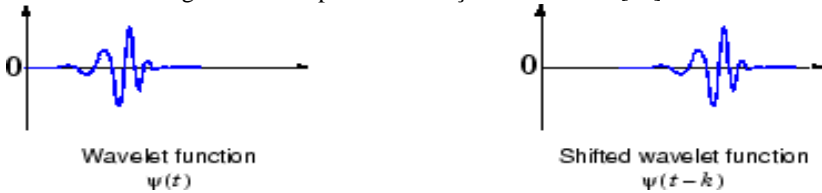
Figura 5: Exemplos de pequena escala à esquerda e grande escala à direita [11].



2.3.2. Translação

Deslocar ou transladar uma Wavelet significa deslocá-la no eixo do tempo [11].

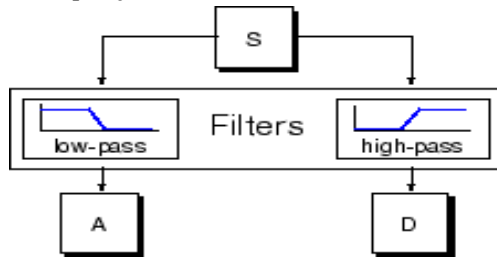
Figura 6: Exemplo de translação de um sinal [11].



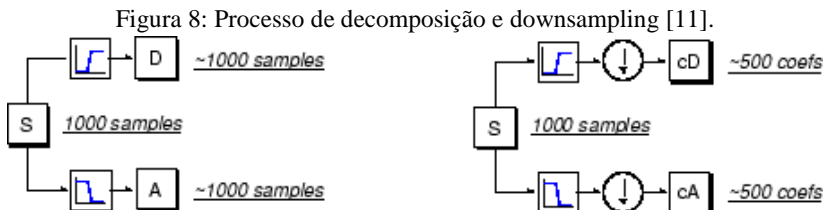
2.3.3. Componentes da Wavelet

A análise da Wavelet possui dois componentes: os componentes de baixa frequência, conhecidos como aproximações, pois para muitos sinais esta é a parte mais importante, e os componentes de alta frequência, conhecidos como detalhes, pois representam as particularidades do sinal. O processo de filtragem é basicamente representado pela Figura 7.

Figura 7: Decomposição de um sinal em amostras e detalhes [11].

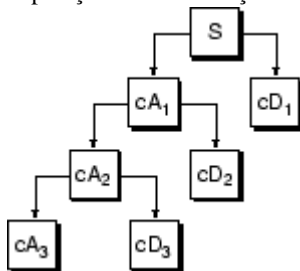


Realizar essa operação gera o dobro de número de dados que o sinal original. Se o sinal original possuir 1000 amostras, serão originados 1000 coeficientes de aproximação e 1000 coeficientes de detalhe, totalizando 2000 amostras. Logo, é necessário realizar um *downsampling*, ou seja, reduzir o número de amostras, para se obter uma Transformada mais sutil [12].



O processo de decomposição do sinal em amostras e detalhes pode ser realizado quantas vezes se queira, de modo a obter a melhor solução possível para o problema proposto. Este processo é conhecido como Análise Multi Resolução (AMR). Uma decomposição multi resolução permite obter uma informação que não varia com a escala [12].

Figura 9: Decomposição multi resolução de um sinal [11].



A Transformada de Wavelet é comumente utilizada em processamento de áudio, imagem e vídeo, na biomedicina, na geofísica, na compressão de dados, em sistemas de controle, mecânica dos fluidos, entre outras áreas [13].

Implementar uma TDW envolve sucessivos pares de filtros passa-altas e passa-baixas para cada escala da transformada. Isso pode ser entendido como sucessivas aproximações da mesma função, em que cada uma destas fornece uma informação incremental de uma escala particular, ou seja, uma faixa de frequência. A primeira escala cobre uma ampla faixa de frequência e as escalas maiores uma faixa mais estreita. A primeira

escala possuirá a melhor resolução de tempo, enquanto grandes escalas cobrem intervalos de tempo mais longos [31].

2.3.4. Famílias de Wavelet

Diversas são as famílias e os tipos de Wavelet disponíveis para aplicação. A seguir serão apresentadas algumas das Wavelets mais conhecidas e que foram testadas neste trabalho, dando ênfase para as Wavelets Daubechies, Haar e Coiflet [14].

- **Wavelet Daubechies**

É um tipo de Wavelet que possui fase não linear e sua energia está concentrada no início do seu apoio. A família de Wavelets Daubechies é a mais utilizada para análise de características de textura em processamento de imagens, devido às suas habilidades de suporte ortogonais e compactas. A Wavelet Daubechies usa janelas sobrepostas, portanto os resultados refletem todas as mudanças entre as intensidades dos pixels. Como a média de Daubechies utiliza mais pixels, ela é mais suave do que a wavelet Haar. A transformação Daubechies D4, por exemplo, possui quatro coeficientes wavelet e de escala. A soma dos coeficientes da função de escala também é uma, portanto, o cálculo é a média de quatro dados adjacentes.

- **Wavelet Haar**

É um caso especial da Wavelet de Daubechies. É um filtro simétrico, útil para detecção de bordas. É conceitualmente simples, eficiente em termos de memória, reversível, sem os efeitos de borda característicos de outras wavelets e computacionalmente barata. A transformação Haar não tem janelas sobrepostas e reflete apenas as alterações entre pares de dados adjacentes. Ela usa apenas dois coeficientes de função de escala e Wavelet e calcula as médias e diferenças de pares.

- **Wavelet Coiflet**

As Coiflets foram originalmente derivadas da Wavelet Daubechies. Estas demandam uma carga computacional ainda maior e usam janelas que se sobrepõem ainda mais. Utilizam seis coeficientes de função de escala e wavelet, portanto, o aumento na média e na diferenciação de pixels leva a uma ondulação mais suave e capacidade aumentada em várias técnicas de processamento de imagem (remoção de ruído de imagens, etc.). O filtro segue a mesma estrutura de ambos, Haar

e Daubechies. Calcula-se as médias e diferenças usando o mesmo formato, apenas com seis pixels adjacentes.

- Wavelet Biortogonal

É uma Wavelet de fase linear.

- Wavelet Symlet

É a Wavelet menos assimétrica e possui fase quase linear.

2.4. PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA

O procedimento para a análise proposta utilizando Transformadas de Wavelets para descrever ondas viajantes do presente estudo, segundo [15], consiste em:

1. Aplicar a transformada na forma de onda.
2. Obter os valores de máximos do resultado da transformada.
3. Gravar os valores de máximos dos detalhes e o momento em que eles ocorrem.
4. Analisar os resultados para identificar os transientes da onda viajante e checar a validação dos resultados.

Complementando o procedimento proposto, a amplitude da onda viajante inicial, gerada por uma falta, é maior que as ondas viajantes subsequentes [16].

Segundo [17], a precisão do algoritmo depende da velocidade de detecção da frente de onda, da onda viajante transiente.

Utilizou-se o método de aquisição de dados sincronizados de dois terminais da linha por este apresentar os melhores resultados, segundo os resultados de [33].

2.5. CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos necessários para entendimento deste trabalho, de modo a fundamentar o estudo de caso que será realizado.

MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Este capítulo tem o propósito de representar computacionalmente o sistema elétrico sobre o qual o algoritmo será testado e validado. Utilizou-se um sistema de transmissão, submetido a condições faltosas, no qual se monitora a tensão em ambas as extremidades da linha de transmissão, para a realização de uma série de simulações computacionais futuramente.

3.1. O SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

O sistema elétrico de potência analisado representa um trecho de 300 km de uma linha de transmissão alternada, de 400 kV e circuito duplo vertical. Para representar tal sistema, utilizou-se o *software* ATP (Alternative Transient Program).

O ATP é a nova versão do antigo programa Eletromagnetic Transient Program (EMTP), da década de 60, que modelava pequenos sistemas monofásicos. Mais recentemente, o ATP recebeu uma versão gráfica, o ATPDraw. Preliminarmente, o programa funcionava com a inserção de cartões de entrada, criados em editor de texto, e gerava cartões de saída, tornando difícil sua utilização por profissionais sem experiência no *software*. A versão gráfica é baseada em diagrama de blocos de funções, que torna sua utilização intuitiva até mesmo para usuários inexperientes.

A Figura 10 representa o sistema elétrico analisado no estudo. Seus elementos serão explicados a seguir.

Figura 10: Sistema modelado no ATP.



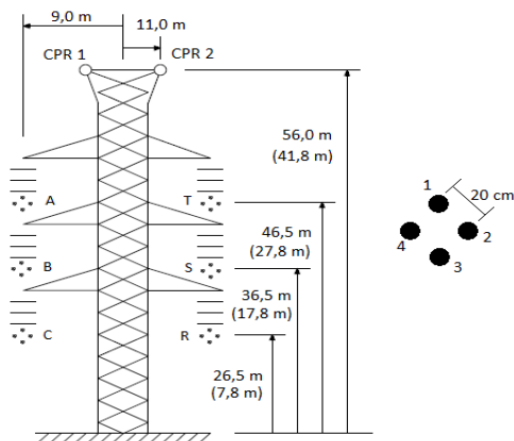
3.1.1. Modelagem da linha de transmissão

A modelagem da linha de transmissão em análise no *software* ATP é baseada nas características construtivas e geométricas de seus elementos, incluindo diversas resistências, resistividade do solo, diversas distâncias físicas, tensões, intervalo de aquisição de amostras de dados, como também a transposição das linhas.

Os modelos de linhas podem ser definidos conforme a organização de seus parâmetros. Linhas com parâmetros concentrados são de fácil utilização, porém nem sempre representam a linha de transmissão de forma adequada para toda a faixa de frequência presentes nos instantes transitórios. Na maioria dos casos esta forma de representação dos parâmetros da linha distorce as formas de onda e aumenta as amplitudes de harmônicas de ordem elevada. Os parâmetros distribuídos dependentes da frequência são considerados mais precisos que os modelos que consideram parâmetros constantes [18].

Para a sua representação, utilizou-se a componente *Line Cable Constants* (LCC) do *software* ATPDraw. Essa rotina é empregada para modelagem de uma linha de transmissão com parâmetros distribuídos e constantes em relação a frequência, que representa uma linha de transmissão no qual o usuário insere os parâmetros físicos e disposições geométricas do modelo de torre analisado. A Figura 11 representa o modelo de torre de transmissão utilizado os valores inseridos na componente LCC, referentes à disposição geométrica da torre encontrada em [19].

Figura 11: Modelo de torre utilizado [19].



