

Localizador de Falhas para Linhas de Transmissão - Estudo, Simulação e Implementação Embarcada

Raphael Philipe Mendes da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo.

Curso de Engenharia da Computação
com Ênfase em Sistemas Embarcados.

Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Regina e José Milton, pelo seu amor e compreensão.

Agradecimentos

A Universidade de São Paulo pela excelência de ensino.

Ao Prof. Tit. Orientador Denis Vinicius Coury, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

A minha família pelo apoio incondicional.

Aos meus irmãos, Paula e Luis Otávio.

Ao Monaro, pelo incentivo, bem como suporte no desenvolvimento do trabalho.

O primeiro passo em direção ao
sucesso é o conhecimento.

Nicola Tesla

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Resumo	xiii
Abstract	xv
1 Introdução	1
1.1 Localizadores de Faltas para Linhas de Transmissão	2
1.2 <i>Hardware</i> de um Localizador Digital de Faltas	4
1.3 Objetivos	6
1.4 Organização do Trabalho	6
2 Revisão Bibliográfica	9
2.1 Métodos Baseados nos Componentes Fundamentais	9
2.1.1 Algoritmos que Utilizam Dados de um Terminal	10
2.1.2 Algoritmos que Utilizam Dados de Múltiplos Terminais	18
3 Sistema Elétrico Analisado	25
3.1 O <i>software</i> ATP	25
3.2 Modelagem da Linha de Transmissão	27
3.2.1 Características e Geometria dos Condutores	28
3.2.2 Transformadores de Corrente e de Potencial	29
3.2.3 Parâmetros do Sistema Elétrico em Análise	30
3.2.4 Rotina <i>Line Constants</i>	32
3.3 Condicionamento do Sinal	34
3.3.1 Filtro Digital Passa-baixas <i>Butterworth</i>	35

3.3.2	Digitalização dos Sinais de Tensão e Corrente	37
3.4	Resultados da Simulação do Sistema	38
4	Localização de Falhas em Linhas de Transmissão	41
4.1	Processo de Localização de Falhas	41
4.2	Sincronização dos Dados	42
4.3	Deteção da Falta	43
4.4	Extração dos Componentes Fundamentais	44
4.5	Obtenção dos Componentes Superpostos	45
4.6	Classificação da Falta	46
4.7	Cálculo da distância da Falta	47
4.7.1	Técnica baseada no método de Girgis	47
4.7.2	Técnica Baseada no Método de Jamali	48
4.8	Implementação	51
5	Comparação Entre os Métodos Implementados	53
5.1	Sincronização dos Dados	53
5.2	Determinação do Instante de Ocorrência da Falta	54
5.3	Cálculo da Distância da Falta	54
5.3.1	Efeito da Resistência de Falta	55
5.3.2	Efeito do Ângulo de Incidência da Falta	58
5.3.3	Efeito do Tipo de Falta	59
6	Conclusão	63
6.1	Sugestão de Trabalhos Futuros	64
	Referências Bibliográficas	65
A	A Plataforma PC104	69
A.1	Formato	69
A.2	Vantagens da Plataforma PC104	70
A.3	Plataforma PC104 Adquirida	71
A.3.1	Módulo de Processamento PFM-450I da AAEON	71
A.3.2	Módulo de Alimentação PCM-P50 da AAEON	72
A.3.3	Módulo de Aquisição PC104-DAS16JR/16 da ComputerBoards	72
A.4	Sistema Operacional	73

Lista de Figuras

1.1	Esquema para o <i>hardware</i> de um localizador de faltas	4
1.2	Conjunto de módulos PC/104	5
2.1	Tipos de localizadores de faltas	10
2.2	Modelagem do sistema utilizada para os diversos métodos apresentados	10
3.1	Sistema elétrico a ser estudado	27
3.2	Silhueta da torre mostrando a disposição dos condutores	29
3.3	Circuito básico de um TPC.	30
3.4	Sistema elétrico utilizando TPCs e TCs	30
3.5	Representação de um trecho da linha por parâmetros distribuídos	31
3.6	Transposição de uma linha de transmissão	31
3.7	Rotina Line Constants para obtenção dos parâmetros da linha.	33
3.8	Fluxograma do tratamento do sinal de entrada	34
3.9	Representação de um filtro passa-baixa ideal do tipo <i>Butterworth</i>	35
3.10	Atenuação de um filtro passa-baixa ideal do tipo <i>Butterworth</i>	36
3.11	Diagrama de Bode do filtro <i>Butterworth</i> implementado	36
3.12	Formas de ondas de tensão obtidas para uma falta fase-terra	38
3.13	Formas de ondas de corrente obtidas para uma falta fase-terra	38
4.1	Diagrama de blocos dos algoritmos de localização de falta	42

4.2	Método de detecção de faltas	44
4.3	Modelagem da linha - técnica para linhas médias	47
4.4	Modelagem da linha - técnica para linhas longas	49
4.5	Execução dos algoritmos	52
5.1	Resistência 0Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	55
5.2	Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	56
5.3	Resistência 50Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	56
5.4	Resistência 100Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	56
5.5	Resistência 150Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	57
5.6	Resistência 200Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	57
5.7	Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	58
5.8	Resistência 17Ω , ângulo de incidência 90, Falta Fase-Terra	58
5.9	Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra	59
5.10	Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Fase	59
5.11	Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0, Falta Fase-Fase-Terra	60
5.12	Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0, Falta Trifásica	60
A.1	Vista lateral de um esquemático de PC104	70
A.2	Vista frontal de um esquemático de PC104	70
A.3	Módulo de processamento PC104	72
A.4	Módulo de alimentação PC104	73

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros obtidos a partir da execução da rotina <i>Line Constants</i>	32
4.1	Critérios para classificação da falta	46
5.1	Sincronização das amostras	54
5.2	Tempo de detecção das faltas	54

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMR: Análise Multiresolução

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CAD: Conversor Analógico Digital

CC: Corrente Contínua

EAT: Extra Alta Tensão

FDC: Fator de Distribuição de Corrente

GPS: *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

LT: Linha de Transmissão

MLP: *Multilayer Perceptron*

RNA: Rede Neural Artificial

SEP: Sistema Elétrico de Potência

TC: Transformador de Corrente

TDF: Transformada Discreta de Fourier

TP: Transformador de potencial

TPC: Transformador de potencial Capacitivo

TW: Transformada Wavelet

Resumo

Silva, R. P. M. **Localizador de Faltas para Linhas de Transmissão - Estudo, simulação e implementação embarcada.** 73 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2009.

Este trabalho de conclusão de curso traz a idealização do uso da plataforma PC104 para o desenvolvimento de um localizador de faltas para linhas de transmissão. A plataforma PC104 oferece uma alternativa flexível para a implementação de soluções embarcadas, pois possibilita o uso de sistemas operacionais avançados, tornando assim o processo de desenvolvimento menos custoso, pois não é necessário ter grandes conhecimentos sobre o *hardware*. Foram escolhidos dois algoritmos de localização que modelam o sistema de forma diferente para serem implementados. Ambos utilizam informações provenientes de dois terminais. Os algoritmos incluem a sincronização dos dados, classificação de faltas, extração dos fasores fundamentais e a estimação da localização da falta propriamente dita. Um sistema elétrico para validar os algoritmos foi proposto e simulado via utilização do *software* ATP. Ao fim, são exibidos resultados comparativos entre os dois algoritmos, sendo que estes resultados foram obtidos pela execução dos mesmos na plataforma PC104.

Palavras-chave: localizador de faltas, sistemas embarcados, sistema elétrico de potência.

Abstract

Silva, R. P. M. **Digital Fault Locators - Simulation and embedded implementation.** 73 p. *Undergraduation Monograph* – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009

This work presents the implementation of digital fault locator algorithms for transmission lines in a embedded system system called PC104. The PC104 offers a flexible alternative to the implementation of embedded solutions, because it makes possible the use of advanced operational systems, becoming the development process easier. There is no need of deep knowledge of the hardware. Two fault locator algorithms was chosen to be implemented. Both uses information from two terminals. The algorithms includes the synchronization of the data, fault classification, extration of the fundamental waveform and the localization of the fault. Using the ATP software, an electrical system was considered and simulated to validate the algorithms. A comparasion between the two algorithms was made. The results was gotten by the execution of the algorithms in the PC104.

Keywords: fault locators, embedded system, power systems.

Capítulo 1

Introdução

A energia elétrica é um recurso fundamental para o desenvolvimento econômico de um país, bem como para a satisfação e bem estar da sociedade, sendo usada nos setores industriais, agrícola e doméstico. Dessa forma, Sistemas Elétricos de Potência (SEP) devem ser projetados para disponibilizar energia elétrica com confiabilidade e continuidade. Contudo, interrupções no fornecimento da energia elétrica podem ser provocadas pela ocorrência de diversos tipos de fenômenos eletromagnéticos, que podem afetar distintas classes de consumidores. Dentre os diversos componentes de um SEP, podem-se destacar as Linhas de Transmissão (LT) como o elemento mais suscetível à falhas, especialmente se considerarmos suas dimensões físicas, complexidade funcional e o ambiente onde se encontram, apresentando assim, maior dificuldade para a sua manutenção e monitoramento. Assim, é fato que as LTs são grandes fontes de erros e mal funcionamento se comparada com outros elementos de um SEP [1].

O aumento da complexidade dos SEPs pelo seu crescimento, devido à maior demanda por energia e a interligação dos sistemas existentes tem exigido uma considerável melhora dos equipamentos de controle e proteção, bem como dos localizadores de falta. Com esta melhora, espera-se uma redução do período de interrupção do fornecimento de energia, em caso de falhas, e garantir uma operação econômica e confiável do sistema de potência, tanto em condições normais como sob contingências. Aliada a isso, a crescente competitividade no mercado de energia elétrica nacional, devido ao processo de desestatização e regulamentação do setor tem levado as empresas de energia elétrica a investirem em equipamentos modernos, permitindo melhor gerenciamento e proteção, e assim, assegurando uma fatia significativa do mercado, através da oferta de energia

a um menor custo e com alto padrão de qualidade.

Além disso, é importante lembrar que a interrupção no fornecimento de energia, além de gerar perdas no faturamento pela descontinuidade do serviço, pode implicar pesadas multas por parte da agência de regulação do setor elétrico (ANEEL). Pode ainda haver prejuízos decorrentes de processos judiciais por perdas e danos causados a grandes e pequenos consumidores, e a insatisfação, seja por parte dos consumidores residenciais, comerciais ou industriais [2]. Dado o contexto mencionado anteriormente, nas últimas décadas, a utilização de dispositivos baseados em microprocessadores para as soluções de problemas relacionados aos SEPs tem sido assunto de grande interesse por parte dos engenheiros e pesquisadores. Esse interesse se deve ao rápido avanço da tecnologia, aliado ao desenvolvimento na área de *software* destinado às aplicações em SEPs, especialmente quando é necessária grande precisão, como é o caso da localização de faltas, assunto a ser abordado a seguir.

1.1 Localizadores de Faltas para Linhas de Transmissão

Um localizador de faltas tem por objetivo determinar, com alta precisão, o ponto de ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão, o que é de suma importância para uma operação confiável e econômica do sistema de potência como um todo. Com o conhecimento preciso do local de ocorrência de uma falta, pode-se efetuar reparos e manutenções de forma ágil, permitindo assim uma rápida restauração às condições normais de operação do sistema. Além de prover a localização de faltas sustentadas, pode-se utilizar o localizador para estimar a localização de faltas transitórias, como por exemplo, decorrentes de descargas atmosféricas, toque de galhos de árvores, etc. Tal estimativa pode ser utilizada para alimentar um banco de dados contendo os locais dos distúrbios, permitindo assim a identificação dos pontos fracos, e por conseqüência, possibilitando a realização de medidas preventivas para cada caso, tais como, instalação de pára-raios e corte de árvores, visando evitar problemas futuros.

Um localizador de faltas pode ser implementado de três maneiras diferentes [3, 4], sendo estas:

1. **como um dispositivo *stand-alone***: o localizador de faltas possui um *hardware* similar ao de um relé digital (o localizador seria um único produto);

2. **como parte de um relé de proteção:** neste caso, o algoritmo de um localizador de faltas é incluído juntamente com o algoritmo do relé de proteção (a localização da faltas seria mais uma das funções do relé);
3. **como um algoritmo independente:** dispondo de dados obtidos através de registradores digitais de faltas. Neste caso, o *software* do localizador poderia ser instalado em diversos tipos de computadores (*notebooks, desktops e servidores*), e com base nas oscilografias encontrar a localização da falta.

É importante lembrar que localizadores de falta não têm requisitos de tempo, como sistemas de tempo-real, em que o sistema precisa reagir em um tempo determinado, o que é o caso dos relés de proteção. Assim, sem restrições de tempo, os localizadores de falta têm possibilidade de implementar algoritmos sofisticados, melhorando assim a precisão da localização das faltas, o que é desejável no caso de linhas longas e localizada em terrenos acidentados [5].

O projeto de localizadores de faltas microprocessados inclui a escolha de um *hardware* e de um método para a localização (algoritmo) que será implementado em *software*.

Os métodos para localização de faltas podem ser separados basicamente em dois grupos:

1. Utilizam informações provenientes de um terminal de LT;
2. Utilizam informações provenientes de múltiplos terminais de LTs.

Os métodos que utilizam dados provenientes de um terminal da linha geralmente apresentam um comprometimento quanto à precisão em relação à simplicidade na obtenção dos dados. A maior parte destas técnicas são baseadas nos modelos de linhas de parâmetros concentrados, com o objetivo de encontrar a impedância complexa do sistema na direção da falta com vista do local de medida, na qual a distância da falta pode ser deduzida.

Quando dados provenientes de múltiplos terminais da linha são utilizados, torna-se possível superar alguns problemas comuns associados com a localização das faltas. Deve ser mencionado que é necessária a comunicação entre os terminais para transmitir os dados de faltas registrados para processamento no terminal de referência.

1.2 Hardware de um Localizador Digital de Faltas

O esquema completo para o *hardware* de um localizador de faltas é visto na figura 1.1. O diagrama apresenta vários estágios existentes pelos quais os dados provenientes da linha de transmissão deverão passar antes do processamento do algoritmo de localização de faltas propriamente dito [5].

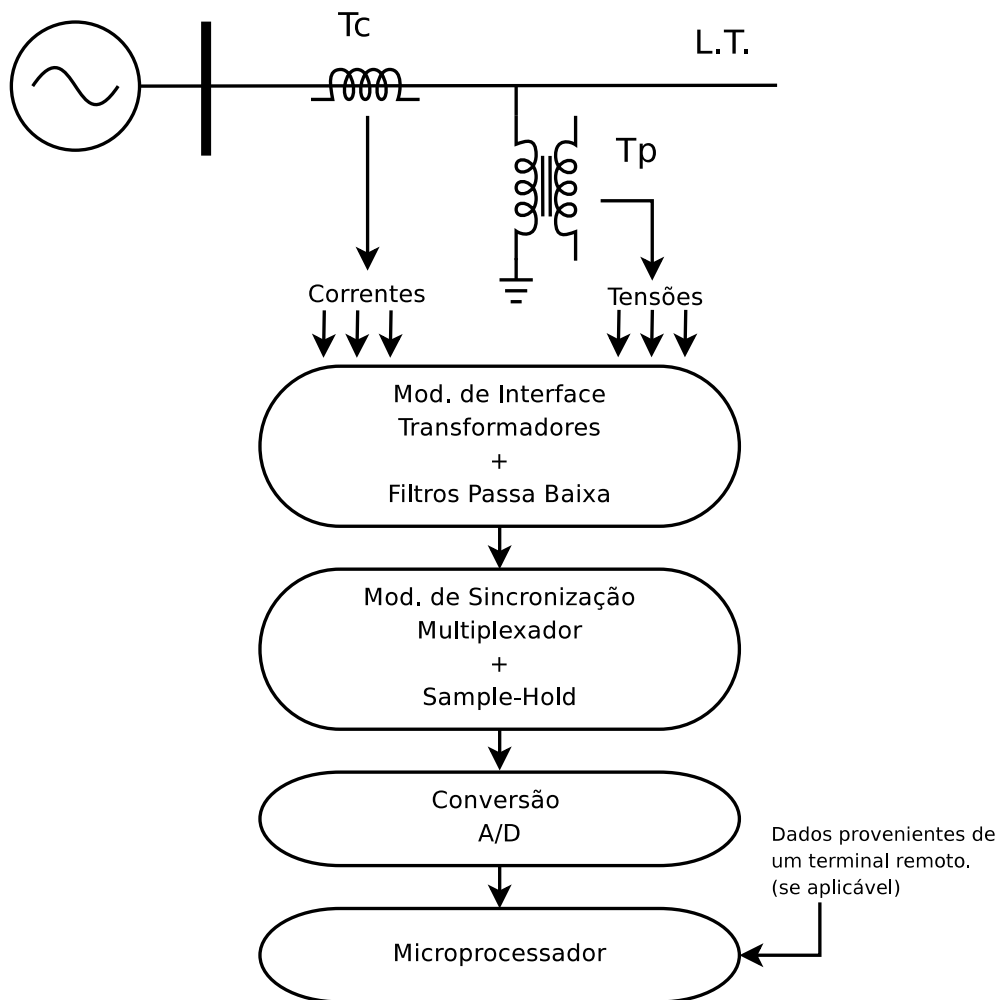


Figura 1.1: Esquema para o *hardware* de um localizador de faltas

As formas de ondas de tensão e corrente da LT passam por transformadores de potencial (TP)s e transformadores de correntes (TC)s, reduzindo a sua magnitude. Esses dispositivos reproduzem a tensão e a corrente dentro de certos limites em seu circuito secundário.