Também é necessário especificar as características dos condutores, seus espaçamentos e a quantidade. No trabalho utilizou-se na representação condutores de alumínio termo resistente com alma de aço da fabricante Nexans, cujos seus principais dados foram extraídos de seu catálogo e são apresentados na Tabela 1. Estes condutores são muito utilizados em linhas de transmissão aéreas e também em linhas de distribuição primária e secundária, segundo o fabricante.

É importante ressaltar que o uso do alumínio como um material para condutores elétricos tem grande desenvolvimento, principalmente por suas propriedades elétricas. No entanto, os condutores de alumínio para maioria das linhas de transmissão com vãos longos, necessitam de um reforço mecânico adicional. Para reforçar o condutor, são usados fios de aço galvanizado na alma dos cabos. O *datasheet* completo do condutor está disponível no anexo A.

Tabela 1: Dados do condutor fase.

Condutor Fase	
Fabricante	Nexans
Bitola	556,5 AWG
Diâmetro externo	24,22 mm
Diâmetro interno	10,38 mm
Resistência elétrica máxima CC a 20°C	0,103 Ω /km

O cabo para-raios utilizado neste estudo é um Optical Grownd Wire (OPGW) da fabricante KSDFIBERCABLE, cabo específico para uso em linhas aéreas, segundo o fabricante. No seu catálogo é possível obter os dados apresentados na Tabela 2. Algumas de suas propriedades serão apresentadas no próximo capítulo. O *datasheet* do condutor OPGW está disponível no anexo B.

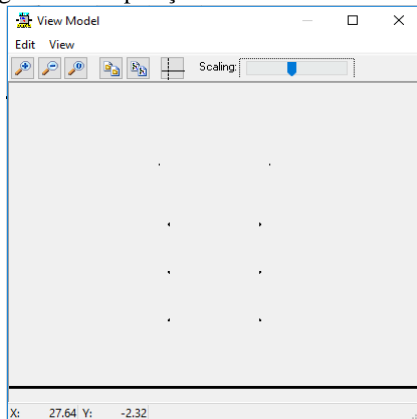
Tabela 2: Dados do cabo OPGW

Cabo OPGW	
Fabricante	KSD
Diâmetro externo	11,2 mm
Resistência elétrica máxima CC a 20°C	0,889 Ω /km

Cada condutor possui em seu interior 4 subcondutores, e sua disposição é ilustrada pela Figura 11, à direita.

Esses dados citados devem ser preenchidos na aba *data* da rotina *Line Constant* do ATPdraw. Ao clicar no botão *view* do bloco *Line Constant* do ATPdraw, tem-se o resultado da disposição geométrica dos condutores na torre, baseada nos dados inseridos na aba *data*. Percebe-se que o resultado, ilustrado na Figura 12, se assemelha com a silhueta da torre, apresentada na Figura 11.

Figura 12: Disposição dos condutores da torre.



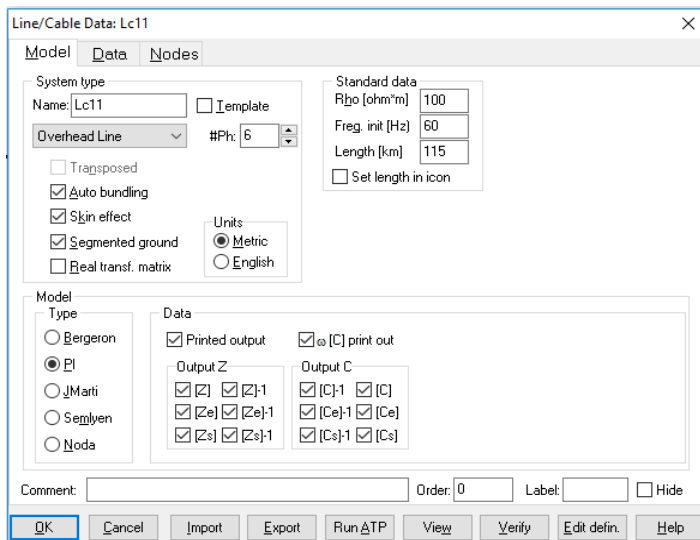
3.1.2. Parâmetros do sistema de dados complementares

Outros dados complementares são necessários para a correta modelagem do sistema, conforme dispostos na Tabela 3. Estes dados devem ser incluídos na aba *model* do bloco LCC, e nos blocos referentes aos geradores e suas respectivas impedâncias. Os valores apresentados na Tabela 3, referentes aos parâmetros dos geradores, foram extraídos de [32].

Tabela 3: Dados complementares

Condições de operação e parâmetros auxiliares	
Temperatura	85 °C
Frequência da Rede	60 Hz
Resistividade do solo	100 $\Omega \cdot m$
Impedância de sequência positiva e negativa do gerador por fase	$Z_s = (0,45+5j) \Omega$
Impedância de sequência zero do gerador	$Z_0 = 1,5 \cdot Z_s$
Potência ativa do gerador	500MW

Figura 13: Aba principal do bloco Line Constants.



Algumas considerações precisam ser feitas, adicionalmente. O circuito possui 6 fases, visto que é um circuito duplo, ou seja, 2 sistemas trifásicos. Como cada condutor possui 4 subcondutores em seu interior, logo é preciso marcar a opção *Auto bundling*, como também a opção *Segmented ground*, que define que os cabos para-raios são aterrados em cada torre.

Para se considerar o efeito pelicular, necessita-se marcar a opção *Skin effect*, que representa o aumento da resistência aparente de um condutor elétrico em função do aumento da frequência da corrente elétrica que o percorre. É caracterizado pela repulsão entre linhas de corrente eletromagnética, criando a tendência desta fluir na superfície do condutor elétrico, diminuindo a capacidade de condução e consequentemente aumentando as perdas do sistema.

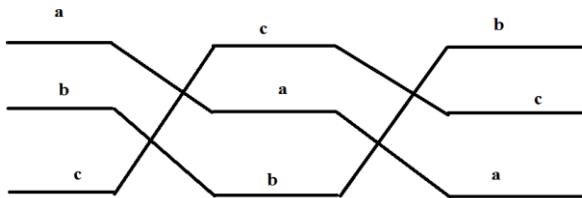
Também se considerou a linha como transposta. A transposição em linhas de transmissão é um método utilizado para diminuir o desequilíbrio à frequência fundamental entre as tensões e correntes de fase vistas dos terminais da linha em análise, supondo balanceamento no início da linha.

A transposição consiste na mudança das posições das fases, ou seja, mudam-se as posições físicas dos condutores de fase, tal como apresentado na Figura 14. Desta forma é possível minimizar os desequilíbrios dos campos magnéticos entre as fases, cabos de cobertura,

ferragens e solo sob a linha de transmissão. O resultado esperado de uma transposição de linha é a mesma indutância média para cada condutor [20].

O restante do sistema elétrico como geradores, cargas e outros elementos foram representados com um equivalente de *Thevenin*. Também não se levou em conta os efeitos de saturação, atenuação ou distorção dos transformadores de corrente e de potencial que, em um sistema real, seriam necessários para obter os sinais de tensão analisados neste trabalho.

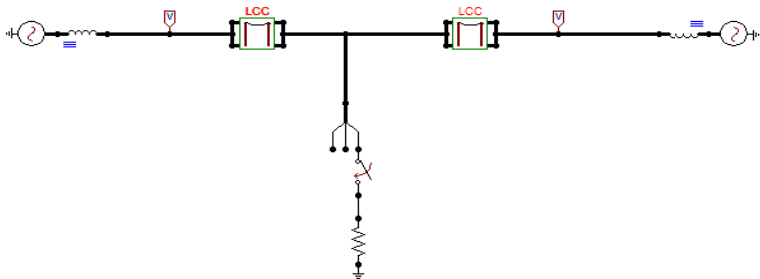
Figura 14: Esquema de transposição de cabos [35].



3.1.3. A falta e o método para a variação das distâncias das faltas

O curto-circuito foi simulado por uma chave seccionadora com abertura por tempo, em série com um resistor, que simulam, respectivamente, a ocorrência do curto e sua resistência. A chave fechada simula uma falta do sistema elétrico, conforme a Figura 15, que representa uma falta monofásica. À esquerda da linha de transmissão, tem-se o terminal A, e à direita, o terminal B.

Figura 15: Simulação da falta.



A variação das distâncias de falta foram feitas dividindo a linha de transmissão em duas partes e variando os seus comprimentos, conforme a Figura 15, porém sempre totalizando, somados, os 300km da linha inteira. Ressalta-se que o principal parâmetro obtido da linha, a velocidade de propagação, não varia com o comprimento da linha.

3.2. O ARQUIVO DE ENTRADA DO ATP

Seguindo a metodologia descrita acima, pode-se preencher por completo a rotina *Line Constant* do ATP. Com a linha de transmissão modelada corretamente, clicando em *Run ATP*, pode-se obter a partir do arquivo gerado pelo ATP informações relevantes sobre o sistema analisado, como suas impedâncias e susceptâncias características de sequências, a atenuação da linha e a velocidade de propagação na linha de transmissão, conforme a Figura 16, que representa um trecho do código gerado. Esta última será utilizada, posteriormente, no algoritmo localizador.

Figura 16: Parâmetros da linha.

Sequence	Surge impedance		Attenuation	velocity	Wavelength	Resistance	Reactance	Susceptance
	magnitude(ohm)	angle(degr.)	db/km	km/sec	km	ohm/km	ohm/km	mho/km
Zero :	6.52600E+02	-4.45027E+00	1.34054E-03	1.90110E+05	3.16850E+03	2.00831E-01	1.28240E+00	3.04782E-06
Positive:	2.48071E+02	-2.97033E+00	5.81351E-04	2.92267E+05	4.87111E+03	3.31624E-02	3.18693E-01	5.20667E-06

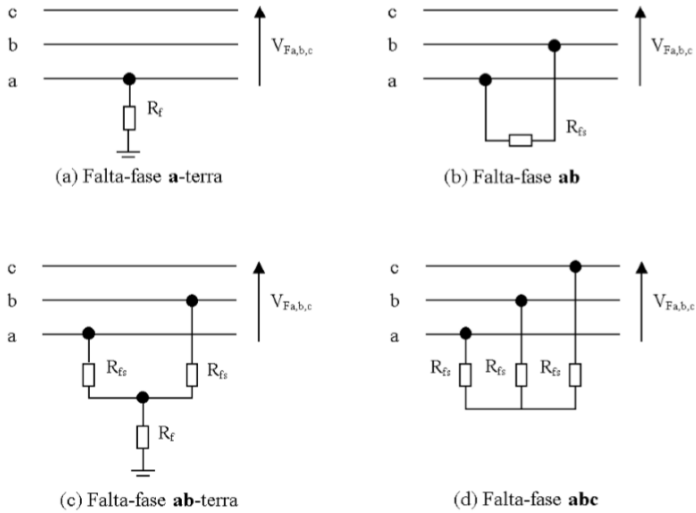
Foram inseridos dois medidores de tensão, um em cada extremidade da linha, para realizar este estudo. Os dados de tensão são discretizados, em um intervalo de tempo de 1µs, ou seja, uma frequência de amostragem de 1MHz, conforme [21]. O tempo de simulação para todas as simulações foi de 0,2 s, tempo mais do que necessário para a detecção das faltas.

Com o sistema elétrico completo, pôde-se obter os dados de tensão de ambas as extremidades da linha.

3.3. OS DIFERENTES TIPOS DE FALTA

São apresentadas neste trabalho um total de 60 combinações de simulações diferentes de situações faltosas para os diferentes tipos de falta, conforme a Figura 17 [22]. Os resultados serão discutidos posteriormente.

Figura 17: Tipos de faltas [22].



3.3.1. As variações das simulações

As variações das simulações são relacionadas a seguir:

Tipos de faltas:

- Fase-terra (monofásicas).
- Fase-fase (bifásicas).
- Fase-fase-terra (bifásicas com conexão à terra).
- Fase-fase-fase (trifásicas).

Distâncias de faltas simuladas:

1, 25, 50, 75, 100, 125, 140, 150, 160, 175, 200, 225, 250, 275, 299 km (em relação ao terminal 1).

Resistências de curto circuito: valores pequenos, variando entre $0,1\Omega$ até 150Ω .

As formas de onda obtidas com as simulações de falta, antes de serem importadas para o *software* Matlab, foram analisadas também na ferramenta PLOTXY, para verificação do êxito nas simulações. Na Figura 18, por exemplo, pode-se observar a forma de onda originada por uma falta monofásica, e na Figura 19, a forma de onda de uma falta trifásica. Nota-se que, mesmo que a falta seja monofásica, nas outras fases também são sentidas o efeito do curto-circuito. Isso ocorre devido ao acoplamento magnético das fases, que será abordado na seção 4.3.

Figura 18: Exemplo de falta monofásica.

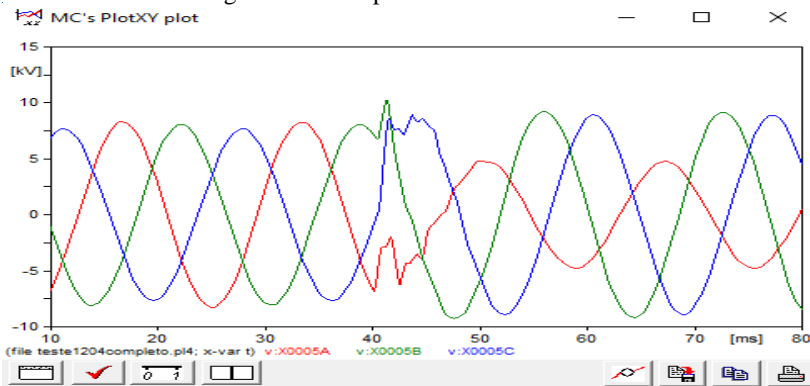
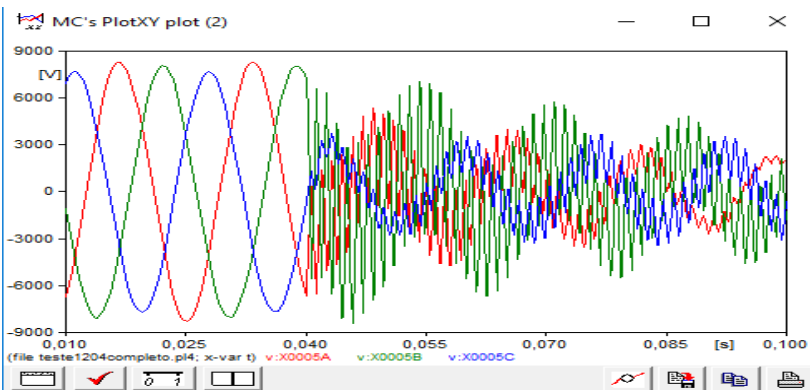


Figura 19: Exemplo de falta trifásica



A ANÁLISE DOS DADOS E LOCALIZAÇÃO DAS FALTAS

Neste capítulo será apresentado, detalhadamente, o desenvolvimento do algoritmo localizador de faltas, implementado no *software* Matlab, baseado na teoria das ondas viajantes e na Transformada de Wavelet.

4.1. O PRINCÍPIO DO MÉTODO

As faltas, como visto anteriormente, são causadas por uma falha da isolamento sólida, líquida ou gasosa que sustenta a tensão entre condutores ou entre condutores e terra; pode ser também causada por uma redução da distância entre os condutores (ou entre condutores e terra). As principais falhas da isolamento podem ser causadas por danos mecânicos, uso abusivo do sistema, isolações afetadas pela umidade, descargas atmosféricas ou sobretensões. Os curtos circuitos reduzem a margem de estabilidade do sistema, geram danos aos equipamentos próximos, explosões e efeito cascata [23].

Na ocorrência de uma falta, segundo a teoria das ondas viajantes, uma injeção de corrente e tensão acontecerá no ponto onde ocorreu a falta. Essa energia injetada se propagará em forma de ondas viajantes pela linha de transmissão, em ambos os sentidos, até o momento que encontrar uma descontinuidade na transmissão, como, por exemplo, o fim da linha de transmissão (A e B), gerando transitórios de alta frequência. Conforme o diagrama de Lattice da Figura 20, essas ondas viajantes causadas pela falta irão, então, refletir nestes pontos finais e retornar em direção ao ponto onde ocorreu a falta e irão, além de refletir outra vez, refratar, criando assim múltiplas ondas viajantes, até que um estado de regime permanente ocorra [24].

A velocidade de propagação da linha de transmissão é dada por:

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

Em que L e C são os valores de indutância e capacitância de sequência, obtidos a partir da modelagem da linha de transmissão do capítulo 3 no *software ATP* [25].

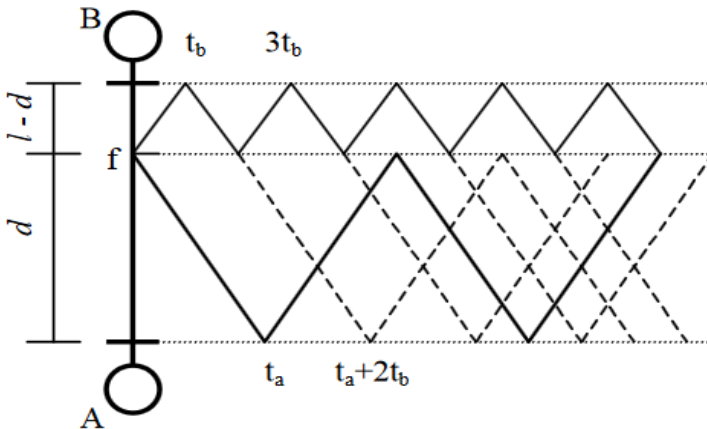
Assim, a velocidade de propagação na linha de transmissão é 292267 km/s , utilizando os parâmetros de sequência positiva do sistema. Esta é a velocidade de propagação do modo aéreo 1 [31].

Os sinais dos medidores de tensão, localizados nos extremos da linha de transmissão sofrerão variações abruptas devido aos transitórios gerados por essas ondas viajantes causadas por faltas. Conhecendo os tempos de detecção dos componentes de alta frequência de ambos os terminais da linha (t_a e t_b do diagrama Lattice da Figura 20) em que essa variação abrupta ocorre, pode-se estimar a distância da falta, a partir da equação:

$$\text{Distância da falta} = \frac{l - v(td)}{2} \quad (4.2)$$

Em que l é o comprimento da linha de transmissão e v a velocidade de propagação da linha.

Figura 20: Diagrama de Lattice [9].



A diferença entre os tempos t_b e t_a é chamada de td , de tal forma que:

$$td = t_b - t_a \quad (4.3)$$

4.2. AQUISIÇÃO DOS DADOS

Os dados de tensão, registrados em ambos os terminais da linha, necessitam de uma comunicação em tempo real para seu funcionamento. Isso pode ser facilmente implementado através do uso do GPS. O GPS, ou Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global), é um elaborado sistema de satélites e outros dispositivos que têm como função básica prestar informações precisas sobre o posicionamento individual no globo terrestre. Durante experiências científicas de recolha de dados, pode-se registrar com precisão de microssegundos o instante em que a amostra foi obtida. Essa precisão, para o estudo em questão, corresponderia a uma precisão de 300 metros na detecção de uma falta [26].

Outro meio de comunicação possível seria por conta do cabo para-raios OPGW, instalado na parte mais alta das linhas de transmissão. A sigla vem do inglês *Optical Ground Wire*, que significa fio de aterramento óptico que é um cabo para-raios com um núcleo de fibra óptica. O cabo OPGW possui duas funções em um único cabo: a de proteção contra descargas atmosféricas e a de transmissão de dados e voz. O uso deste em conjunto com as técnicas de comunicação digital fornece mais velocidade, segurança e capacidade de transmissão [27].

Na simulação do algoritmo, os dados de tensão são provenientes das simulações de faltas realizadas no ATP, representando os dados mencionados anteriormente. Pode-se então começar a realizar os devidos estudos do caso e a implementação do algoritmo localizador de faltas.

4.3. TRANSFORMAÇÃO MODAL

Uma linha de transmissão por ser representada no domínio das fases ou no domínio modal. A representação no domínio modal facilita a obtenção da solução das equações diferenciais que descrevem o comportamento transitório de tensões ao longo da linha [28].

Desta forma, necessitou-se desacoplar o sinal, uma vez que em uma linha de transmissão tem suas fases acopladas magneticamente, ou seja, a perturbação sofrida em uma fase será sentida nas demais fases, conforme foi demonstrado no exemplo da Figura 18 do capítulo anterior [29].

O desacoplamento foi realizado através da transformação modal de Clarke, uma vez que a linha de transmissão possui um plano de simetria. Esta transforma os três sinais de tensão acoplados em três sinais de tensão magneticamente desacoplados α , β , zero ou também mais conhecidos

como modo aéreo 1, modo aéreo 2 e modo zero. A matriz transformação de Clarke é dada por:

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

E a transformação para o domínio modal é descrita por:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

As componentes α e zero são acopladas entre si enquanto que a componente β é totalmente desacoplada em relação às componentes α e zero. Devido ao acoplamento mútuo, as componentes α e zero são denominadas quase modos da linha e a componente β , por ser totalmente desacoplada, é um modo exato da linha [30].

Neste trabalho, analisou-se o quase modo 1, uma vez que este aparece em todo o tipo de falta, conforme proposto por [17], [30] e [31].