Para que os sinais elétricos de tensão e corrente possam ser transformados em dados, para análise no algoritmo, uma série de passos devem ser levados em conta. A primeira

interface para a saída dos TPs e TCs inclui filtros passa-baixa (*anti-aliasing*), para adequação do teorema de Nyquist e transformadores de entrada, que irão reduzir o nível de tensão do sinal. Os passos seguintes estão envolvidos na digitalização correta dos dados pelo uso de multiplexadores, samplers-holders e conversores A/D.

Por fim, os dados digitalizados são enviados ao microprocessador, onde serão processados pelo algoritmo de localização. Um exemplo de *hardware* que pode ser utilizado para tais fins é o PC/104 [6] com módulos devidamente escolhidos, como mostra a figura 1.2. Mais informações sobre a plataforma PC104 podem ser encontradas no anexo A.



Figura 1.2: Conjunto de módulos PC/104

O projeto de localizadores de falta baseados em microprocessadores inclui a escolha de um algoritmo que será implementado em *software* para aplicação de uma técnica escolhida. Diversas abordagens e diferentes princípios já foram aplicados ao problema da localização de faltas em LTs.

Como foi dito anteriormente, as técnicas diferem basicamente na utilização de informação de um ou de vários terminais. Um esquema do *software* de um localizador digital de faltas será descrito apropriadamente nos capítulos subsequentes.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo o estudo e comparação de duas técnicas de localização de faltas baseadas em informações de dois terminais, por meio de simulações. Os dois algoritmos serão implementados para serem utilizados de forma independente e em um dispositivo *stand-alone* através de um conjunto de módulos PC/104. Os algoritmos serão testados para dados obtidos de um *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos.

Cabe ainda ressaltar os objetivos secundários:

1. Definição e estudo de um sistema elétrico;
2. Estudo do *software* de simulação de sistemas elétricos ATP;
3. Estudo da plataforma PC/104;
4. Estudo do tratamento do sinal de entrada.

1.4 Organização do Trabalho

O capítulo 1 apresenta a introdução sobre o assunto, bem como a necessidade do uso de localizadores de falta.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica referente aos métodos de localização de faltas que utilizam componentes fundamentais, divididos entre métodos que utilizam informações de um terminal e métodos que utilizam informações provenientes de múltiplos terminais.

No capítulo 3 é apresentado o sistema elétrico estudado para o desenvolvimento deste trabalho. O *software* ATP é apresentado. O processo para o cálculo das características do sistema elétrico estudado é mostrado, bem como o tratamento do sinal: filtros *anti-aliasing*, conversão analógica digital.

No capítulo 4 os localizadores de faltas utilizados para estudo neste trabalho são apresentados, bem como sua implementação.

No capítulo 5 os resultados obtidos com as simulações aplicando os localizadores de faltas implementados são mostradas. Uma comparação entre as duas técnicas é feita.

No capítulo 6 é apresentada uma conclusão sobre o tema abordado, e são feitas propostas para a continuação do trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A utilização de dispositivos baseados em microprocessadores tem atraído grande interesse de pesquisadores atualmente, com o intuito de aumentar a precisão para a localização de faltas em sistemas de potência. Um grande esforço tem sido feito para o desenvolvimento de técnicas digitais de localização de faltas em linhas de transmissão de alta tensão.

Os métodos ou algoritmos de localização de faltas têm sido classificados em três diferentes categorias [7], como mostra a figura 2.1.

- Métodos baseados em componentes de frequência fundamental;
- Métodos baseados em componentes de alta frequência, também conhecidos como métodos de ondas viajantes;
- Métodos baseados na solução da equação diferencial do sistema elétrico.

De acordo com o escopo deste trabalho, somente métodos baseados em componentes de frequência fundamental serão abordados, mais especificamente aqueles que utilizam dados provenientes de dois terminais.

2.1 Métodos Baseados nos Componentes Fundamentais

Os algoritmos de localização de faltas que consideram as componentes de frequência fundamental são baseados na determinação da impedância aparente da linha de transmissão durante a falta. Esta impedância é obtida em função dos parâmetros da LT e

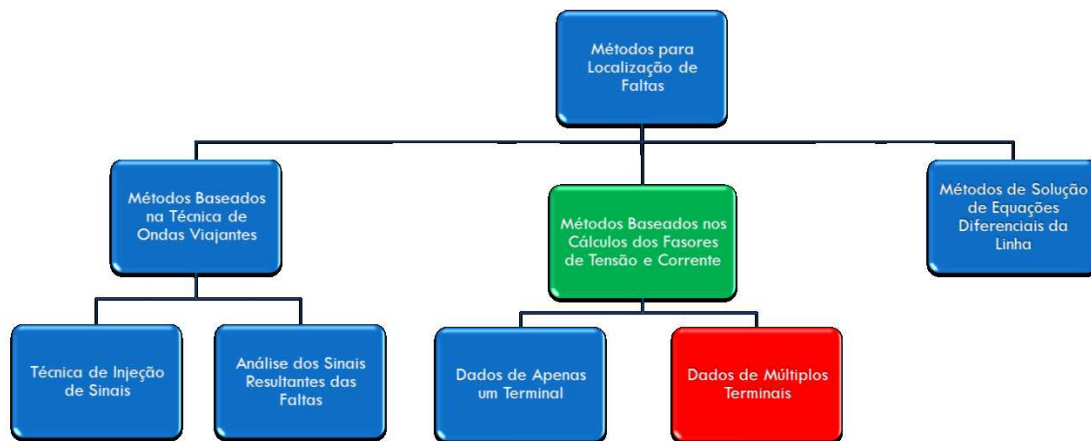


Figura 2.1: Tipos de localizadores de falhas

dos fasores fundamentais (60 ou 50 Hz) extraídos dos sinais registrados em um ou em múltiplos terminais da LT através de alguma técnica de filtragem, como por exemplo, Fourier, Mínimos Quadrados, Kalman, etc [7]. A figura 2.2 mostra a modelagem do sistema elétrico, evidenciando as variáveis, para os diversos métodos de localização a serem apresentados a seguir.

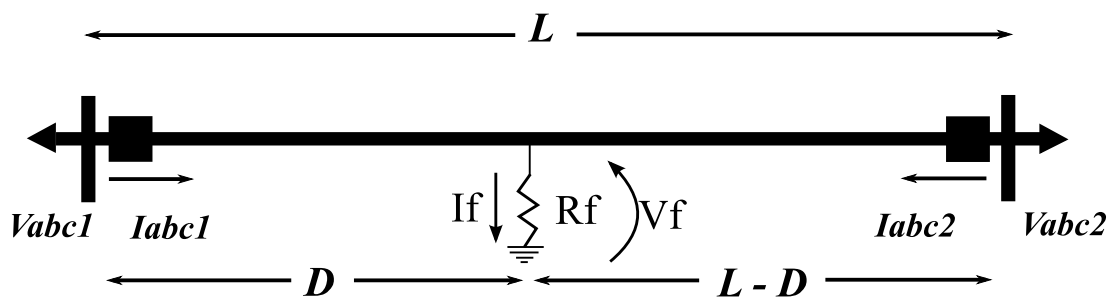


Figura 2.2: Modelagem do sistema utilizada para os diversos métodos apresentados

2.1.1 Algoritmos que Utilizam Dados de um Terminal

Os algoritmos baseados nos componentes de frequência fundamental registrados em um único terminal, geralmente fazem uso da impedância aparente calculada em relação ao ponto de falta e das correntes de pré-falta para calcular a localização da falta. Entretanto, os mesmos estão sujeitos a erros devido à contribuição de correntes provenientes dos alimentadores remotos e também devido à resistência de falta. Nesses métodos, em geral, faz-se necessário primeiro a identificação do tipo de falta ocorrida, pois o equacionamento para cada tipo de falta é diferente dos demais.

Saint e Paithankar [8] propuseram uma técnica de localização de faltas baseada no cálculo da razão entre a reatância de falta da linha (X_{LS}) (a partir do terminal onde se encontra o localizador de falta até o ponto da falta), e a reatância total da LT (X_n), ou seja, X_{LS}/X_n . Como X_n é um valor conhecido, a razão X_{LS}/X_n determina a posição da falta. Do cálculo dessa razão pode ser derivada a seguinte expressão:

$$\frac{X_{LS}}{X_n} = \frac{\text{sen}\theta_3 \text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} \quad (2.1)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{arctg}\left(\frac{I'_R X_n}{V'_S}\right) \\ \theta_2 &= -\frac{V'_S}{I'_R X_n - V'_S} \\ \theta_3 &= 180^\circ - (\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

sendo que I'_R é a corrente pós-falta no terminal R e V'_S a tensão pós-falta no terminal local.

A equação 2.1 denota que a posição da falta pode ser determinada pela medida de dois quaisquer dos três ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 . O localizador de faltas é analisado somente sob condições de fonte conectada em um único terminal. Conforme relatado, as estimativas da localização de falta não são precisas caso exista uma contribuição à corrente de falta por fontes conectadas em ambos os terminais da linha e se for levada em conta a resistência de falta.

Takagi *et. al.* [9] apresentaram um algoritmo de localização baseado no uso de sinais de tensão e corrente apenas de um terminal, os quais são posteriormente filtrados através da técnica da Transformada Discreta de Fourier (TDF), a fim de se obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime permanente. O algoritmo utiliza componentes superpostos e modais de tensão e corrente, ao invés dos valores totais para o cálculo da distância. Isso permite que um sistema trifásico seja tratado como um sistema com três circuitos monofásicos independentes, simplificando consideravelmente os cálculos necessários. O equacionamento deste algoritmo faz uso da teoria de quadripólos, do método de *Newton-Raphson* e necessita da classificação da falta.

Para uma linha monofásica, aplicando-se a teoria da superposição em redes lineares, isto é, separando a rede faltosa em duas redes derivadas (uma rede de pré-falta e uma rede em que a falta foi isolada) será obtido o vetor V_F no ponto de falta:

$$V_F = R_F I_F = -R_F(I''_{SF} + I''_{RF}) \quad (2.3)$$

Sendo V_F e I''_{SF} estimados por vetores medidos no terminal da linha:

$$V_F = A(d)V_F - B(d)I_s \quad (2.4)$$

$$I''_{SF} = C(d)V''_S - D(d)I''_S \quad (2.5)$$

$A(d)$, $B(d)$, $C(d)$ e $D(d)$ são as constantes do quadripólo representativo da linha de transmissão expressas por:

$$\begin{aligned} A(d) &= D(d) = \cosh(\lambda d) \\ B(d) &= Z_0 \sinh(\lambda d) \\ C(d) &= \sinh(\lambda d) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Sendo λ a constante de propagação da onda e d a distância da falta.

A partir de uma série de manipulações algébricas envolvendo as equações 2.3, 2.4 e 2.5, chega-se a:

$$R_F[1 + k(d)] = -\frac{A(d)V_S - B(d)I_S}{C(d)V''_S - D(d)I''_S} \quad (2.7)$$

Dadas as equações 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7, tem-se que V_F e I_F são respectivamente a tensão e a corrente no ponto de falta, V_S e I_S representam a tensão e a corrente de pré-falta no terminal local, R_F a resistência de falta, I''_{SF} é o componente superposto da corrente de falta no terminal local ao ponto de falta, I''_{RF} é o componente superposta da corrente de falta do terminal remoto ao ponto de falta, Z_0 a impedância característica da linha e $K(d)$ é a relação entre I''_{RF} e I''_{SF} considerando-se as seguintes hipóteses:

- R_F é puramente resistiva e;
- Relação $K(d)$ é um número real.

Entretanto, a segunda hipótese só é válida se os equivalentes nos terminais da linha de transmissão forem puramente indutivos e a linha sem perdas, o que em determinados casos pode ser uma boa aproximação.

A equação básica do localizador é definida como:

$$Im\left[\frac{A(d)V_S - B(d)I_S}{C(d)V_S'' - D(d)I_S}\right] = 0 \quad (2.8)$$

Onde $Im[.]$ representa a parte imaginária de uma variável complexa. A solução da equação 2.8 corresponde à distância do ponto de falta ao terminal local. A equação 2.8 é uma equação não linear, sendo necessária uma técnica interativa, como a de *Newton-Raphson*, para resolvê-la.

Em Takagi *et. al.* [10], uma continuação de [9], é apresentado uma possível solução para o problema de localização da falta baseado na transformada de Laplace. Este método considera o modelo de linhas com parâmetros distribuídos e utiliza o princípio da superposição aplicado a análise do estado transitório de uma rede faltosa. A equação fundamental do localizador é não linear. Portanto, se faz novamente necessário o uso de uma técnica de solução interativa, como a citada anteriormente.

Takagi *et.al.* [11] desenvolveram uma técnica aproximada de localização de faltas, na qual se calcula a reatância da linha faltosa, usando a representação dos fasores de tensão e corrente no terminal local da LT, juntamente com a teoria de quadripólos. Erros causados por vários fatores como: fluxo de carga, resistência de falta e disposição não simétrica da linha de transmissão foram amenizados por esta abordagem. Segundo os autores, a técnica é aplicável para linhas curtas, sendo estas, transpostas ou não.

Este método parte do mesmo equacionamento apresentado anteriormente em [9], mas é direcionado de forma a chegar a seguinte equação:

$$V_S - I_S Z_0 \tanh(\lambda d) = R_F K \left(\frac{V_S'' \tanh(\lambda d)}{Z_0} - I_S'' \right) \quad (2.9)$$

Neste caso as aproximações consideradas são:

- $\tanh(\lambda d) = \lambda d$
- $\frac{V_S'' \tanh(\lambda d)}{Z_0} \ll I_S''$

Considerando essas hipóteses, admitindo que a resistência de falta seja puramente resistiva e que não haja diferença entre as fases das correntes de falta isoladas na linha (em falta menos pré-falta), os valores de R_F e K são números reais.

Dessa forma é possível chegar a uma expressão em que a distância da falta pode ser obtida de maneira direta, sem a necessidade de cálculos iterativos por:

$$d = \frac{\text{Im}[V_S' I_S''^*]}{\text{Im}[Z_L I_S' I_S''^*]} \quad (2.10)$$

O símbolo * indica o conjugado complexo e d a distância do ponto de falta ao terminal local.

Erikson et.al.[12] descreveram uma técnica de localização de faltas usando o Fator Distribuição de corrente (FDC), na qual se determinam o ângulo da tensão no ponto de falta e a distância da falta. Esta técnica apresenta maiores benefícios se comparada ao método proposto por Takagi *et.al.* [11], uma vez que considera a influência introduzida pelo terminal remoto da linha, usando para isso, o modelo completo da rede. Além disso, valores representativos para a impedância da fonte são também armazenados, para compensar as variações nos ângulos das impedâncias e determinar uma correta descrição da rede. O valor de R_F desconhecido não é necessário, sendo usado somente o ângulo de R_F e I_F e a tensão no ponto de falta.

O cálculo da localização determina a impedância aparente da falta com uma compensação para a queda de tensão na resistência de falta, eliminando erros na medição convencional do tipo à reatância. Como a impedância de seqüência positiva não depende da resistência do pé de torre e nem da resistência do solo, as componentes da corrente de seqüência zero foram eliminadas e somente as componentes da corrente de seqüência positiva e negativa foram usadas. A partir de todo um equacionamento foi obtida a equação 2.11, na qual foi introduzido o FDC (K_p):

$$V_S = I_{Sp} Z_l + \left(\frac{I_{SF}}{K_p}\right) R_F \quad (2.11)$$

Sendo que I_{SF} varia conforme o tipo de falta e representa a mudança na corrente produzida pela falta, que é igual a atual corrente menos a corrente de pré-falta. O FDC (K_p) é definido pela equação 2.12 como função da localização da falta, dos parâmetros de seqüência positiva da linha e da impedância das fontes (Z_S e Z_R):

$$K_p = \frac{(1-p)Z_L + Z_S}{Z_R + Z_L + Z_S} \quad (2.12)$$

Em que Z_L é a impedância da linha, p a distância da falta em percentagem e K_P o fator de distribuição de corrente.

Substituindo a equação 2.12 na equação 2.11 foi obtida a expressão complexa 2.13 que contém variáveis p e R_F desconhecidas:

$$p^2 - pK_1 + K_2 - K_3R_F \quad (2.13)$$

Em que:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{V_S}{I_S Z_L} + 1 + \frac{Z_R}{Z_L} \\ K_2 &= \frac{V_s}{I_S Z_L} \left(\frac{Z_R}{Z_L} + 1 \right) \\ K_3 &= \frac{I_{SF}}{I_S Z_L} \left(\frac{Z_S + Z_R}{Z_L} + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Separando a equação complexa 2.13, em uma parte real e outra imaginária, são obtidas duas equações simultâneas. Eliminando a resistência de falta R_f , que é desconhecida, resulta em uma expressão em função de uma única variável desconhecida – p . Esta é resolvida através de um algoritmo que emprega os valores de pico e posições de fase, obtidos por uma rotina baseada na análise de Fourier.

Ranjbar *et. al.* [13] apresentam uma técnica baseada em modelos de LT por parâmetros distribuídos que leva em consideração o efeito da capacitância da linha. A abordagem utilizada baseia-se no cálculo da tensão ao longo da LT. No ponto de falta, a tensão assume seu valor mínimo e, assim, uma comparação dos valores das tensões em diferentes pontos da linha fornece uma base para a localização de falta. Para isso os autores desenvolveram uma função $G(x)$, proporcional à integral do valor

absoluto da tensão sobre um intervalo de tempo limitado. Esta função, por sua vez, faz uso das ondas de tensão ao longo da linha calculadas por meio de equações telegráficas. $G(x)$ é calculada para diversos pontos sobre a linha e possui seu valor mínimo no local de ocorrência da falta.

O método determina a localização mesmo para uma falta com ângulo de incidência igual a zero. O erro máximo atingido foi menor do que $D_X/2$, que é a distância entre dois pontos consecutivos da LT, sobre os quais são calculados valores para a função $G(x)$. O método faz uso da teoria modal para transformação das equações aplicadas às faltas não simétricas.

Girgis e Fallow [14] desenvolveram duas técnicas de localização de faltas baseadas no conceito de impedância aparente e uso dos fasores trifásicos de tensão e corrente. O primeiro método utiliza dados de apenas um terminal da linha e o segundo método, utiliza dados de dois terminais, sendo estes obtidos por registradores digitais de faltas. Ambos os métodos foram testados utilizando-se de registros de faltas sobre linhas de 69 e 115 kV. Tais técnicas apresentaram alto grau de precisão nos testes avaliados. Segundo os autores, as imprecisões constatadas nas técnicas são devidas à incertezas dos parâmetros da linha, carga do sistema e comprimento da linha.

Johns *et. al.* [15] apresentaram uma nova proposta para o cálculo da distância de falta dispondo somente dos dados do terminal local. O método utiliza componentes superpostos de tensão e corrente, sendo a equação básica utilizada expressa por:

$$Z_F = \frac{(E_F - V_S + I_S d Z_L)((1 - d)Z_L + Z_R)}{V_S - I_S(Z_L + Z_R)} \quad (2.15)$$

Em que:

$$E_F = -(V_S - d Z_L I_L)$$

Sendo que Z_F representa a impedância de falta e E_F a tensão no ponto de falta.

Um dos objetivos do método é apresentar insensibilidade às condições de operação da rede. Para os Testes realizados, considerando-se uma linha de 400kV com 100km de comprimento, a precisão obtida foi bastante satisfatória.

Purushothama *et. al.* [16] propuseram a aplicação de Redes Neurais Artificiais

(RNAs) ao problema de localização de faltas, usando dados registrados em um, ou em ambos os terminais da linha. Os autores desenvolveram duas RNAs, uma utilizando a rede *Multilayer Perceptron* (MLP) convencional e outra, baseada na técnica de correlação em cascata de Fahlman, para localização da falta em LTs de Extra Alta Tensão (EAT). Na primeira aplicação (rede MLP), as entradas para a rede caracterizam dados de pré e pós-falta das correntes e de pós-falta das tensões trifásicas, medidas em um terminal, assim como o tipo da falta. A saída do modelo artificial é a localização e a resistência da falta associada. Na segunda aplicação (cascata de Fahlman) são usados como entrada valores de seqüência positiva, negativa e zero da tensão, medidos em ambos os terminais. Esta também apresenta como saída a distância e a resistência da falta. Pelo relato, ambas as aplicações foram comparadas a três convencionais métodos, apresentando resultados promissores.

Saha *et. al.* [17] apresentaram um algoritmo de localização de faltas para linhas paralelas utilizando sinais de tensão e corrente provenientes de um terminal. O algoritmo faz uso de componentes simétricos. As correntes e tensões de fase em ambas as linhas, com falta e sem falta, são utilizadas pelo localizador. O algoritmo é capaz de localizar faltas quando da operação de ambas as linhas, não requerendo o conhecimento das impedâncias das fontes e o uso de sinais de pré-falta. A incerteza com respeito a impedância de seqüência zero da linha é parcialmente limitada, pois a queda de tensão gerada pela falta ao longo da linha é determinada excluindo-se a componente de seqüência zero.

Yibin *et. al.* [18] propuseram uma nova técnica de localização de faltas usando a Transformada *Wavelet* (TW). Este método faz uso das componentes de freqüência fundamental do sistema, extraídas com o auxílio da TW, para promover a localização da falta. Com base na análise multiresolução (AMR) usando *wavelets*, sendo os sinais amostrados à freqüência de 5 KHz, os autores afirmam que as componentes fundamentais estão inclusas na sexta escala de decomposição, a qual compreende a faixa de freqüência de 39,06 a 78,13 Hz. Porém, nesta escala, os sinais são representados por menos de duas amostras por ciclo, o que pode ser considerado insuficiente para sua representação. Portanto, considera-se o emprego do algoritmo de codificação por sub-bandas de tempo invariante, o qual mantém o mesmo número de amostras em todas as escalas. O algoritmo proposto apresentou melhores resultados quando comparado a

um algoritmo baseado na extração dos fasores fundamentais por meio da Transformada de Fourier.

Soares *et. al.* [19] descrevem uma outra aplicação da teoria *wavelet* ao problema de localização de faltas em linhas de transmissão seguindo o princípio apresentado em [18]. O método faz uso das componentes de frequência fundamental dos sinais de tensão e corrente para promover a localização da falta. A partir dos sinais de tensão e corrente, suas versões aproximadas e detalhadas são obtidas através da implementação do algoritmo de codificação por sub-bandas, baseado na AMR. Porém, neste método, são consideradas as aproximações de terceira escala dos sinais de tensão e corrente para se obter as componentes a faixa de frequência de 0 a 480 Hz. Para implementação deste método, considera-se que as componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente são obtidas ao extrair as componentes dos sinais de terceira escala, sendo a distância estimada considerando o método da impedância aparente.

2.1.2 Algoritmos que Utilizam Dados de Múltiplos Terminais

Com a finalidade de melhorar a precisão dos algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão, muitos autores propõem o uso de dados observados em ambos os terminais da linha. Essas técnicas, geralmente, são independentes da impedância de falta e de mudanças na configuração das fontes dos sistemas de potência. Por outro lado, torna-se necessário um meio de comunicação entre os terminais, bem como um método para determinação dos ângulos de fase das tensões e correntes, em relação a um eixo de referência.

Schweitzer e Jachinowshi [20] propuseram uma técnica usando corrente e tensão em regime permanente, provenientes dos dois terminais da linha. Uma primeira abordagem é usada para um modelo de linha curta. A tensão no ponto de falta (ponto F), usando dados de ambos os barramentos, como por exemplo, barramentos S e R, são dadas pelas equações 2.16 e 2.17:

$$V'_F = V'_S - pZ_L I'_S \quad (2.16)$$

$$V'_F = V'_R - (1 - p)Z_L I'_R \quad (2.17)$$

Equacionando-as de modo a eliminar V'_F , obtêm-se o resultado:

$$p = \frac{(V'_S - V'_R) + Z_L I'_R}{Z_L (I'_S + I'_R)} \quad (2.18)$$

A equação 2.18 fornece o valor de p , usando valores em regime permanente para correntes e tensões, e representa a distância fracionada ao ponto de falta.

Considerando um sistema com linhas curtas e assumindo que as correntes em ambos os terminais da linha são as mesmas sob condições normais (sem a ocorrência de faltas). Portanto, pode-se deduzir que na condição de pré-falta:

$$I'_R = -I'_S \quad (2.19)$$

Dada a observação anterior, pode-se pela corrente pré-falta estabelecer uma relação de fase entre as estampas de tempos nas duas subestações, tornando possível a sincronização dos dados para a obtenção da precisão máxima.

Todavia, para linhas longas a aproximação para linhas curtas não é justificada, sendo necessária a dedução usando-se equações com parâmetros distribuídos, as equações 2.16 e 2.17 são substituídas por:

$$V'_F = V'_S \cosh(\lambda p L) - Z_0 I'_S \cosh(\lambda p L) \quad (2.20)$$

$$V'_F = V'_R \cosh[\lambda(1-p)L] - Z_0 I'_R \cosh[\lambda(1-p)L] \quad (2.21)$$

A solução obtida para a localização, usando as equações acima definidas e as aproximações de primeira ordem para as exponenciais das funções hiperbólicas, fica:

$$p = \frac{(V'_S - V'_R) + Z_0 \lambda I'_R}{Z_0 \lambda L (I'_S + I'_R) - (V'_S - V'_R)(\lambda L) - (V'_R + Z_0 I'_R)(\lambda L)^2} \quad (2.22)$$

Sendo:

$$Z_0 \lambda L = Z_L$$

Uma estimativa da corrente de pré-falta (I'_R) no barramento local é necessária para a sincronização das estampas de tempo. Usando as mesmas aproximações, a estimativa é:

$$I'_{RS} = V'_S \left[\frac{\lambda L}{Z_0} \right] - I'_S \quad (2.23)$$

Em que I'_{RS} denota uma estimativa para a corrente do barramento R no barramento S.

Conforme apontado, esse método não requer valores para os parâmetros do sistema externo à linha de transmissão monitorada. Contudo, não são apresentados resultados com referência a nenhuma das técnicas mencionadas anteriormente. Na realidade, a precisão pode ser limitada por alguns fatores, como por exemplo, grau de fidelidade do modelo da linha usado na implementação, precisão com que os parâmetros da linha são determinados e pelos *hardwares* e *softwares* empregados, o que inclui eficiência do método de filtragem para obtenção dos valores em regime permanente.

Sachedev e Aggarwal [21] propuseram uma técnica de localização de faltas não interativa que é adequada às situações envolvendo o terra. O método faz uso da impedância aparente local da linha, da corrente de seqüência positiva medida localmente por relés, e também de dados correspondentes ao terminal remoto. A partir dessas informações, diferentes tipos de faltas foram analisados e testados usando a teoria de componentes simétricos, a fim de se obter a distância da falta para cada caso. Impedâncias das fontes, fatores de distribuição e correntes de pré-falta não foram usados no processo de estimação. A técnica foi testada para dados simulados envolvendo situações de faltas fase-terra e fase-fase-terra. Os resultados indicaram que os erros de estimação são menores que 5% do comprimento da linha, exceto para uma porção da linha próxima do seu ponto médio, onde as contribuições das correntes de faltas dos dois terminais da linha são iguais. Conforme relatado, as medidas realizadas nos dois terminais não necessitam ser sincronizadas e o efeito da capacitância em paralelo é desprezado.

Jeyasurya e Rahman [22] tomaram por base a equação 2.18 para estimar a localização de faltas em linhas de transmissão. Para linhas de Extra Alta Tensão (EAT) longas, onde as correntes de carga são substanciais, os autores afirmam que o método apresentará uma estimação altamente precisa para a localização da falta, visto que os

transitórios de alta frequência, originados pela capacitância em paralelo, são eliminados através de filtros adequados.

Uma estimativa precisa da posição da falta é obtida com um ciclo de dados pós-falta, quando a capacitância da linha é desprezada. Levando-se em conta essa capacitância, foi observado que quase dois ciclos de dados pós-falta são necessários para obter a mesma estimativa.

Johns e Jamali [23] descreveram uma técnica com boa estimativa de localização de faltas para linhas de transmissão, a qual envolve o monitoramento e a filtragem das ondas de tensões e correntes medidas em ambos os terminais da linha, de maneira a produzir uma medida dos fasores fundamentais em regime permanente. Eles usaram as equações 2.20 e 2.21 para uma avaliação exata da distância à falta, calculando-a pela teoria dos modos naturais e função matricial. A expressão final par ao cálculo da distância da falta para o modelo em uma única etapa é dada pela equação 2.24:

$$d = \frac{\operatorname{arctanh}(-B/A)}{\lambda} \quad (2.24)$$

Sendo:

$$A = I'_R \cosh(\lambda L) Z_0 - V'_R \sinh(\lambda L) + Z_0 I'_S \quad (2.25)$$

$$B = V'_R \cosh(\lambda L) - Z_0 V'_R \sinh(\lambda L) + V'_S \quad (2.26)$$

A localização da falta independe da resistência de falta e não exige qualquer conhecimento da impedância da fonte. O método mantém um alto grau de precisão para linhas não transpostas e nenhuma identificação do tipo da falta é exigida. Para todos os casos avaliados, o erro produzido pelo algoritmo foi satisfatório. Esta técnica será levada em conta e melhor descrita posteriormente.

Kalam e Johns [24] descrevem um novo método de localização de faltas para linhas de transmissão com três terminais, fundamentado nas idéias de Johns e Jamali [23]. Entretanto, a aplicação é estendida para os dados de tensão e corrente, medidos nos três terminais, os quais são filtrados de maneira a produzir uma medida dos fasores

fundamentais em regime permanente. O algoritmo é independente da resistência da falta e não exige qualquer conhecimento da impedância da fonte e do tipo da falta. O algoritmo também não requer um pré-conhecimento da seção na qual a falta ocorreu.

Em Girgis et.al. [14] a distância da falta é obtida a partir do equacionamento dos vetores trifásicos de tensão e corrente com o uso da matriz trifásica de impedâncias série da linha, sendo desprezado o efeito da capacitância, o que é uma boa aproximação apenas para linhas curtas.

O método considera linhas de dois ou três terminais, e pode ser aplicado mesmo no caso de não haver sincronização dos dados entre os mesmos. Para o caso de linhas de dois terminais com dados sincronizados, tem-se:

$$[V_F] = [V_S] - d[Z_{a,b,c}][I_S] \quad (2.27)$$

$$[V_F] = [V_R] - (L - d)[Z_{a,b,c}][I_R] \quad (2.28)$$

A partir das equações 2.27 e 2.28 tem-se:

$$[V_S] - [V_R] + L[Z_{a,b,c}][I_R] = d[Z_{a,b,c}]([I_S] + [I_R]) \quad (2.29)$$

A equação 2.29 pode ser reescrita como:

$$Y = Md \quad (2.30)$$

Sendo:

$$Y = [V_S] - [V_R] + L[Z_{a,b,c}][I_R]$$

$$M = [Z_{a,b,c}]([I_S] + [I_R])$$

O valor da incógnita d na equação 2.30 é obtido com o uso do método dos mínimos quadrados:

$$d = (\bar{M}^T M)^{-1} \bar{M}^T Y \quad (2.31)$$

Em que \bar{M}^T é a matriz M transposta com os elementos conjugados, $[V_S]$ e $[I_S]$ são os vetores de tensão e corrente trifásicos no terminal local, $[V_R]$ e $[I_R]$ são os vetores de tensão e corrente trifásicos no terminal remoto, $[Z_{a,b,c}]$ é a matriz trifásica de impedância série da linha, L é o comprimento da linha e d a distância da falta.

A metodologia apresentada estende-se para linhas de três terminais e permite a utilização de dados não sincronizados. A mesma independe do tipo e da resistência de falta. Esta técnica juntamente com a técnica de Jamali *et. al.* [23] serão utilizada neste trabalho.

Coury *et. al.* [25] apresentaram um método para computar a localização das faltas em linhas de transmissão de três terminais, desenvolvido a partir do método para linha de dois terminais reportado por Johns e Jamali [23]. A técnica é baseada na utilização das formas de ondas de tensão e corrente em todos os terminais de uma típica linha de três terminais de EAT, sendo as formas de ondas filtradas, usando-se a técnica da TDF a fim de se obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime permanente. Essa técnica faz uso da teoria da superposição e de componentes modais, ao invés dos valores de fase para calcular a distância da falta. Alguns artifícios são também desenvolvidos para efetivamente sincronizar os dados provenientes dos três terminais e identificar o ramo faltoso. Artifícios estes, necessários para se obter um alto grau de exatidão. A técnica é também virtualmente independente da resistência de falta e insensível às variações na impedância da fonte e configurações de linha, incluindo a sua não transposta. O método em questão apresenta uma boa precisão para as condições analisadas.

Novosel *et. al.* [26] apresentam um método baseado no equacionamento com matrizes trifásicas da linha. Por ser um método *off-line*, não requer sincronização dos dados nos terminais e permite a comunicação por um simples canal, como é o caso do modem.

Em Zamora *et. al.* [27] a obtenção da distância de falta é feita utilizando apenas os componentes fundamentais dos sinais de tensão em falta e pré-falta registrados em ambos os terminais da linha e um novo conceito denominado fator de distância (Kv). São

considerados no equacionamento componentes superpostos e componentes simétricos de tensão e corrente para a melhoria da precisão do algoritmo, que parte da seguinte equação:

$$V_{FD} = -Z_{th}I_{FD} \quad (2.32)$$

Em que Z_{th} representa a impedância equivalente de Thévenin de seqüência positiva do sistema modelado como um circuito PI, V_{FD} é a componente de tensão superposta de seqüência positiva e I_{FD} a corrente superposta de seqüência positiva, ambas no ponto de falta.

No que segue, os autores fizeram uso de um fator de distância (K_V), que representa a razão entre os componentes de tensão superpostos de seqüência positiva de ambos os terminais, que por sua vez é função da distância. A partir do fator de distância é obtida a distância da falta, através da consulta a uma curva K_V versus p , sendo p igual a distância da falta em p.u.. A curva referenciada está definida como uma função de K_V e determinada em particular para a linha em análise. Para os testes apresentados, o erro máximo obtido foi de 2, 25% do comprimento da linha, mesmo considerando a entrada de dados com erros em amplitude e em ângulo. O algoritmo é independente do sincronismo de dados, do tipo e resistência de falta e condições de pré-falta.

Capítulo 3

Sistema Elétrico Analisado

Com o objetivo de testar e validar os algoritmos de localização de faltas a serem analisados, utilizou-se da simulação de um sistema de transmissão em condição faltosa. Para tal, o *software* ATP (*Alternative Transiente Program*) [28] foi empregado. Deve ser mencionado que a técnica descrita é baseada em simulações computacionais e que considerações práticas tais como o efeito dos transdutores (TPCs e TCs), filtros *anti-aliasing* e conversores Analógico/Digital, foram também incluídas na simulação, fazendo com que os dados obtidos sejam bastante próximos à realidade. Além disso, foram consideradas características dos condutores e suas disposições geométricas nas torres de transmissão.

Inicialmente são colocadas algumas considerações sobre o *software* empregado. Posteriormente, os tópicos inerentes ao processo de simulação de um sistema elétrico, tais como, a modelagem da linha de transmissão, os transformadores de corrente e de potencial, a obtenção dos parâmetros do sistema, o filtro passa-baixa, além da digitalização dos sinais de tensão e corrente, serão colocados.