4.4. A TRANSFORMADA DE WAVELET

Como a preservação de energia é importante nesta aplicação, necessita-se fazer o uso de uma Wavelet ortogonal [11]. Foram analisados na implementação do algoritmo as principais Wavelets ortogonais: Coiflets de ordem 1 a 5, Daubechies de ordem 1 a 10, Haar e Symlet de ordem 2 a 10.

Com o sinal desacoplado, aplicou-se a transformada de Wavelet no sinal do modo aéreo 1. Diante dos diversos tipos de Wavelets analisados, a Wavelet que melhor representou os instantes de descontinuidade foi a Wavelet Haar, que é um caso especial da Wavelet Daubechies (Daubechies de ordem 1). Esta apresentou os melhores resultados, sendo sensível a variações abruptas no sinal. Assim, obteve-se os coeficientes da transformada de Wavelet sobre o sinal de tensão do modo aéreo 1.

A análise multi resolução (AMR) é ideal para a análise de sinais não estacionários que foi desenvolvida para dar uma boa resolução de tempo e uma baixa resolução de frequência para altas frequências e boa resolução de frequência e baixa resolução de tempo para baixas

frequências. Na AMR as funções Wavelet e funções de escala constroem o sinal em diferentes níveis de resolução [12].

Para este trabalho, analisaram-se os coeficientes de detalhes nível 1, pela sua precisão devido ao número de coeficientes, porém também foram extraídos coeficientes nível 2 e 3, para quaisquer facilidades em alterações futuras ou melhorias do algoritmo. Estes coeficientes representam as componentes de alta frequência do sinal de tensão modal 1.

No primeiro momento da situação faltosa, os coeficientes de detalhes da Wavelet assumem os valores máximos [16], uma vez que estes representam as componentes de alta frequência do sinal. Assim, com os coeficientes obtidos de ambos os lados da linha e com o conhecimento dos instantes de chegada aos terminais de monitoramento, pôde-se obter a distância da falta mediante a Equação 4.2.

Logo, desenvolveu-se um algoritmo que retorna os instantes de tempo onde o maior coeficiente de detalhe da TW, de cada terminal da linha, ocorre.

4.5. A DETECÇÃO DA FALTA

Para ilustrar o funcionamento do algoritmo, confeccionaram-se os gráficos das Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, dos coeficientes de detalhes de wavelet, representados por CW, de ambos os terminais da linha de algumas simulações que compuseram este trabalho. Os valores em azul e os instantes $t1$ representam os coeficientes de detalhes da wavelet referentes aos registros de tensão do terminal A, enquanto os valores em vermelho e os instantes $t2$ representam os coeficientes de detalhes referentes aos registros de tensão do terminal B, respectivamente. Ressalta-se a importância do uso de diversas casas decimais para os instantes $t1$ e $t2$, uma vez que uma diferença de tempo de $1\mu s$, considerando a velocidade de propagação da linha, representa uma precisão de cerca de 292 metros.

Na Figura 21, tem-se os coeficientes obtidos de uma simulação de uma falta fase-terra que ocorreu a 25 km de distância do terminal A. Conforme é observado mais detalhadamente na Figura 22, no terminal A da linha registrou-se um pico nos valores dos coeficientes da wavelet em $t1 = 0,08283799s$, enquanto o pico no terminal B ocorreu em $t2 = 0,08369199s$, gerando assim uma diferença de tempo de $td = 8,54 \times 10^{-4} s$. Como visto anteriormente, a velocidade de propagação na linha de transmissão modelada foi de 292267 km/s . Logo, aplicando a Equação 4.2, tem-se que uma falta ocorreu à uma distância de $25,202 \text{ km}$ do terminal A, representando um erro relativo de $0,81\%$.

Figura 21: Coeficientes de uma falta monofásica.

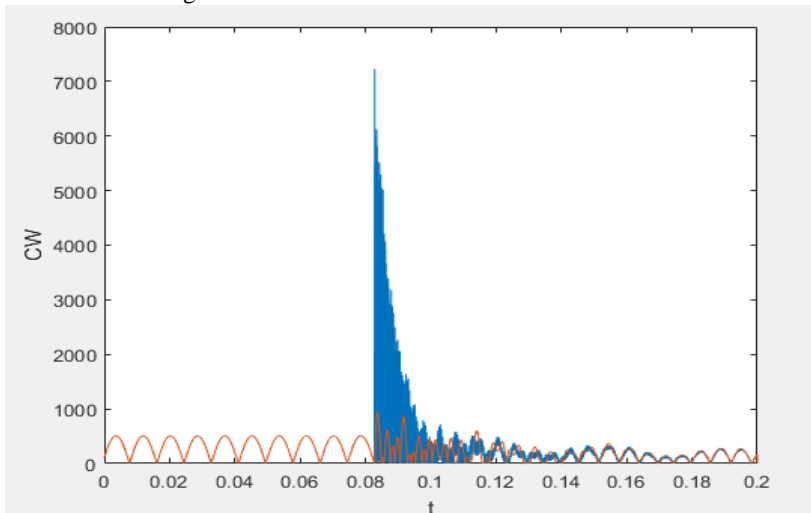
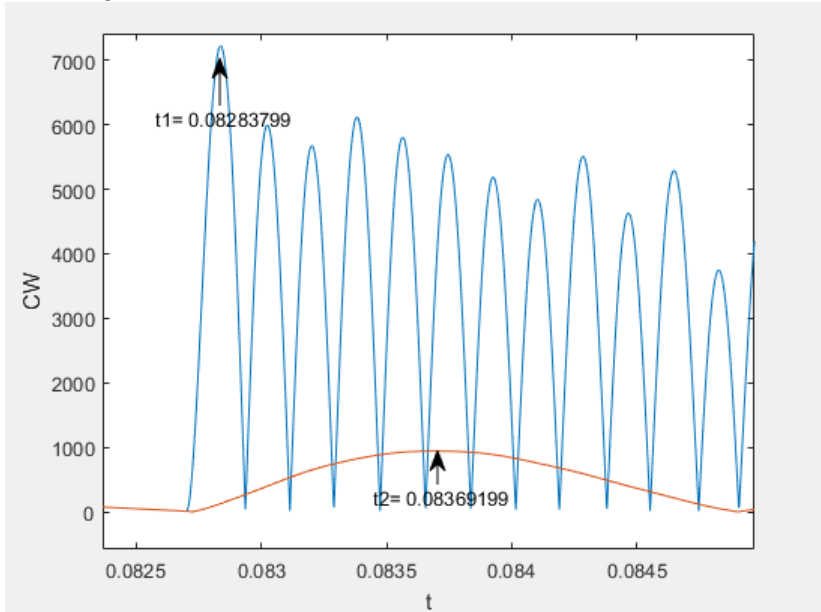


Figura 22: Detalhes dos coeficientes relevantes de uma falta monofásica.



Já na Figura 23, tem-se os coeficientes de uma simulação de uma falta fase terra que ocorreu a 75 km de distância do terminal A. Conforme é observado na Figura 24, no terminal A da linha registrou-se o máximo valor dos coeficientes da wavelet em $t1 = 0,08501199s$, enquanto que no terminal B ocorreu em $t2 = 0,08552599s$, gerando assim uma diferença de tempo de $td = 5,14 \times 10^{-4}s$. Como visto anteriormente, a velocidade de propagação na linha de transmissão modelada foi de 292267 km/s . Logo, aplicando a Equação 4.2, tem-se que uma falta ocorreu à uma distância de 74,887 km do terminal A, representando um erro relativo de 0,15%.

Figura 23: Coeficientes de uma falta monofásica

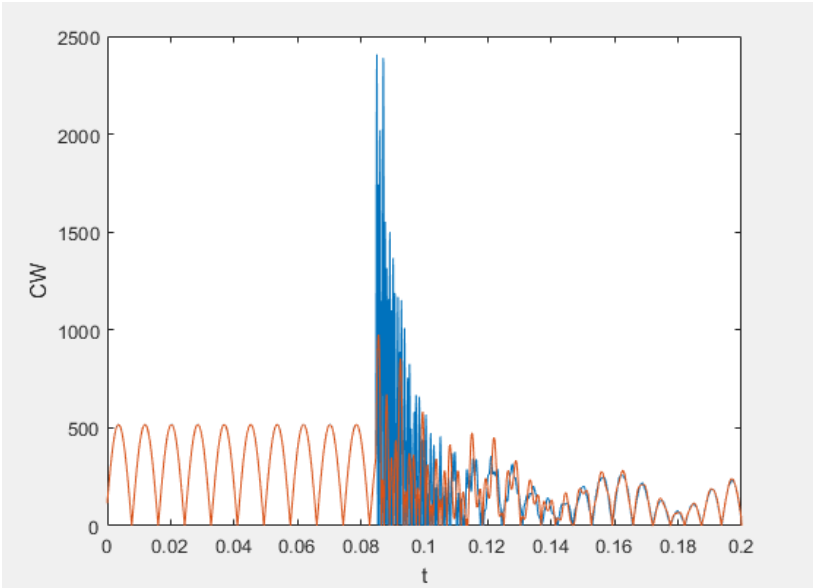
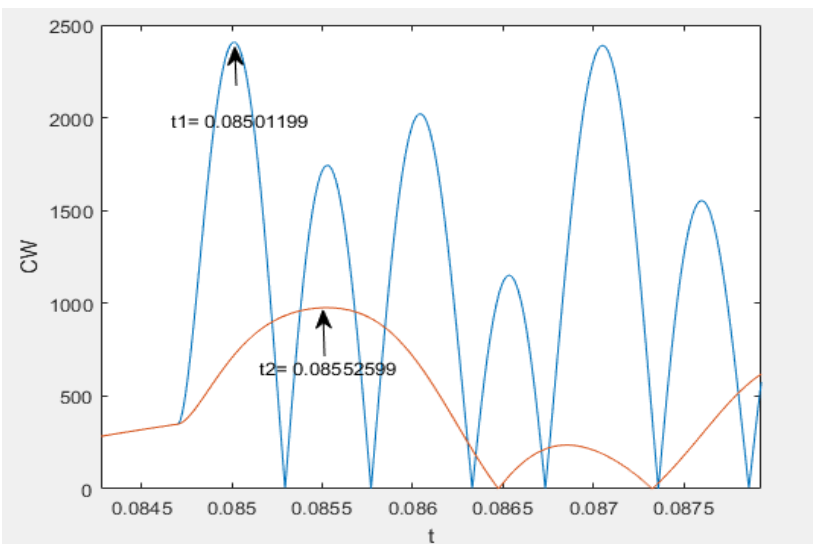
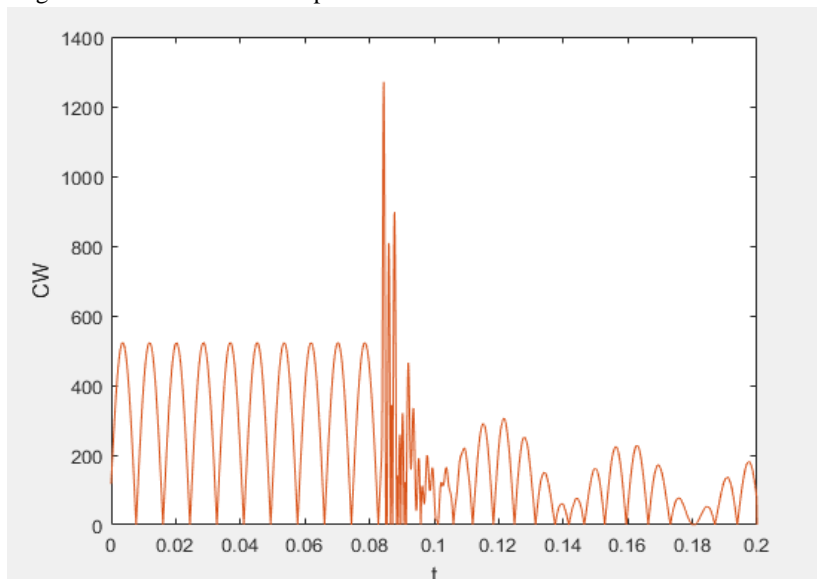