3.1 O *software* ATP

Os sistemas elétricos de potência são planejados para disponibilizar energia com qualidade, confiabilidade e continuidade. No entanto, os SEPs estão constantemente expostos às várias contingências, tais como, descargas atmosféricas e outras intempéries, curtos-circuitos, falhas na operação e dispositivos (geradores, transformadores, cabos,

disjuntores, chaves de manobra, barramentos, relés e motores, entre outros). Das conseqüências, tais contingências podem prejudicar os sistemas que estejam interligados.

Neste contexto, torna-se necessário a execução de um prévio estudo dos possíveis transitórios que podem ocorrer em um sistema elétrico. Este estudo poderá ter o intuito, tanto para a definição de uma adequada especificação dos dispositivos de proteção, quanto para se determinar os motivos que ocasionaram uma anomalia comportamental do sistema elétrico [29]. Dentre os mecanismos existentes para a realização de tal estudo, os simuladores digitais têm se mostrado uma ferramenta em potencial devido ao aumento no poder de processamento dos computadores atuais. Afirma-se em [29] que não existem relevantes limitações no ato de modelar qualquer componente do sistema elétrico em programas digitais. Devido ao seu rápido avanço e aos custos envolvidos, os computadores são vistos, hoje, como a nova tendência no que tange o desenvolvimento dos simuladores de transitórios.

Um dos simuladores digitais mais utilizados é o EMTP (*ElectroMagnetic Transient Program*) da *Bonneville Power Administration* (BPA). Este foi desenvolvido com base no trabalho de Frey e Althammer, por Herman W. Dommel, na década de 60 em Munique, Alemanha. Inicialmente, o programa possibilitava a modelagem de circuitos monofásicos, contendo uma chave e uma fonte de excitação, por modelos de indutâncias, capacitâncias, resistências e linhas sem perdas.

Com a saída de Herman W. Dommel para a *University of British Columbia* (UBC), a coordenação do projeto de desenvolvimento do simulador ficou sob responsabilidade de Scott Meyer. Com isso, deu-se início a um processo de desenvolvimento coordenado, tornando o simulador uma ferramenta muito poderosa.

Após a saída de Scott Meyer da coordenação do projeto na BPA, foi criada uma nova versão do EMTP pelo LEC (*Leuven EMTP Center*) na Bélgica, baseada na versão M39. Esta nova versão é conhecida como ATP. A distribuição do programa ficou centralizada até 1992, momento em que a BPA e Scott Meyer voltaram a trabalhar em conjunto.

Atualmente, o ATP possibilita a utilização de configurações arbitrárias em simulações de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas. Além destas, outras características constituem o grupo de definições passíveis de utilização, tais como não linearidades, elementos com parâmetros concentrados e distribuídos, diversos tipos de chaves, transformadores e reatores, dentre outros.

Vale frisar que por ser um programa digital, pelo ATP não é possível se obter uma resposta contínua no tempo, sendo assim, caracterizada por valores a intervalos de tempo discretos. Entretanto, este fato não reduz a precisão nos resultados obtidos pelo ATP. Este *software* apresenta precisão suficiente para ser utilizado em diversas categorias de estudos. Conforme pode ser comprovado, realizando-se uma comparação dos resultados obtidos pela utilização do ATP com dados reais, percebe-se uma boa correlação entre os mesmos [29].

Contudo, a documentação do *software* ATP consiste basicamente de um manual (ATP *Rule Book*)[28], o qual possui todas as informações sobre os modelos disponíveis. A utilização do ATP abrange tanto a área acadêmica quanto empresarial [30]. Os resultados apresentados por sua utilização possuem uma elevada aceitação e validação, o que pode ser verificado, por exemplo, por sua grande utilização em trabalhos publicados nos periódicos do CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) e do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

3.2 Modelagem da Linha de Transmissão

Devido a sua extensão física, as LTs são os dispositivos em um sistema de potência onde podem ocorrer uma grande quantidade de falhas. Acrescentando a isso um alto grau de complexidade da interligação dos sistemas elétricos em geral, é necessário um estudo para que solução de eventuais problemas (faltas), seja resolvido da maneira eficiente, garantindo a qualidade de energia e o retorno financeiro para a concessionária.

Esta seção tem por objetivo apresentar o sistema elétrico em análise, o qual servirá como base de estudo para os testes de desempenho dos algoritmos de localização de falta. O sistema proposto para estudo pode ser observado na figura 3.1

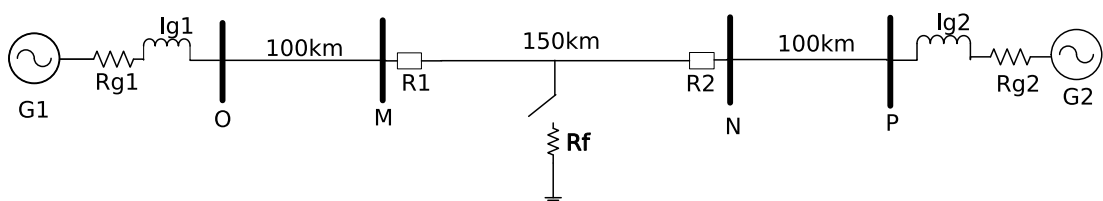


Figura 3.1: Sistema elétrico a ser estudado

O sistema é composto por 3 linhas de transmissão, duas linhas de 100 Km e uma de 150 Km, sendo esta última onde serão aplicadas as faltas. Entre cada uma das linhas

existem barramentos (O, M, N e P) e equivalentes de rede (G1 e G2).

3.2.1 Características e Geometria dos Condutores

O comportamento dos níveis de tensão e corrente em regime permanente e em situações de faltas depende fortemente das características físicas e parâmetros elétricos das linhas de transmissão. Neste trabalho se fez uso da modelagem de uma linha de transmissão de 440kV típica da CESP (Companhia Elétrica de São Paulo). A silhueta da torre de transmissão utilizada é apresentada na Figura 3.2. No que segue, apresentam-se as suas principais características, além da resistividade do solo considerada no estudo.

Condutor de fase: Cabo *Grosbeak*

- raio externo do condutor: 12,57 mm;
- raio interno do condutor: 4,635 mm;
- resistência em corrente contínua: 0,08998 Ω /km.

Cabos Pára-raios: OPGW

- raio externo do condutor: 7,15 mm;
- resistência em corrente contínua: 0,3261 Ω /km;

Resistividade do solo

- R_{solo} : 1000 Ω /km

Flecha a meio vão

- fase: 13,43 m
- pára-raios: 6,4 m

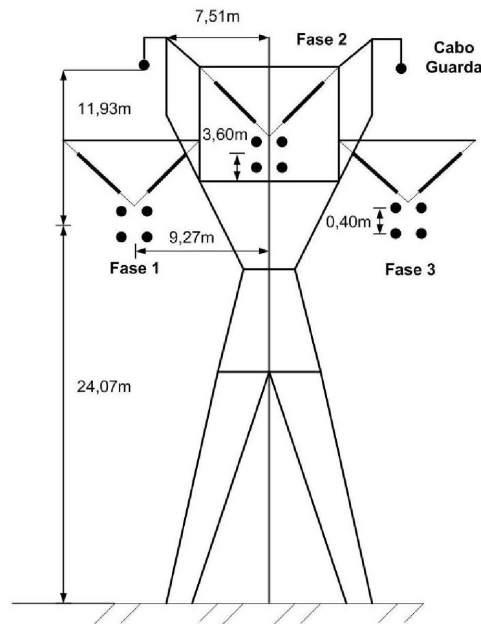


Figura 3.2: Silhueta da torre mostrando a disposição dos condutores

3.2.2 Transformadores de Corrente e de Potencial

Como parte da modelagem da linha de transmissão utilizada, faz-se necessário incorporar ao sistema as características dos TCs e TPs. Estes transformadores têm a função de reproduzir uma cópia em escala reduzida dos valores de corrente e tensão da linha de transmissão, adequando-os aos utilizados pelos sistemas de medição, controle e, principalmente, proteção.

Com relação ao tipo do TP a ser utilizado, optou-se pelo transformador de potencial capacitivo (TPC). Esta escolha foi motivada pela alta tensão do sistema em análise e em simulação, não sendo adequada a utilização de um TP eletromagnético devido à sua classe de isolamento, a qual acarretaria em dimensões impraticáveis [31]. Entretanto, a utilização do TPC incorre em alguns problemas na proteção de distância que requer uma alta velocidade de atuação [32]. Estes problemas são provenientes dos erros introduzidos pelo processo de transformação dos sinais analisados devido ao seu mau comportamento durante o período transitório que segue a uma situação de falta. Estes erros são causados pelo fato do TPC ser um equipamento ajustado para atuar na frequência de operação do sistema elétrico.

Uma representação de um circuito básico de um TPC pode ser visto na Figura 3.3, onde C1 e C2 representam a capacitância do divisor de tensão, L1 é um reator

ajustável, V e V_s são respectivamente as tensões de linha e secundária do sistema. Definiu-se o valor de C_1 em 2000 pF e V_2 em 12 kV e, conforme apresentado em [32], da equação $V_2 = VC_1 / (C_1 + C_2)$ obteve-se um valor aproximado de C_2 a ser empregado nas simulações.

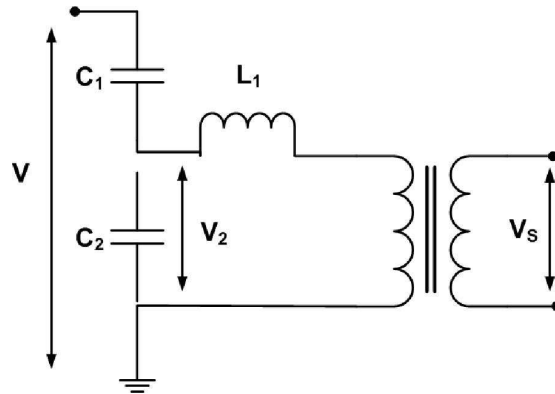


Figura 3.3: Circuito básico de um TPC.

Por fim, baseando-se em [2] a linha de transmissão estudada foi modelada utilizando-se TCs e TPCs que se assemelham aos utilizados em campo, e portanto aproximando da realidade as simulações realizadas. Os TPCs e TCs utilizados podem ser vistos na figura 3.4.

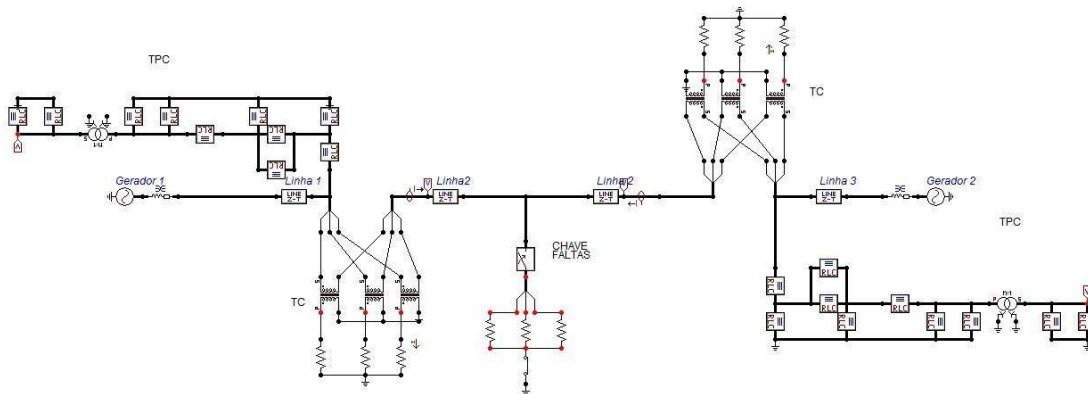


Figura 3.4: Sistema elétrico utilizando TPCs e TCs

3.2.3 Parâmetros do Sistema Elétrico em Análise

Para a realização de uma adequada simulação, diversas considerações devem ser tomadas em relação às características das linhas de transmissão, levando em consideração os condutores e suas respectivas disposições geométricas, conforme apresentado

na Figura 3.2. A consideração da disposição espacial dos parâmetros de uma linha de transmissão como distribuída é, segundo [30], a melhor representação a ser seguida para simulações de linhas que possuam um grande comprimento. Neste sentido, deve-se abstrair a representação de um Δx em um esquema monofásico do sistema elétrico, composto por valores dos parâmetros de $R\Delta x$, $L\Delta x$, e $C\Delta x$. Os valores de indutância e capacitância são determinados pelos valores de reatância e susceptância obtidos a partir da execução da rotina *Line Constants* do ATP. Uma representação deste esquema é apresentada na Figura 3.5.

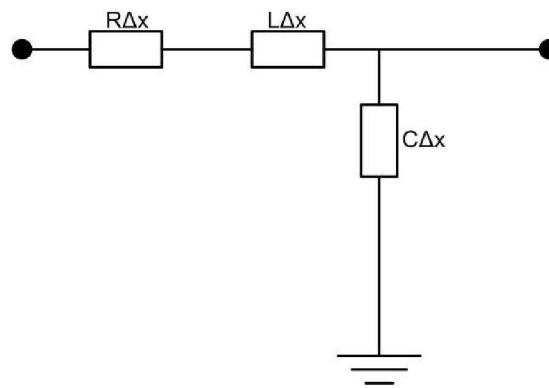


Figura 3.5: Representação de um trecho da linha por parâmetros distribuídos

Outra consideração foi com relação à transposição das linhas de transmissão. Esta decisão se deve pelo fato da transposição realizar uma compensação entre os desequilíbrios dos campos magnéticos entre fases, cabo de cobertura, ferragens e solo sob a linha de transmissão. De acordo com [33], o uso da transposição acarretará em uma indutância média para cada condutor, o que irá influenciar no modelo utilizado pelo ATP. A transposição de uma linha de transmissão qualquer é ilustrada na Figura 3.6

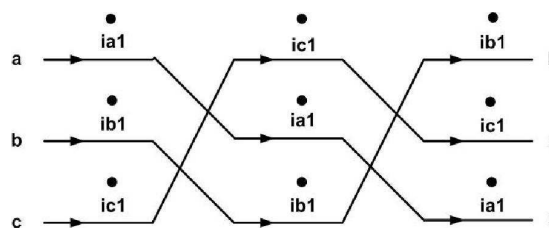


Figura 3.6: Transposição de uma linha de transmissão

3.2.4 Rotina *Line Constants*

A rotina *Line Constants* consiste em uma sequência auxiliar ao processo de cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão em uma determinada frequência. Os resultados obtidos de seu processamento são utilizados na construção do arquivo principal de dados.

Como parâmetros de entrada desta rotina, relativo a cada condutor de cada fase associada ao sistema elétrico, temos: o efeito *skin* ou pelicular, a resistência em CC, o diâmetro externo, a distância horizontal, a altura vertical, além da resistividade do solo, frequência em que os parâmetros estão sendo calculados, condições da linha (com ou sem transposição) e características dos cabos pára-raios referentes ao sistema como um todo. Na Figura 3.7 é apresentado o arquivo de entrada da rotina *Line Constants*, o qual descreve a topologia do sistema elétrico em análise.

Impedância característica da linha

Os resultados obtidos pela execução dessa rotina, serão utilizados posteriormente na construção do arquivo principal de simulação do sistema elétrico. Esses são: valores de sequência positiva e zero das grandezas referentes às susceptâncias, reatâncias e resistências. Particularmente, as susceptâncias e as reatâncias serão usadas para a obtenção dos valores de indutância e capacitância de sequência zero e positiva das linhas. Estes valores são apresentados na Tabela 3.1.

Com isso, de posse dos dados resultantes da aplicação da rotina *Line Constants*, o arquivo principal de simulação deverá levar em consideração as demais características descritas até o momento. Ressalta-se que a composição espacial distribuída dos parâmetros do sistema elétrico é da forma (R, L, C).

Tabela 3.1: Parâmetros obtidos a partir da execução da rotina *Line Constants*

Seq.	Resis.(Ω /Km)	Susc.(S/Km)	Reat.(Ω /Km)	Ind.(mH/Km)	Cap.(μ F/Km)
Zero	1,847E-001	3,404E-006	8,658E-001	2,296	9,032E-003
Positiva	2,301E-002	5,932E-006	2,796E-001	7,418E-001	1,573E-002

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 1,188E-01 + i6,0697E-01 & 9,886E-02 + i3,412E-01 & 9,599E-02 + i2,956E-01 \\ 9,886E-02 + i3,412E-01 & 1,245E-01 + i6,052E-01 & 9,886E-02 + i3,412E-01 \\ 9,599E-02 + i2,956E-01 & 9,886E-02 + i3,412E-01 & 1,188E-01 + i6,069E-01 \end{bmatrix} \Omega$$

3.3 Condicionamento do Sinal

Os passos que serão descritos a seguir compõem o condicionamento inicial do sinal. Na prática este condicionamento ocorre por meio da implementação de filtros passa baixa (*Butterworth*), amostragem (*sample e hold*) e quantização. Neste trabalho tais passos foram simulados por meio da implementação dos algoritmos.

Como pode ser visto na figura 3.8, primeiramente o sinal é gerado pelas simulações no *software* ATP com uma alta taxa de amostragem, se aproximando assim de um sinal contínuo. Em seguida, o sinal é filtrado por um filtro passa baixa implementado digitalmente. Em seguida é feita uma reamostragem do sinal, pois o mesmo já não possui componentes de alta frequência, e o teorema de Nyquist poderá ser obedecido. Por fim, o sinal é quantizado, e assim está pronto para análise (cálculo da impedância aparente).

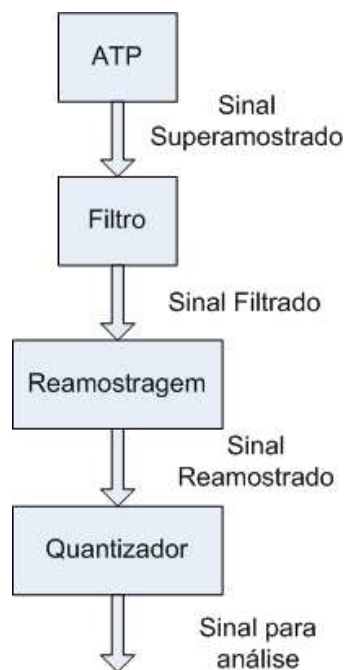


Figura 3.8: Fluxograma do tratamento do sinal de entrada

3.3.1 Filtro Digital Passa-baixas *Butterworth*

Segundo [34], “os filtros têm por finalidade principal a função de permitir a passagem dos componentes do sinal na faixa selecionada de freqüências, rejeitando ou atenuando os componentes indesejados...”. De um modo prático, estas palavras representam a eliminação dos possíveis ruídos no sinal amostrado. Em SEPs, sua aplicação é reforçada pela necessidade de redução das componentes harmônicas de alta freqüência do sinal amostrado, evitando o indesejável efeito *aliasing* (sobreposição de espectros). Em [35] enfatiza-se a necessidade de implementação de um filtro digital passa-baixa *Butterworth* com este objetivo.

Como primeiro passo, deve-se iniciar o projeto do filtro analógico *Butterworth*. Uma representação do filtro passa-baixa ideal é apresentado na Figura 3.9. Nesta figura, a faixa de freqüências na qual o módulo da amplitude da função de transferência é constante de $w = 0$ até $w = w_c$, é chamada de faixa de passagem, sendo caracterizada por uma atenuação nula (0 dB). A faixa de freqüências, onde para todo w maior que w_c , cujo módulo de transmissão é nulo é chamada de faixa rejeitada, apresentando uma atenuação infinita. Deste modo, o filtro permitirá a passagem apenas de componentes de baixas freqüências, definindo, assim, uma freqüência máxima w_c de representação do sinal. Uma representação de sua característica de “perdas” é mostrada na Figura 3.10, onde se ressalta a perda zero na faixa de passagem e a perda infinita após a freqüência de corte.

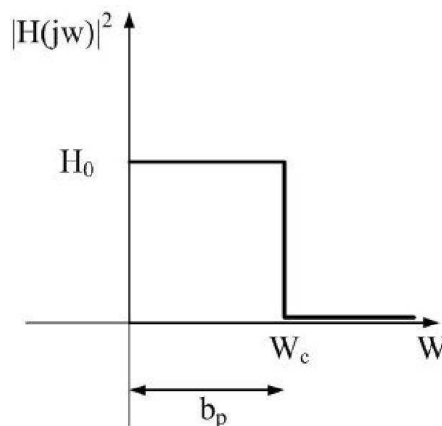


Figura 3.9: Representação de um filtro passa-baixa ideal do tipo *Butterworth*

Após o projeto do filtro analógico, deve-se encontrar a função de transferência correspondente ao filtro, de acordo com suas especificações citadas anteriormente.

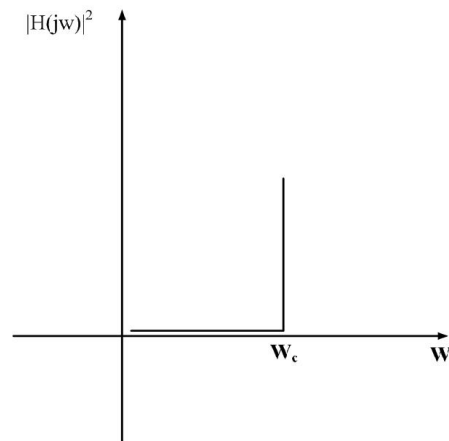


Figura 3.10: Atenuação de um filtro passa-baixa ideal do tipo *Butterworth*

Com base nos estudos apresentados anteriormente, foi implementado um filtro *Butterworth* de ordem 2, com frequência de corte de 500 Hz. O diagrama de bode do filtro implementado pode ser visto na figura 3.11.

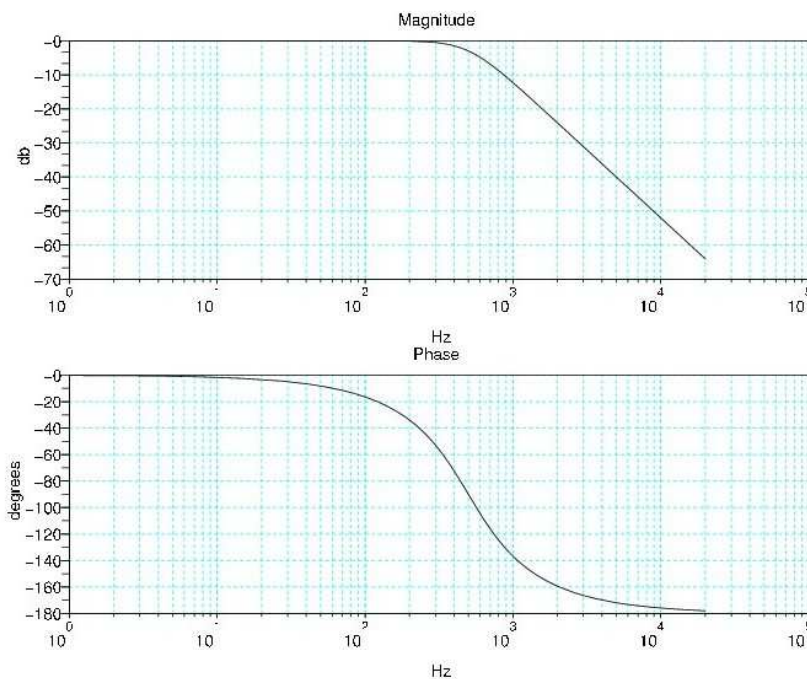


Figura 3.11: Diagrama de Bode do filtro *Butterworth* implementado

Por fim, deve-se aplicar a transformada bilinear a fim de transformar o filtro analógico em um filtro digital [36]. O processo não vai ser descrito aqui devido à sua complexidade. Com o filtro digital devidamente projetado, com sua equação de diferenças descritas, este pode ser implementado como um algoritmo, o qual irá rodar em um processador digital de sinais ou mesmo um *software*.

3.3.2 Digitalização dos Sinais de Tensão e Corrente

Após a obtenção dos sinais de tensão e corrente, na forma discreta pelo *software* de simulação, deve-se realizar sua digitalização pela aplicação de um Conversor Analógico/Digital (CAD). Para tanto, algumas etapas devem ser realizadas, tais como: aplicação de um filtro *anti-aliasing*, amostragem e quantização do sinal.

Como já mencionado, a aplicação de um filtro passa-baixa do tipo *Butterworth* se deve à necessidade de redução das componentes harmônicas de alta frequência do sinal amostrado, evitando o indesejado efeito *aliasing*. Tais filtros também são chamados de filtros *anti-aliasing*. No tocante à amostragem do sinal, deve-se observar o teorema da amostragem (teorema de Nyquist), cujo conteúdo informa que a taxa de amostragem da amplitude de um sinal analógico deve ser, no mínimo, igual a duas vezes a frequência máxima contida neste sinal. Obedecendo a este teorema, a metade da taxa de amostragem (frequência de Nyquist), corresponde ao limite máximo da frequência do sinal que pode ser reproduzido [36]. Por fim, deve-se realizar a quantização do sinal e sua respectiva representação digital. Tal aproximação introduz um erro de quantização, o qual é definido sobre os níveis de quantização, que corresponde à diferença entre o valor numérico real e o valor passível de representação binária, sendo o erro máximo representado pela fórmula:

$$e = + - \frac{q}{2}$$

Em que e representa o erro máximo obtido para cada amostra e q o intervalo entre dois níveis de quantização. q por sua vez, pode ser expresso pela fórmula que segue:

$$q = \frac{V}{2^X 2^{n-1}} = 2^{-n} XV$$

Sendo V a amplitude passível de representação do sinal. Ou seja, é o módulo da diferença entre o valor mínimo e o valor máximo passível de ser representado pelo sinal a ser digitalizado e n é o número de bits utilizado pelo conversor. Observa-se que o número de bits utilizado pelo conversor influi diretamente no erro máximo caracterizado pelo CAD.

Dispondo das considerações apresentadas neste capítulo, acredita-se que os valores das impedâncias aparentes obtidas após a aplicação das faltas se mostrem fiéis quando comparadas aos valores encontrados na prática.

O quantizador utilizado para implementação tem 16 bits. A amplitude do sinal de

corrente é de 24A (-12A – 12A) e a amplitude do sinal de tensão é de 300V (-150V – 150V).

3.4 Resultados da Simulação do Sistema

Após a execução de uma simulação do *software* ATP, tendo como entrada a descrição adequada do sistema elétrico a ser simulado, são obtidas como saída, as formas de onda de tensão e corrente. Para efeito de teste, foi feito uma simulação de uma falta franca do tipo Fase-Terra. Os resultados podem ser observadas nas figuras 3.12 e 3.13.

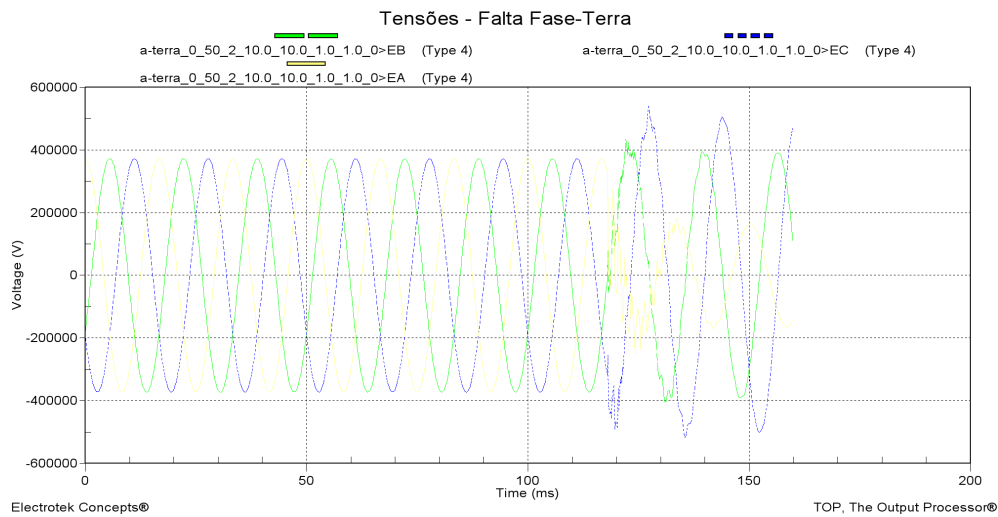


Figura 3.12: Formas de ondas de tensão obtidas para uma falta fase-terra

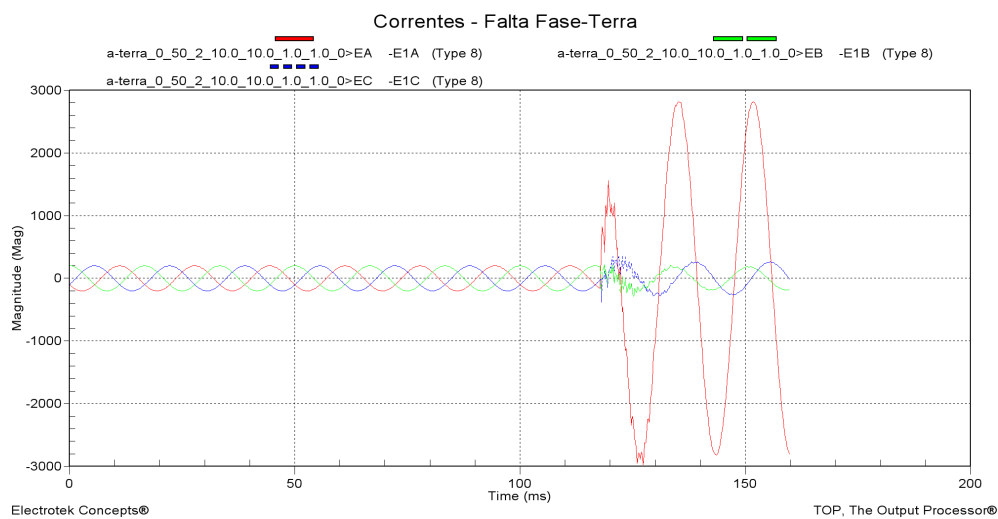


Figura 3.13: Formas de ondas de corrente obtidas para uma falta fase-terra

Pode-se notar claramente o instante em que acontece a falta, evidenciado pelo desvio

de corrente de uma das fases, indicando a fuga de corrente para o terra. As formas de ondas tornam-se ruidosas e existe um grande aumento na magnitude da corrente da fase envolvida na falta. Através da análise dos dados de pré e pós-falta (extração dos componentes fundamentais) será possível dar um diagnóstico contendo informações sobre o tipo da falta bem como sua localização. Tal processo, será descrito a seguir.

Capítulo 4

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão

Neste capítulo serão apresentados dois algoritmos para a localização de faltas em linhas de transmissão de dois terminais. Os dois algoritmos escolhidos foram os de Jamali[23] e Girgis[3].

Todo o processo para o suporte ao funcionamento dos algoritmos será mostrado e por fim será descrita a implementação dos mesmos.

4.1 Processo de Localização de Faltas

Um algoritmo de localização de faltas envolve diversas etapas antes que a técnica de localização propriamente dita possa ser aplicada e a localização da falta possa ser estimada. A figura 4.1 mostra o diagrama de blocos representando os passos envolvidos nos algoritmos estudados.

O processo começa com os dados digitalizados, provenientes de um *hardware* específico ou de alguma fonte de dados, dependendo do tipo de localizador (*stand-alone* ou como um algoritmo independente). Logo após, os dados são sincronizados, para que os componentes fundamentais sejam obtidos sobre a mesma estampa de tempo. Esta etapa é de relevância quando existem dados provenientes de mais de um terminal. O instante da falta é então detectado para que haja separação entre os dados de pré e pós-falta. Os componentes fundamentais são extraídos pela utilização da TDF. Os

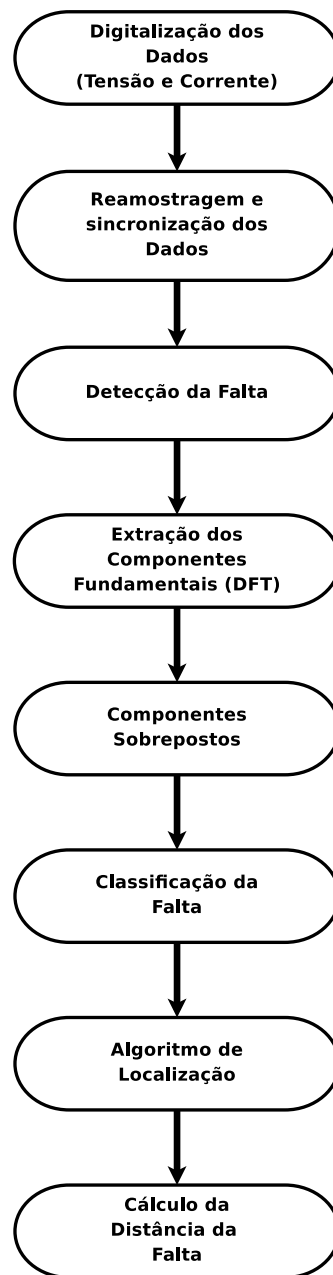


Figura 4.1: Diagrama de blocos dos algoritmos de localização de falta

componentes sobrepostos são calculados para a classificação da falta. Por fim, a técnica de localização de falta é aplicada, realizando uma estimativa da ocorrência da mesma.

4.2 Sincronização dos Dados

Como os algoritmos estudados neste trabalho utilizam dados provenientes de dois terminais é necessário que os componentes fundamentais estejam relacionados por uma

referência de tempo comum. Uma sincronização dos tempos de medida nos dois terminais pode ser conseguida através de um canal de comunicação contínuo entre os terminais, ou pela utilização de um GPS. No entanto estas soluções se mostram dispendiosas ou muito onerosas. Na prática, os dados de pré-falta de corrente e tensão em um dos terminais podem ser usados para providenciar uma referência comum a fim de relacionar esses dados com os dados do outro terminal. Por exemplo, a tensão pré-falta no terminal local poder ser calculada em função das grandezas do terminal remoto através da equações da linha obtidas através de sua modelagem. Observando a equação 4.1

$$V_S = \cosh(\lambda L)V_R - Z_C \sinh(\lambda L)I_R \quad (4.1)$$

Em que:

V_R é a tensão no receptor (estimada); λ é a constante de propagação da linha; L é o comprimento da linha; Z_0 é a impedância característica da linha; V_S é a tensão medida no emissor; I_S é a corrente medida no emissor.

Pode-se observar que, pela avaliação da equação 4.1, o ângulo de fase entre as tensões do terminal local e remoto para os dados pré-falta é fornecido. Este ângulo, por sua vez, é usado para providenciar uma referência de tempo comum a qual relaciona os dados de tensão amostrados em cada terminal. Através dele, é possível uma sincronização dos dados.

4.3 Detecção da Falta

Como pode ser observado no capítulo anterior, faltas causam distorção nas formas de onda de corrente e tensão, alterando a sua magnitude e/ou ângulo de fase com relação aos dados de pré-falta. Tirando vantagem deste fato, utiliza-se nesse processo um método que consiste na comparação dos sinais de tensão e corrente de um ciclo com os seus respectivos sinais do ciclo anterior. Portanto, o módulo da diferença entre os valores de tensão e corrente de um instante com o seu ciclo posterior é calculado, caso três valores seqüenciais estiverem fora do erro estabelecido, é declarada a situação de falta.