Figura 24: Detalhes dos coeficientes relevantes de uma falta monofásica



Para a falta fase terra localizada a 150 km do terminal A, nota-se que os coeficientes referentes aos sinais de tensões de ambos os lados da linha (azuis e vermelhos) são sobrepostos, uma vez que esta distância representa o centro da linha de transmissão e os transitórios são registrados exatamente no mesmo momento, em ambos os lados da linha. O erro para este caso foi nulo.

Figura 25: Coeficientes sobrepostos de uma falta monofásica no meio da linha.



Já um exemplo de coeficientes de detalhes obtidos a partir da simulação de uma falta trifásica a 200 km do terminal A pode ser visto na Figura 26. A diferença de tempo, que pode ser melhor observada na Figura 27, foi de $-3,44 \times 10^{-4} s$, representando uma estimativa de localização à 200,269 km do terminal A. Logo, o erro relativo foi de 0,13%.

Figura 26: Coeficientes de uma falta trifásica.

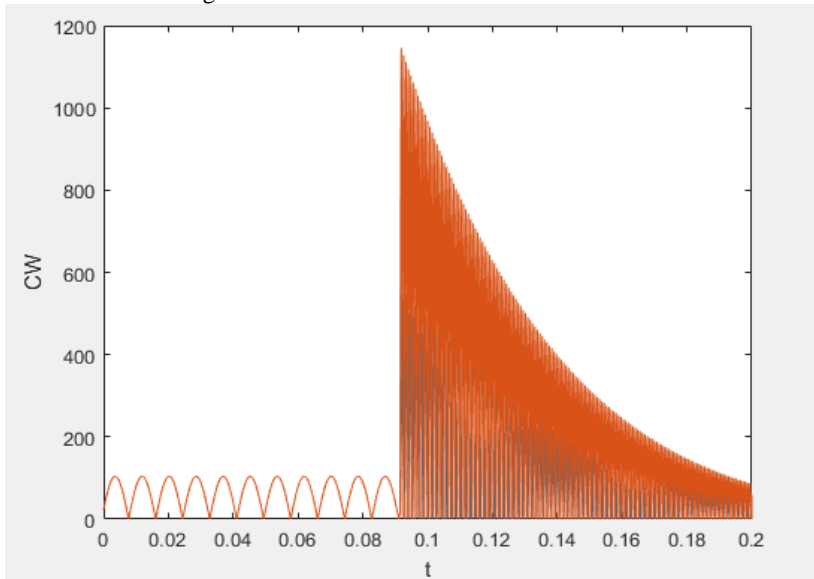
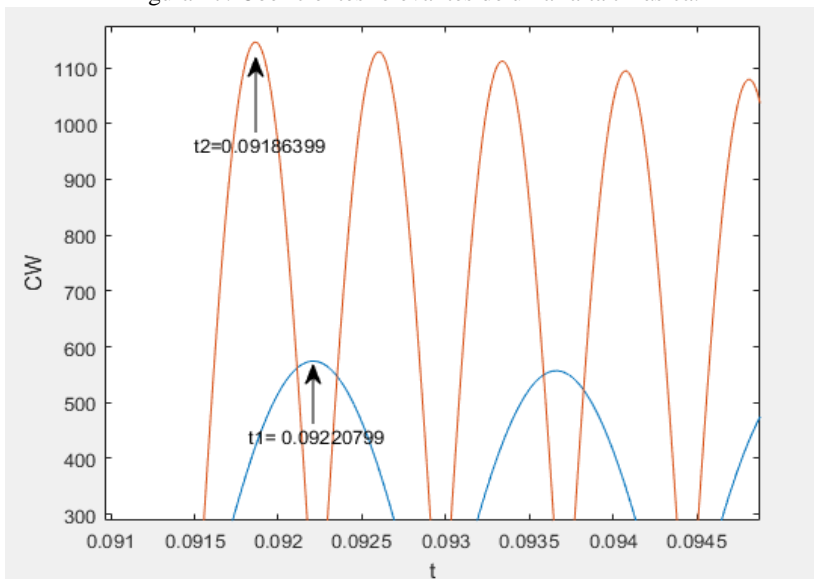


Figura 27: Coeficientes relevantes de uma falta trifásica.



Um exemplo de resultados de falta bifásica é representado na Figura 28. O tempo $t1$, ilustrado na Figura 29, foi $0,08602400$ s. O tempo $t2$, ilustrado na Figura 30, foi $0,08500400$ s. Logo, a diferença de tempo encontrada foi de $-1,02 \times 10^{-3}$ s, o que corresponde a uma distância de 299,056 km do terminal A. Logo, o erro relativo foi de 0,019%.

Figura 28: Coeficientes de uma falta bifásica.

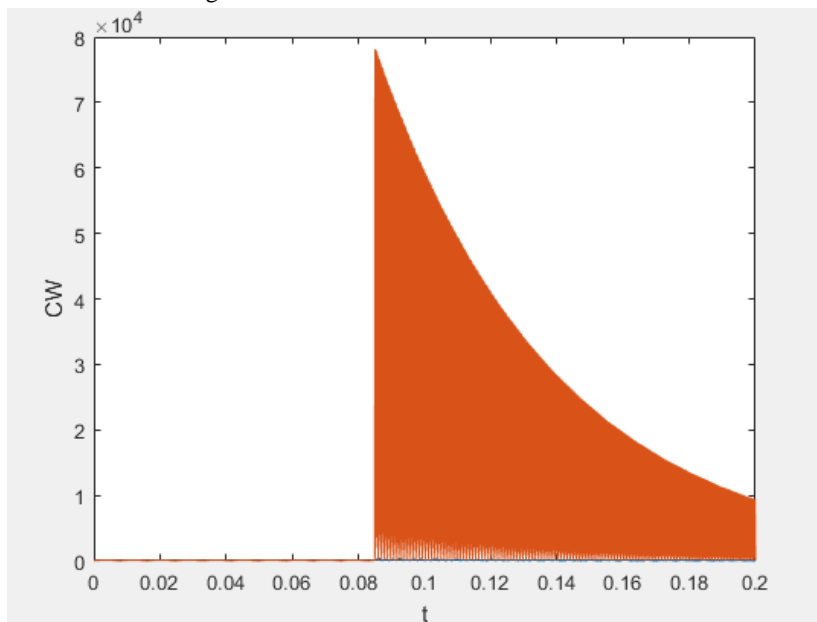


Figura 29: Coeficientes relevantes de uma falta bifásica.

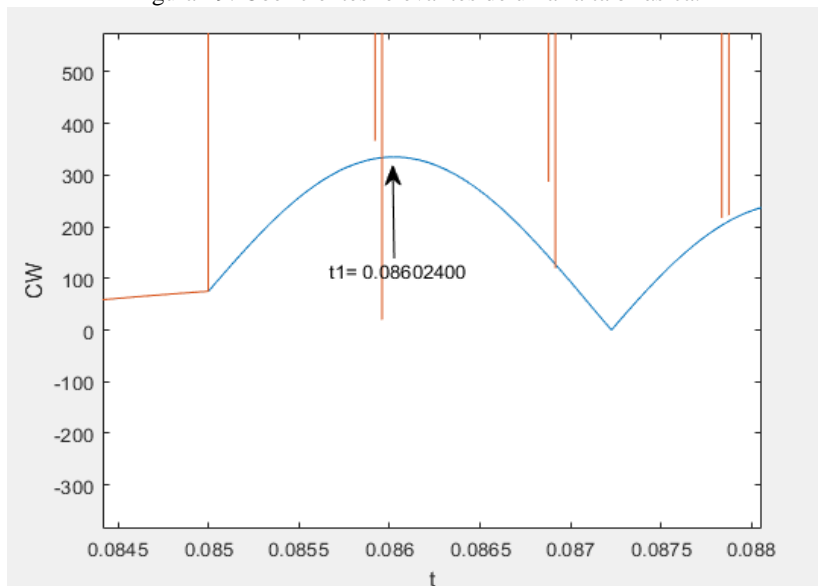
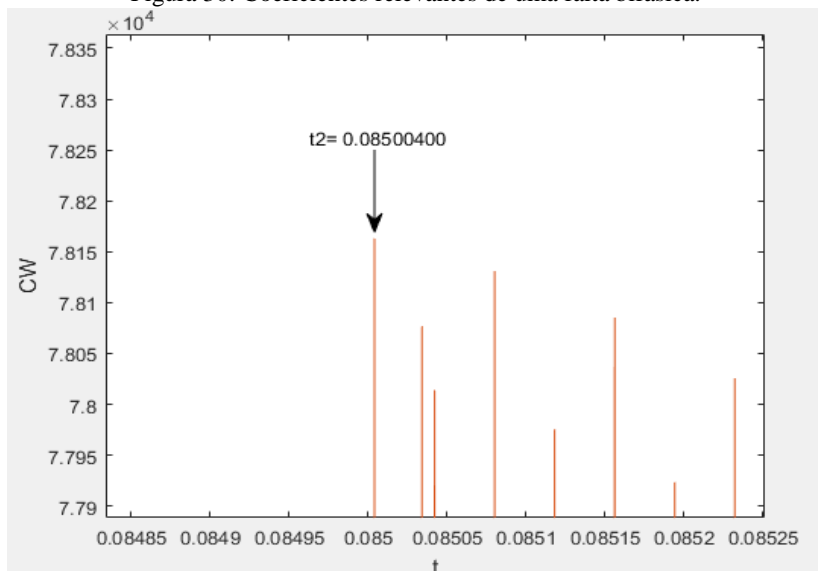


Figura 30: Coeficientes relevantes de uma falta bifásica.



RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a implementação do algoritmo no *software* MATLAB, apresentado no capítulo 4, analisando os instantes transientes de uma situação faltosa simulada no *software* ATP, apresentado no capítulo 3. Como descrito no capítulo 4, variaram-se alguns parâmetros e foram avaliadas as influências nos resultados.

O sistema elétrico analisado apresenta uma velocidade de propagação de 292267 km/s no modo aéreo 1, apresentado nos capítulos anteriores, sendo o passo de amostragem 1µs (1MHz). Os sinais do modo 1 foram decompostos em suas aproximações e detalhes, sendo os coeficientes da Transformada de Wavelet do segundo o objeto de estudo deste trabalho. A Wavelet escolhida neste estudo foi a Wavelet de Haar, uma vez que essa melhor detectou os regimes transitórios.

5.1. OS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados das simulações serão expressos a seguir no formato de tabelas, contendo os dados referentes de cada simulação. Nas tabelas, as colunas **D. Real** representam as distâncias reais da simulação, **R** é a resistência de falta, **D. Detectada** a distância localizada pelo algoritmo e as demais colunas são os erros apresentados a seguir, na respectiva ordem apresentada. Todas as simulações foram realizadas em um ângulo de incidência de 90°, momento em que o valor de tensão atinge seu máximo e seus coeficientes são melhores visualizados, conforme proposto por [34].

Três tipos de erros foram calculados, sendo o erro relativo percentual ao comprimento da linha expresso pela Equação 5.1, o erro absoluto é expresso pela Equação 5.2 e o erro relativo à distância estimada é expresso pela Equação 5.3, onde *D estimada* é a distância detectada pelo algoritmo, *D real* é a distância real da falta e *LT* é o comprimento da linha de transmissão, 300 km.

$$\varepsilon_{relLT}(\%) = \left| \frac{D \text{ estimada} - D \text{ real}}{LT} \right| \cdot 100\% \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{abs}(km) = |D \text{ estimada} - D \text{ real}| \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_{rel}(\%) = \left| \frac{D_{estimada} - D_{real}}{D_{real}} \right| \cdot 100\% \quad (5.3)$$

Já o erro global ou erro médio total será apresentado por último, na interpretação dos resultados, foi calculado a partir da Equação 5.4, onde N é o número de simulações.

$$\varepsilon_{medio} = \frac{\sum_N \varepsilon_{rel}(\%)}{N} \quad (5.4)$$

Tabela 4: Resultados de faltas bifásicas.

D. Real	R(Ω)	D. Detectada (km)	εrelLT	εabs(km)	εrel
1km	0,1	0,944	0,02%	0,056	5,60%
25km	0,1	25,202	0,07%	0,202	0,81%
50km	0,1	49,752	0,08%	0,248	0,50%
75km	0,1	74,887	0,04%	0,113	0,15%
100km	0,1	99,731	0,09%	0,269	0,27%
125km	0,1	124,865	0,05%	0,135	0,11%
140km	0,1	140,063	0,02%	0,063	0,04%
150km	0,1	150,000	0,00%	0,000	0,00%
160km	0,1	159,937	0,02%	0,063	0,04%
175km	0,1	175,134	0,04%	0,134	0,08%
200km	0,1	200,269	0,09%	0,269	0,13%
225km	0,1	225,113	0,04%	0,113	0,05%
250km	0,1	250,248	0,08%	0,248	0,10%
275km	0,1	274,798	0,07%	0,202	0,07%
299km	0,1	299,056	0,02%	0,056	0,02%

Tabela 5: Resultados de faltas trifásicas.

D. Real	R(Ω)	D. Detectada (km)	ϵ_{relLT}	$\epsilon_{abs}(km)$	ϵ_{rel}
1km	0,1	3,868	0,96%	2,868	286,80%
25km	0,1	24,032	0,32%	0,968	3,87%
50km	0,1	49,168	0,28%	0,832	1,66%
75km	0,1	74,302	0,23%	0,698	0,93%
100km	0,1	99,730	0,09%	0,270	0,27%
125km	0,1	124,865	0,05%	0,135	0,11%
140km	0,1	140,063	0,02%	0,063	0,04%
150km	0,1	150,000	0,00%	0,000	0,00%
160km	0,1	159,937	0,02%	0,063	0,04%
175km	0,1	175,135	0,04%	0,135	0,08%
200km	0,1	200,270	0,09%	0,270	0,14%
225km	0,1	225,697	0,23%	0,697	0,31%
250km	0,1	250,832	0,28%	0,832	0,33%
275km	0,1	275,968	0,32%	0,968	0,35%
299km	0,1	296,133	0,96%	2,867	0,96%

Pode-se observar a partir dos resultados expostos nas Tabelas 4 e 5 que o algoritmo de localização obteve bons resultados para as faltas que não envolveram terra. Para estes casos, o algoritmo localizou com boa precisão 96,67% dos casos, detectando com baixa precisão apenas uma falta (falta trifásica à 1 km do terminal A). Fora esse caso isolado, o erro máximo para faltas sem envolvimento terra foi de 5,60% e o erro médio foi de 0,30% em relação à distância real. Ao analisarmos o erro relativo ao comprimento da linha, o erro máximo cai para 0,96%.

Tabela 6: Resultados de faltas bifásicas com contato Terra.

D. Real	R(Ω)	D. Detectada (km)	ϵ_{relLT}	$\epsilon_{abs}(km)$	ϵ_{rel}
1km	35	1,237	0,08%	0,237	23,70%
25km	35	24,910	0,03%	0,090	0,36%
50km	35	50,336	0,11%	0,336	0,67%
75km	10	72,258	0,91%	2,742	3,66%
100km	10	99,438	0,19%	0,562	0,56%
125km	10	125,742	0,25%	0,742	0,59%
140km	10	140,064	0,02%	0,064	0,05%
150km	10	150,000	0,00%	0,000	0,00%
160km	10	159,936	0,02%	0,064	0,04%
175km	10	174,258	0,25%	0,742	0,42%
200km	10	200,562	0,19%	0,562	0,28%
225km	10	227,742	0,91%	2,742	1,22%
250km	35	249,664	0,11%	0,336	0,13%
275km	35	275,089	0,03%	0,089	0,03%
299km	35	298,763	0,08%	0,237	0,08%

As faltas bifásicas com contato terra apresentadas na Tabela 6 foram detectadas com êxito na maioria dos casos. Do mesmo modo que ocorreu nas situações sem contato com a terra, a detecção da falta localizada à 1 km do terminal A apresentou o maior erro, de 23,7%. Para os outros 93,33% dos casos, o erro não superou 3,66%. Para esse tipo de faltas, o erro médio de detecção foi de 2,12% já incluindo o caso com maior erro. Ao analisarmos o erro relativo ao comprimento da linha, o erro máximo cai para 0,91%.

Tabela 7: Resultados de faltas monofásicas.

D. Real	R(Ω)	D. Detectada (km)	ϵ_{relLT}	$\epsilon_{abs}(km)$	ϵ_{rel}
1km	25	0,943	0,02%	0,057	5,70%
25km	25	25,202	0,07%	0,202	0,81%
50km	25	50,628	0,21%	0,628	1,26%
75km	25	74,887	0,04%	0,113	0,15%
100km	75	101,191	0,40%	1,191	1,19%
125km	150	129,249	1,42%	4,249	3,40%
140km	150	140,939	0,31%	0,939	0,67%
150km	150	150,000	0,00%	0,000	0,00%
160km	150	159,061	0,31%	0,939	0,59%
175km	150	178,641	1,21%	3,641	2,08%
200km	75	199,394	0,20%	0,606	0,30%
225km	25	226,282	0,43%	1,282	0,57%
250km	25	248,494	0,50%	1,506	0,60%
275km	25	275,091	0,03%	0,091	0,03%
299km	25	299,056	0,02%	0,056	0,02%

As faltas monofásicas, apresentadas na Tabela 7, similarmente aos casos anteriores, apresentaram seu pior erro percentual na localização da falta à 1 km do terminal A da linha de transmissão, com valor de 5,70%. O erro médio percentual, para este tipo de simulação, foi de 1,16%. Ao analisarmos o erro relativo ao comprimento da linha, o erro máximo cai para 1,42%.

Na totalidade de todos os resultados apresentados, o erro percentual médio na localização das faltas foi de 5,88%, com apenas 2 valores acima dessa média. Observando os resultados apresentados, notou-se que a técnica apresenta excelentes resultados para a região mais próxima ao centro da linha, e piores resultados para detecções perto dos terminais. Também pode-se dizer que a técnica foi implementada com êxito, já que o maior erro obtido foi de 4,25 km. Considerando que a linha de transmissão em questão tem 300 km de comprimento, essa distância representa 1,42% de sua totalidade, reduzindo consideravelmente o esforço necessário para a equipe de reparos localizar e corrigir o defeito encontrado.

5.2. A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DAS FALTAS

O resultado das simulações foi satisfatório, porém algumas considerações foram realizadas para obter resultado de maior excelência. Segundo [3], não se nota variação na precisão do algoritmo com a variação da resistência de falta. Porém, observou-se que a variação da resistência alterou os resultados. Alguns resultados das inúmeras situações que foram simuladas são apresentados na Tabela 8 para ilustrar a questão.

Como pode-se observar na Tabela 8, a resistência influenciou nos resultados obtidos. Variando a resistência da falta fase-terra localizada à 25km do terminal A, por exemplo, o melhor resultado encontrado foi para uma resistência de falta de 25Ω , com erro de 0,8%. Esse mesmo valor de resistência também forneceu resultados ótimos para as distâncias de 1 km, 50 km, 75 km, 225 km, 250 km e 300 km.

As faltas fase-terra localizadas a uma distância de 100 km e 200 km do terminal A apresentaram melhores resultados com uma resistência de falta de 75Ω . Já as faltas localizadas no centro da linha apresentaram resultados superiores com resistências de 150Ω e até superiores.

Do mesmo modo ocorrido com as faltas fase-terra, a faltas fase-fase-terra apresentaram o mesmo comportamento. Para faltas localizadas próximas ao centro da linha, os melhores resultados foram obtidos com valores de resistências mais elevados, enquanto as faltas mais próximas aos terminais foram melhores detectadas com valores de resistência menores. Os valores ótimos das resistências foram apresentados na Tabela 6.

Já as faltas sem contato com a terra apresentam seus melhores resultados com valores baixos de resistência. Como demonstrado na tabela, o erro associado aumenta na medida que aumenta a resistência da falta.

O aumento da resistência atenua os coeficientes obtidos da Transformada de Wavelet de Haar, como pode ser observado pelas Figuras 31, 32 e 33, nas quais são apresentados os coeficientes wavelet para uma falta bifásica incidente a 250 km do terminal, com resistências de 1Ω , 10Ω e 50Ω , respectivamente.

Tabela 8: Variação das resistências de falta

D. Real (km)	Tipo	R (Ω)	D. Detectada (km)	$\epsilon_{rel}LT$	$\epsilon_{abs}(km)$	ϵ_{rel}
25	Fase-terra	0,1	26,800	0,60%	1,80	7,20%
25	Fase-terra	10,0	27,240	0,75%	2,24	8,96%
25	Fase-terra	15,0	26,950	0,65%	1,95	7,80%
25	Fase-terra	25,0	25,200	0,07%	0,20	0,80%
125	Fase-terra	0,1	132,760	2,59%	7,76	6,21%
125	Fase-terra	5,0	133,040	2,68%	8,04	6,43%
125	Fase-terra	10,0	133,040	2,68%	8,04	6,43%
125	Fase-terra	50,0	133,040	2,68%	8,04	6,43%
125	Fase-terra	100,0	131,880	2,29%	6,88	5,50%
125	Fase-terra	150,0	129,540	1,51%	4,54	3,63%
125	Fase-terra	200,0	128,670	1,22%	3,67	2,94%
125	Fase-terra	225,0	128,370	1,12%	3,37	2,70%
125	Fase-terra	250,0	127,780	0,93%	2,78	2,22%
125	Fase-terra	300,0	121,900	1,03%	3,10	2,48%
125	Fase-terra	400,0	119,600	1,80%	5,40	4,32%
225	Fase-terra	0,1	221,897	1,03%	3,10	1,38%
225	Fase-terra	1,0	222,189	0,94%	2,81	1,25%
225	Fase-terra	10,0	223,230	0,59%	1,77	0,79%
225	Fase-terra	25,0	226,282	0,43%	1,28	0,57%
225	Fase-terra	50,0	230,082	1,69%	5,08	2,26%
225	Fase-terra	75,0	235,050	3,35%	10,05	4,47%
25	Bifásica	10,0	26,078	0,36%	1,08	4,31%
25	Bifásica	25,0	27,832	0,94%	2,83	11,33%
25	Bifásica	50,0	24,909	0,03%	0,09	0,36%
25	Bifásica	100,0	17,312	2,56%	7,69	30,75%
25	Bifásica	150,0	10,588	4,80%	14,41	57,65%
100	Bifásica	1,0	99,438	0,19%	0,56	0,56%
100	Bifásica	10,0	98,854	0,38%	1,15	1,15%
100	Bifásica	25,0	98,854	0,38%	1,15	1,15%
100	Bifásica	50,0	98,854	0,38%	1,15	1,15%
100	Bifásica	100,0	97,684	0,77%	2,32	2,32%
100	Bifásica	200,0	94,761	1,75%	5,24	5,24%
250	Bifásica	1,0	250,248	0,08%	0,25	0,10%
250	Bifásica	10,0	248,494	0,50%	1,51	0,60%
250	Bifásica	25,0	247,618	0,79%	2,38	0,95%
250	Bifásica	50,0	248,786	0,40%	1,21	0,49%
250	Bifásica	100,0	254,339	1,45%	4,34	1,74%
250	Bifásica	200,0	262,815	4,27%	12,82	5,13%

Figura 31: Coeficientes de falta bifásica com $R=1 \Omega$.

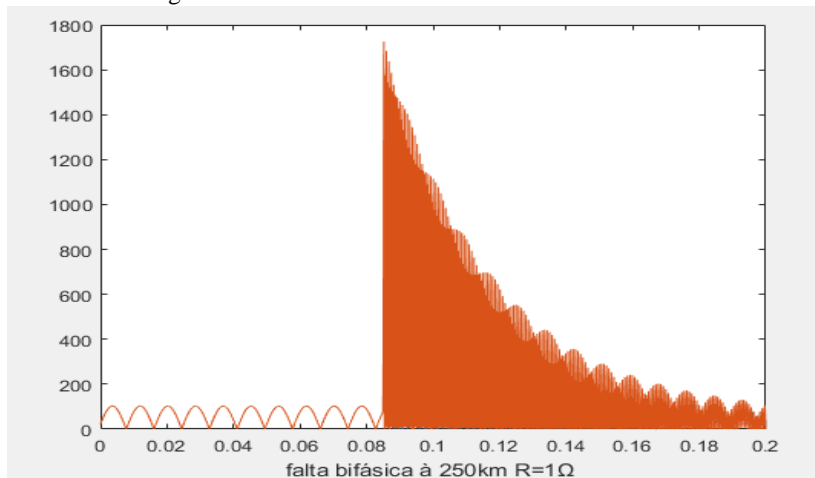


Figura 32: Coeficientes de falta bifásica com $R=10 \Omega$.

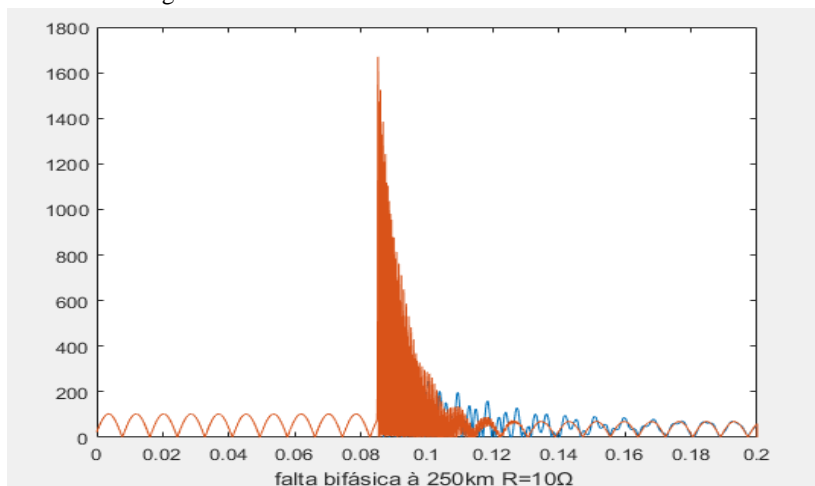
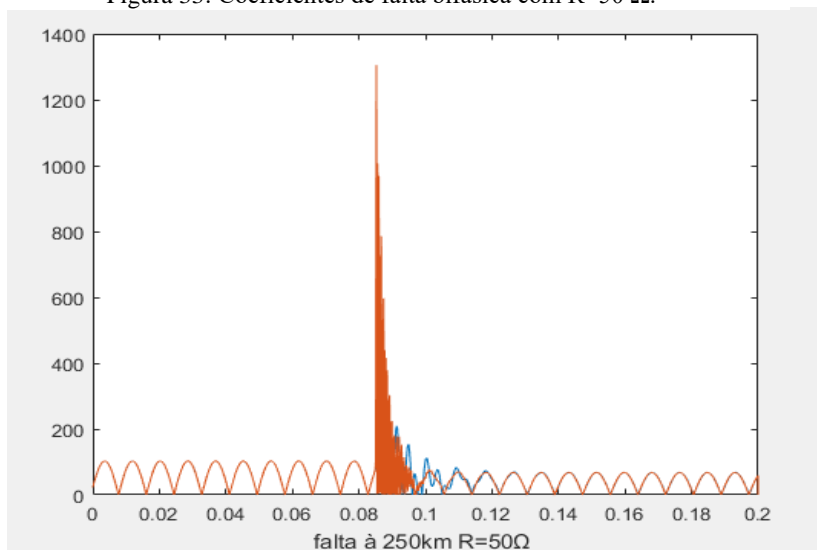


Figura 33: Coeficientes de falta bifásica com $R=50 \Omega$.



CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo de lógica computacional, para possível implementação em equipamento de proteção de sistemas elétricos de potência, baseado na teoria das ondas viajantes e na Transformada de Wavelet. Uma rápida localização de distúrbios em um sistema elétrico de potência, este cada vez mais competitivo, é essencial para que os resultados entregues pela empresa sejam economicamente viáveis e confiáveis.

Os resultados obtidos foram, de uma maneira global, satisfatórios. O maior erro encontrado, em relação aos 300 km totais da linha de transmissão simulada, foi de 1,42%, representando um erro de 4,25 km, valor muito inferior aos 300 km totais da linha. O erro médio total estimado foi de 0,22% quando se analisa o erro baseado no tamanho total da linha, conforme a Equação 5.1. Já o erro médio total baseado na localização da própria falta foi de 5,88%, seguindo a metodologia utilizada na Equação 5.3.

Para continuidade do trabalho, visando o aperfeiçoamento das técnicas desenvolvidas e visando uma diminuição dos erros, propõe-se o desenvolvimento do algoritmo para que ele não sofra influências nos resultados que tenham contato com a terra. Propõe-se também uma análise mais detalhada, referente à influência do ângulo de incidência da falta na sua detecção, a influência dos parâmetros da linha de transmissão na detecção, bem como taxas amostrais mais elevadas.

Outro ponto de possível melhoria é a análise dos outros modos do domínio modal para que o algoritmo além de detectar, possa classificar o distúrbio, como realizado por [31], onde se analisa também o modo zero de propagação.

Conclui-se pelos resultados obtidos que o método proposto caracteriza de fato regimes transitórios com qualidade e mostrou-se propício para implementação em relés digitais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Oleskovics, Mário et al . Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica. Sba Controle & Automação, Campinas , v. 17, n. 3, p. 331-341, 2006.
- [2] Molas EC, Silva KM. Modelagem e simulação da proteção diferencial de linhas de transmissão no atp. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (IV SBSE). Goiânia, Brasil, 2012.
- [3] Silva, Murilo da. "Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada wavelet." PhD diss., Universidade de São Paulo, 2003.
- [4] Molas, Edgar Carvalho. "Proteção diferencial de linhas de transmissão no Plano Alfa: modelagem e simulação.", 2015.
- [5] Chegg Study, 2018. Disponível em <<https://www.chegg.com/homework-help/definitions/traveling-waves-on-transmission-lines-4>>. Acesso em: 5 mai. 2018.
- [6] Dong, X. Z., et al. "The application of the wavelet transform of travelling wave phenomena for transient based protection." International conference of power system Transients-IPST2003. New Orleans, USA, 2003.
- [7] Aggarwal, R. and Kim, C.H.. "Wavelet transforms in power systems." Power Engineering Journal, pp.81-87, 2000.
- [8] Gu Y.H. and Bollen, M.H.J. . Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 15, Issue: 4, Oct, 2000.
- [9] Silva, Murilo da; Oleskovics, Mário; COURY, Denis V.. Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas. Sba Controle & Automação, Campinas, v. 16, n. 3, p. 345-358, 2005.
- [10] Santoso, S., Powers, E.J., Grady, W.M. and Hofmann, P. . Power quality assessment via wavelet transform analysis. IEEE transactions on Power Delivery, 11(2), pp.924-930, 1996.
- [11] Mathworks, 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/continuous-wavelet-transform-and-scale-based-analysis.html>>. Acesso em 20 jun. 2018.
- [12] Chui, Charles K. "Wavelets: a tutorial in theory and applications." Wavelet Analysis and its Applications, San Diego, CA: Academic Press, c1992, edited by Chui, Charles K., 1992.
- [13] Mendes, Sérgio da Costa. "Transformada de Wavelet aplicada a proteções digitais.", 2008.

- [14] Gutierrez, Carlos Enrique Gutierrez. “Eliminação do ruído por encolhimento”. PhD diss., PUC-Rio, 2002.
- [15] Dong Xingli, Ge Yaozhong, Dong Xinzhou, et al., “Directional Protection Relaying Based on Amplitude Comparison of Travelling Wave by Using Wavelet Transform,” *Automation of Electric Power System* vol.24,no.17,pp. 11-15,64, 2000.
- [16] Huang, S. J.; Hsieh, C. T. and Huang, C. L. Application of wavelet to classify power system disturbances, *Electric Power Systems Research*, No. 47, pp. 87-93, 1998.
- [17] Shehab-Eldin, E.H. and McLaren, P.G. . Travelling wave distance protection-problem areas and solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), pp.894-902, 1988.
- [18] Elguera Flores, Alexander Vladimir. "Análise da correta modelagem da transposição em linhas de transmissão no domínio da frequência.", 2006.
- [19] Amon Filho, Jorge, and Marco Polo Pereira. "Curso básico sobre a utilização do ATP." CLAUE-Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, 1996.
- [20] Stevenson, William D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. McGraw-Hill do Brasil, 1974.
- [21] Souza TB. *Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão para Localização de Faltas: Abordagem via Transformada Wavelet* (Doctoral dissertation, Master’s Thesis, Federal University of Pará (UFPA): Belém, Brazil, 2007.
- [22] Dos Santos, Vanessa Malaco. "ESTUDO DE CASO DE CURTO-CIRCUITO EM UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL.", 2009.
- [23] Coury, Denis Vinicius, Mário Oleskovicz, and Renan Giovanini. *Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. SEL/EESC/USP, 2007.
- [24] Silveira, P. M., R. Seara, and Hans Helmut Zürn. "Localização de faltas por ondas viajantes—uma nova abordagem baseada em decomposição Wavelet." *Proceedings of the Anais do XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica—SNPTEE* (2001).
- [25] Valins, Thiago Ferreira. “Relé digital de distância baseado na teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet”. Diss. Universidade de São Paulo, 2005.
- [26] Zhao, W.; Song, Y. H.; Chen, W. R. . “Improved GPS traveling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis.”

ELSEVIER Electrical Power and Energy Systems, v.23, p. 403-411, 2001.

[27] Gonzalez, Luciana, et al. "Análise Eletromagnética de cabos OPGW Utilizando o Método de Elementos Finitos." MOMAG 2008–13º SBMO–Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 8º CBMag–Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2008.

[28] KUROKAWA, Sérgio et al . “Decomposição modal de linhas de transmissão a partir do uso de duas matrizes de transformação”. Sba Controle & Automação, Natal , v. 18, n. 3, p. 372-380, 2007 .

[29] Clarke, Edith. “Circuit analysis of AC power systems.” Vol. 1. Wiley, 1943.

[30] Wang, S., Dong, X., Shi, S. and Cui, L. . “Study on Current Travelling Wave Transmission Characteristics in Secondary Control Cable Connected with CT. Physics Procedia,” 33, pp.663-671., 2012.

[31] Magnago, Fernando H., and Ali Abur. "Fault location using wavelets." IEEE Transactions on Power Delivery 13.4, p. 1475-1480, 1998.

[32] Mahanty, R. N., and P. B. Dutta Gupta. "An improved method for digital relaying of transmission lines." Electric Power Components and Systems 32.10, p. 1013-1042, 2004.

[33] Silva, M., M. Oleskovicz, and D. V. Coury. "A fault locator for transmission lines using traveling waves and wavelet transform theory.", p.212-215, 2004.

[34] Xinzhou, Dong, Ge Yaozhong, and Xu Bingyin. "Fault position relay based on current travelling waves and wavelets." Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. Vol. 3. IEEE, 2000.

[35] The Learning Point, 2018. Disponível em: <
<http://www.thelearningpoint.net/home/electrical-science-and-engineering/estimation-of-capacitance-and-inductance-for-electrical-transmission-lines> >. Acesso em: 5 jul. 2018.

Anexo - A: Datasheet dos condutores.

Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço - CAA (Série KCMIL)

Eagle

Contatos
São Paulo
Telefone: +55 11 2054-1800
nexans.brazil@nexans.com

Condutor formado por uma alma de aço e coroas de fios de alumínio.

DESCRIÇÃO

O uso do alumínio como um material para condutores elétricos tem grande desenvolvimento principalmente por suas propriedades elétricas. No entanto, os condutores de alumínio para maioria das linhas de transmissão com vãos longos, necessitam de um reforço mecânico adicional. Para reforçar o condutor, são usados fios de aço galvanizado na alma dos cabos CAA.

APLICAÇÕES

É muito usado em linhas de transmissão aéreas e também em linhas de distribuição primária e secundária.

CONSTRUÇÃO

O cabo CAA é um condutor encordoado concêntricamente com uma ou mais coroas de fios de alumínio 1350-H19 sobre a alma de aço. A alma pode ser fio sólido ou encordoado dependendo da seção transversal. O fio de aço está disponível nas classes de galvanização A e B.

O cabo CAA está de acordo com os requisitos elétricos e mecânicos das linhas de transmissão ou distribuição, podendo fornecer um projeto apropriado combinando a quantidade de fios de alumínio e fios de aço.

Condições para cálculo da Amplitude

Temperatura do condutor = 75 °C;

Temperatura ambiente = 25 °C;

Velocidade do vento = 1 m/s, com sol.



ESPECIFICAÇÃO

Nacional ABNT NBR 7270/88

Todos os desenhos, especificações, dimensões e dimensões centrais nos documentos técnicos e materiais de usuário são somente ilustrativos, e não devem ser considerados como representação por parte da Nexans. Dimensões são nominais e, portanto, sujeitas às tolerâncias normais de fabricação.
Produção 16/06/10 - www.nexans.com.br - Página 1 / 3

Nexans

Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço - CAA (Série KCML)

Eagle

Contatos

São Paulo
Telefone: +55 11 3054-1800
naxans.brasil@naxans.com

CARACTERÍSTICAS

Características construtivas	
Tipo de condutor	Circular, encordado
Material do condutor	Alumínio / Alma de Aço
Tipo de cabo	Eagle
Características dimensionais	
Bitola	556,5 kcmil
Seção transversal de alumínio	232,07 mm ²
Seção transversal do condutor	347,89 mm ²
Número de fios de alumínio	30
Diâmetro dos fios de alumínio	3,46 mm
Número de fios de aço	7
Diâmetro dos fios de aço	3,46 mm
Diâmetro da alma de aço	10,38 mm
Diâmetro do condutor	24,22 mm
Raio médio geométrico	0,01 m
Peso nominal do Alumínio (aprox.)	783,4 kg/km
Peso nominal do aço (aprox.)	814,1 kg/km
Massa aproximada	1297,5 kg/km
Características elétricas	
Resistência elétrica máxima CC a 20°C	0,103 Ohm/km
Resistência elétrica máxima CA 60Hz 75°C	0,122 Ohm/km
Resistência Indutiva	0,3473 Ohm/km
Resistência capacitiva	0,2107 MOhm.km
Ampacidade	730,0 A
Características mecânicas	
Carga de ruptura (Classe A)	12694 kgf
Carga de ruptura (Classe B)	12143 kgf
Têmpera	1350-H19
Características de utilização	
Lance nominal	1930 m
Peso líquido da bobina	2500,0 kg
Acondicionamento	Bobina 170/80

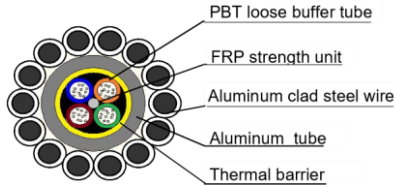
Todos os desenhos, especificações, dimensões e detalhes estão sujeitos a alterações sem aviso prévio. A Naxans não se responsabiliza por danos materiais ou morais decorrentes do uso indevido das informações aqui apresentadas. Consulte o site www.naxans.com.br para mais informações.

Produto 1206/10 - www.naxans.com.br - Página 2 / 2

 Naxans

Anexo - B: Datasheet OPGW.

Cross Section:



Cable Type: OPGW-16B1-70 [68.1;29.9]

	Name	No	Name	No	Material Dia.	
	Fiber	G.652D	16	G.655	0	
Structure	Center	SUS Tube/AL- Tube	1		Tube-Dia.	3.2/5.2 mm
	Layer1	20% AS wire	8	AA wire	0	Diameter 3.00 mm
Technical Data	according to IEC, IEEE, DL/T 832-2003, GB/T 7424.4-2003 standards					
	stranding direction of outer layer is right hand(Z-stranding)					
	Cable Diameter					11.2 mm
	Cable Weight					433 kg/km
	Supporting Cross Section					69.7 mm ²
	Section of AS Wire				56.55 mm ²	
	Section of AA Wire				0.00 mm ²	
	Section of AL tube				13.19 mm ²	
	Ultimate Tensile Strength (UTS)					73.9 kN
	Rate Tensile Strength (RTS)					68.1 kN
	Modulus of Elasticity (E-Modulus)					141.9 kN/mm ²
	Thermal Elongation Coefficient					13.7 × 10 ⁻⁶ /°C
Permissible Maximum Working Stress (40% RTS)					390.5 N/mm ²	

	Everyday Stress (EDS) (18%~25% RTS)	175.7 ~244.1 N/mm ²
	Ultimate Exceptional Stress (70% RTS)	683.4 N/mm ²
	DC Resistance	0.889 Ω/km
	Short Time Current (0.25s, 40°C~200°C)	10.9 kA
	Short Time Current Capacity I _{2t}	29.9 kA ² s
	Minimum Bending Radius : Installation :	280 mm
	Oprating :	168 mm
	Ratio between Pull and Weight	16.0 km
Temperature Range:	Installation	-10°C ~ +50 °C
	Transportation and Operation	-40°C ~ +80 °C

Remarks: All Sizes and Values are Nominal Values