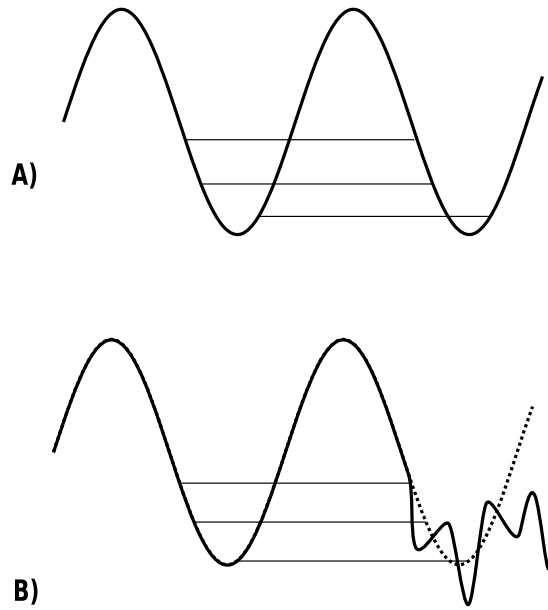


Figura 4.2: Método de detecção de faltas

Como pode ser visto na figura 4.2, (a) representa uma situação onde a forma de onda é equivalente a seu ciclo anterior, enquanto em (b), houve uma distorção na forma de onda e portanto, caracteriza-se uma situação de falta.

4.4 Extração dos Componentes Fundamentais

O sinal de pós-falta de interesse é constituído pela componente fundamental, componentes de alta frequência acrescidos de componentes C.C.. Necessita-se apenas dos componentes fundamentais para o cálculo da distância da falta utilizando os métodos aqui estudados. Portanto, necessita-se de uma boa filtragem dos sinais de pós-falta de tensão e de corrente.

O método utilizado é a Transformada Discreta de Fourier, que possui alta precisão para extração dos componentes fundamentais e simplicidade na sua implementação. A essência da TDF é a decomposição do sinal em diferentes frequências, tornando assim possível a extração dos componentes fundamentais de 60Hz.

A equação geral da TDF é dada por:

$$X_{v,i}(W) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x_{v,i}(n) \cos(Wn\Delta t) - j \text{sen}(Wn\Delta t)] \quad (4.2)$$

Onde:

$X_{v,i}$ = Fator Resultante

N = Número de amostras por ciclo

Δt = Intervalo de tempo entre uma amostra e sua subsequente

$W = 2\pi 60$ Hz frequência do fator a ser extraído (rad/s)

$x_{v,i}$ = Formas de ondas de corrente e tensão amostradas (i,v)

4.5 Obtenção dos Componentes Superpostos

Uma ocorrência de falta em uma linha de transmissão pode ser considerada como sendo equivalente à superposição da tensão no ponto de falta, a qual é igual e oposta à tensão pré-falta em regime permanente. As componentes de tensão e corrente pós-falta podem ser então consideradas como compostas por componentes pré-falta em regime permanente e componentes introduzidas pela falta, como a seguir:

$$V'_S = V_S + \Delta V_F \quad (4.3)$$

$$I'_S = I_S + \Delta I_F \quad (4.4)$$

Os componentes superpostos ΔV_F e ΔI_F representam a diferença entre os valores de pós-falta e os valores de pré-falta em regime permanente.

Assim, a diferença entre os fasores no terminal emissor S é dada por:

$$\begin{aligned} V''_{Sa} &= V'_{Sa} - V_{sa} \\ V''_{Sb} &= V'_{Sb} - V_{sb} \\ V''_{Sc} &= V'_{Sc} - V_{sc} \\ I''_{Sa} &= I'_{Sa} - I_{sa} \\ I''_{Sb} &= I'_{Sb} - I_{sb} \\ I''_{Sc} &= I'_{Sc} - I_{sc} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Os fasores sobrepostos das fases são de fundamental importância para a classificação da falta. A sobreposição pode ser utilizada também para aumentar a precisão dos algoritmos de localização, pois elimina erros causados pelas cargas nos dados de pré-falta.

4.6 Classificação da Falta

A classificação da falta determina as fases envolvidas no distúrbio e pode ser utilizada, principalmente na técnica de Jamali para a utilização do modo correto. O método empregado é baseado na comparação entre os fasores sobrepostos de correntes de fase e seqüência zero I_a'', I_b'', I_c'' e I_0'' para um dado terminal, sendo que os fasores sobrepostos são obtidos pela diferença entre os sinais de pós-falta e pré-falta.

Assim, a classificação de faltas pode ser obtida na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Critérios para classificação da falta

	Se	
(I)	$I_b'' \leq KI_a''$ e $I_c'' \leq KI_a''$	Falta A-TERRA
	$I_a'' \leq KI_b''$ e $I_c'' \leq KI_b''$	Falta B-TERRA
	$I_a'' \leq KI_c''$ e $I_b'' \leq KI_c''$	Falta C-TERRA
(II)	$I_c'' \leq KI_a''$ e $I_c'' \cong KI_b''$	e
	$I_0'' \leq I_{min}$	Falta AB-TERRA
	Caso Contrário	Falta AB
	$I_a'' \leq KI_b''$ e $I_c'' \cong KI_b''$	e
	$I_0'' \leq I_{min}$	Falta BC-TERRA
	Caso Contrário	Falta BC
	$I_b'' \leq KI_a''$ e $I_a'' \cong KI_c''$	e
	$I_0'' \leq I_{min}$	Falta AC-TERRA
	Caso Contrário	Falta AC
(III)	$I_a'' \cong I_b'' \cong I_c''$	Falta ABC

Sendo que um valor apropriado para constante de proporcionalidade K é 0.3 [37].

4.7 Cálculo da distância da Falta

Para a localização de faltas baseada em informações provenientes de dois terminais, como foi dito anteriormente, existem duas técnicas que serão abordadas neste documento. Ambos já haviam sido mencionados na revisão bibliográfica. Em primeiro lugar, a técnica desenvolvida por Girgis[3], que se baseia nos sinais de tensão e corrente de ambos os terminais e utiliza a matriz de impedância trifásica $Z_{a,b,c}$ para o cálculo da distância. Esta técnica tem como vantagem a independência do tipo de falta. A outra técnica abordada é a de Jamali [23], que também se baseia nas informações de tensão e corrente provenientes dos dois terminais. Por meio de transformações modais e aplicação do modelo de linhas de transmissão longas, a distância é encontrada. Esta técnica se mostra mais precisa que a técnica de Girgis, e tem a vantagem de não necessitar da matriz de impedância trifásica. A desvantagem é que o cálculo preciso da distância da falta necessita a informação prévia do tipo de falta. As duas técnicas serão descritas detalhadamente a seguir:

4.7.1 Técnica baseada no método de Girgis

Esta seção descreve os princípios da técnica de localização de faltas criada por Girgis *et al* [3]. Usando fasores trifásicos de tensão e corrente provenientes de ambos os terminais da linha. O sistema estudado para tal está descrito na figura 4.3:

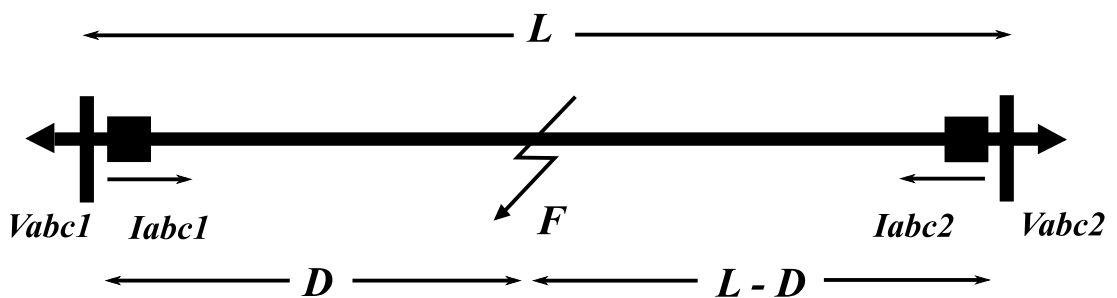


Figura 4.3: Modelagem da linha - técnica para linhas médias

Assumindo que os fasores trifásicos de tensão e corrente obtidos dos dois barramentos estão sincronizados, os fasores de tensão podem ser representados pelas equações a seguir:

$$V_{abc1} = VF_{abc} + DZ_{abc}I_{abc1} \quad (4.6)$$

$$V_{abc2} = VF_{abc} + (L - D)Z_{abc}I_{abc2} \quad (4.7)$$

De 4.6 e 4.7:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + LZ_{abc}I_{abc2} = DZ_{abc}[I_{abc1} + I_{abc2}] \quad (4.8)$$

A equação 4.8 pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} D \text{ ou } Y = MD \quad (4.9)$$

sendo:

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + L \sum_{i=a,b,c} Z_{ji}I_{i2} \quad (4.10)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji}(I_{i1} + I_{i2}) \quad (4.11)$$

$$j = a, b, c$$

A equação 4.9 representa três equações complexas ou seis equações reais. Por simplicidade, para encontrar D , pode-se resolver a equação matricial a seguir:

$$D = (M^\dagger M)^{-1} M^\dagger Y \quad (4.12)$$

Em que M^\dagger é a matriz conjugada transposta M .

Deve ser notado que este procedimento é independente do tipo de falta.

4.7.2 Técnica Baseada no Método de Jamali

Esta seção descreve os princípios da técnica de localização de faltas criada por Johns e Jamali [23]. A tensão e corrente medidas nos terminais das linhas após a filtragem são transformadas em fasores. Considere na figura 4.4 a relação aplicável para uma linha simples, isto é, não irá funcionar se aplicado diretamente sobre uma linha trifásica.

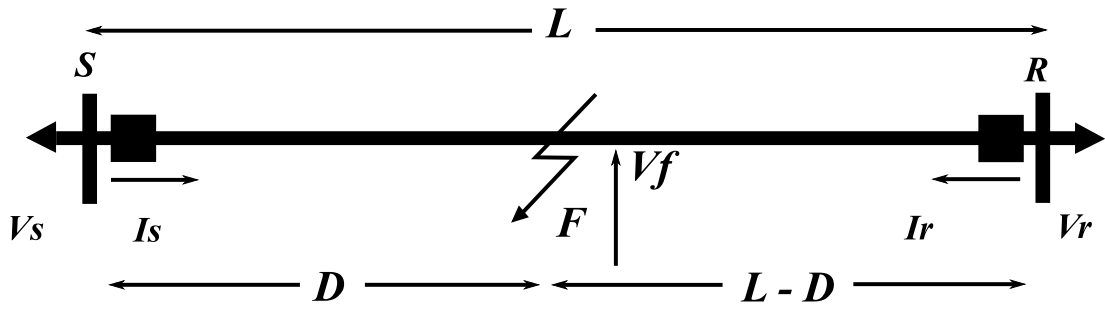


Figura 4.4: Modelagem da linha - técnica para linhas longas

A tensão de pós-falta V_f na distância D do terminal S é expressa em termos das tensões e correntes medidas no final do terminal.

$$V_f = \cosh(\lambda D)V_S - Z_0 \sinh(\lambda D)I_S \quad (4.13)$$

$$V_f = \cosh(\lambda D)V_R - Z_0 \sinh(\lambda D)I_R \quad (4.14)$$

Nas equações 4.13 e 4.15, a impedância característica Z_0 e a constante de propagação da linha λ são dadas por:

$$Z_0 = \sqrt{Z/Y}$$

$$\lambda = \sqrt{ZY}$$

Em que Z é a impedância série da linha e Y é a admitância parasita por unidade de comprimento.

As equações 4.13 e 4.15 eliminam qualquer necessidade de definir a rede do local de falta. Este artifício é útil na prática devido as incertezas do caminho da falta. Rearranjando as equações 4.13 e 4.15 a distância da falta pode ser obtida por:

$$D = \frac{\operatorname{arctanh}(-B/A)}{\lambda} \quad (4.15)$$

Sendo:

$$A = Z_0 \cosh(\lambda L) I_R - \sinh(\lambda L) V_R + Z_0 I_S$$

$$B = \cosh(\lambda L) V_R - Z_0 \sinh(\lambda L) I_R - V_S$$

Se todos os parâmetros necessários puderem ser especificados sem erro, o conjunto de equações acima deve levar ao valor exato da distância da falta D . D é um número imaginário. A distância está na parte real, sendo assim a parte imaginária, que contém um pequeno valor, deve ser ignorada.

Extensão para Linhas Trifásicas

O método descrito anteriormente não pode ser aplicado diretamente em uma linha de múltiplas fases devido a interação que uma fase tem sobre as demais. O algoritmo básico descrito anteriormente pode ser estendido para uma linha trifásica pelo desacoplamento das fases. Isto é feito pela aplicação da teoria de modos naturais e funções de matriz.

Devido a complexidade da teoria, esta não será documentada e pode ser consultada em [38].

Os modos são obtidos pela seguinte equações:

$$[V_{Sn}] = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S1} & V_{S2} & V_{S3} \end{bmatrix}^T = [Q]^{-1} \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \end{bmatrix}^T \quad (4.16)$$

$$[I_{Sn}] = \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{S1} & I_{S2} & I_{S3} \end{bmatrix}^T = [S]^{-1} \begin{bmatrix} I_a & I_b & I_c \end{bmatrix}^T \quad (4.17)$$

Sendo que para linhas transpostas pode-se fazer as seguintes considerações:

$$[Q] = [S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

4.8 Implementação

A implementação busca colocar toda a teoria apresentada até aqui na forma de um *software* utilizável. Para tal foi escolhida a linguagem Java [39]. Tal escolha se baseia no fato de que esta linguagem é extremamente flexível, orientada a objetos, possuindo uma grande quantidade de documentação, funcionalidades disponíveis, além de ser multiplataforma. Este último fato possibilitou o desenvolvimento dos algoritmos em um PC *desktop*, sendo que estes seriam executados no futuro na plataforma PC/104 (Anexo A).

A linguagem Java utiliza o conceito de máquina virtual. Assim, para que um programa compilado na linguagem Java seja executado, basta que haja uma máquina virtual disponível para a plataforma de destino.

A implementação foi feita seguindo a seguinte metodologia: primeiramente os algoritmos foram implementados utilizando o MATLAB como ambiente de teste para verificar eventuais erros conceituais, já que este ambiente de programação facilita a manipulação algébrica, manipulação de matrizes e exibição dos resultados. Posteriormente os algoritmos eram implementados em linguagem Java. Foi utilizada uma biblioteca científica [40] para a manipulação de matrizes e números complexos, já que o ambiente Java padrão não dispunha destes recursos.

A figura 4.5 demonstra o processo de como os algoritmos foram executados. Arquivos contendo os resultados das simulações são enviados ao PC104, onde os algoritmos são executados.

Por fim, foram realizados diversos testes para verificar a eficácia dos algoritmos testados, que serão apresentados no próximo capítulo.

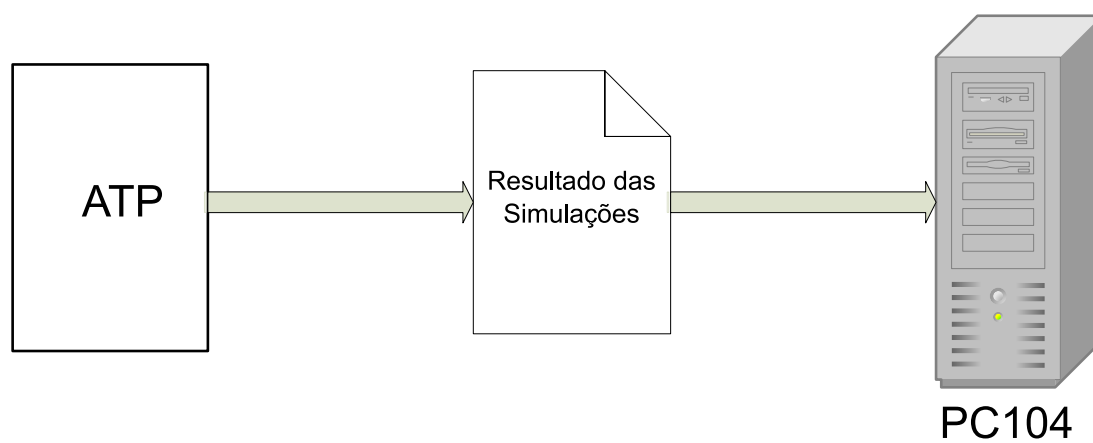


Figura 4.5: Execução dos algoritmos

Capítulo 5

Comparação Entre os Métodos Implementados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados pelos algoritmos de localização de faltas, sendo estes executados diretamente na plataforma PC104.

Como mostrado no capítulo anterior, um algoritmo de localização é composto por diversas etapas antes que a técnica de localização propriamente dita possa ser aplicada. Portanto aqui serão descritos os testes de cada uma das etapas descritas na figura 4.1.

5.1 Sincronização dos Dados

A sincronização dos dados é feita por meio dos dados pré-falta. Para testar a eficiência do algoritmo de sincronização, dados de um dos terminais serão deslocados manualmente, e os resultados obtidos serão dispostos na tabela 5.1. A tabela mostra o número de amostras deslocadas e o número de amostras a serem sincronizadas, estimadas pelo algoritmo. Cabe ressaltar que a taxa de amostragem será de 32 amostras por ciclo da fundamental (1920Hz).

Quando poucos dados foram removidos, a sincronização respondeu corretamente. O sincronizador apresentou bom desempenho, sincronizando as amostras deslocadas corretamente.

Tabela 5.1: Sincronização das amostras

Amostras Deslocadas	Amostras a Serem Sincronizadas
1	1
2	2
4	4
6	6
12	12

5.2 Determinação do Instante de Ocorrência da Falta

Conforme descrito anteriormente, a determinação do ponto de ocorrência da falta é baseada na comparação das amostras de cada fase da linha com as amostras correspondentes a um ciclo anterior. Após a ocorrência de três amostras consecutivas com grandes variações, verifica-se que uma falta ocorreu. Os tempos de detecção das faltas, atrasos e número de amostras em atraso podem ser vistos na tabela 5.2 para três diferentes taxas de amostragem. Independente da taxa de amostragem, todas as faltas ocorreram em 0.1178 (s). Foi escolhido este tempo para ocorrência da falta, pois neste ponto se verifica um ângulo de incidência de falta 0° .

Tabela 5.2: Tempo de detecção das faltas

Frequência	Amostras por Ciclo	Detecção(s)	Atraso(s)	Amostras de Atraso
1920	32	1.200E-1	0.022E-1	1
3840	64	1.190E-1	0.012E-1	1
7680	128	1.186E-1	0.008E-1	3

Pode-se verificar que o detector de faltas está funcionando adequadamente para amostragens descritas na tabela. O número de amostras de atraso para a amostragem de 128 amostras por ciclo pode ter sido maior pois como as amostras estavam mais próximas uma das outras, não foi possível verificar a variação com relação ao ciclo anterior, aumentando assim o tempo necessário para a detecção.

5.3 Cálculo da Distância da Falta

Nesta seção são avaliados os algoritmos de localização de faltas estudados. Para tal, será levado em conta a eficiência dos mesmos mediante a diversas condições de faltas. Serão variados a localização das falta, resistência de falta e ângulo de incidência.

Para a avaliação, será utilizada como medida de erro a seguinte fórmula:

$$\%erro = \frac{|dist.real - dist.estimada|}{comprimento da linha} \times 100\% \quad (5.1)$$

Os gráficos a seguir demonstram o desempenho de cada algoritmo, exibindo o erro de estimação com relação a distância real onde a falta foi aplicada.

5.3.1 Efeito da Resistência de Falta

Nas figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, pode-se observar o efeito da variação da resistência de falta nos respectivos valores de 0Ω , 17Ω , 50Ω , 100Ω , 150Ω e 200Ω . O ângulo de incidência foi fixado em 0° e o tipo de falta em Fase-Terra.

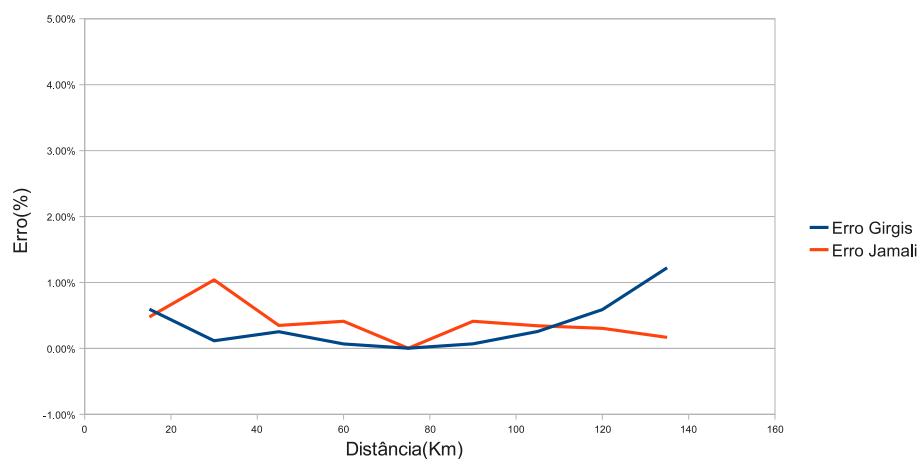


Figura 5.1: Resistência 0Ω , ângulo de incidência 0 , Falta Fase-Terra

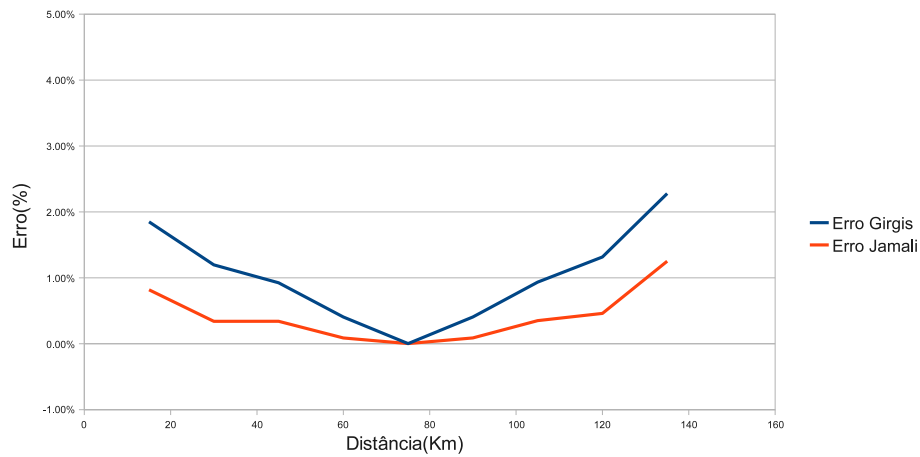


Figura 5.2: Resistência 17Ω, ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra

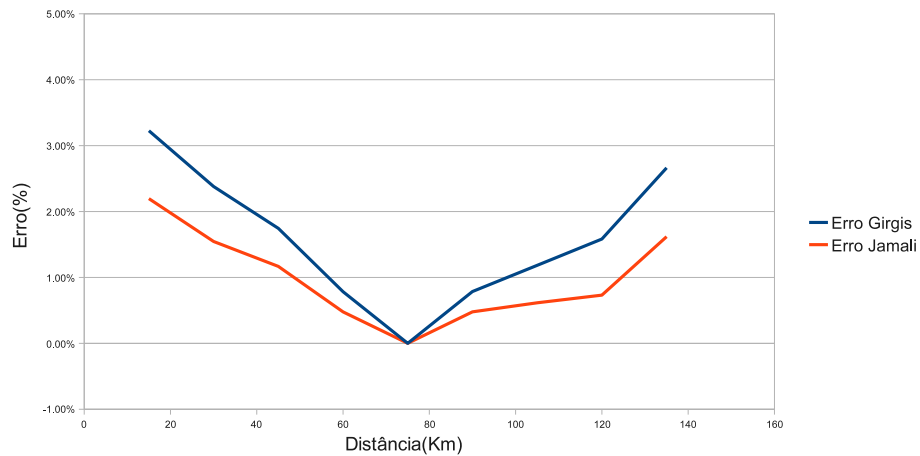


Figura 5.3: Resistência 50Ω, ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra

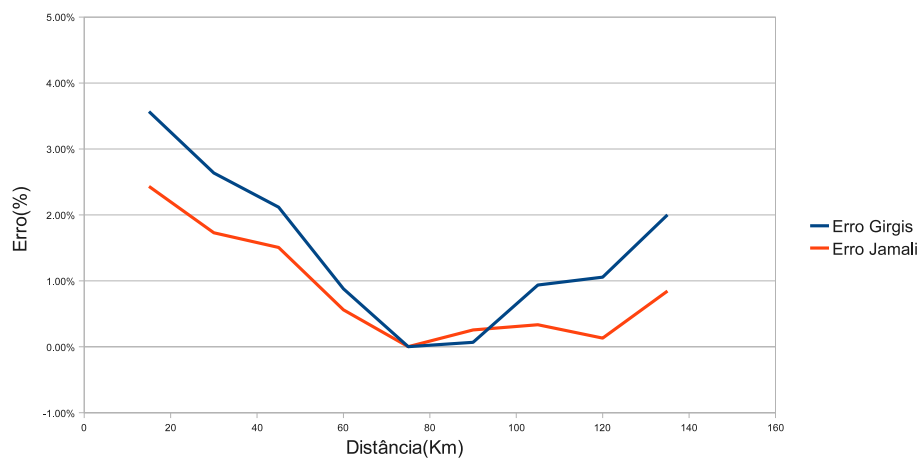


Figura 5.4: Resistência 100Ω, ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra

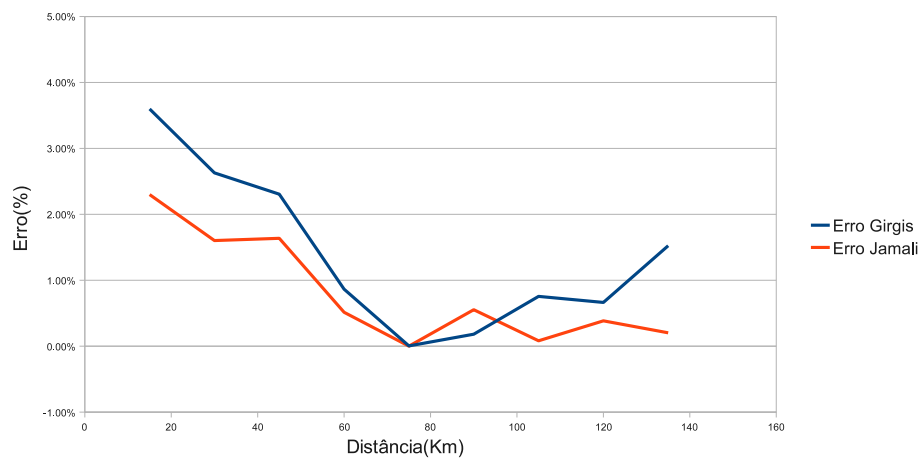


Figura 5.5: Resistência 150Ω, ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra

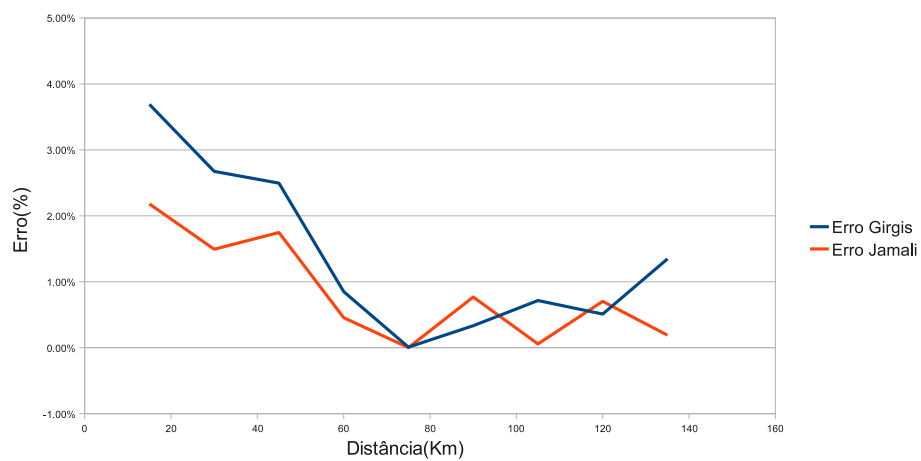


Figura 5.6: Resistência 200Ω, ângulo de incidência 0, Falta Fase-Terra

Pode-se observar que com o aumento da resistência de falta, o algoritmo de Jamali obteve uma ligeira vantagem com relação ao algoritmo de Girgis. Esta diferença foi ainda mais acentuada nos extremos da linha. Pode-se observar o fato curioso de os dois métodos terem erro zero exatamente no meio da linha.

5.3.2 Efeito do Ângulo de Incidência da Falta

Nas figuras 5.7 e 5.8 busca-se verificar a influência do ângulo de incidência da falta na performance dos algoritmos. Para tanto, foram aplicadas faltas com ângulo de incidência de 0° e 90° . A resistência e tipo de faltas em ambos os casos foram 17Ω e Fase-Terra respectivamente.

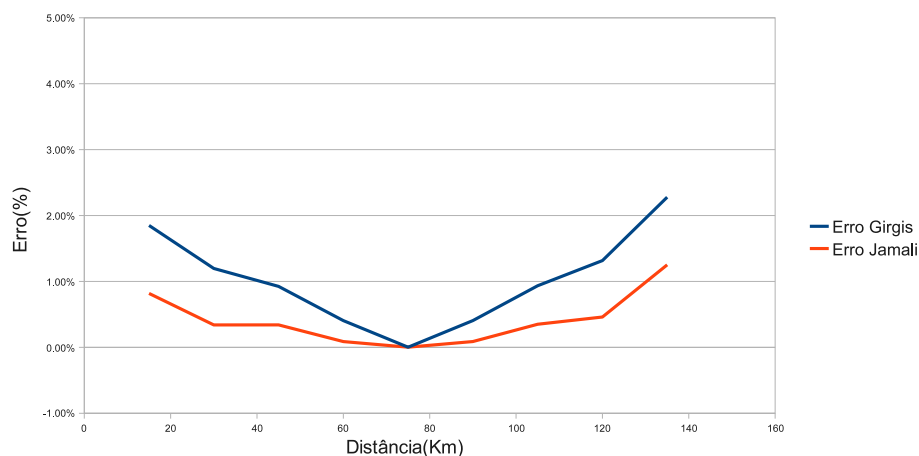


Figura 5.7: Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0 , Falta Fase-Terra

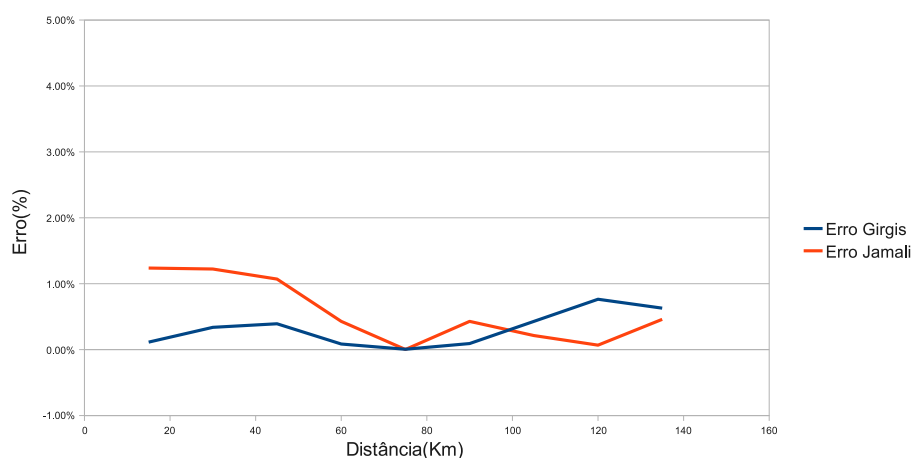


Figura 5.8: Resistência 17Ω , ângulo de incidência 90 , Falta Fase-Terra

Pode-se notar que o ângulo de incidência de 90° teve uma influência negativa no algoritmo de Jamali para distâncias inferiores a 50Km, aumentando o erro. Tal fato pode ser explicado pela descarga maior ocorrida nas faltas devido ao ângulo de incidência.

5.3.3 Efeito do Tipo de Falta

Nas figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 busca-se verificar a influência do tipo de falta nos desempenhos dos dois algoritmos. Com isso, foram aplicadas faltas Fase-Terra, Fase-Fase, Fase-Fase-Terra e Trifásicas. A resistência e o ângulo de incidência de falta foram fixados respectivamente em 17Ω e 0° .

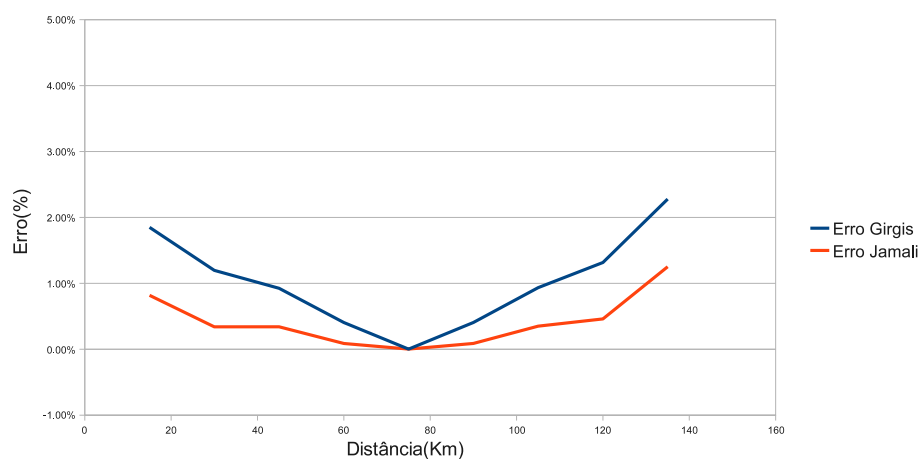


Figura 5.9: Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0 , Falta Fase-Terra

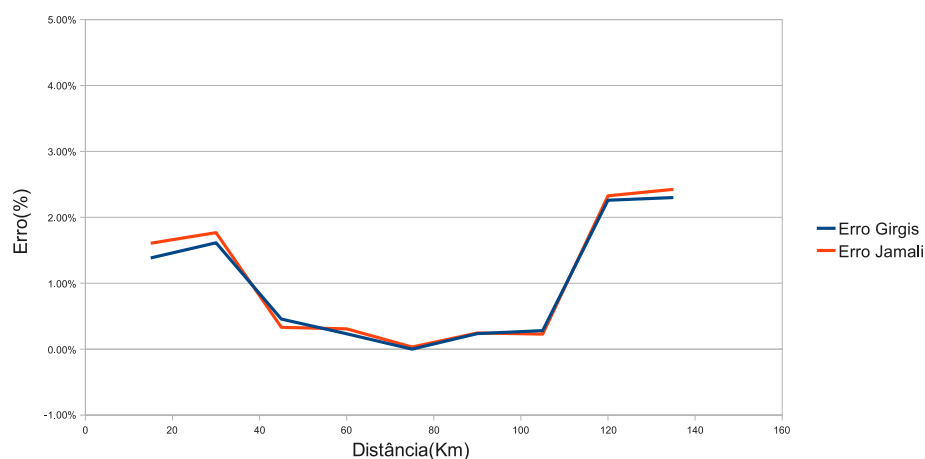


Figura 5.10: Resistência 17Ω , ângulo de incidência 0 , Falta Fase-Fase

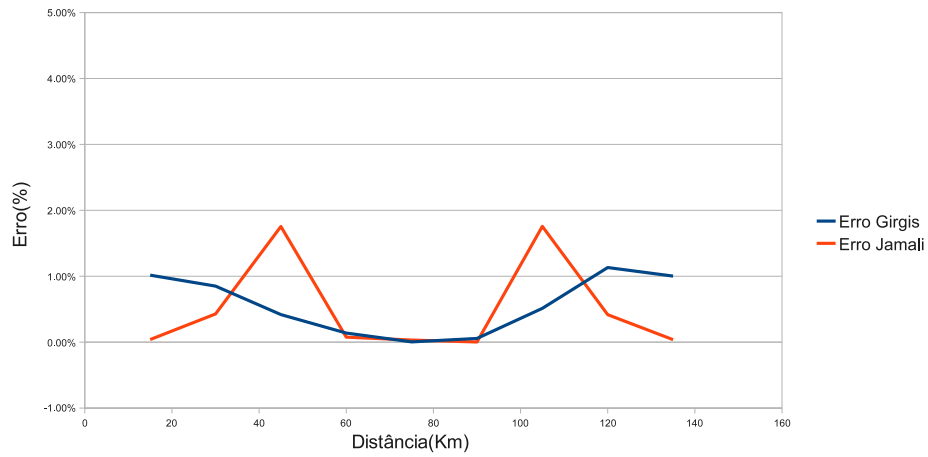


Figura 5.11: Resistência 17Ω, ângulo de incidência 0, Falta Fase-Fase-Terra

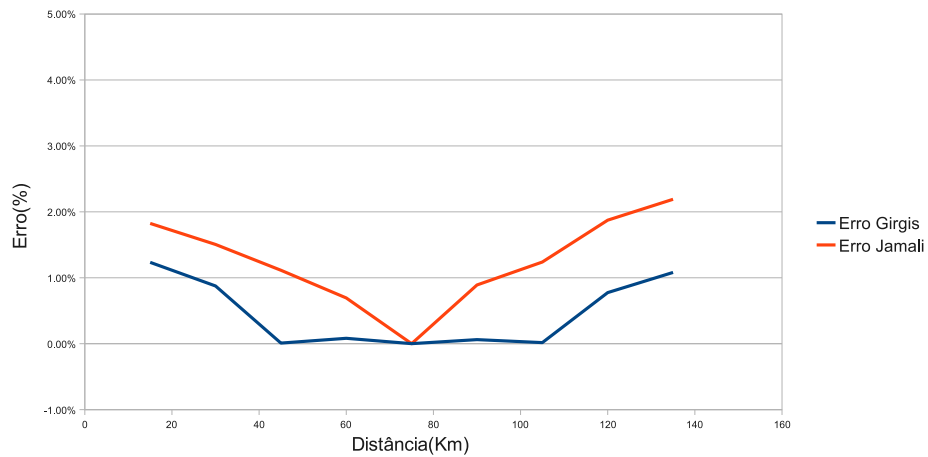


Figura 5.12: Resistência 17Ω, ângulo de incidência 0, Falta Trifásica

Pode-se observar que o algoritmo de Girgis leva vantagens em todas as faltas, exceto nas Faltas do tipo Fase-Terra. No entanto os dois algoritmos tiveram um desempenho parecido, visto que o erro esteve baixo.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o estudo, simulação e implementação em um sistema embarcado para localizadores de faltas digitais para linhas de transmissão. Foi feito o estudo e implementação de dois algoritmos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais e informações provenientes de dois terminais. Os dois algoritmos utilizam as componentes fundamentais extraídas pela TDF para a solução de equações provenientes de modelagens do sistema elétrico. O algoritmo de Jamali utiliza a modelagem completa da linha, incluindo a capacitância parasita, sendo melhor utilizado para linhas longas, enquanto o de Girgis utiliza apenas a impedância trifásica, sendo mais adequado a linhas curtas. Os algoritmos, além da localização de faltas, provêm a detecção e classificação de faltas, bem como a sincronização dos dados provenientes de dois terminais.

Foi apresentado o sistema elétrico estudado, bem como a sua simulação utilizando o *software* ATP. Com base na geometria e características dos condutores, as impedâncias série e trifásica foram calculadas pela rotina *Line Constants*. Estes parâmetros são de fundamental importância para a execução correta das simulações e algoritmos de localização de falta. Além disso, o processo de tratamento do sinal proveniente de uma linha de transmissão foi abordado, que inclui: TPCs, TCs, filtros *anti-aliasing* e conversão analógica digital.

Durante o desenvolvimento do trabalho, houve a possibilidade da implementação embarcada dos algoritmos na plataforma PC104. Os resultados foram obtidos pela execução dos algoritmos na plataforma mencionada. A plataforma PC104 se mostrou

bastante flexível pela possibilidade de execução de sistemas operacionais comuns, e que assim, possuíam suporte à execução de uma máquina virtual Java.

A comparação entre os dois algoritmos estudados foi feita por meio de gráficos, apresentando o erro de estimação em relação a distância real onde a falta foi aplicada. Observou-se que o algoritmo de Jamali tinha uma ligeira vantagem sobre o de Girgis, pelo fato de ser superior em faltas do tipo fase-terra. No entanto esta diferença poderia ser mais acentuada pela utilização de uma linha de transmissão mais longa, tornando assim os resultados mais tendenciosos.

Este projeto ainda está em desenvolvimento, e existe a necessidade da exploração dos recursos de aquisição de dados para que o localizador de faltas seja totalmente embarcado, ou seja, para que os dados processados sejam provenientes da placa de aquisição.

Este trabalho trouxe diversos resultados multidisciplinares: o aprofundamento dos conhecimentos em modelagem e simulação de sistemas elétricos, filtros analógicos, conversão analógica digital, sistemas embarcados, sistemas operacionais e principalmente sobre localizadores de falta.

6.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Possíveis trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de:

- Utilização de dados diretamente da placa de aquisição, utilizando caixas de teste;
- Comparação dos dois algoritmos utilizando uma linha longa;
- Implementação de outros algoritmos de localização de faltas;
- Implementação de outras funções de proteção.

Referências Bibliográficas

- [1] M. M. Saha and L. Erikson, “Microcomputer-Based Accurate Fault Locator with Remote-End Infeed Compensation,” in *IEE Conference Publication no 249*, pp. 193–198, 1985.
- [2] M. Silva, *Implementação de um localizador de faltas híbrido para linhas de transmissão com três terminais baseado na transformada Wavlet*. PhD thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [3] A. Girgis, D. Hart, and W. Peterson, “A new fault location technique for two- and three-terminal lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 98–107, 1992.
- [4] P. Moore, C. Öhlén, and R. Aggarwal, *Power System Protection*. The Electricit Training Association, 1995.
- [5] L. R. Gautier, “Localizadores digitais de faltas para linhas de transmissão de alta tensão,” Master’s thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- [6] “Pc/104 embedded consortium.” Último acesso em 5 de novembro de 2009.
- [7] B. Lian and M. Salama, “An overview of the digital fault location algorithms for the power transmission line protection based on the steady-state phasor approaches,” *Electric machines and power systems*, vol. 24, no. 1, pp. 83–115, 1996.
- [8] M. Sant and Y. Paithankar, “On line digital fault locator for overhead transmission line,” in *IEE proceedings*, vol. 126, pp. 1181–1185, 1979.
- [9] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, and T. Sakaguchi, “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*, pp. 1316–1323, 1981.
- [10] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, and T. Sakaguchi, “A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II-Laplace Transform Method,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 564–573, 1982.
- [11] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, “Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2892–2898, 1982.
- [12] L. Eriksson, M. Saha, and G. Rockefeller, “An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 2, pp. 424–436, 1985.
- [13] A. Ranjbar, A. Shirani, and A. Fathi, “A new approach for fault location problem on power lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 146–151, 1992.
- [14] A. Girgis and C. Fallon, “Fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorded data,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 1936–1945, 1992.
- [15] A. Johns, P. Moore, and R. Whittard, “New technique for the accurate location of earth faults on transmission systems,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, p. 119, 1995.
- [16] G. Purushothama, A. Narendranath, D. Thukaram, and K. Parthasarathy, “ANN applications in fault locators,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 23, no. 6, pp. 491–506, 2001.
- [17] M. Saha, K. Wikstrom, J. Izykowski, and E. Rosolowski, “New accurate fault location algorithm for parallel lines,” in *IEE conference publication*, pp. 407–410, London; Institution of Electrical Engineers; 1999, 2001.

- [18] X. Yibin, D. CHAN TAT WAI, and W. Keerthipala, “A new technique using wavelet analysis for fault location,” in *IEE conference publication*, pp. 231–234, IEE.
- [19] L. Soares, M. de Carvalho Jr, and H. de Oliveira, “Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Representação Wavelet Multiresolução,” in *Congresso Brasileiro de Automática*.
- [20] E. Schweitzer and J. Jachinbwski, “A Prototype Microprocessor-Based System for Transmission Line Protection and Monitoring,” in *Eight annual western protective relay conference, Spokane, Washington, USA*, 1981.
- [21] M. Sachdev and Agarwal, “Accurate Fault-Location Estimates from Digital Impedance Relay Measurements,” in *Proceedings of Third International Conference on Developments in Power System Protection, London, Apr*, pp. 17–19, 1985.
- [22] B. Jeyasurya and M. Rahman, “Accurate fault location of transmission lines using microprocessors,” in *Developments in Power Protection, 1989., Fourth International Conference on*, pp. 13–17, 1989.
- [23] A. Johns and S. Jamali, “Accurate fault location technique for power transmission lines,” *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution [see also IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution]*, vol. 137, no. 6, pp. 395–402, 1990.
- [24] A. Kalam and A. Johns, “Accurate fault location technique for multi-terminal EHV lines,” in *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991. APSCOM-91., 1991 International Conference on*, pp. 420–424, 1991.
- [25] R. Aggarwal, D. Coury, A. Johns, and A. Kalam, “A practical approach to accurate fault location on extra highvoltage teed feeders,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 874–883, 1993.
- [26] D. Novosel, D. Hart, E. Udren, and M. Saha, “Fault location using digital relay data,” *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 8, no. 3, pp. 45–50, 1995.
- [27] I. Zamora, J. Minambres, A. Mazon, R. Alvarez-Isasi, and J. Lazaro, “Fault location on two-terminal transmission lines based on voltages,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 1, pp. 1–6, 1996.

- [28] EEUG, *Alternative Transients Program Rule Book*. LEC, 1987.
- [29] J. Amon Filho and M. Pereira, *ATP Alternative Transient Program: curso básico sobre a utilização do ATP*. Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, 1996.
- [30] S. A. d. Souza, *Algoritmos genéticos aplicados à proteção e estimação de harmônicos em sistemas elétricos de potência*. PhD thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [31] G. Kinderman, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Volume 1*. Edição do Autor, 1999.
- [32] M. Oleskovicz, *Aplicação de redes neurais artificiais na proteção de distância*. PhD thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- [33] W. Stevenson Jr, *ATP Alternative Transient Program: curso básico sobre a utilização do ATP*. Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1974.
- [34] C. Serra, *Teoria e Projeto de Filtros*. 1993.
- [35] A. Phadke and J. Thorp, *Computer relaying for power systems*. 1988.
- [36] A. Oppenheim, A. Willsky, and S. Nawab, “Signals and systems,” 1997.
- [37] D. V. Coury, M. Oleskovicz, and R. Giovanini, *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessadores inteligentes*. Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, 2007.
- [38] L. Wedepohl, “Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems,” *Proc. IEE*, vol. 110, no. 12, pp. 2200–2212, 1963.
- [39] B. Eckel, *Thinking in JAVA*. Pearson Paravia Bruno Mondador, 2006.
- [40] M. Flanagan, “Flanagan’s java scientific library.”

Anexo A

A Plataforma PC104

PC104 (ou PC/104) é um padrão de computador embarcado controlado pelo PC/104 Consortium [6] que define um padrão de formato e de barramento. PC/104 é destinado a aplicações de computação embarcada em que se depende de uma aquisição de dados confiáveis em ambientes extremos como chão de fábrica. O formato PC104 foi originalmente concebido pela empresa Ampro, em 1987, e mais tarde padronizado pelo PC/104 Consortium em 1992. Uma tentativa de padronização correspondente ao PC104 pela IEEE foi feita como IEEE P996.1, mas nunca foi ratificada.

A.1 Formato

Ao contrário dos modelos ATX, que utilizam barramento PCI e são utilizados na maioria dos PCs, o modelo PC104 não tem plano de fixação e permite que seus módulos sejam empilhados juntos como blocos de construção. O empilhamento dos barramentos é mais robusto que as conexões de PCs normais. Isso é resultado de orifícios que ficam nos cantos dos módulos, permitindo que um seja fixado ao outro por meio de espaçadores.

O tamanho padrão das placas de acordo com as normas é de 3,55 X 3,775 polegadas (90,7 mm X 95,89 mm), enquanto a altura é restrita normalmente pelo tamanho dos conectores. Essa restrição de altura é feita para que cada módulo não interfira com seu vizinho, embora haja módulos comerciais que muitas vezes não respeitam o padrão.

As vistas frontais e laterais de um esquemático de PC104 podem ser observadas nas

figuras A.1 e A.2.

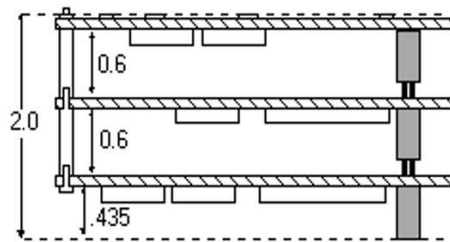


Figura A.1: Vista lateral de um esquemático de PC104

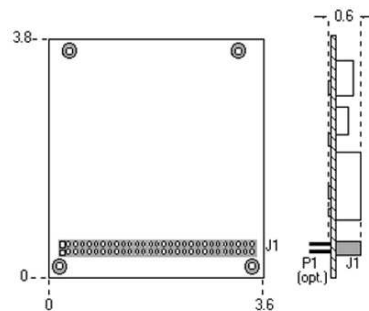


Figura A.2: Vista frontal de um esquemático de PC104

A.2 Vantagens da Plataforma PC104

Conforme foi mencionado anteriormente, a plataforma PC104 permite a implementação de computação embarcada em ambientes extremos, isso se deve as seguintes características:

1. Formato reduzido, permitindo assim menor área para danos;
2. Ausência de partes móveis (*Solid State Disk*);
3. Sistema de refrigeração *fan-less* (utiliza somente dissipador);
4. Excelente modularidade pelo formato de pilha;
5. *Watch dog timer* (ausente em computadores normais).

Além dessas características que provêm robustez à plataforma, esta permite o uso de sistemas operacionais convencionais, provendo assim flexibilidade no seu uso. Dentre os sistemas operacionais que podem ser utilizados estão:

- Linux;
- Windows CE/XP/2000
- DOS
- VexWorks
- QNX

Ainda é possível a utilização de sistemas operacionais de tempo-real, como alguns dos citados acima, para suprir a necessidades de aplicações de controle que tem requisitos de tempo. Tais características fazem da plataforma PC104 uma excelente base de desenvolvimento para aplicações industriais, pois une robustez com flexibilidade.

A.3 Plataforma PC104 Adquirida

No desenvolvimento das atividades, depois de análise de diversos fatores, foi possível a aquisição de um conjunto de 3 módulos PC104 para estudo e implementação embarcada dos algoritmos localizadores de faltas. O conjunto de módulos é composto por um módulo de processamento, um módulo de alimentação e um módulo de aquisição de dados analógicos. Os módulos adquiridos estão descritos a seguir:

A.3.1 Modulo de Processamento PFM-450I da AAEON

O módulo de processamento PFM-450I tem as seguintes características:

- Formato: PC/104;
- Processador: AMD Geode LX 800 (500MHz);
- Memória: 512 MB DDR SODIMM;
- Chipset: AMD LX800 + CS5536;

- Ethernet: Realtek RTL 8139DL, 10/100Base-TX;
- Armazenamento: Solid State Disk 4GB;
- Interfaces de Saída/Entrada: 4 Portas USB, RS232, Monitor, Teclado, Mouse.;
- Extras: *Watch-Dog Timer*.

O módulo pode ser observado na figura A.3.

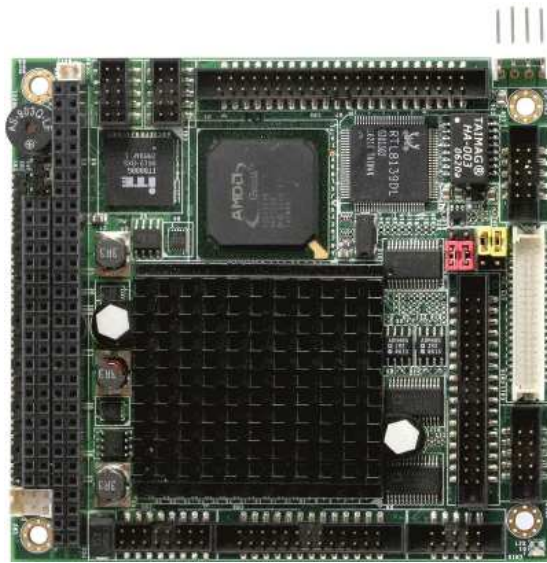


Figura A.3: Módulo de processamento PC104

A.3.2 Módulo de Alimentação PCM-P50 da AAEON

O módulo de alimentação PCM-P50 tem as seguintes características:

- Potência: 50W;
- Tensão de entrada: +6 V até + 40 V DC
- Tensões de saída: -5,+5,-12 e +12.

O módulo de alimentação pode ser observado na figura A.4.

A.3.3 Módulo de Aquisição PC104-DAS16JR/16 da ComputerBoards

O módulo de aquisição de dados analógicos PC104-DAS16JR/16 tem as seguintes características:

