Campus de São Carlos

**ALGORITMO BASEADO NA EQUAÇÃO DIFERENCIAL PARA PROTEÇÃO
RÁPIDA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Autora: Renata Araripe de Macêdo

Orientador: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 20/12/00

Ass.: *Renata Araripe de Macêdo*

**ALGORITMO BASEADO NA EQUAÇÃO
DIFERENCIAL PARA PROTEÇÃO RÁPIDA DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Renata Araripe de Macêdo

Dissertação apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Denis V. Coury

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017091

São Carlos
Outubro de 2000

Class.	TESE-EEEX
Curt.	4649
Tombo	024/01

st 1128339

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M141a Macêdo, Renata Araripe de
Algoritmo baseado na equação diferencial para
proteção rápida de linhas de transmissão / Renata
Araripe de Macêdo. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Denis V. Coury.

1. Sistemas de potência. 2. Proteção digital.
3. Equações diferenciais. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **RENATA ARARIPE DE MACÊDO**

Dissertação defendida e aprovada em 24-11-2000
pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **MARCELO BASILIO JOAQUIM**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **JOSÉ FRANCISCO RODRIGUES**
(UNESP - Campus de Bauru)

Profa. Associada **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Aos meus pais Fernando e Eva
e a minha irmã Larissa
com muito amor e carinho.*

Agradecimentos

Ao professor Dr. Denis Vinícius Coury pela oportunidade da pesquisa, incentivo, e intervenções críticas.

A Dra. Maria Cristina Tavares pelo apoio, amizade e incentivo indispensável à realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Marcelo Basílio Joaquim pela contribuição e atenção na implementação dos filtros.

Aos meus pais Fernando e Eva, minha irmã Larissa, com a qual tenho uma dívida especial pela incondicional suporte em todos os momentos da minha vida, e sobretudo pelo exemplo frente a situações as mais adversas possíveis.

A Nando, Simone e Nandinho por fazerem parte da minha nova família.

Aos amigos e colegas da pós-graduação: Patricia, Donato, Ênio, Renan, Kátia, e em especial a Mário pelo auxílio na parte de programação.

A Silvinha, que mesmo sem perceber contribuiu para minha formação pessoal em São Carlos.

A Fernanda, Dani, Michelle, Herta e Stael, mais que amigas, que venceram a barreira da distância física e estiveram comigo todo o tempo.

Aos amigos do mestrado, Stella, Rodrigo, Renata, Ceila, Trovão, Arlis, Cris e o pequeno Gui, que hoje são meus grandes amigos.

Ao Sandro pelo simples fato de estar próximo em todos os momentos.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica que de algum modo colaboraram no período da realização neste trabalho.

A Capes pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	I
SUMÁRIO	II
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	1
1.2 FUNÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	2
1.3 A NECESSIDADE DA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	4
1.4 EFEITOS DA FALTA EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	5
1.5 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DOS RELÉS.....	5
1.6 A EVOLUÇÃO DOS RELÉS	8
1.7 O RELÉ DE DISTÂNCIA	11
1.8 O ALGORITMO PARA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	11
1.9 A EQUAÇÃO DIFERENCIAL PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 EVOLUÇÃO DOS ALGORITMOS DE PROTEÇÃO.....	17
2.2 ALGORITMOS BASEADOS NO MODELO RL -SÉRIE DA LINHA DE TRANSMISSÃO	19

3	O HARDWARE PARA PROTEÇÃO DIGITAL	23
3.1	ARQUITETURA DE UM RELÉ DIGITAL	23
3.2	COMPONENTES BÁSICOS DE UM RELÉ DIGITAL	23
3.3	SUBSISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS	26
3.3.1	<i>Transdutores.....</i>	26
3.3.2	<i>Módulo de interface.....</i>	26
3.3.3	<i>Filtragem dos dados.....</i>	27
3.3.4	<i>O filtro passa-baixa Butterworth.....</i>	27
3.4	SUBSISTEMA DE CONVERSÃO	30
3.4.1	<i>Sample and Hold.....</i>	30
3.4.2	<i>Multiplexador</i>	31
3.4.3	<i>Conversão analógico/digital</i>	31
3.5	SUBSISTEMA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DO SINAL	32
4	ALGORITMO PARA A PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO EQUAÇÕES DIFERENCIAIS.....	33
4.1	DETECÇÃO DA FALTA	34
4.2	CLASSIFICAÇÃO DA FALTA	35
4.2.1	<i>Extração dos fasores fundamentais</i>	35
4.2.2	<i>Obtenção dos componentes superpostos</i>	36
4.2.3	<i>Método da classificação da falta.....</i>	37
4.3	LOCALIZAÇÃO DA FALTA UTILIZANDO-SE A TÉCNICA BASEADA EM EQUAÇÕES DIFERENCIAIS	
	39	
4.3.1	<i>Derivação da equação geral</i>	39
4.3.2	<i>Faltas fase-terra</i>	41
4.3.3	<i>Faltas fase-fase-terra e fase-fase.....</i>	42
4.3.4	<i>Faltas trifásicas</i>	43
4.3.5	<i>Solução da equação diferencial</i>	43
4.4	FILTRAGEM DAS ESTIMATIVAS	44
4.4.1	<i>O filtro de mediana.....</i>	45
5	SIMULAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO SOFTWARE ATP.....	47
5.1	UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ATP NA SIMULAÇÃO DE FALTAS AO LONGO DA LINHA DE TRANSMISSÃO	47
5.2	O SOFTWARE ATP.....	48
5.3	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO	48
5.4	MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO	49
5.5	PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO	51
5.6	A ROTINA <i>LINE CONSTANT</i>	52
5.7	ARQUIVO PRINCIPAL DE DADOS.....	52
6	UM ESQUEMA COMPLETO DE PROTEÇÃO DIGITAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO– TESTES REALIZADOS	57
6.1	SIMULAÇÕES REALIZADAS NO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO.....	57
6.2	FILTRAGEM DOS DADOS	58
6.3	DETECÇÃO DA FALTA	59

6.4	CLASSIFICAÇÃO DA FALTA	64
6.5	LOCALIZAÇÃO DA FALTA EM RELAÇÃO AO TERMINAL P	68
6.5.1	<i>Efeito do tipo de falta</i>	68
6.5.2	<i>Efeito da resistência e localização de falta</i>	78
6.5.3	<i>Efeito do ângulo de incidência da falta</i>	81
7	CONCLUSÃO	83
7.1	CONCLUSÃO	83
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXO A	90
	ANEXO B	98
B.1.	COMPONENTES DE CLARKE - $\alpha\beta 0$	98
B.2.	TEOREMA FUNDAMENTAL	99

Lista de figuras

FIGURA 1.1: UM SISTEMA DE PROTEÇÃO TÍPICO E SUAS ZONAS DE PROTEÇÃO.	7
FIGURA 1.2: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE PROTEÇÃO.	13
FIGURA 3.1: COMPONENTES BÁSICOS DE UM RELÉ DIGITAL	25
FIGURA 3.2: CURVAS DAS RESPOSTAS DO FILTRO BUTTERWORTH PASSA-BAIXA REAL.	28
FIGURA 3.3: UNIDADE DIGITAL DO RELÉ.	31
FIGURA 4.1: LINHA DE TRANSMISSÃO SOB FALTA A UMA DISTÂNCIA K DO RELÉ.	40
FIGURA 5.1 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO.	49
FIGURA 5.2: TOPOLOGIA DA TORRE ESTUDADA – LINHA TRIFÁSICA SIMPLES.	50
FIGURA 5.3: ARQUIVO DE ENTRADA DA ROTINA <i>LINE CONSTANT</i>	52
FIGURA 5.4: DIAGRAMA DO CIRCUITO SIMPLES PARA O SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO.	53
FIGURA 5.5: ARQUIVO DE ENTRADA DOS DADOS PARA O <i>SOFTWARE</i> ATP.	55
FIGURA 5.6: CIRCUITO ESTUDADO - TENSÃO EM P.	55
FIGURA 5.7: CIRCUITO ESTUDADO - CORRENTE EM P.	56
FIGURA 6.1: GRÁFICO DO MÓDULO DE CLASSIFICAÇÃO PARA DIFERENTES TIPOS DE FALTA COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FALTA DE 0° E RESISTÊNCIA DE FALTA DE $10\ \Omega$	67
FIGURA 6.2: GRÁFICO DO K_R ($K_R=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE $1\ \Omega$	69
FIGURA 6.3: GRÁFICO DO K_L ($K_L=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE $1\ \Omega$	69
FIGURA 6.4: GRÁFICO DO K_R ($K_R=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE $10\ \Omega$	70
FIGURA 6.5: GRÁFICO DO K_L ($K_L=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE $10\ \Omega$	70

FIGURA 6.6: GRÁFICO DO K_R ($K_R=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 50Ω .	71
FIGURA 6.7: GRÁFICO DO K_L ($K_L=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 50Ω .	71
FIGURA 6.8: GRÁFICO DO K_R ($K_R=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 100Ω .	72
FIGURA 6.9: GRÁFICO DO K_L ($K_L=0,4$) PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> A 60 KM DE P, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 100Ω .	72
FIGURA 6.10: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-A-TERRA</i> . .	73
FIGURA 6.11: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-B-TERRA</i> . .	73
FIGURA 6.12: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-C-TERRA</i> . .	74
FIGURA 6.13: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-AB</i> . .	74
FIGURA 6.14: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-AC</i> . .	75
FIGURA 6.15: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-BC</i> . .	75
FIGURA 6.16: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-ABT</i> . .	76
FIGURA 6.17: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-ACT</i> . .	76
FIGURA 6.18: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-BCT</i> . .	77
FIGURA 6.19: GRÁFICO DE K_L A 15 KM DE P ($K_L=0,1$) PARA UMA FALTA TIPO <i>FASE-ABC</i> . .	77
FIGURA 6.20: GRÁFICO DO K_L PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> , A 90 KM DO TERMINAL P DA LINHA ($K_L=0,60$) COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 1Ω E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 0° .	79
FIGURA 6.21: GRÁFICO DO K_L PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> , A 90 KM DO TERMINAL P DA LINHA ($K_L=0,60$) COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 10Ω E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 0° .	79
FIGURA 6.22: GRÁFICO DO K_L PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> , A 90 KM DO TERMINAL P DA LINHA ($K_L=0,60$) COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 50Ω E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 0° .	80
FIGURA 6.23: GRÁFICO DO K_L PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> , A 90 KM DO TERMINAL P DA LINHA ($K_L=0,60$) COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 50Ω E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 0° .	80
FIGURA 6.24: GRÁFICO DO K_L PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> , A 60 KM DO TERMINAL P DA LINHA ($K_L=0,40$) COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 1Ω E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 0° .	81
FIGURA 6.25: GRÁFICO DO K_L PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> , A 60 KM DO TERMINAL P DA LINHA ($K_L=0,40$) COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 1Ω E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 45° .	82
FIGURA 6.26: GRÁFICO DO K_L PARA UMA FALTA <i>FASE-A-TERRA</i> , A 60 KM DO TERMINAL P DA LINHA ($K_L=0,40$) COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 1Ω E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 90° .	82

Lista de Tabelas

TABELA 1.1: DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO.	2
TABELA 1.2: OCORRÊNCIA DAS FALTAS NO SISTEMA ELÉTRICO EM UM	4
TABELA 4.1: CLASSIFICAÇÃO DA FALTA QUANTO AO TIPO.....	38
TABELA 6.1: TESTE DA DETECÇÃO DA FALTA PARA FALTAS TIPO <i>FASE-TERRA</i>	60
TABELA 6.2: TESTE DA DETECÇÃO DA FALTA PARA TODAS AS FALTAS TIPO <i>FASE-FASE</i>	61
TABELA 6.3: TESTE DA DETECÇÃO DA FALTA PARA TODAS AS FALTAS TIPO <i>FASE-FASE-TERRA</i>	62
TABELA 6.4: TESTE DA DETECÇÃO DA FALTA PARA TODAS AS FALTAS <i>TRIFÁSICAS</i>	63
TABELA 6.5: TABELA PARA CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS TIPO AT.	65
TABELA 6.6: TABELA PARA CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS TIPO CT.	65
TABELA 6.7: TABELA PARA CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS TIPO AB.....	65
TABELA 6.8: TABELA PARA CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS TIPO BCT.....	66
TABELA 6.9: TABELA PARA CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS TIPO ACT.....	66
TABELA 6.10: TABELA PARA CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS TIPO ABC.	66

Lista de abreviaturas e siglas

A/D	- Analógico/Digital
AED	- Algoritmo da Equação Diferencial
ATP	- <i>Alternative Transient Program</i>
CC	- Corrente Contínua
CESP	- Companhia Energética de São Paulo
EMTP	- <i>Eletrromagnetic Transients Program</i>
ONS	- Operadora Nacional de Sistemas Elétricos
TC	- Transformador de Corrente
TP	- Transformador de Potencial
TDF	- Transformada Discreta de Fourier

Lista de símbolos

V	- tensão
i	- corrente
a, b, c	- fases da linha
$v_{a,b,c}$	- tensão na fase
$i_{a,b,c}$	- corrente na fase
i_0	- corrente de seqüência zero
R	- resistência por unidade de comprimento da linha
R^+	- resistência de seqüência positiva por comprimento da linha
R^0	- resistência de seqüência zero por comprimento da linha
R_f	- resistência de falta
R_s	- resistência própria
R_m	- resistência mútua
L	- indutância por unidade de comprimento da linha
L^+	- indutância de seqüência positiva por comprimento da linha
L^0	- indutância de seqüência zero por comprimento da linha

L_s	- indutância própria
L_m	indutância mútua
C^+	- capacitância de sequência positiva por comprimento da linha
C^0	- capacitância de sequência zero por comprimento da linha
t	- tempo em segundo
h	- intervalo de tempo entre amostras
n	- número da amostra
k	- distância entre o relé e a falta
k_r	- fator multiplicativo da resistência
k_l	- fator multiplicativo da indutância
Δx	- elemento da linha de transmissão
Hz	- unidade que exprime uma medida em <i>ciclos</i> por segundo, onde <i>ciclo</i> é o tempo que o processador demora em executar uma operação
f_c	- frequência de corte
P, T, Q, R	- barramentos tomados como referência no sistema estudado
FPT	- interruptores controlados por tempo, fechados para a aplicar uma situação
FTQ	de falta na linha de transmissão
FTR	
(A)	- chave de medida para obtenção da corrente nos pontos indicados
RF_i	- resistência de falta relacionada com a fonte
LF_i	- indutância de falta relacionada com a fonte
LT_{ii}	- porção da linha segmentada pelo nó contendo as resistências de falta
i	- 1, 2, 3

Resumo

MACÊDO, R. A. (2000). *Algoritmo baseado na equação diferencial para proteção rápida de linhas de transmissão*. São Carlos, 2000. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo baseado na modelagem do sistema de transmissão por meio de equações diferenciais, formuladas através dos parâmetros resistência e indutância da linha de transmissão a ser protegida. Nesta abordagem não é necessário que a entrada do algoritmo seja puramente senoidal, admitindo-se a presença de harmônicos e componentes CC presentes na falta como parte da solução do problema. Utilizou-se o *software* ATP para a modelagem do sistema elétrico estudado e a obtenção do conjunto de dados para análise e testes, permitindo-se a representação detalhada da linha de transmissão por meio das características dos condutores e suas respectivas disposições geométricas nas torres de transmissão, além da modelagem das diversas manobras e defeitos que os afetam, buscando-se uma aproximação com uma situação real. Com relação ao uso direto das equações diferenciais para a tarefa de proteção das linhas, constatou-se que sua aplicação não produz uma estimativa aceitável para ser usada em relés digitais por possuírem convergência em tempos normalmente superiores a dois ciclos. Assim, foi feita uma filtragem das respostas do algoritmo, proporcionando-se um diagnóstico mais rápido das estimativas. Para isso foi usado um filtro de mediana de 5ª ordem para o cálculo da localização da falta. Para todos os tipos de falta testados, a estimativa da localização da falta com o uso do referido filtro mostrou-se altamente satisfatória para a finalidade de proteção, convergindo em menos de um ciclo e meio de pós-falta, após a filtragem das estimativas, imprimindo maior velocidade de resposta para os relés digitais.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos; Proteção digital; Equação diferencial.

Abstract

MACÊDO, R. A. (2000). *An Algorithm based on the differential equation for fast protection of transmission lines*. São Carlos, 2000. 101 p. MSc Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo.

The present work shows the development of an algorithm based on the modeling of the transmission system utilizing differential equations. The differential equation for the line is solved having its resistance and inductance as parameters. In this approach there is no need for the algorithm inputs to be pure sinusoidal, allowing the presence of harmonic and DC components in the line as a part of the solution to the problem. The software ATP was utilized for the modeling of the electric system under study as well as data collection for analysis and tests. This representation allowed a detailed representation of the transmission line through the characteristics of the conductors and its geometrical disposition in the transmission towers, as well as the simulation of faults that usually affect the electric system, reproducing a realistic situation. The direct use of differential equations do not give an acceptable estimation as far as digital relays are concerned because they have convergence times over two cycles. In this sense, a 5th order median filter was utilized, providing faster diagnosis for the fault location estimation. The estimation of the fault location has proved to be a coherent criteria for the algorithm. For the fault types tested, the estimation for the fault location utilizing line parameters has shown itself highly satisfactory for protection purposes. This work has shown that the algorithm outputs converge in less than 1 and a half cycles after the fault occurrence, presenting a much faster response for digital relays.

Key Words – Power System, Digital Protection, Differential Equation.

1 Introdução

1.1 O sistema elétrico de potência

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema elétrico brasileiro era até recentemente formado por dois grandes sistemas, interligados através de linhas de transmissão, um reunindo as empresas das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e outro as concessionárias da região Nordeste e parte da região Norte.

Estes sistemas foram unidos por uma linha de transmissão, a Interligação Norte-Sul, passando a formar um único sistema interligado de âmbito nacional. Segundo a ONS – Operadora Nacional de Sistemas Elétricos, atualmente, apenas 3,9% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora desse sistema, em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica¹.

A opção pela intensa utilização do potencial hidroelétrico do país determinou as características singulares do sistema. As usinas desse tipo são construídas onde melhor se podem aproveitar as afluições e os desníveis dos rios, muitas vezes em locais distantes dos centros consumidores.

Assim, para atender ao mercado, foi necessário desenvolver um extenso sistema de transmissão, em que as linhas de transmissão criam uma complexa rede de caminhos alternativos para escoar, com segurança, a energia produzida até os centros de consumo.

¹ Dados cedidos pela Operadora Nacional de Sistemas Elétricos – ONS.

1.2 Função das linhas de transmissão

A energia elétrica é de suma importância na sociedade industrial moderna, e a única maneira de transportar esta energia, sob forma de eletricidade, é utilizando linhas de transmissão. Como as linhas de transmissão não podem armazenar energia elétrica gerada nas usinas, toda ela é convertida simultaneamente em carga, excetuando as perdas do sistema. Portanto, entende-se por transmissão, a transferência de energia através de linhas, entre um centro gerador e um centro consumidor [1].

A necessidade de um grande número de linhas de transmissão é justificada pelo fato de que:

- os centros produtores de energia, que são no Brasil, em sua maioria, usinas hidroelétricas, encontram-se afastados dos grandes centros consumidores, caracterizando assim, a necessidade do sistema de transmissão;
- um sistema de potência bem projetado compreende um grande número de estações geradoras interligadas através de linhas de transmissão que, em função da otimização dos recursos energéticos, aproveita a diversidade hidrológica das regiões, aportando algo em torno de 20% a mais de geração. Os dados sobre o sistema de transmissão são mostrados na Tabela 1.1 a seguir.

Tabela 1.1: Dados do Sistema de Transmissão Brasileiro².

Extensão das Linhas de Transmissão – 1998	
De 230 kV à 440kV	46.090 km
Em 500 kV ou acima	16.004 km
Elo de 600 kV CC	1.612 km
TOTAL	63.706 km

O sistema elétrico de potência é tradicionalmente dividido, para efeito dos estudos de planejamento, em três componentes principais: as usinas geradoras, o sistema de transmissão e o sistema de subtransmissão. Essa divisão é necessária devido ao grau de desagregação do mercado consumidor que cada uma dessas redes enxerga: a subtransmissão vê um mercado mais desagregado que a transmissão [1].

² Dados cedidos pela Operadora Nacional de Sistemas Elétricos – ONS.

Como o sistema de transmissão está em constante crescimento, torna-se difícil a caracterização das fronteiras existentes entre uma rede de transmissão e a de subtransmissão.

Assim, pode-se caracterizar a primeira como sendo aquela que possui tensão igual ou superior a 230 kV e a segunda como sendo a que engloba as tensões de 69 a 138 kV. Tal classificação não é rígida, porque a tensão de 138 kV também pode ser enquadrada como sendo de transmissão. Isso ocorre porque há linhas de transmissão em 138 kV que são importantes para dar continuidade de fluxo na eventualidade de contingências em linhas de tensão superior paralelas a elas.

O sistema de subtransmissão é a continuidade do sistema de transmissão e tem a finalidade de transmitir energia às pequenas cidades ou grupamentos de cidades, ao interior de grandes centros urbanos e a consumidores industriais de grande porte. Esse sistema reparte espacialmente, entre as subestações de distribuição, a energia recebida em grosso de subestações de transmissão. O sistema de distribuição não será enfatizado neste trabalho.

O sistema de transmissão, levando em consideração a aleatoriedade da disponibilidade dos seus componentes e consumo, a capacidade de produção e os recursos energéticos primários, tem como função:

- a distribuição espacial em grosso da energia gerada pelas usinas aos grandes centros consumidores e a alimentação de eventuais consumidores de grande porte;
- a interligação das usinas geradoras, bacias hidráulicas e regiões de características hidrológicas heterogêneas, de modo a atender os desequilíbrios regionais entre produção e consumo;
- a integração energética com os países vizinhos.

Ao se constituir um sistema de transmissão em malha, aumenta-se a confiabilidade do sistema elétrico, minimizando-se o seu custo total.

As interconexões elétricas internacionais assumem importância crescente, seja por benefício interno aos setores elétricos dos países, ou seja pela importância como instrumento de integração econômica. Essas interligações elétricas propiciam a compra e a venda de energia, a otimização do uso dos recursos de geração e o aumento da confiabilidade dos sistemas elétricos.

1.3 A necessidade da proteção de linhas de transmissão

A interligação do sistema elétrico de potência trouxe, além de vantagens econômicas, novos problemas para o sistema como um todo. Em sistemas interligados, as perturbações causadas por uma falta podem se estender a todo o sistema, pois a corrente que circula durante um curto-circuito é aumentada, obrigando a instalação de um sistema de proteção de maior capacidade [2].

Pela própria natureza do sistema elétrico de potência, o elemento mais vulnerável a falhas é a linha de transmissão, especialmente se for considerada sua dimensão física, visto que ela fica exposta a toda sorte e risco como intempéries, descargas atmosféricas entre outros.

A Tabela 1.2 apresenta uma idéia da ordem de ocorrência das falhas em um sistema elétrico, levando-se em consideração às suas próprias características³. Pode ser observado que cerca de 80% das interrupções acidentais no fornecimento de energia são originados nas linhas de transmissão, ou provocados por elas.

Tabela 1.2: Ocorrência das faltas no sistema elétrico em um sistema de 500 kV, num período de 10 anos.

Setor do sistema elétrico	Número de Faltas
Linhas de Transmissão	82
Circuitos disjuntores	4
Autotransformadores	6
Barramentos	1
Geradores	1
Falha humana	5

Uma das filosofias aplicadas a proteção de linhas de transmissão é a dos relés de distância. Esta filosofia será detalhada mais adiante.

³ Van Zee, W. R. e Felton, R. J. – 500kV System Relaying-Design and operating Experience; CIGRE- Paris, 1978, Paper no. 34-07 *apud* Coury, D. V. Um Estimador Ótimo Aplicado à Proteção Digital dos Sistemas Elétricos de Potência. São Carlos, 1987. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

1.4 Efeitos da falta em um sistema elétrico de potência

Entende-se por falta em linhas de transmissão como sendo uma falha total ou parcial na continuidade do fornecimento de energia elétrica. A ocorrência de uma falta pode ser um fenômeno interno ou externo ao sistema, isto é, sobretensões no sistema oriundas de quebra de isolador, raios, sobrecargas nos equipamentos, aumento repentino de carga, perda de grandes blocos de carga ou perda de geração.

Na ocorrência destes problemas, podem surgir [1]:

- danos ao sistema devido aos efeitos dinâmicos e térmicos da corrente de falta;
- descontinuidade do sistema;
- perda de sincronismo;
- redução das margens de estabilidade do sistema;
- danos aos equipamentos;
- desligamento de áreas que não estão sob falta, produzindo um efeito conhecido como efeito cascata.

A principal causa de faltas em linhas de transmissão são as descargas atmosféricas que podem ocorrer em pontos aleatórios do sistema. Se a falta não for eliminada rapidamente, os danos aos equipamentos que integram o sistema poderão ser elevados.

As faltas podem ser do tipo permanente ou transitória. As faltas permanentes, como o próprio nome já indica, são do tipo irreversíveis, ou seja, após a abertura do disjuntor, a continuidade do fornecimento de energia não poderá ser restabelecido. As faltas temporárias são aquelas que ocorrem sem haver danos físicos ao sistema, ou seja, após a atuação da proteção, o sistema poderá ser restabelecido sem problemas.

1.5 Características funcionais dos relés

Para um melhor entendimento do sistema de proteção, é necessário que se conheçam as características e o princípio de funcionamento dos relés.

O relé é a parte lógica do sistema de proteção. É um dispositivo, analógico ou digital, que conectado ao sistema elétrico é responsável pela detecção de condições intoleráveis ou indesejáveis ao sistema elétrico e pela tomada de decisão de abertura ou não dos disjuntores adequados a ele associados, a fim de iniciar o processo de retirada de operação da parte faltosa da linha, mantendo com isso a continuidade do fornecimento de energia elétrica e limitando os danos aos equipamentos.

Tecnicamente, o sistema de proteção é composto por um conjunto de relés de diferentes tipos ou não. Porém, para efeito de estudo, entende-se como sistema de proteção o conjunto formado por disjuntores, transdutores e relés, os quais serão definidos no capítulo 3.

O sistema de proteção não deve ser requisitado para operar durante o funcionamento normal do sistema elétrico, mas deve estar disponível para operar imediatamente após a detecção de condições anormais.

Assim, o relé deve ser capaz de estabelecer uma lógica entre os parâmetros de entrada do sistema de potência, sinais de tensão e corrente provenientes dos transdutores, e tomar a decisão correta de abertura, sendo sua decisão – *trip* – baseada diretamente na comparação ou combinação destes parâmetros com um valor predeterminado.

Dentro destes aspectos, existem algumas características básicas para a aplicação da proteção. Quando uma falta é detectada pelo relé, o sistema de proteção envia um sinal de *trip* para os disjuntores, os quais isolarão a menor porção possível do sistema sob falta. Para isto, os relés possuem uma área de operação abrangendo uma parte do sistema definida como zona de proteção do relé.

A lógica de operação do sistema de proteção divide o sistema de potência em várias zonas de proteção, cada uma requerendo seu próprio grupo de relés.

A Figura 1.1 apresenta a configuração de um sistema de potência que mostra a área do sistema envolvido e suas respectivas zonas de proteção. Esse diagrama mostra com detalhes a localização dos disjuntores, barras, geradores, transformadores e suas respectivas zonas de proteção onde:

1. gerador;
2. transformador
3. barramento;
4. linha de transmissão;
5. motor.

Figura 1.1: Um sistema de proteção típico e suas zonas de proteção.

A localização dos TCs, suprindo o relé, define as extremidades das zonas de proteção. A primeira zona de proteção usualmente abrange de 80 a 90% da impedância da linha de transmissão a ser protegida. A segunda é ajustada para 100% da linha e mais aproximadamente 50% da linha adjacente. A terceira é ajustada para 100% de ambas as linhas e mais aproximadamente 25% da linha adjacente. As proteções secundária e terciária (proteção de retaguarda) não serão abordadas neste trabalho [3].

Esta distribuição clássica define as zonas de proteção apenas se não for considerado o efeito do erro sobre o alcance da zona de proteção do relé, que é tipicamente da ordem de 5% da zona marcada [3]. As zonas de proteção são sobrepostas evitando-se a ocorrência de pontos cegos, ou seja, a possibilidade de existirem áreas do sistema sem proteção.

Em nenhum caso o sistema de proteção deve atuar se não existir defeito na sua zona de proteção. O acionamento de disjuntores que não estão associados à área sob falta pode causar mais danos ao sistema que a não atuação da proteção quando necessária. Nestas condições, é desejável que o releamento tenha um comportamento de acordo com algumas características básicas. Confiabilidade, seletividade, velocidade e sensibilidade são termos empregados para descrever estas características funcionais do relé [4].

- **Confiabilidade:** é entendida por duas características, confiabilidade e segurança. A primeira é definida como o grau de certeza que o relé irá operar corretamente. A segunda é definida como o grau de certeza de que o relé não irá operar em condições normais de operação. Então, confiabilidade indica a habilidade do relé de executar corretamente sua função quando requerido e evitar operação desnecessária durante a operação normal do sistema ou na presença de faltas fora de sua zona de proteção.
- **Seletividade:** é a habilidade do relé de isolar a menor parte possível do sistema que está sob falta do resto deste, operando os disjuntores adequados a ele associados o mais rápido possível, dentro da sua zona de proteção, para assegurar a máxima continuidade dos serviços com a retirada de operação do sistema apenas das linhas que estejam sob falta.
- **Velocidade de operação:** o tempo entre a incidência da falta e o comando de abertura do disjuntor dado pelo relé é determinado pela configuração do sistema e no caso da proteção digital, é tipicamente um ciclo de frequência do sistema ou uma fração deste. Assim, é desejado que o relé tenha uma velocidade de atuação necessária para assegurar um rápido isolamento da zona de proteção em que se encontra a falta, principalmente quando a necessidade de seletividade é envolvida.
- **Sensibilidade:** a proteção deve possuir a habilidade de distinguir entre alterações normais no sistema, como energização de transformadores ou aumento de carga no sistema, e anomalias causadas por curto-circuito, retirando de operação apenas a parte do sistema que se encontra sob falta, deixando o resto do sistema operando normalmente.

1.6 A evolução dos relés

Os primeiros relés projetados eram dispositivos eletromecânicos, mais conhecidos como relés convencionais. Este tipo de relé é projetado e construído com predominância dos movimentos mecânicos provenientes dos acoplamentos elétricos e magnéticos do seu núcleo. Seu princípio de operação pode ser resumido como sendo uma relação entre sua entrada, que geralmente são sinais de tensão e corrente, e sua saída, que consiste em estados de *on-off* dos contatos do relé. Estes relés utilizam forças de atração que são produzidas por acoplamentos eletromagnéticos entre a corrente e o fluxo de sua bobina em seu interior. Alguns relés têm seu princípio de operação baseado nas forças criadas pela expansão do metal de seus

contatos causada pelo aumento de temperatura durante a passagem da corrente. Nos relés eletromecânicos, as forças atuantes são criadas pela combinação dos sinais de entrada e a energia armazenada nas bobinas dos enrolamentos internos do relé [5].

Com a expansão dos sistemas de potência, surgiu a necessidade de sistemas de proteção mais confiáveis e com altos índices de desempenho. Isso foi alcançado com o desenvolvimento de relés utilizando-se dispositivos semicondutores, geralmente referidos como relés de estado sólido ou estático. O termo estático foi originado por oposição aos relés eletromecânicos, já que o relé estático é caracterizado essencialmente pela ausência de movimentos mecânicos, pois são construídos com dispositivos eletrônicos. Os primeiros relés estáticos colocados em operação no sistema elétrico causaram muitos problemas, produzindo operações indevidas. Esses problemas ocorreram principalmente porque eles, sendo eletrônicos, ficaram com sensibilidade muito apurada, e quaisquer transitórios ou pequenos harmônicos comuns ao sistema elétrico de potência já eram suficientes para sua operação.

Todas as características e funções avaliadas nos relés convencionais estão presentes nos relés de estado sólido. Esses dois tipos são constituídos por componentes que necessitam de baixa potência para operarem, porém possuem capacidade limitada na tolerância de temperaturas extremas e umidade [6].

Com o desenvolvimento da tecnologia digital, deu-se início ao desenvolvimento dos relés computadorizados ou digitais. Tal tipo de dispositivo é um relé gerenciado por um microprocessador específico, controlado por um *software*, onde os dados de entrada são digitais. Os princípios de funcionamento dos relés convencionais são uma referência para o seu desenvolvimento, desde que a entrada do relé consista em sinais de tensão e corrente provenientes do sistema elétrico. Portanto é necessário obter uma representação digital para esses sinais e, usando-se um algoritmo apropriado, a abertura dos disjuntores é conseguida.

Os relés digitais podem efetuar várias funções, tais como:

- proteção;
- supervisão de rede;
- transmissão de sinais;
- conexão com outros computadores;
- auto-supervisão;
- religamento dos disjuntores;
- obtenção de dados para relatórios.

Estes relés são extremamente rápidos em comparação com os seus antecessores, porém são muito susceptíveis a interferências eletromagnéticas, necessitando de filtros. São normalmente modulares e necessitam de fonte de alimentação.

A utilização dos relés digitais em substituição aos convencionais (eletromecânicos, estado sólido) oferece algumas vantagens importantes citadas a seguir [5]:

- **Custo:** o custo do relé é a sua principal consideração de aceitação; os primeiros relés computadorizados custavam de 10 a 20 vezes mais que os relés convencionais. Com a evolução dos processadores, esse custo diminuiu e ao mesmo tempo houve um aumento na sua capacidade de processamento. Estima-se hoje que o custo do relé computadorizado, incluindo o custo do *software*, seja equivalente ao custo de um relé convencional.
- **Auto-checagem e confiabilidade:** um relé digital pode ser programado para monitorar seu *software* e *hardware* continuamente aumentando sua confiabilidade, pois ele pode detectar qualquer mau funcionamento e retirar-se de operação, diminuindo, assim as chances de falha de operação. Essa característica do relé digital é o argumento mais forte em favor da digitalização das subestações.
- **Flexibilidade:** os relés conseguem efetuar uma revisão ou modificação em suas características já que estes podem ser programados. Com isso são capazes de executar várias funções como: medição e monitoramento de carga, tomada das tensões em transformadores de linhas de transmissões, controle de abertura e fechamento de disjuntores e chaves. Podem ainda prover proteção de retaguarda para outros dispositivos que venham a falhar. A função do relé só é requerida na ocorrência da detecção de uma condição anormal no sistema, ficando ele, na maior parte do tempo ocioso, podendo executar outras funções praticamente sem um custo adicional.
- **Interação do sistema:** computadores digitais fornecem uma maior interligação entre os componentes do sistema numa subestação. Como medição, comunicação, telemetria e controle, que são funções executadas em ambiente digital.
- **Velocidade de operação:** a redução do tempo de eliminação da falta é resultado da redução do tempo de operação dos relés digitais, reduzindo com isto danos aos equipamentos e aumentando a continuidade do sistema.

1.7 O relé de distância

Na proteção de linhas de transmissão são usadas diversas classes de relés. Os mais freqüentemente empregados são os relés de distância. Como a impedância por quilômetro da linha de transmissão pode ser considerada constante, o relé responde através da impedância aparente calculada entre a localização do relé e a localização da falta, obtida em função dos valores dos sinais de tensão e corrente registrados. Assim, como seu próprio nome sugere, o relé de distância mede a distância da falta, ou seja, ele reconhece a falta que ocorre dentro da sua zona de proteção, considerando que a impedância da linha à falta é menor do que o seu valor de ajuste predefinido [7].

A maioria dos relés de distância operam através de três quantidades elétricas: tensão, corrente e ângulo de fase. O uso desta terminologia serve para classifica-los quanto ao seu princípio de operação, em que a sua resposta à entrada é função da distância entre a localização em que ele se encontra e o ponto onde a falta ocorreu.

Os sinais de entrada para o relé digital são os sinais de tensão e corrente, obtidos através de transdutores. Esses sinais, no instante da falta, são formados por ondas distorcidas devido à presença de ruídos sob forma de componentes CC e harmônicos de alta freqüência introduzidos pela falta.

O relé digital de impedância, que estima a impedância da linha baseado nos componentes de freqüência fundamental dos sinais de tensão e corrente, encontra uma certa dificuldade na estimativa correta da localização da falta, devido aos ruídos presentes nos sinais, acarretando erros na estimativa da impedância em comparação com valores reais [8].

1.8 O algoritmo para proteção de distância de uma linha de transmissão

O releamento de linhas de transmissão constitui um esforço computacional muito grande dependendo do algoritmo utilizado, especialmente quando várias linhas são protegidas. Para minimizar este efeito, o procedimento de proteção da linha é dividido em tarefas distintas: detecção, classificação e cálculo da impedância aparente da linha, e por conseguinte, a localização da falta em relação ao relé. O tempo computacional pode ser economizado se o cálculo da impedância for executado somente após a falta ter sido detectada e classificada [9].

A Figura 1.2 mostra o fluxograma de um algoritmo de proteção de linhas, que envolve diferentes etapas. Inicialmente tem-se a entrada de dados com os sinais de tensão e corrente, devido à ocorrência de um curto-circuito ou alguma anomalia no sistema. O algoritmo de proteção do relé utiliza dados de pré-falta e pós-falta para a determinação da

posição da falta. Assim, torna-se necessário determinar o ponto amostral onde a ocorrência da falta teve início. Para isso, deve-se observar a distorção das formas de ondas de tensão e corrente provocada pela ocorrência de uma situação de falta. Essa variação é constatada pela magnitude ou ângulo de fase, comparando-se com as condições de entrada antes da sua ocorrência.

O algoritmo de classificação é incorporado como um dispositivo opcional que permite facilitar a restauração e manutenção da linha, pela identificação do tipo de falta e das fases envolvidas.

O cálculo da impedância aparente é necessário para a verificação se a falta está ou não dentro da zona de proteção do relé.

A etapa final constitui do sinal de *trip* mandado para os disjuntores convenientes para abertura e isolação da linha sob falta.

Figura 1.2: Fluxograma do algoritmo de proteção.

1.9 A equação diferencial para linhas de transmissão

O impacto dos desenvolvimentos modernos na tecnologia digital vem sendo sentido principalmente na engenharia de potência, que nos últimos anos vem desenvolvendo novas técnicas digitais aplicadas ao releamento de linhas de transmissão.

Um novo algoritmo para o cálculo da resistência e da indutância de uma linha de transmissão após a ocorrência de uma falta foi desenvolvido neste trabalho, baseado no modelo matemático de uma linha de transmissão de 400 kV. Essa aplicação requer amostras

digitalizadas dos sinais de tensão e corrente para serem analisadas pelo algoritmo que calcula a impedância aparente da linha, a fim de determinar se a falta ocorreu dentro da zona de proteção do relé ou não. No desenvolvimento deste trabalho, a determinação numérica da distância, pelo cálculo da impedância, está relacionado com o cálculo dos parâmetros da linha, ou seja, a sua resistência e sua indutância.

Foi constatado que, na maioria das aplicações, a linha de transmissão pode ser representada por um modelo de equação diferencial. Na equação 1.1 mostra-se a equação geral de uma linha para todo tipo de falta. Nesta, V e i são os valores amostrados dos sinais de tensão e corrente provenientes dos terminais do relé, e os valores R e L , a resistência e indutância da linha por quilômetro, respectivamente.

Calcula-se, portanto, a solução da equação diferencial descrita, onde k_r e k_l são o comprimento relativo da linha associados aos valores de resistência e indutância, respectivamente. Para uma falta na linha, os parâmetros k_r e k_l assumirão um valor entre 0 e 1, que representa a distância entre a falta e o relé.

$$V = k_r Ri + k_l L \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

Essa relação engloba o estado-estacionário e as condições transitórias da linha, isto é, os períodos de pré-falta e pós-falta do sistema. Essa equação é a base do algoritmo digital que é utilizado neste trabalho e será detalhado posteriormente.

Algumas considerações simplificadoras na equação 1.1 são:

- a linha é considerada perfeitamente transposta;
- a capacitância *shunt* da linha não é considerada;
- os transformadores de corrente e de potencial são considerados ideais.

O objetivo deste trabalho é demonstrar que o algoritmo implementado produz resultados satisfatórios. Para geração de dados para teste do referido algoritmo, empregou-se dados gerados por um simulador de transitórios eletromagnéticos, o ATP - *Electromagnetic Transient Program* [10].

O sistema foi testado em um modelo de linhas de transmissão utilizado para o cálculo dos parâmetros. A linha é um modelo típico da Companhia Energética de São Paulo – CESP de 440kV correspondente ao trecho Araraquara – Bauru.

No capítulo 2, é mostrada uma revisão bibliográfica, onde são apresentadas historicamente as várias técnicas de proteção digital, para a modelagem da linha de transmissão.

No capítulo 3, são apresentados conceitos fundamentais do relé digital e para o capítulo 4 reserva-se o desenvolvimento teórico do algoritmo com base na equação diferencial da linha de transmissão.

Os dados utilizados nos testes do algoritmo foram obtidos através do *software* ATP, como citado anteriormente. Sua utilização é apresentada no capítulo 5, e os resultados obtidos estão documentados no capítulo 6.

Termina-se a apresentação deste trabalho com as conclusões no capítulo 7 e a apresentação das referências bibliográficas no capítulo 8. Nos anexos, é apresentado detalhadamente o desenvolvimento matemático das equações diferenciais e das técnicas matriciais utilizadas para o desenvolvimento da modelagem de uma linha de transmissão trifásica.

2 Revisão bibliográfica

No final da década de 60, foi introduzido o uso de computadores digitais na proteção de linhas de transmissão. Nessa época, os benefícios de tal tecnologia não eram muito claros, e poucos estudos sobre o assunto foram considerados. Comparando a outras tecnologias, sua evolução aconteceu em um curto período de tempo e os avanços foram significativos. Os relés digitais eram confiáveis e rápidos o bastante para controlar enormes quantidades de dados, tornando sistemas críticos menos vulneráveis aos erros humanos.

Com o crescente desenvolvimento das técnicas digitais, um número de pesquisas voltada ao uso tais técnicas na proteção resultaram em vários trabalhos publicados sobre novos algoritmos específicos e, conseqüentemente, o desenvolvimento de novos *hardware* e *software* para releamento.

Todo algoritmo de proteção diverge entre si em relação ao método empregado nas suposições da natureza da forma de onda processada, e a maior parte deles, usada para proteção de linhas de transmissão, baseia-se no princípio do cálculo da impedância aparente da linha após a inserção da falta, onde a impedância é um conceito de estado-estacionário, referindo-se à relação entre as componentes fundamentais de frequência dos sinais de tensão e corrente.

Neste capítulo, é apresentado um levantamento bibliográfico da evolução dos diferentes métodos utilizados para o desenvolvimento de um algoritmo para o cálculo da impedância aparente da linha baseado na modelagem do sistema elétrico.

2.1 Evolução dos algoritmos de proteção.

Um dos primeiros trabalhos sobre este assunto foi proposto por Rockefeller [6], em 1969, onde o autor sugere que a lógica digital fosse desenvolvida para substituir as funções dos equipamentos analógicos de um sistema de potência em uma subestação. A técnica sugerida por Rockefeller é essencialmente uma adaptação dos princípios dos primeiros relés convencionais para a forma digital, onde os sinais de tensões e correntes amostrados são usados para estimar numericamente os valores de pico dos sinais faltosos para o cálculo da impedância da linha. A partir desta época, observa-se um grande número de estudos voltados para essa linha de pesquisa, desenvolvendo-se novas técnicas de proteção com a implementação de novos algoritmos.

Em 1971, Mann e Morrison [11], estudaram os erros envolvidos no cálculo da impedância utilizando diferenciação numérica, onde foi observado a presença de ruídos nas formas de onda de tensão e corrente provenientes dos transdutores, do conversor A/D e do módulo de *interface*. Os autores observaram que a presença de ruídos aumentava com a taxa amostral, e que, por outro lado, a necessidade de uma rápida detecção da falta implicaria numa taxa amostral razoavelmente alta. Foi sugerido, então, um algoritmo de proteção a distância baseado na predição dos valores de pico das formas de onda senoidais de tensão e corrente, usando-se valores amostrais e suas derivadas para o cálculo da impedância, onde a magnitude desta e o ângulo de fase eram comparados a valores constantes pré-definidos no programa para determinar se existia a condição de abertura. Neste método, a técnica de diferenciação empregada amplifica os harmônicos presentes nas formas de onda devido aos efeitos da capacitância *shunt* e dos transdutores, que podem ser eliminados com o uso de filtros digitais.

O método descrito por Rockefeller, Udren e Gilcrest [12], baseado no trabalho de Mann e Morrison, testou a praticidade de um esquema trifásico do método, que utilizava a primeira e a segunda derivada da equação diferencial. O uso das derivadas reduziu os efeitos da componente CC do sinal, mas também tendia a amplificar os harmônicos presentes nas formas de onda devido à capacitância *shunt* da linha e dos efeitos dos transdutores, como no caso anterior. Filtragens analógicas e digitais foram usadas com a intenção de minimizar tais problemas.

Em 1972, uma técnica similar, baseada na primeira e na segunda derivada foi desenvolvida juntamente por *Westinghouse and Pacific Gas & Electric Company* nos Estados Unidos [13]. Baseado nessas técnicas, um sistema experimental para proteção a distância de uma linha de transmissão foi instalado em uma subestação de 230 kV para testes de campo.

Em 1975, Makino e Miki [14] sugeriram o uso de duas amostras para predizer os valores de pico da forma de onda faltosa, e determinaram que o princípio de operação do relé e a filtragem digital devem detectar a falta em um tempo computacional pequeno. Já Gilbert e Shovlin [15] desenvolveram um algoritmo para a predição dos valores de pico usando três amostras sucessivas, $n-2$, $n-1$ e n . Em ambos os casos, os autores assumiram que as formas de onda da tensão e da corrente eram puramente senoidais. As equações eram sensíveis a transitórios de alta frequência.

Thorp, Phadke, Horowitz e Beerhle [16] discutiram uma relação entre os relés e a influência da sua velocidade e alcance na eliminação da falta em linhas de transmissão, onde os esforços para tornar os relés de impedância rápidos, inevitavelmente, fizeram com que a medida da impedância aparente da linha fosse inexata por causa da influência de fenômenos transitórios que acompanham a ocorrência de uma falta.

Outros desenvolvimentos, que aconteceram praticamente no mesmo período, tomavam como base a natureza não-senoidal da forma de onda da tensão e da corrente de falta, onde os esforços eram voltados para a extração das componentes fundamentais das formas de ondas corrompidas. Essa aproximação é baseada no uso dos métodos de Fourier. Em 1971, Ramamoorthy [17] propôs que as componentes fundamentais de tensão e corrente fossem extraídas dos transitórios presentes no sistema após a falta, correlacionando um ciclo de dados com amostras de referência de ondas fundamentais seno e co-seno armazenadas na memória do relé. Os dados utilizados foram de um ciclo completo.

Phadke, Ibrahim e Hlibka [18] investigaram a resposta de um relé de alta velocidade com base na teoria de componentes simétricas. O método utiliza uma relação entre os sinais de tensão e corrente em uma falta trifásica. Neste trabalho é mostrado que uma única equação é adequada para definir todos os tipos de faltas que possivelmente possam ocorrer em um sistema de potência. As tensões e correntes de fase são transformadas em componentes simétricas através de filtragem digital e, dependendo do tipo de falta, um modelo apropriado é composto de componentes simétricas das tensões e correntes para que a impedância de sequência positiva resultante seja a medida da distância entre o relé e a falta. Contudo, tal método de releamento é implementado no domínio da frequência, isto é, fasores das componentes simétricas de tensão e corrente são calculados e, com base neles, a impedância aparente é estimada. Consequentemente, o algoritmo não pode ser muito rápido. Outros trabalhos propuseram o uso de séries de Fourier para a determinação da corrente e da tensão fundamental [19].

Johns e Martin [20] sugeriram o algoritmo de Fourier aplicado nas formas de onda de tensão e corrente usando uma janela de dados de menos de um ciclo. A função Walsh foi

FALTA O INTERVALO p. 19-22

3 O *hardware* para proteção digital

3.1 Arquitetura de um relé digital

O diagrama esquemático do *hardware* de um relé digital para a proteção de linhas de transmissão, e o fluxo de informações entre as unidade em termos do processamento digital de sinais é apresentado neste capítulo [39].

A relação entre os sinais de tensão e corrente provenientes do sistema analisado independe de qualquer consideração digital. O sinal é convertido para a forma digital em intervalos de tempo constantes denominados intervalos de tempo entre amostras, h .

Como primeira etapa do esquema, tem-se a entrada de dados, que são os sinais de tensão e corrente contínuos no tempo, provenientes do sistema de potência. A seguir, os sinais são transformados na forma digital e interpretados pelo algoritmo. Infelizmente o processo de discretização introduz alguns erros nos sinais de entrada que precisam ser considerados causados pelos transdutores, saturação dos TCs, etc. Esses procedimentos serão detalhados a seguir.

3.2 Componentes básicos de um relé digital

O relé digital é consistido de subsistemas com funções bem definidas, as quais mostram os estágios de condicionamento a que os sinais de entrada do relé são submetidos desde a entrada até o processamento, e são classificados e compostos por três subsistemas fundamentais ilustrados na Figura 3.1: [40],[3]

- subsistema de condicionamento de sinais;
- subsistema de conversão do sinais;
- subsistema de processamento digital do sinais.

Os subsistemas de condicionamento e de conversão de sinais são comuns em quase todos os tipos de relé digital. O terceiro subsistema varia de acordo com a aplicação para a qual o relé foi projetado.

Cada um dos três subsistemas é formado por um número de componentes e circuitos que serão detalhados a seguir, onde:

D/O = *saída de dados*

D/I = *entrada de dados*

CPU = *Unidade Central de Processamento*

D/A = *Conversor digital - analógico*

A/D = *Conversor analógico – digital*

Figura 3.1: Componentes básicos de um relé digital

3.3 Subsistema de condicionamento de sinais

3.3.1 Transdutores

Como os relés operam com os sinais de tensão e corrente relativamente altos, estes devem ser atenuados a um nível compatível com os exigidos pelos processadores através de transformadores denominados por transdutores, ou simplesmente, transformadores de potencial ou TPs, e transformadores de corrente ou TCs.

Os transdutores provêm isolação entre a linha de transmissão e o relé e devem sempre possuir alta qualidade a fim de reduzir o erro nesta etapa, visto que o desempenho do relé depende da exatidão da reprodução da corrente de falta [4].

Os TPs e os TCs devem ser selecionados de acordo com dois critérios básicos: o nível de tensão do sistema e o nível de isolação requerido pelo sistema [4]. Neste trabalho foram utilizados TCs e TPs ideais, isto é: as características não lineares presentes nos dispositivos foram assumidas lineares.

O papel do TC é reproduzir proporcionalmente o sinal de entrada do seu circuito primário no seu circuito secundário, porém em escala reduzida – correntes de 1A a 5A. Na prática, essa reprodução é acompanhada de erros devido ao fato de seus elementos não serem ideais. Uma fonte de erro encontrada nesta etapa é a saturação dos enrolamentos do TC devido à presença da componente CC na corrente de falta.

Os TPs são transformadores destinados a transmitir o sinal de tensão a instrumentos de medida, controle e proteção. Eles reproduzem o sinal de entrada de tensão no seu circuito secundário com o menor erro possível, que deverá ser uma réplica proporcional da tensão do seu circuito primário – tensões de 110V a 220V [40].

3.3.2 Módulo de *interface*

Depois que os sinais de tensão e corrente do secundário dos TPs e TCs forem atenuados, eles entram em um módulo de *interface*, constituído basicamente por capacitores e transformadores de isolação, onde serão novamente atenuados até atingirem níveis de discretização. Esse módulo é composto por transformadores e filtros passa-baixa [20]. Uma outra alternativa para se atingir níveis discretos de sinais é a utilização de TCs auxiliares. Contudo qualquer erro no TC auxiliar irá contribuir para o erro total no processo de conversão analógica/digital, que deve ser o menor possível.

Os transformadores reduzem ainda mais os níveis de tensão da entrada e os filtros eliminam os componentes transitórios de alta frequência dos sinais de entrada, evitando assim um fenômeno conhecido como *aliasing*, que é a sobreposição de espectros. O fenômeno *aliasing* acarretará outra fonte de erro na conversão analógica/digital.

Nesta etapa é realizada ainda a conversão dos sinais da corrente para sinais de tensão, pois os computadores trabalham somente com estes sinais.

3.3.3 Filtragem dos dados

Após os dados atenuados, o passo seguinte é a filtragem analógica dos sinais amostrados, com a finalidade de reduzir os componentes de alta frequência presentes quando uma falta ocorre, evitando-se assim o fenômeno *aliasing* como descrito anteriormente [5]. As características dinâmicas dos filtros passa-baixa assim como suas características em regime, são de fundamental importância. Entre elas destacam-se [40]:

- **tempo de subida:** característica que indica quanto tempo a saída de um filtro passa-baixa demora para atingir o seu valor final;
- **overshoot:** característica que indica o quanto a saída do filtro irá ultrapassar o seu valor em regime;
- **tempo de acomodação:** que indica quanto tempo o filtro demora até acomodarse no seu valor em regime.

Todas as características acima atuam na resposta dinâmica dos sistemas de proteção digital. Deve-se ressaltar que, em sistemas de decisão rápidos, o processo de filtragem deve ser projetado com uma frequência de corte que proporcione o melhor desempenho e que ao mesmo tempo, não proporcione longos atrasos na filtragem [40].

Essa filtragem é realizada por um filtro passa-baixa *Butterworth*, no qual simula-se um filtro passa-baixa analógico real.

3.3.4 O filtro passa-baixa Butterworth

Escolheu-se a aproximação *Butterworth* para o filtro, por esta prover a máxima planura na faixa de passagem, com um decréscimo monotônico do ganho até a frequência desejada.

A diferença entre um filtro passa-baixa real e um filtro passa-baixa ideal mostra-se na faixa de passagem: no primeiro caso, a perda não é zero nesta faixa e, no final dela, a

perda não tende a infinito. A diferença caracteriza-se também pelo fato de que a transição da faixa de passagem é gradual no filtro passa-baixa real.

Na Figura 3.2, observa-se o comportamento de um filtro passa-baixa *Butterworth* real. Nela, é possível notar que, na prática, é impossível obter uma transição brusca da banda de passagem para a banda de rejeição.

Figura 3.2: Curvas das respostas do filtro Butterworth passa-baixa real.

O filtro passa-baixa *Butterworth* possui as seguintes características expressas pela equação 3.1.

$$\begin{aligned} |H(j\omega)| &= 1 & \text{para } 0 < f < f_c \\ |H(j\omega)| &= 0 & \text{para } f > f_c \end{aligned} \quad (3.1)$$

Na prática, um filtro real deveria possuir uma delimitação bem definida entre a banda de rejeição e a banda de passagem. No entanto, isso não ocorre devido ao fato de a curva da amplitude *versus* frequência não possuir pontos de demarcação bem definidos indicando os extremos da banda de passagem e de rejeição. Portanto, um filtro passa-baixa real é na realidade uma aproximação de um filtro ideal.

O filtro *Butterworth* projetado possui um decréscimo monotônico do ganho até a frequência desejada com atenuação de 50 dB, e tem como função de transferência a equação 3.2.

$$|H(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (3.2)$$

onde:

ω_c = frequência de corte;

n = ordem do filtro;

k = ganho .

O filtro *Butterworth* possui as seguintes características:

- possui uma resposta monotonicamente crescente para $f > 0$;
- a amplitude da resposta é aproximadamente plana nas bandas de passagem e de rejeição devido às primeiras $(2n-1)$ derivadas em $\omega = 0$ serem nulas, que ocorre também para f tendendo a infinito;
- a amplitude da resposta $\omega = 0$ é igual a k (ganho unitário).

Se a taxa amostral for escolhida tal que a frequência de amostragem seja menor que duas vezes a frequência máxima do sinal original, isto é, se a equação 3.1 não for satisfeita, pode ser visto, na prática, que existirá o erro *aliasing*, que causa um erro na análise como resultado da dificuldade na distinção entre as componentes de alta e baixa frequência. Em outras palavras, se a taxa amostral não satisfizer a equação, uma componente de baixa frequência, que não existe no sinal original, pode se tornar aparente no sinal amostrado.

Normalmente, é utilizado um filtro analógico passa-baixa para remover os sinais de alta frequência provenientes dos TCs e TPs. De fato, o teorema da amostragem requer que as componentes dos sinais analógicos acima de uma certa frequência sejam atenuadas para evitar erros no processo digital subsequente, como citado anteriormente. Essa é a função *anti-aliasing* executada por um filtro passa-baixa, que deve ser designada por uma frequência de corte, f_c , que rejeita sinais acima da frequência especificada [40].

Pelo teorema de Nyquist, a frequência amostral de um sinal deve ser, no mínimo, duas vezes maior que a maior frequência contida no sinal original, isto é :

$$f_c \geq 2f_m \quad f_{an} \geq 2f_c \quad (3.3)$$

Onde f_m é a frequência amostral e f_c é a maior frequência contida no sinal a ser amostrado.

3.4 Subsistema de conversão

3.4.1 *Sample and Hold*

Sendo o relé digital um dispositivo que trabalha com múltiplas entradas dos sinais de tensão e corrente amostrados, para que ele possa fazer uma correta análise do sinal, é desejável que todos os sinais sejam amostrados simultaneamente. Uma possível solução para esse problema seria o emprego de vários conversores A/D operando simultaneamente, disponibilizando assim os vários sinais digitais para a CPU do relé. Apesar desta ser uma solução fisicamente possível, ela é inviável economicamente, devido ao alto custo de um conversor A/D.

Uma solução alternativa para o problema é o emprego de vários circuitos conhecidos como *Sample and Hold* dispostos em conjunto com um circuito multiplexador. Neste esquema, o circuito *Sample and Hold* é responsável pela amostragem e armazenamento do sinal de entrada para que o conversor A/D possa realizar as várias conversões existentes para cada instante de amostragem. Esses vários circuitos em conjunto com um circuito multiplexador possibilitam uma solução economicamente viável ao processo de amostragem do sinal.

3.4.2 Multiplexador

Na operação de releamento digital é usualmente utilizado um multiplexador analógico que é um dispositivo que seleciona um sinal de um número de canais de entrada e o transfere para o canal de saída, permitindo a transmissão de vários sinais simultaneamente.

Um relé de distância requer, no mínimo seis canais de entrada, três tensões e três correntes. Contudo, a conversão dos sinais analógicos para digital leva em torno de $25\mu s$. Isso significa que para um relé com seis entradas, a última é convertida após $150\mu s$, que é o tempo entre a primeira e a sexta amostra, que é equivalente a um atraso de 3.23° para um sistema de potência de 60Hz [3].

3.4.3 Conversão analógico/digital

Para cada instante definido pelo *clock*, é executada uma conversão dos sinais analógicos de entrada para a forma digital através do conversor analógico/digital [5].

O processo típico da conversão de uma variável analógica para digital é mostrado na Figura 3.3, onde pode-se observar o arranjo *Sample and Hold*/Multiplexadores.

Figura 3.3: Unidade digital do relé.

3.5 Subsistema de processamento digital do sinal

O subsistema de processamento digital do sinal compreende o *hardware* e o *software* do relé. O *hardware* consiste em uma central de processamento, memórias e dispositivos de entrada e saída. O *software* compreende a parte lógica do relé e o princípio de operação acrescido de algumas rotinas que possibilitam o seu correto funcionamento, tais como: rotinas para a manipulação de dados de entrada e saída, rotinas para a autochecagem do *hardware*, etc. O *software* é implementado através de alguma linguagem de programação e compilado para o modelo de CPU presente em seu *hardware*.

O algoritmo usado varia de acordo com a aplicação do relé. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo baseado na equação diferencial de uma linha de transmissão.

Deve-se ressaltar então que os algoritmos desenvolvidos ao longo deste trabalho corresponderão ao módulo principal do *software*, isto é, ao princípio básico de operação.

4 Algoritmo para a proteção de linhas de transmissão utilizando equações diferenciais

Os dispositivos de proteção digital se utilizam de técnicas numéricas, que são implementadas em tempo real. Tais métodos são sempre específicos para cada tipo de proteção. Um crescente interesse vem sendo mostrado no uso de computação digital para proteção e aquisição de dados, requeridos em modernas subestações de alta tensão.

Como explicitado nos capítulos anteriores, os relés digitais foram inicialmente projetados durante o final dos anos 60. Desde então, muitos métodos foram propostos e diversos algoritmos foram desenvolvidos baseados na representação de uma linha de transmissão por suas equações de 1ª e 2ª ordem, conforme ilustrado no capítulo 2.

Uma alternativa rápida apresentada neste capítulo é o algoritmo fundamentado em equações diferenciais (AED), que podem trabalhar com quantidades não senoidais [38]. Investigações foram feitas motivadas pela possibilidade de que o AED poderia reduzir o tempo de operação de um relé de linha de transmissão. O tempo de operação deverá incluir detecção da falta, classificação da falta, localização da falta e decisão de *trip*.

Há um número de fatores que influenciam a seleção de um algoritmo de um relé específico de linha de transmissão. Segurança, integridade e rapidez devem ser consideradas. O AED é próprio para uma aplicação onde a estabilidade transitória é a consideração fundamental. Um AED rápido, juntamente com um disjuntor de alta velocidade, pode reduzir o tempo de extinção da falta para dentro do tempo crítico e, assim, manter o sistema estável. Por isso, tal relé necessita de um algoritmo que possa operar

rapidamente para uma falta dentro da 1ª zona de proteção. Um relé baseado em AED é especialmente próprio quando a velocidade de operação é crucial.

As sub-rotinas implementadas para este fim incluem métodos de filtragem, de detecção do ponto em que a falta ocorreu, classificação da falta quanto ao tipo e cálculo das equações diferenciais para extração dos parâmetros que determinarão se a falta pertence ou não à 1ª zona de proteção do relé.

Estas sub-rotinas foram implementadas por meio de uma linguagem estruturada, o Fortran. O algoritmo para o cálculo das equações diferenciais foi desenvolvido baseado em metodologias existentes na bibliografia, e foi adaptado aos casos de estudos sugeridos. Os dados de entrada foram obtidos através de simulações de diferentes tipos de falta através de um simulador digital, o ATP - *Alternative Transients Program*, que será descrito com maiores detalhes no capítulo 5.

A seguir, serão descritas as metodologias desenvolvidas para a implementação de um algoritmo para o cálculo das equações diferenciais de uma linha de transmissão de 440 kV. O método faz uso de ondas de tensão e corrente provenientes do sistema elétrico de potência proposto.

O estágio inicial do algoritmo é a obtenção dos dados digitalizados de tensão e corrente no terminal P da linha (figura 5.1, próximo capítulo), que são utilizados para a detecção da falta, extração dos fasores fundamentais, classificação da falta quanto ao tipo e, por último, cálculo da distância da falta por meio da solução das equações diferenciais da linha modelada. Esses estágios serão descritos detalhadamente a seguir.

4.1 Detecção da falta

As faltas causam distorções nas ondas de tensão e corrente, e fazem com que seus valores de pico variem em magnitude com relação às condições encontradas antes da ocorrência da falta.

O processo de detecção compara as amostras de corrente das três fases da linha simultaneamente com as amostras correspondentes a um ciclo anterior. Uma mudança significativa, correspondente a 5% do valor de pico, na magnitude das amostras entre os dois casos indica a ocorrência de uma falta. Espera-se uma confirmação da mudança com as duas próximas comparações, isto é, três amostras seguidas com mudança na magnitude determinam o ponto amostral de ocorrência da falta.

Deve ser mencionado que não é essencial sempre detectar a primeira amostra que corresponde ao tempo de inserção da falta. A detecção com um pequeno atraso de tempo irá simplesmente significar uma mudança no tempo de referência sem causar maiores erros [39].

4.2 Classificação da falta

4.2.1 Extração dos fasores fundamentais

As formas de onda de tensão e corrente de pós-falta podem apresentar transitórios eletromagnéticos tais como: componente de frequência fundamental, componentes transitórias de alta frequência e componentes CC. Logo, torna-se importante a extração precisa dos fasores fundamentais destas ondas, através do emprego de técnicas especiais de filtragem digital, de modo que se obtenha um alto grau de confiabilidade na classificação da falta.

O método utilizado foi a TDF [41] para um ciclo completo de dados, que produz a magnitude e o ângulo de fase do fasor fundamental $X_{v,i}(\omega)$ para 60Hz, com sua equação geral dada por:

$$X_{v,i}(\omega) = (2/N) \sum_{n=0}^{n=N-1} [x_{v,i}(n) \{ \cos(\omega n \Delta t) - \sin(\omega n \Delta t) \}] \quad (4.1)$$

onde:

N = número de amostras por ciclo

Δt = intervalo de tempo entre as amostras

$\omega = 2\pi 60$ frequência angular em Hz do fasor extraído

$x_{v,i}(\omega)$ = onda de tensão e corrente amostradas

Os fasores trifásicos fundamentais de tensão e correntes pós-falta podem ser determinados no terminal P, da linha PT como:

$$V'_{Pa} = X_{VaP}(\omega)$$

$$V'_{Pb} = X_{VbP}(\omega)$$

$$V'_{Pc} = X_{VcP}(\omega)$$

$$I'_{Pa} = X_{IaP}(\omega)$$

$$I'_{Pb} = X_{IbP}(\omega)$$

$$I'_{Pc} = X_{IcP}(\omega)$$

onde

V'_{Pi} = fasor de tensão pós-falta da fase i em P

I'_{Pi} = fasor de corrente pós-falta da fase i em P

Estudos realizados demonstram que a técnica TDF é bastante eficaz para a rejeição de componentes de alta frequência e providencia uma boa filtragem para os componentes CC.

4.2.2 Obtenção dos componentes superpostos

A ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão pode ser considerada como equivalente a uma superposição de tensões no ponto de falta, que é igual e oposta à tensão pré-falta em regime permanente. As componentes das tensões e correntes de pós-falta podem ser consideradas como constituídas por componentes de pré-falta em regime permanente e uma injeção de componentes de falta do seguinte modo:

$$V_p' = V_p + \Delta V_F$$

$$I_p' = I_p + \Delta I_F$$

Onde 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 [39].

Assim, a diferença entre os fasores no terminal P da linha é dada por:

$$V_{pa}'' = V_{pa}' + V_{pa}$$

$$V_{pb}'' = V_{pb}' + V_{pb}$$

$$V_{pc}'' = V_{pc}' + V_{pc}$$

$$I_{pa}'' = I_{pa}' + I_{pa}$$

$$I_{pb}'' = I_{pb}' + I_{pb}$$

$$I_{pc}'' = I_{pc}' + I_{pc}$$

onde:

$$V_{pi}'' = \text{componente superposta da tensão da fase } i \text{ no terminal P}$$

$$I_{pi}'' = \text{componente superposta da corrente da fase } i \text{ no terminal P}$$

A utilização de componentes superpostas, em vez de valores totais, providencia uma precisão adicional pelo fato de que erros causados pela carga de pré-falta são virtualmente eliminados.

4.2.3 Método da classificação da falta

O módulo de classificação da falta é incorporado ao algoritmo para permitir uma rápida identificação do ramo sob falta e, com isso, diminuir o tempo do cálculo dos parâmetros que identificaram a localização da falta.

O método é baseado na utilização das formas de onda de tensão e corrente em todos os terminais da linha de transmissão, os quais são obtidos no terminal P onde são filtradas usando-se a técnica da TDF, a fim de se obter uma medida dos seus fasores em regime permanente.

O algoritmo é independente do tipo de falta e insensível às variações da impedância da fonte ou da resistência de falta, e despreza totalmente a capacitância em derivação da linha.

A técnica utiliza componentes superpostas de tensão e corrente em vez de valores totais para classificar a falta. Ela realiza uma comparação entre os fasores de corrente superpostos e de seqüência zero fundamental I''_{pa} , I''_{pb} , I''_{pc} e I''_{p0} do terminal P da linha estudada, Tabela 4.1. Além disso, existe a necessidade de se determinar se a falta envolve ou não a terra, a fim de se escolher uma das duas equações disponíveis, que serão descritas a seguir [39]. Na prática, o monitoramento da magnitude da corrente de seqüência zero permite essa identificação, uma vez que esta magnitude cresce para faltas envolvendo a terra.

Se	Falta tipo
$I''_{pb} < K I''_{pa}$ e $I''_{pc} < K I''_{pa}$	Fase-a terra
$I''_{pa} < K I''_{pc}$ e $I''_{pc} < K I''_{pb}$	Fase-b terra
$I''_{pa} < K I''_{pc}$ e $I''_{pb} < K I''_{pc}$	Fase-c terra
$I''_{pc} < K I''_{pa}$ e $I''_{pb} \cong I''_{pa}$ e $I''_{p0} > I_{min}$	Fase-a-b terra
Caso contrário	Fase-a-b
$I''_{pa} < K I''_{pb}$ e $I''_{pc} \cong I''_{pb}$ e $I''_{p0} > I_{min}$	Fase-b-c terra
Caso contrário	Fase-b-c
$I''_{pb} < K I''_{pa}$ e $I''_{pa} \cong I''_{pc}$ e $I''_{p0} > I_{min}$	Fase-a-c terra
Caso contrário	Fase-a-c
$I''_{pa} \cong I''_{pb} \cong I''_{pc}$	Falta a-b-c

Tabela 4.1: Classificação da falta quanto ao tipo.

O parâmetro K é a razão entre as correntes de fase antes e depois da ocorrência da falta, e depende da configuração do sistema. Uma série de estudos mostra que para o sistema em questão, o valor de $K=0.3$ fornece uma correta classificação da falta para todos tipos de falta.

Na prática, é necessário também aplicar um pequeno *threshold* I_{min} para as medidas, devido à existência de linhas não balanceadas, transdutores, erros na filtragem, etc.

Este critério é aplicado para todos os casos estudados.

4.3 Localização da falta utilizando-se a técnica baseada em equações diferenciais

A abordagem fundamental do algoritmo é baseada no fato de que a linha de transmissão pode ser normalmente representada por equações de 1ª e 2ª ordem. Para o método proposto, deve-se assumir que:

- os TPs e TCs são ideais;
- a linha é perfeitamente transposta;
- a capacitância *shunt* da linha é negligenciada.

Nesta seção desenvolve-se a teoria utilizada no algoritmo para faltas do tipo *fase-terra*, *fase-fase*, *fase-fase-terra* e *trifásica*.

4.3.1 Derivação da equação geral.

O propósito do algoritmo estudado é descrever a dinâmica de uma linha de transmissão sob falta por meio de uma equação diferencial. Como citado anteriormente, deve-se assumir que o comprimento da linha seja tal que a capacitância *shunt* possa ser negligenciada, ficando a linha composta apenas por resistência e indutância.

A linha de transmissão trifásica, sob falta, pode ser modelada pela equação de 1ª ordem:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (4.1)$$

onde L e R são a indutância e a resistência da linha, e V e i são a tensão e a corrente medidas no relé, respectivamente. Para resolver a equação (4.1), foram introduzidos os parâmetros que limitarão a solução. Assumindo-se uma falta na linha, ilustrada pela Figura 4.1, a uma distância k do relé, os valores instantâneos da tensão e da corrente podem ser calculados pela equação 4.2.

Figura 4.1: Linha de transmissão sob falta a uma distância k do relé.

Assim, a equação para uma linha trifásica fica sendo: [18]

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = k_r R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + k_l L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

onde v_a, v_b, v_c, i_a, i_b e i_c são as tensões (v_i) e correntes (i_i) trifásicas nas respectivas fases a, b e c da linha, e os parâmetros k_r e k_l são o comprimento relativo da linha para a resistência e a indutância, respectivamente. Para uma falta na linha, estes parâmetros assumirão um valor entre 0 e 1, que representa a distância entre a falta e a localização do relé, que em condições ideais seriam iguais.

As matrizes R e L são as matrizes de resistência e de indutância para a linha, respectivamente. Assumindo-se uma transposição perfeita, tem-se que todas as fases possuirão a mesma impedância própria e mútua por comprimento da linha, R_s e R_m , respectivamente, como é mostrado na equação 4.3:

$$R = \begin{bmatrix} R_s & R_m & R_m \\ R_m & R_s & R_m \\ R_m & R_m & R_s \end{bmatrix} \text{ e } L = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde os índices s e m significam própria e mútua, respectivamente. Os índices 0 e $+$ são utilizados na representação do sistema através das componentes de sequência zero e positiva da linha, respectivamente [38].

A relação entre os parâmetros são:

$$\begin{aligned} L^+ &= L_s - L_m \\ R^+ &= R_s - R_m \\ L^0 &= L_s + 2L_m \\ R^0 &= R_s + 2R_m \end{aligned} \quad (4.4)$$

da equação 4.4 , segue que:

$$\begin{aligned} 3L_m &= L^0 - L^+ \\ 3R_m &= R^0 - R^+ \end{aligned} \quad (4.5)$$

Utilizando-se das equações 4.5 para rescrever a equação 4.2 tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = k_r R^+ \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + k_r (R^0 - R^+) \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} + k_l (L^0 - L^+) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

com a corrente de seqüência zero igual a:

$$i_0 = (i_a + i_b + i_c)/3 \quad (4.7)$$

O desenvolvimento matemático das equações apresentadas encontram-se no anexo A.

4.3.2 Faltas fase-terra

Assumindo-se uma falta *fase-terra* ocorrendo na fase “a” e a uma distância k do relé ao longo da linha, o valor instantâneo da tensão v_a , que é a tensão da fase a no ponto do relé, pode ser calculado pela da equação 4.8.

Os parâmetros k_r e k_l , que são os fatores multiplicadores da resistência e indutância, respectivamente para uma falta na linha, podem ser relacionados na forma:

$$v_a = k_r [R^+ i_a + (R^0 - R^+) i_0] + k_l \left[L^+ \frac{di_a}{dt} + (L^0 - L^+) \frac{di_0}{dt} \right] \quad (4.8)$$

e a expressão é rescrita em forma geral como:

$$v = k_r i_r + k_l \frac{di_l}{dt} \quad (4.9)$$

com

$$\begin{aligned} v &= v_a \\ i_r &= R^+ i_a + (R^0 - R^+) i_0 \\ i_l &= L^+ i_a + (L^0 - L^+) i_0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

As equações para o cálculo das faltas nas fases b e c podem ser formuladas a partir da equação geral 4.9.

4.3.3 Faltas fase-fase-terra e fase-fase

Considere-se uma falta entre as fases a e b a uma distância k . Se a falta possuir a conexão à terra, a corrente de sequência zero estará presente, ou seja: $i_0 \neq 0$, caso contrário, a corrente de sequência zero não estará presente, ou seja: $i_0 = 0$. Em ambos os casos, a equação é:

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \end{pmatrix} = k_r R^+ \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} + k_r (R^0 - R^+) \begin{pmatrix} i_0 \\ i_0 \end{pmatrix} + k_l (L^0 - L^+) \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_0 \\ i_0 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

e a expressão é escrita na forma geral como:

$$v = k_r i_r + k_l \frac{di_l}{dt} \quad (4.12)$$

com

$$\begin{aligned} v &= v_a - v_b \\ i_r &= R^+ (i_a - i_b) \\ i_l &= L^+ (i_a - i_b) \end{aligned} \quad (4.13)$$

As equações referentes aos demais tipos de faltas podem ser escritas a partir da equação 4.12.

4.3.4 Faltas trifásicas

Considerando-se uma falta trifásica simétrica a uma distância, temos $i_0 = 0$, e da equação 4.6 tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = k_r R^+ \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Usando-se a componente $\alpha\beta$ definida por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{com} \quad M = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

as quantidades trifásicas são condensadas em duas novas quantidades que são ortogonais entre si. No sentido de que as duas colunas de M são ortogonais, ter-se-á:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = k_r R^+ \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Na literatura, a transformação completa é sempre chamada de transformação- $\alpha\beta 0$ e então inclui a componente de sequência zero. Maiores detalhes são apresentados no anexo B.

4.3.5 Solução da equação diferencial

Para o tipo de falta *fase-terra*, *fase-fase* e *fase-fase-terra*, a solução geral das equações 4.9 e 4.12 é dada pelas equações 4.17a e 4.17b, utilizando-se da regra trapezoidal. Os dois parâmetros desconhecidos k_l e k_r são estimados por essas equações e utilizam três amostras consecutivas dos sinais de corrente e tensão de pós-falta [5].

$$\hat{k}_{r_n} = \frac{(i_{l_n} - i_{l_{n-1}})(v_{n-1} + v_{n-2}) - (i_{l_{n-1}} - i_{l_{n-2}})(v_n + v_{n-1})}{(i_{r_{n-1}} + i_{r_{n-2}})(i_{l_n} - i_{l_{n-1}}) - (i_{r_n} + i_{r_{n-1}})(i_{l_{n-1}} - i_{l_{n-2}})} \quad (4.17a)$$

$$\hat{k}_{l_n} = \frac{h}{2} \frac{(i_{r_n} - i_{r_{n-1}})(v_{n-1} + v_{n-2}) + (i_{r_{n-1}} + i_{r_{n-2}})(v_n + v_{n-1})}{(i_{r_{n-1}} + i_{r_{n-2}})(i_n - i_{l_{n-1}}) - (i_{r_n} + i_{r_{n-1}})(i_{l_{n-1}} - i_{l_{n-2}})} \quad (4.17b)$$

Para a falta trifásica, tem-se duas equações que são baseadas em quantidades ortogonais. Apenas duas amostras são necessárias para estimar os parâmetros e os cálculos para a solução geral da equação 4.16 usam a aproximação Tustin [39] para derivadas dos sistemas de equações em tempo-discreto.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha + i_{\alpha_{n-1}} & i_\alpha - i_{\alpha_{n-1}} \\ i_\beta + i_{\beta_{n-1}} & i_\beta - i_{\beta_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r R^+ \\ k_l L^+ \frac{2}{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha_n} + v_{\alpha_{n-1}} \\ v_{\beta_n} + v_{\beta_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

o sistema de equações é resolvido e as estimativas são:

$$k_{r_n} = \frac{1}{R^+} \cdot \frac{(i_{\beta_n} - i_{\beta_{n-1}})(v_{\alpha_n} + v_{\alpha_{n-1}}) - (i_{\alpha_n} - i_{\alpha_{n-1}})(v_{\beta_n} + v_{\beta_{n-1}})}{(i_{\alpha_n} + i_{\alpha_{n-1}})(i_{\beta_n} - i_{\beta_{n-1}}) - (i_{\alpha_n} + i_{\alpha_{n-1}})(i_{\beta_n} + i_{\beta_{n-1}})} \quad (4.19a)$$

$$k_{l_n} = \frac{h}{2} \frac{1}{L^+} \cdot \frac{-(i_{\beta_n} - i_{\beta_{n-1}})(v_{\alpha_n} + v_{\alpha_{n-1}}) + (i_{\alpha_n} + i_{\alpha_{n-1}})(v_{\beta_n} + v_{\beta_{n-1}})}{(i_{\alpha_n} + i_{\alpha_{n-1}})(i_{\beta_n} - i_{\beta_{n-1}}) - (i_{\alpha_n} + i_{\alpha_{n-1}})(i_{\beta_n} + i_{\beta_{n-1}})} \quad (4.19b)$$

A solução da equação diferencial resultará na distância em que a falta ocorreu na linha em termos percentuais. Os valores de k_l e k_r serão valores numéricos entre 0 e 1, conforme citado anteriormente e indicarão a existência da condição ou não de *trip* do disjuntor.

Foi desenvolvido um programa computacional em linguagem *Fortran* para testar o princípio descrito anteriormente para a proteção digital, fundamentado na modelagem da linha de transmissão, sendo os resultados obtidos apresentados posteriormente no capítulo 6.

4.4 Filtragem das estimativas

O uso direto do algoritmo acima não resulta numa estimativa aceitável em termos de proteção, e uma filtragem adicional da estimativa é necessária para proporcionar uma convergência mais rápida dos valores de k_l e k_r calculados.

Neste trabalho, foram implementados um filtro de média e um de mediana com o objetivo de se obter uma comparação entre os métodos de filtragem. Tais filtros possuem

características semelhantes, diferindo apenas na maneira em que a sua curva é suavizada. Melhores resultados foram conseguidos utilizando-se um filtro de mediana de 5ª ordem, por ele possuir a vantagem de rejeitar totalmente valores extremos. A sua teoria será apresentada a seguir.

4.4.1 O filtro de mediana

Assumindo-se um conjunto de amostras, pode-se descrever ou sumarizar este conjunto como um todo por meio de um valor típico. Uma possibilidade pode ser a descrição do conjunto pela mediana. Em estatística, os valores das medianas, que é o valor médio, após a ordenação do conjunto, podem ser usados para descrever tal conjunto de dados.

Assim, a mediana é definida em estatística como o valor central de uma sequência ordenada em ordem ascendente ou descendente, caso a amostra consista em um número ímpar de observações. Se a sequência consistir em um número par de observações, a mediana será a média aritmética dos dois valores centrais. Portanto, em uma sequência par, a mediana será um número que não é observado no conjunto de dados, a menos que os valores dos números centrais sejam iguais.

Se $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ é um conjunto de n observações. A mediana deste conjunto, denotada por $med(x)$, é dada por

$$med(x) = \begin{cases} x_{(v+1)} & n = 2v + 1 \\ \frac{x_{(v)} + x_{(v+1)}}{2} & n = 2v \end{cases}$$

onde: $x_{(i)}$ é a $i^{ésima}$ ordem estatística.

Se o conjunto for ímpar, existirá um único valor no meio. Se o conjunto for par, a mediana será o valor da média dos pares do meio.

Assim, a mediana é definida como o valor médio de uma série ordenada, onde existem n valores no conjunto.

O filtro de mediana é uma técnica de processamento digital de sinais desenvolvida por Tukey [43], que é útil para a supressão de ruídos em imagens e redução de picos, suavizando o gráfico. Em forma de uma dimensão, sua implementação requer uma janela móvel de dados englobando um número ímpar de amostras. A amostra central da janela é

substituída pela mediana do conjunto dentro da janela, rejeitando-se os valores extremos das amostras totalmente [42].

O filtro de mediana implementado foi um filtro de 5ª ordem, ou seja, o tamanho da janela de dados é um vetor formado por 5 valores de pós-falta. Esses valores são ordenados de forma crescente e o valor central do conjunto é a mediana da amostra ordenada. A mediana da janela irá formar o conjunto de dados da solução dos cálculos para a localização da falta.

Os resultados das subrotinas apresentadas anteriormente encontram-se no capítulo 6.

5 Simulações do sistema elétrico de potência através do *software* ATP

5.1 Utilização do *software* ATP na simulação de faltas ao longo da linha de transmissão

Oscilações causadas por distúrbios no sistema envolvem variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos, na grande maioria dos casos, inicialmente em regime permanente. Essas variações são provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores. Como consequência, a propagação destes distúrbios ao longo das linhas de transmissão afeta a análise do sistema de proteção.

O estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos pode ser realizado através de modelos em escala reduzida ou simuladores digitais. O modelo em escala reduzida oferece aplicações limitadas devido à necessidade de miniaturização dos equipamentos envolvidos na simulação do sistema elétrico. Já os simuladores digitais não apresentam qualquer limitação física na modelagem de qualquer sistema, e têm um custo muito menor que o da modelagem em escala reduzida, sendo capaz de representar situações transitórias, com dados precisos, semelhantes aos reais.

O *software* ATP é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância na realização de estudos de transitórios em sistemas de potência, ou mesmo em regime permanente, onde a topologia da rede a ser estudada não permite uma simples representação monofásica.

Com o objetivo de testar a aplicabilidade do algoritmo proposto, foi simulado um sistema de transmissão em condição de falta. Neste estudo foram consideradas as características dos condutores e suas respectivas disposições geométricas nas torres de transmissão.

São apresentados a seguir o *software* ATP utilizado na simulação do sistema sob falta e a configuração do sistema elétrico considerado neste estudo.

5.2 O *software* ATP

Um simulador digital muito utilizado em sistemas de potência é o EMTP - *Electromagnetic Transient Program*, desenvolvido na década de 60. O programa inicialmente trabalhava com simulações de circuitos monofásicos por meio de modelos de indutância, capacitância e resistência em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. O *software* foi evoluindo com alterações, estabelecendo um processo de desenvolvimento, tornando-o uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos. Hoje o *software* apresenta-se no mercado sob várias versões, como o ATP - *Alternative Transients Program*. Esta nova versão, na realidade, é apenas uma continuação das versões anteriores do programa EMPT. Tal programa é distribuído gratuitamente, tendo um número elevado de usuários no mundo inteiro.

O *software* ATP é utilizado tanto em áreas acadêmicas quanto em empresas de consultoria, indústrias de equipamentos e concessionárias em todo o mundo, permitindo uma representação detalhada do sistema elétrico a ser simulado, possibilitando que seus resultados sejam utilizados com grande aceitação para estudos de transitórios, aplicações em controle e proteção [10].

5.3 Configuração do sistema estudado

Para estudar a localização de falta, é necessário simular diferentes tipos de faltas ao longo da linha. Observa-se, na Figura 5.1, a representação do sistema elétrico estudado com a especificação das fontes, barramentos e comprimentos das linhas. Na ocorrência de uma falta na linha, tem-se trechos de linha antes e depois da falta. Utilizando-se do modelo de parâmetros distribuídos, calculou-se os parâmetros desejados de cada seção da linha em estudo.

Neste sistema, a linha pontilhada entre os barramentos P e T representa a área (zona de proteção primária) do sistema de transmissão a ser protegida.

Figura 5.1 - Representação do sistema elétrico analisado.

Todas as situações de falta consideradas foram aplicadas entre os terminais P e T, sendo que os sinais trifásicos analisados referenciados ao barramento P.

5.4 Modelagem da linha de transmissão

O desempenho de uma linha de transmissão depende quase exclusivamente de sua geometria, ou seja, de sua característica física. Estas não só ditam o seu comportamento em regime normal de operação, definindo os seus parâmetros elétricos, como também quando submetidas a sobretensões

Para a análise, adota-se uma linha de transmissão trifásica cuja topologia é apresentada na

Figura 5.2, com disposição horizontal e cabos pára-raios. Sua principal vantagem reside em permitir estruturas de menor altura para um mesmo condutor e vão do que as demais disposições, porém exige estruturas mais largas.

A linha de transmissão utilizada para o cálculo dos parâmetros é uma linha típica da CESP de 440kV. Essa topologia foi empregada em todo o trabalho. Os dados de seqüência obtidos, através da simulação no *software* ATP, foram utilizados em todos os estudos e são:

$$R^0 = 279,3570 \, \Omega$$

$$R^+ = 5,785215 \, \Omega$$

$$L^0 = 336,97665 \, mH$$

$$L^+ = 113,61 \, mH$$

$$C^0 = 1,33408 \, \mu F$$

$$C^+ = 2,292642 \, \mu F$$

Figura 5.2: Topologia da torre estudada – linha trifásica simples.

Esta linha corresponde ao trecho entre as cidades de Araraquara – Bauru. Seus dados são:

- Tensão base de 440kV
- Condutor de fase: cabo Grosbeak
raio externo : 12,57 mm
raio interno : 4,635 mm
resistência CC por subcondutor: 0,089898 Ω /km
- Cabo pára-raios: EHS 3/8"
raio externo : 4,572 mm
resistência CC : 4,188 Ω /km
- Resistividade do solo : 1000 Ω .m
- Comprimento da linha : 150 km
- Flecha a meio vão:
Fase: 13,43 m
Pára-raios : 6,4 m
- Permissividade do cabo pára-raios : 70

Uma vez que os parâmetros elétricos da linha foram calculados, a linha pode ser representada para iniciar-se a simulação, que diz respeito às situações de falta analisadas através do *software* ATP.

5.5 Parâmetros do sistema elétrico

As simulações envolvem a linha de transmissão como o principal componente dos cálculos e obtém-se sua melhor representação pelos cálculos com parâmetros de resistência, indutância e capacitância distribuídas ao longo da linha. Para o cálculo de parâmetros distribuídos, a linha de transmissão é considerada como uma associação de resistências e indutâncias em série e capacitância em derivação por unidade de comprimento.

Para a obtenção dos parâmetros de linha de transmissão, os cálculos são efetuados independentemente da frequência da rede, uma vez que esses parâmetros são considerados constantes em relação à mesma. Tal suposição não é absolutamente correta, pois sabe-se que tanto a resistência como a indutância variam com a frequência, devido ao efeito pelicular. Os parâmetros dependentes da frequência são importantes quando os efeitos de alta frequência são objetivos de estudo, o que não se refere ao caso analisado. Também nos cálculos, considera-se que as linhas de transmissão são transpostas, compensando os desequilíbrios dos campos magnéticos entre fases, cabos e pára-raios, estruturas e o solo sob a linha de transmissão.

Os parâmetros da linha de transmissão são calculados levando-se em consideração as características do condutor e suas respectivas disposições geométricas nas torres de transmissão. Para se manter a linha perfeitamente equilibrada, são usados condutores de mesmas características e igualmente espaçados.

O *software* ATP dispõe de uma rotina para o cálculo desses parâmetros, considerando as características dos condutores e suas respectivas disposições geométricas nas torres de transmissão. Na prática, os modelos de linhas com parâmetros distribuídos apresentam resultados satisfatórios e são utilizados na maioria dos estudos de transitórios elétricos, não sendo essencial a utilização de modelos com parâmetros variando com a frequência. Entretanto, a modelagem mais correta é aquela que leva em conta a variação dos parâmetros com a frequência. Assim, foram incorporados ao ATP alguns métodos para efetivar este tipo de modelagem [10].

5.6 A rotina *Line Constant*

A rotina *Line Constant* é uma rotina auxiliar que permite o cálculo dos parâmetros da linha de transmissão, que são a resistência, reatância e a susceptância de sequência positiva e zero, para uma determinada frequência, a partir das características dos condutores, cabos pára-raios, resistividade do solo e configuração geométrica da torre. O seu arquivo de entrada é mostrado na Figura 5.3.

Os resultados obtidos após o processamento da rotina *Line Constant* são devidamente inseridos no arquivo de entrada de dados de simulação dos transitórios do sistema elétrico, que será descrito a seguir.

```
BEGIN NEW DATA CASE
LINE CONSTANTS
METRIC
BRANCH PA BUSTA PB BUSTB PC BUSTC
C 1 2 3 4 5 6 7
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C Condutores da primeira fase
1 .316 .0899 4 2.514 -9.67 23.67 10.20
1 .316 .0899 4 2.514 -9.67 24.47 11.04
1 .316 .0899 4 2.514 -8.87 24.47 11.04
1 .316 .0899 4 2.514 -8.87 23.67 10.20
C Condutores da segunda fase
2 .316 .0899 4 2.514 -0.40 27.27 13.84
2 .316 .0899 4 2.514 -0.40 28.07 14.64
2 .316 .0899 4 2.514 0.40 28.07 14.64
2 .316 .0899 4 2.514 0.40 27.27 13.84
C Condutores da terceira fase
3 .316 .0899 4 2.514 8.87 23.67 11.24
3 .316 .0899 4 2.514 8.87 24.47 11.20
3 .316 .0899 4 2.514 9.67 24.47 10.20
3 .316 .0899 4 2.514 9.67 23.67 11.24
C Condutores dos cabos pára-raios
0 .5 4.188 4 0.914 -7.51 35.00 28.60
0 .5 4.188 4 0.914 7.51 35.00 28.60
BLANK card ending conductor cards within "LINE CONSTANTS" data
C 1 2 3 4 5 6 7
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1000. 600.00 1 1 0
BLANK card ending frequency cards of "LINE CONSTANTS" data
BLANK card ending "LINE CONSTANTS" data cases
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK card ending all EMTP cases
```

Figura 5.3: Arquivo de entrada da rotina *Line Constant*.

5.7 Arquivo principal de dados

O arquivo de entrada do software ATP é formulado a partir dos resultados obtidos pela rotina *Line Constant*, que são os valores numéricos dos parâmetros que representam o sistema elétrico simulado.

A Figura 5.4 apresenta um esquema do sistema elétrico modelado no ATP, composto por geradores (com valores especificados em p.u.), barramentos, linhas, chaves e resistência de faltas, que irão simular as situações desejadas. O arquivo de entrada deste circuito para o

software ATP é apresentado na Figura 5.5 que contém informações sobre o passo de integração, tempo máximo de simulação, frequência de saída de resultados, etc.

Para o processamento dos casos, cada linha foi dividida por chaves em dois trechos que simulam o ponto de aplicação da falta. Estas chaves são deslocadas ao longo das linhas simulando faltas em toda sua extensão, bastando para isto que os trechos antes e depois de cada chave sejam alterados. As variações dos parâmetros considerados podem ser resumidas por :

- a localização da falta;
- a resistência de falta;
- instante de falta (ângulo de incidência);
- tipo de falta.

Figura 5.4: Diagrama do circuito simples para o sistema elétrico estudado.

Figura 5.5 apresenta a entrada de dados para o software ATP para o caso estudado.

```

BEGIN NEW DATA CASE
2.0000-5.1000000
      50      50      1      1      1      1
$DISABLE

RENATA01

$ENABLE
$VINTAGE, 1
  FTQA      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FTQB      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FTQC      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FPTA      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FPTB      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FPTC      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FTRA      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FTRB      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  FTRC      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
-1T1A      90A      1.86238E+00 2.24651E+00 8.89387E-03 4.00000E+01 0 00
-2T1B      90B      3.85681E-02 0.75740E+00 1.53842E-02 4.00000E+01 0 00
-3T1C      90C
-190A      QA      1.86238E+00 2.24651E+00 8.89387E-03 4.00000E+01 0 00
-290B      QB      3.85681E-02 0.75740E+00 1.53842E-02 4.00000E+01 0 00
-390C      QC
$VINTAGE, 0
51Q1A      GERQA      .42775 1.29346E+01
52Q1B      GERQB      1.8869 5.70600E+01
53Q1C      GERQC
$VINTAGE, 1
$VINTAGE, 0
51GERPA      PA      .38498 1.16414E+01
52GERPB      PB      1.6982 5.13500E+01
53GERPC      PC
$VINTAGE, 1
-1P1A      166A      1.86238E+00 2.24651E+00 8.89387E-03 7.50000E+01 0 00
-2P1B      166B      3.85681E-02 0.75740E+00 1.53842E-02 7.50000E+01 0 00
-3P1C      166C
-1166A      T0A      1.86238E+00 2.24651E+00 8.89387E-03 7.50000E+01 0 00
-2166B      T0B      3.85681E-02 0.75750E+00 1.53842E-02 7.50000E+01 0 00
-3166C      T0C
-1T2A      210A      1.86238E+00 2.24651E+00 8.89387E-03 5.00000E+01 0 00
-2T2B      210B      3.85681E-02 0.75740E+00 1.53842E-02 5.00000E+01 0 00
-3T2C      210C
-1210A      RA      1.86238E+00 2.24651E+00 8.89387E-03 5.00000E+01 0 00
-2210B      RB      3.85681E-02 0.75740E+00 1.53842E-02 5.00000E+01 0 00
-3210C      RC
$VINTAGE, 0
51R1A      GERRA      .40520 1.23000E+01
52R1B      GERRB      1.7876 5.41000E+01
53R1C      GERRC
$VINTAGE, 1
$VINTAGE, 0
BLANK card terminating network
  TA      T1A      MEASURING      0
  TB      T1B      MEASURING      0
  TC      T1C      MEASURING      0
  90A      FTQA      1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
  90B      FTQB      1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
  90C      FTQC      1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
  QA      Q1A      MEASURING      0
  QB      Q1B      MEASURING      0
  QC      Q1C      MEASURING      0
  PA      P1A      MEASURING      1
  PB      P1B      MEASURING      1
  PC      P1C      MEASURING      1
  166A      FPTA      1.620E-02 1.000E+02 0.000E+00      0
  166B      FPTB      1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
  166C      FPTC      1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
  T0A      TA      MEASURING      0
  T0B      TB      MEASURING      0
  T0C      TC      MEASURING      0
  TA      T2A      MEASURING      0
  TB      T2B      MEASURING      0
  TC      T2C      MEASURING      0

```

210A	FTRA	1.000E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
210B	FTRB	1.000E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
210C	FTRC	1.000E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
RA	RIA				MEASURING	0
RB	RIB				MEASURING	0
RC	RIC				MEASURING	0
BLANK card terminating switches						
14GERQA	0	3.591E+05	6.000E+01	0.000E+00	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERQB	0	3.591E+05	6.000E+01	-1.200E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERQC	0	3.591E+05	6.000E+01	1.200E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERPA	0	3.591E+05	6.000E+01	2.000E+01	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERPB	0	3.591E+05	6.000E+01	-1.000E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERPC	0	3.591E+05	6.000E+01	1.400E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERRA	0	3.233E+05	6.000E+01	1.000E+01	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERRB	0	3.233E+05	6.000E+01	-1.100E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02
14GERRC	0	3.233E+05	6.000E+01	1.300E+02	0	-1.000E+00 1.000E+02
BLANK card terminating sources						
TOA TOB TOC						
BLANK card terminating outputs						
BLANK card terminating plots						
BEGIN NEW DATA CASE						

Figura 5.5:Arquivo de da entrada dos dados para o software ATP.

Nas Figuras 5.6 e 5.7, são apresentadas formas de onda de tensão e corrente no terminal P, resultados de uma simulação de uma falta fase-a-terra localizada no meio da linha entre os terminais P e T, onde as distorções provocadas pela inserção da falta podem ser notadas.

Figura 5.6: Circuito estudado - tensão em P.

Figura 5.7: Circuito estudado - corrente em P.

Desta maneira, procurou-se caracterizar um conjunto de dados que apresenta situações de faltas localizadas em todo comprimento da linha a ser protegida, incluindo ainda faltas fora da zona de proteção do relé.

A taxa amostral utilizada foi 16 amostras por ciclo (960 Hz), o que equivale a uma amostra a cada 22.50^0 (1,04 ms) para um sistema de 60 Hz.

6 Um esquema completo de proteção digital de linhas de transmissão– Testes realizados

Os testes realizados para a validação do método proposto são apresentados neste capítulo. De acordo com os estágios envolvidos no algoritmo descrito no capítulo 4, foram utilizados valores amostrais dos sinais de tensão e corrente, tendo-se como referência o terminal P da configuração da linha simulada, Figura 5.1. Os sinais avaliados foram obtidos através de simulações no *software* ATP.

Embora uma série muito extensa de testes tenha sido realizada para verificar o desempenho do algoritmo, somente os resultados principais serão apresentados no que segue.

6.1 Simulações realizadas no sistema elétrico estudado

O conjunto de situações estudadas foi composto de simulações realizadas a partir de dados gerados pelo *software* ATP, os quais foram filtrados por um filtro *Butterworth*, com o objetivo de evitar o efeito *aliasing*, como escrito anteriormente.

Os resultados dos testes se referem à configuração do sistema da Figura 5.1 variando-se a distância da falta na linha de transmissão em relação à zona de proteção do relé, a partir da barra P, e o ângulo de incidência da falta. Foram simulados também casos com diferentes resistências de falta. O algoritmo também foi testado para todos os tipos de faltas possíveis (*fase-terra*, *fase-fase*, *fase-fase-terra* e *trifásica*) aplicados ao longo dos ramos da linha de transmissão, variando-se:

Distância :

- 6, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 e 144 km do relé no ramo PT;

Resistência de falta :

- 1, 10, 50 e 100 Ω .

Ângulo de incidência da falta :

- 0°, 45° e 90°.

Foi caracterizado, com isso, um conjunto de dados que envolvem faltas localizadas em todo o comprimento da linha a ser protegida, incluindo faltas fora da zona de proteção do relé. A taxa amostral utilizada foi 16 amostras por ciclo (960 Hz).

6.2 Filtragem dos dados

Os resultados das simulações obtidos através do *software* ATP, foram gerados a uma frequência de 50 kHz, podendo conter componentes de alta frequência provocados por mudanças bruscas nas formas de ondas na ocorrência da falta. Devido aos componentes de alta frequência, foi necessário implementar um filtro analógico para filtragem dos sinais amostrados, evitando-se assim a sobreposição de espectros (efeito *aliasing*) [5], descritos no capítulo 3.

Essa filtragem é realizada por um filtro digital passa-baixa *Butterworth*, o qual simula um filtro analógico real passa-baixa.

6.3 Detecção da falta

Conforme explicitado na seção 4.1, 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 variação na magnitude do sinal de corrente, verifica-se a ocorrência da falta. O algoritmo foi submetido a testes utilizando-se o conjunto de dados descritos na seção 6.1, por meio dos quais foram formulados vários gráficos e tabelas para a análise. Tais tabelas contêm basicamente a proporção do número de amostras pós-falta necessárias para a detecção da falta em relação a um parâmetro de simulação (tipo de falta, distância da falta em relação ao ramo P, resistência de falta e ângulo de incidência de falta).

Serão apresentados os gráficos relativos ao desempenho do algoritmo segundo os parâmetros acima citados dentro da primeira zona de proteção, como mostrado no sistema da Figura 5.1.

Na Tabela 6.1 à Tabela 6.4, são apresentados os resultados dos testes feitos em todos os diferentes tipos de falta, ângulos de incidência e resistências de falta, variando-se, para cada tipo de falta as distâncias correspondem à primeira zona de proteção do relé, ou seja, o ramo PT e mostram a amostra na qual o algoritmo detectou a falta.

Deve-se notar que o algoritmo foi capaz de detectar a maioria dos casos com apenas três amostras pós-falta, sendo o tempo de detecção maior para àquelas faltas onde apresenta uma resistência de falta alta ou em faltas ocorrendo próximo ao terminal remoto da linha. É observado que o algoritmo não possui uma resposta uniforme para os diferentes ângulos analisados.

Os testes mostraram que todos os tipos de falta foram detectados corretamente, devendo ser notado que a identificação do ponto de ocorrência da falta independe do tipo da falta.

Falta AT

Falta BT

Falta CT

□ 3 amostras
■ 4 amostras

ângulo		0°				45°				90°			
Resistência(Ω)		1	10	50	100	1	10	50	100	1	10	50	100
Falta AT	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3
	105 km	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	3
	120 km	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3
	135 km	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3
	144 km	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3
Falta BT	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3
	105 km	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	3
	120 km	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3	4
	135 km	3	4	4	4	3	4	4	4	3	3	3	4
	144 km	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4
Falta CT	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	105 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	120 km	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4
	135 km	4	3	4	4	3	3	3	4	3	3	3	4
	144 km	4	4	4	4	3	3	3	4	3	3	4	4

Tabela 6.1: Teste da detecção da falta para faltas tipo *fase-terra*.

Falta AB

Falta AC

Falta BC

□ 3 amostras
■ 4 amostras

Ângulo		0°				45°				90°			
resistência (Ω)		1	10	50	100	1	10	50	100	1	10	50	100
Tipo AB	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	105 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	120 km	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3
	135 km	3	3	3	4	3	3	4	4	3	3	3	3
	144 km	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3	4
Tipo AC	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	105 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	120 km	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3
	135 km	3	3	3	4	3	3	4	4	3	3	3	4
	144 km	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3	4
Tipo BC	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	105 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	120 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	135 km	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4
	144 km	4	4	4	4	3	3	3	4	3	4	4	4

Tabela 6.2: Teste da detecção da falta para todas as faltas tipo *fuse-fase*.

Falta ABT

Falta ACT

Falta BCT

ângulo		0°				45°				90°			
resistência (Ω)		1	10	50	100	1	10	50	100	1	10	50	100
Falta ABT	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	105 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	120 km	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	4
	135 km	3	3	3	4	3	3	4	4	4	4	4	5
Falta ACT	144 km	3	3	3	4	3	4	4	5	3	3	4	5
	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	105 km	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4
	120 km	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	4
Falta BCT	135 km	3	3	4	4	3	3	4	4	3	4	5	5
	144 km	3	3	4	5	3	3	4	5	3	4	5	5
	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4
	105 km	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	4	4

Tabela 6.3: Teste da detecção da falta para todas as faltas tipo fase-fase-terra.

Falta ABC

ângulo		0°				45°				90°			
resistência (Ω)		1	10	50	100	1	10	50	100	1	10	50	100
Falta ABC	6 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	30 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	45 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	60 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	75 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	105 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	120 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	135 km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
	144 km	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	4	5

Tabela 6.4: Teste da detecção da falta para todas as faltas trifásicas.

6.4 Classificação da falta

Como explicitado na seção 4.2, o método para a classificação da falta é baseado na comparação entre os fasores fundamentais de corrente superpostos e de seqüência zero, para as fases a , b , c e a componente de seqüência zero. Os valores dos fasores I''_a , I''_b , I''_c e I''_0 do terminal P da linha estudada são normalizados, tomando-se o maior valor como base. Usando-se como referência o fator $K = 0,3$, considera-se que fasores inferiores a 0,3 são não faltosos e os fasores de valor superior a 0,7 são faltosos [39]. Nas faltas que envolvem duas fases, a existência ou não da componente de seqüência zero indica se a falta envolve a fase terra.

Novamente, é necessário ser aplicado um pequeno *threshold* $I_{min} = 0,1$ nas medidas devido à existência de linhas não balanceadas, transdutores e erros na filtragem, etc.

Foram realizados testes com todos os tipos de falta, variando-se a distância, ângulo de incidência da falta e resistência, seção 6.1, com a finalidade de validar o algoritmo.

Da Tabela 6.5 à Tabela 6.10 são apresentados os resultados da subrotina de classificação da falta e a amostra na qual o algoritmo a classifica corretamente, onde são mostrados os resultados para diferentes tipos de faltas aplicadas a 30 km do terminal P da linha estudada, com resistência de falta de 10Ω e ângulo de incidência de 0° .

A Figura 6.1 ilustra os resultados obtidos anteriormente. Os testes demonstraram que a subrotina de classificação da falta foi capaz de classificar corretamente, quanto ao tipo, as faltas para todos os casos estudados.

Tabela 6.5: Tabela para classificação de faltas tipo AT.

Rf=10 ohm, ângulo de 0 graus	Fase					Amostra
	Km	A	B	C	0	
	6	1,000	0,082	0,083	1,165	3
	15	1,000	0,079	0,080	1,150	3
	30	1,000	0,073	0,075	1,148	3
	45	1,000	0,067	0,069	1,135	3
	60	1,000	0,059	0,061	1,120	3
	75	1,000	0,050	0,052	1,102	3
	90	1,000	0,038	0,041	1,079	3
	105	1,000	0,026	0,028	1,050	3
	120	1,000	0,013	0,011	1,013	4
	135	1,000	0,024	0,018	0,962	4
	144	1,000	0,044	0,039	0,919	4

Tabela 6.6: Tabela para classificação de faltas tipo CT.

Rf=10 ohm, ângulo de 0 graus	Fase					Amostra
	Km	A	B	C	0	
	6	0,082	0,082	1,000	1,164	3
	15	0,078	0,080	1,000	1,158	3
	30	0,073	0,075	1,000	1,147	3
	45	0,067	0,069	1,000	1,136	3
	60	0,059	0,062	1,000	1,121	3
	75	0,050	0,053	1,000	1,102	3
	90	0,039	0,042	1,000	1,079	3
	105	0,025	0,028	1,000	1,051	3
	120	0,012	0,011	1,000	1,012	3
	135	0,025	0,018	1,000	0,962	4
	144	0,045	0,038	1,000	0,920	4

Tabela 6.7: Tabela para classificação de faltas tipo AB.

Rf=10 ohm, ângulo de 0 graus	Fase					Amostra
	Km	A	B	C	0	
	6	1,000	0,703	0,019	0,275	3
	15	1,000	0,727	0,015	0,271	3
	30	1,000	0,716	0,260	0,270	3
	45	1,000	0,757	0,020	0,300	3
	60	1,000	0,779	0,016	0,300	3
	75	1,000	0,797	0,012	0,290	3
	90	1,000	0,809	0,009	0,271	3
	105	1,000	0,820	0,007	0,262	3
	120	1,000	0,817	0,003	0,254	3
	135	1,000	0,833	0,007	0,232	3
	144	1,000	0,833	0,010	0,230	3

Tabela 6.8: Tabela para classificação de faltas tipo BCT.

Rf=10 hom, ângulo de 0 graus	Fase					Amostra
	Km	A	B	C	0	
	6	0,041	1,000	0,742	1,100	3
	15	0,030	1,000	0,760	1,097	3
	30	0,031	1,000	0,753	1,091	3
	45	0,240	1,000	0,766	1,084	3
	60	0,015	1,000	0,769	1,075	3
	75	0,004	1,000	0,774	1,075	3
	90	0,014	1,000	0,774	1,064	3
	105	0,028	1,000	0,775	1,050	3
	120	0,051	1,000	0,782	1,032	3
	135	0,064	1,000	0,785	1,008	4
	144	0,062	1,000	0,788	1,000	4

Tabela 6.9: Tabela para classificação de faltas tipo ACT.

Rf=10 hom, ângulo de 0 graus	Fase					Amostra
	Km	A	B	C	0	
	6	1,000	0,716	0,067	1,135	3
	15	1,000	0,757	0,059	1,120	3
	30	1,000	0,799	0,052	1,102	3
	45	1,000	0,799	0,080	1,159	3
	60	1,000	0,797	0,083	1,165	3
	75	1,000	0,809	0,083	1,149	3
	90	1,000	0,817	0,075	1,079	3
	105	1,000	0,830	0,041	1,050	3
	120	1,000	0,833	0,028	1,013	3
	135	1,000	0,838	0,011	0,962	3
	144	1,000	0,841	0,018	0,919	4

Tabela 6.10: Tabela para classificação de faltas tipo ABC.

Rf=10 hom, ângulo de 0 graus	Fase					Amostra
	Km	A	B	C	0	
	6	0,907	1,000	0,831	0,010	3
	15	0,905	1,000	0,832	0,010	3
	30	0,894	1,000	0,828	0,010	3
	45	0,935	1,000	0,808	0,010	3
	60	0,947	1,000	0,813	0,010	3
	75	0,940	1,000	0,812	0,010	3
	90	0,939	1,000	0,814	0,010	3
	105	0,914	1,000	0,806	0,010	3
	120	0,956	1,000	0,800	0,010	3
	135	0,921	1,000	0,798	0,010	3
	144	0,919	1,000	0,801	0,010	3

Figura 6.1: Gráfico do módulo de classificação para diferentes tipos de falta com ângulo de incidência da falta de 0° e resistência de falta de 10Ω .

6.5 Localização da falta em relação ao terminal P

A presente seção avalia o desempenho do algoritmo no cálculo da distância da falta sob diferentes condições do sistema. Para a configuração apresentada na Figura 5.1, são mostrados alguns resultados obtidos com os testes, para diferentes tipos de faltas existentes, onde é aplicado o método da equação diferencial, e em seguida a implementação de um filtro de mediana de 5^ª ordem, para a obtenção da distância da falta, em percentagem, em relação ao terminal P da linha. Foram feitas análises do desempenho do algoritmo para diferentes tipos de falta ao longo de toda a linha de transmissão.

A estimativa da localização da falta, ou seja, o cálculo da resistência e da indutância da linha de transmissão, mostra ser um critério coerente com as expectativas do algoritmo, em que os testes realizados obtiveram respostas de acordo com o esperado, como apresentado na seção 4.3.5. Alguns resultados são apresentados a seguir mostrando o efeito dos diferentes tipos de faltas sobre a precisão do algoritmo.

Deve ser ressaltado que a filtragem das estimativas resulta em uma rápida convergência dos valores de k_l e k_r calculados pelo algoritmo. A filtragem mencionada possibilita o uso de tal filosofia para a proteção de distância rápida de linhas de transmissão.

Os gráficos da Figura 6.2 à Figura 6.9 apresentam os gráficos relativos aos valores de k_l e k_r para uma falta *fase-a-terra* a 60 km do relé (40 % da linha), onde variou-se a resistência de falta 1, 10, 50 e 100 Ω , mantendo-se constante o ângulo de incidência da falta de 0°. Os resultados são coerentes com a resposta esperada do algoritmo, porém, devido à presença de resistência de falta, é observada uma diferença entre os valores do k_l e k_r . No entanto, deve ser observado que os valores de k_l mantém a precisão do resultado e será adotado como parâmetro para o cálculo da distância da falta no que diz respeito a tomada de decisão do algoritmo.

É observado que os valores do k_l calculado apresentam uma variação devido a influência da resistência de falta. No entanto, para efeito de localização da falta, este apresenta uma precisão ainda aceitável.

6.5.1 Efeito do tipo de falta

Os gráficos da Figura 6.9 à Figura 6.19 apresentam a curva gerada pelo cálculo do k_l em relação a amostras de pós-falta e resumem os resultados obtidos apresentando uma série de estimativas para a solução da equação diferencial para todos os tipos de faltas a uma distância de 15 km, (10% da linha), do ponto P da linha estudada da Figura 5.1, com resistência de falta de 1 Ω e ângulo de falta de 0°.

Figura 6.2: Gráfico do k_r ($k_r=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 1Ω .

Figura 6.3: Gráfico do k_l ($k_l=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 1Ω .

Figura 6.4: Gráfico do k_r ($k_r=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 10Ω .

Figura 6.5: Gráfico do k_l ($k_l=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 10Ω .

Figura 6.6: Gráfico do k_r ($k_r=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 50Ω .

Figura 6.7: Gráfico do k_l ($k_l=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 50Ω .

Figura 6.8: Gráfico do k_r ($k_r=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 100Ω .

Figura 6.9: Gráfico do k_l ($k_l=0,4$) para uma falta *fase-a-terra* a 60 km de P, com resistência de falta de 100Ω .

Figura 6.10: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) para uma falta tipo *fase-a-terra*.

Figura 6.11: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) para uma falta tipo *fase-b-terra*.

Figura 6.12: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) para uma falta tipo *fase-c-terra*.

Figura 6.13: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) para uma falta tipo *fase-ab*.

Figura 6.14: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) para uma falta tipo *fase-ac*.

Figura 6.15: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) para uma falta tipo *fase-bc*.

Figura 6.16: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) para uma falta tipo *fase-abt*.

Figura 6.17: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_f=0,1$) uma falta tipo *fase-act*.

Figura 6.18: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_l=0,1$) para uma falta tipo fase-bct.

Figura 6.19: Gráfico de k_l a 15 km de P ($k_l=0,1$) para uma falta tipo fase-abc.

6.5.2 Efeito da resistência e localização de falta

Para reavaliar o efeito da resistência de falta no modelo proposto, foram realizados testes com resistências de 1, 10, 50 e 100 Ω e são apresentados nos gráficos da Figura 6.20 à Figura 6.22.

Como já observado e comentado no primeiro item deste capítulo, a presença da resistência de falta afeta o cálculo do k_I , porém o algoritmo ainda apresenta resultados com precisão adequada a um relé de distância.

Deve ainda ser ressaltado que segundo os testes realizados, não foi observado nenhuma variação significativa na precisão do algoritmo quando da variação da distância da falta com relação ao terminal P. No entanto, erros maiores estão presentes para faltas mais próximas do terminal remoto.

Figura 6.20: Gráfico do k_L para uma falta *fase-a-terra*, a 90 km do terminal P da linha ($k_f=0,60$) com resistência de falta de $1\ \Omega$ e ângulo de incidência de 0°

Figura 6.21: Gráfico do k_L para uma falta *fase-a-terra*, a 90 km do terminal P da linha ($k_f=0,60$) com resistência de falta de $10\ \Omega$ e ângulo de incidência de 0°

Figura 6.22: Gráfico do k_l para uma falta fase-a-terra, a 90 km do terminal P da linha ($k_f=0,60$) com resistência de falta de 50Ω e ângulo de incidência de 0° .

Figura 6.23: Gráfico do k_l para uma falta fase-a-terra, a 90 km do terminal P da linha ($k_f=0,60$) com resistência de falta de 50Ω e ângulo de incidência de 0° .

6.5.3 Efeito do ângulo de incidência da falta

Na prática, as faltas ocorrem em qualquer ponto da forma de onda de tensão, podendo isso acontecer desde um valor mínimo (forma de onda de tensão passando por zero) até um valor máximo (forma de onda de tensão passando por um máximo), na fase ou fases faltosas. Do ponto de vista de distorções harmônicas, o pior caso é quando as faltas ocorrem próximo ou na tensão passando por um máximo. No outro extremo, quando as faltas ocorrem próximo ou na tensão passando por zero as distorções são extremamente pequenas. Neste caso, nota-se o aparecimento do componente CC na onda de corrente.

Dessa maneira é de grande importância verificar o comportamento do algoritmo para as faltas em diferentes ângulos de incidência. Este item analisa o efeito da variação do ângulo de incidência da falta variando entre 0, 45 e 90°. Alguns dos resultados testados são apresentados nos gráficos da Figura 6.24, Figura 6.25 e Figura 6.26 mostrando um grau de exatidão aceitável para a configuração do sistema estudado.

Figura 6.24: Gráfico do k_l para uma falta *fase-a-terra*, a 60 km do terminal P da linha ($k_f=0,40$) com resistência de falta de 1Ω e ângulo de incidência de 0°.

Figura 6.25: Gráfico do k_l para uma falta *fase-a-terra*, a 60 km do terminal P da linha ($k_f=0,40$) com resistência de falta de $1\ \Omega$ e ângulo de incidência de 45° .

Figura 6.26: Gráfico do k_l para uma falta *fase-a-terra*, a 60 km do terminal P da linha ($k_f=0,40$) com resistência de falta de $1\ \Omega$ e ângulo de incidência de 90° .

7 Conclusão

7.1 Conclusão

A técnica apresentada neste trabalho mostra a utilização de um algoritmo baseado nas equações diferenciais para o cálculo da localização da falta em linhas de transmissão. Essa técnica utiliza a modelagem da linha por meio de seus parâmetros, resistência e indutância, de onde observações teóricas e experimentais do modelo foram obtidas por meio de simulações de situações reais.

Nesta etapa de geração de dados, utilizou-se o *software ATP - Alternative Transients Program* na modelagem de uma linha de transmissão para simulações de situações reais de falta. A linha de transmissão utilizada para o cálculo dos parâmetros foi uma linha típica da CESP de 440kV que corresponde ao trecho entre as cidades de Araraquara – Bauru. Com relação à resposta do modelo transitório, foram efetuadas simulações para todos os tipos de faltas em diferentes localizações da linha.

Deve-se ressaltar que em problemas de engenharia, não é suficiente procurar uma fórmula matemática que possa ser aplicada indiscriminadamente na solução de problemas particulares, sem o conhecimento completo das limitações e simplificações admitidas em sua derivação. Tal circunstância poderia levar ao uso indevido da mesma. As chamadas soluções matemáticas dos fenômenos físicos exigem, normalmente, aproximações e limitações que são impostas ao mesmo. Neste trabalho, o algoritmo de localização de faltas considerado negligencia a capacitância *shunt* da linha. A mesma capacitância não é negligenciada na simulação do sistema elétrico faltoso através do ATP.

Neste trabalho foi implementado um esquema completo de proteção incluindo um detector, um classificador e um localizador de faltas. Após a correta detecção e classificação da falta quanto ao tipo, o AED estima a distância da falta por meio da solução da equação diferencial da linha, tendo como solução os parâmetros k_l e k_r .

Pelo emprego do algoritmo proposto, os resultados não são afetados pela presença de harmônicos e ruídos introduzidos no sistema quando na ocorrência da falta. Esta técnica pode ser aplicada para qualquer tipo de falta com ou sem a presença de resistência de falta. Foi notado que a presença de uma resistência de falta modifica os valores de k_r e parcialmente os valores do k_l . Este fato não afeta a decisão do algoritmo na abertura dos disjuntores a ele associados, pois na tomada de decisões só é levado em consideração o valor de k_l .

Observou-se que o uso direto das equações diferenciais não produz uma estimativa aceitável para ser usada em relés digitais por possuírem convergência em tempos normalmente superiores a dois ciclos. Assim, foi implementado um filtro, proporcionando um diagnóstico mais rápido das estimativas. Para isso foi usado um filtro de mediana de 5ª ordem após o cálculo da localização da falta. Para todos os tipos de falta testados, a estimativa da localização da falta através dos parâmetros mostrou-se altamente satisfatória para a finalidade de proteção, convergindo em menos de um ciclo e meio de pós-falta, após a filtragem das estimativas, imprimindo maior velocidade de resposta para os relés digitais.

Uma série bastante extensiva de testes foi realizada com o algoritmo completo de proteção para as suas diferentes fases. Foram aplicadas faltas do tipo *fase-terra*, *fase-fase*, *fase-fase-terra* e *trifásica*, bem como faltas em diferentes localizações da linha de transmissão. Pode ser observado que maiores imprecisões ocorrem para faltas próximas ao terminal remoto da linha, não inviabilizando, no entanto, o método proposto. Foi também investigado o desempenho do algoritmo para faltas com diferentes ângulos de incidência.

De uma forma geral o algoritmo apresenta resultados altamente satisfatórios no que diz respeito as suas diferentes fases e vem contribuir para uma proteção mais rápida e eficiente das linhas de transmissão de alta tensão.

8 Referências Bibliográficas

- [1] Stevenson, William D. Jr.; *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1983.
- [2] Weedy, B. M. ; *Sistemas Elétricos de Potência* – Editora Polígono, São Paulo, 1973.
- [3] W. A. Elmore ; *Protective Relaying Theory and Applications*, ABB Power T&D Company Inc., 1994.
- [4] Horowitz, S. H. ; Phadke A. G.; *Power System Relaying*, 2 ed., Research Studies Press Ltd. 1995.
- [5] Phadke, A. G. and Thorp, J. S. ; *Computer Relaying for Power Systems*, Research Studies Ltd., Taunton, Somerset, England, 1994.
- [6] G. D. Rockefeller ; “Fault protection with a digital computer” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 438-458, April, 1969.
- [7] M. S. Sachdev ; M. A. Baribeau “ A new algorithm for digital impedance relays “ – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 6, p. 2232-2240, Nov/Dec. 1979.
- [8] M. Mir , P. J. McCleer ; “Simulation methods for optimum performance estimation of analog and computer impedance relays” - *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 6, p. 1147-1157, June, 1984.

- [9] D. V. Coury ; *Um estimador ótimo aplicado à proteção digital dos sistemas de potência*. São Carlos, 138p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987.
- [10] *Alternative Transient Program*, Leuven EMTP Center - Rule Book, 1987
- [11] B. J. Mann , I. F. Morrison ; “ Digital calculation of impedance for transmission line protection” - *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-90, No. 1, Jan/Fev, pp. 270-276, 1971.
- [12] G. D. Rockefeller , E. A. Udren , G. B. Gilcrest ; “High speed distance relaying using a digital computer” part I – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-91, No. 3, pp. 1235-1243, 1972.
- [13] G. D. Rockefeller and E. A. Udren; “High speed distance relaying using a digital computer” part II – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, *ibid*, pp 1244-1258
- [14] J. Makino, Y. Miki; “Study of operating principles and digital filters for protective relays with digital computers” – *IEEE PES Winter Power Meeting*, New York, Jan. pp. 1-8, 1975.
- [15] J. G. Gilbert, R. J. Shovlin ; “High speed transmission line fault impedance calculation using a dedicated minicomputer” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 3, May/June, pp. 872-883, 1975.
- [16] J. S. Thorp, A. G. Phadke, S. H. Horowitz e J. E. Beehler; “Limits to impedance relaying” - *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 1, pp. 246-260, Jan/Fev, 1979.
- [17] M. Ramamoorthy ; “Application of digital computers to power system protection” *J. Inst. Eng. (India)*, 52, pp. 235-238, 1972.
- [18] A. G. Phadke, M. Ibrahin, T. Hlibka ; “Fundamental basis for relaying with symmetrical components”, – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, No. 2, pp. 635-646, March/April, 1977.
- [19] P. G. McLaren , M. A. Martin ; “Fundamental digital approach to the distance protection” – *IEE Proc.*, 125, pp. 1295-1300, 1975.

- [20] A. T. Johns , M. A. Martin ; “Fundamental digital approach to distance protection of EHV transmission lines” - *Proc. IEE*, 125, pp. 377-384, 1978.
- [21] J. W. Horton ; “The use of walsh function for high-speed digital relaying” – *IEEE PES Summer Meeting*, San Francisco, July 20-25, Paper A 75 582 7, 1975.
- [22] A. A. Girgis , R. G. Brown; “Application of kalman filtering in computer relaying” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, pp. 3387-3397.
- [23] A. A. Girgis; “A new kalman filtering based digital distance relay” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, pp. 3471-3480.
- [24] A. D. McInnes , I. F. Morrison ; “Real time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computer” – *Elec. Eng. Trans. Inst. Eng. Australia*, , EE7, pp.16-23, 1970.
- [25] A. M. Ranjbar , B. J. Cory ; “An improved method for the digital protection of high voltage transmission lines” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No.2, March/April, pp. 544-550, 1975.
- [26] W. D. Breingan , M. M. Chen ; “The laboratory investigation of a digital system for the protection of transmission lines” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No.2, March/April, pp. 350-368, 1979.
- [27] W. J. Smolinski ; “An algorithm for digital impedance calculation using a single *PI* section transmission line model” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No.5, pp. 1546-1551, Sept./Oct., 1979.
- [28] R. Poncelet ; “The use of digital computers for network protection” , *CIGRÈ*, France, No. 32-08, pp. 1-5, Aug. , 1972.
- [29] J. G. Gilbert , E. A. Udren , M. Sackin ; “Evaluation of algorithms for computer relaying” – *IEEE PES Summer Meeting*, Mexico City, Mex., July 17-22, 1977.
- [30] A. D. McInnes , I. F. Morrison ; “Real-time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computer” – *IEE Transaction*, Institution of Engineers, Australia, EE7, No.1 pp.16-23, 1971.

- [31] B. Jeyasuray , W. J. Smolinski ; “Identification of a best algorithm for digital distance protection of transmission lines,” – *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No.10, October, pp. 3358-3369, 1983.
- [32] Y. Ohura, T. Matsuda, M. Suzuki, M. Yamaura, Y Kurosawa e T. Yokoyama; “Digital distance relay with improved characteristics a against distorted transient waveforms” – *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 4, No. 4, October, pp. 2025-2031, 1989.
- [33] Ch. Hendrich e E. Wittmann ; “New digital distance protection system combining signal spectrum analysis and differential equation solution for power systems” – *ETPE* , Vol. 5, No. 1, January/February, pp. 49-54, 1995.
- [34] B. Lian, M. M. A. Salama e J. Hanson ; “Identifying an error source in differential equation approach for the transmission line fault location algorithm” – *Electric Power Systems Research*, No. 42, pp. 115-119, March, 1996.
- [35] E. Rosolowski, J. Izykowski, B. Kasztenny e M. M. Saha ; “A new relaying algorithm based on complex differential equation for symmetrical components” – *Electric Power Systems Research*, No. 40, March, pp. 175-180, 1997.
- [36] K. R. Cho, Y. C. Kang, S. S. Kim, J. K. Park, S. H. Kang e K. H. Kim; “An ANN based approach to improve the speed of a differential equation based distance relaying algorithm” – *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April, pp. 349-357, 1999.
- [37] M. Akke, J. S. Thorp; “Improved estimates from the diferential equation algorithm” – *Developments in Power System Protection*, pp. 235-238, March, 1997.
- [38] M. Akke, J. S. Thorp; “Some improments in three-phase differential equation algorithm for fast transmission line protection” – *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, pp. 66-72, January, 1998.
- [39] D. V. Coury ; *A pratical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders* , Tese (Doutorado) – Universidade de Bath, Inglaterra, 1992.
- [40] A. T. Johns , S. K. Salman ; *Digital Protection for Power Systems*, Peter Peregrinus Ltd. On behalf of The Institution of Electrical Engineers, 1995.

-
- [41] Oppenheim, A. V. , Schafer, R. W. ; Digital Signal Processing – Prentice-Hall International Editions., 1975.
 - [42] Chen, C. H. ; Signal Processing Handbook – edited by C. H. Chen, 1988.
 - [43] Tukey; J. W.; Exploratory data analysis, Addison – Wesley, Reading, Mass., 1971.

Anexo A

A.1. Teoria da medição digital da falta. [25]

Geralmente, uma linha de transmissão trifásica pode ser representada por um conjunto de equações diferenciais expressa em termos de seus parâmetros elétricos básicos: resistência, indutância e capacitância.

A tensão por unidade de comprimento sobre uma linha é consistida por três condutores de fases: a , b e c .

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_a}{dx} \\ \frac{dv_b}{dx} \\ \frac{dv_c}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{sa} & Z_{mab} & Z_{mac} \\ Z_{mba} & Z_{sb} & Z_{mbc} \\ Z_{mca} & Z_{mcb} & Z_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{A.1}$$

onde Z_s são as impedâncias próprias e Z_m são as impedâncias mútuas por unidade de comprimento.

Considerando a linha perfeitamente transposta, tem-se as impedâncias própria e mútua Z_s e Z_m por unidade de comprimento, respectivamente. A equação A.1 tornar-se-á :

$$\begin{aligned}
\frac{dv_a}{dx} &= Z_s i_a + Z_m (i_a + i_c) \\
\frac{dv_b}{dx} &= Z_s i_b + Z_m (i_a + i_c) \\
\frac{dv_c}{dx} &= Z_s i_c + Z_m (i_a + i_b)
\end{aligned} \tag{A.2}$$

escrevendo a equação A.2 em termos da impedância de sequência positiva e zero da linha, Z^+ e Z_0 , tem-se que:

$$\begin{aligned}
\frac{dv_a}{dx} &= Z^+ i_a + (Z_0 - Z^+) i_0 \\
\frac{dv_b}{dx} &= Z^+ i_b + (Z_0 - Z^+) i_0 \\
\frac{dv_c}{dx} &= Z^+ i_c + (Z_0 - Z^+) i_0
\end{aligned} \tag{A.3}$$

Das equações A.2 e A.3, a tensão durante a medição da corrente de falta i_a , i_b , e i_c e ou a corrente residual i_0 podem ser calculadas para qualquer condição de falta dada.

Na representação de uma linha de transmissão com capacitância *shunt* negligenciada é considerado um elemento de comprimento Δx ao longo da linha. Se for assumido que R_k e L_k são a resistência e a indutância por unidade de comprimento da k -ésima fase, L_{kl} é a indutância mútua por unidade de comprimento entre a k -ésima fase e a l -ésima fase, e i_k e v_k são a corrente e a tensão da k -ésima fase respectivamente.

A tensão ao longo da infinitésima parte do comprimento dx da fase a é

$$dv_a = (R_a dx) i_a + (L_a dx) \frac{di_a}{dt} + (L_{ab} dx) \frac{di_b}{dt} + (L_{ac} dx) \frac{di_c}{dt}$$

ou

$$\frac{dv_a}{dx} = \left(R_a + L_a \frac{d}{dt} \right) i_a + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} \tag{A.4}$$

similarmente, a relação de tensão e corrente para a fase b e c será

$$\frac{dv_b}{dx} = L_{ba} \frac{di_a}{dt} + \left(R_a + L_b \frac{d}{dt} \right) i_b + L_{bc} \frac{di_c}{dt}$$

$$\frac{dv_c}{dx} = L_{ca} \frac{di_a}{dt} + \left(R_a + L_c \frac{d}{dt} \right) i_c + L_{bc} \frac{di_b}{dt}$$

se a linha for considerada idealmente transposta, tem-se

$$\begin{aligned} R_a &= R_b = R_c = R_s \\ L_a &= L_b = L_c = L_s \\ L_{ab} &= L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = L_m \end{aligned} \tag{A.5}$$

onde R_s, L_s são a resistência e a indutância própria por unidade de comprimento da linha para cada fase, e L_m é a indutância mútua por unidade de comprimento entre quaisquer das duas fases. Por substituição da equação A.5 nas equações A.4, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{dv_a}{dx} &= \left(R_s + L_s \frac{d}{dt} \right) i_a + L_m \frac{di_b}{dt} + L_m \frac{di_c}{dt} \\ \frac{dv_b}{dx} &= L_m \frac{di_a}{dt} + \left(R_s + L_s \frac{d}{dt} \right) i_b + L_m \frac{di_c}{dt} \\ \frac{dv_c}{dx} &= L_m \frac{di_a}{dt} + L_m \frac{di_b}{dt} + \left(R_s + L_s \frac{d}{dt} \right) i_c \end{aligned} \tag{A.6}$$

agora, os parâmetros próprio e mútuo são relacionados com as seqüências zero e positiva.

$$\begin{aligned}
L^0 &= L_s + 2L_m \\
R^+ &= R_s \\
L^+ &= L_s - L_m
\end{aligned}
\tag{A.7}$$

onde R^+ e L^+ são a resistência e a indutância própria de seqüência positiva, respectivamente, e L^0 a indutância de seqüência negativa e i_0 a corrente de seqüência zero dada por:

$$i_0 = (i_a + i_b + i_c)/3 \tag{A.8}$$

por combinação das equações A.6 e as relações A.7 e A.8, obtém-se:

$$\begin{aligned}
\frac{dv_a}{dx} &= \left(R^+ + L^+ \frac{d}{dt} \right) i_a + (L^0 - L^+) \frac{di_0}{dt} \\
\frac{dv_b}{dx} &= \left(R^+ + L^+ \frac{d}{dt} \right) i_b + (L^0 - L^+) \frac{di_0}{dt} \\
\frac{dv_c}{dx} &= \left(R^+ + L^+ \frac{d}{dt} \right) i_c + (L^0 - L^+) \frac{di_0}{dt}
\end{aligned}
\tag{A.9}$$

As equações A.4, A.6 e A.9 podem ser utilizadas para calcular a tensão entre o ponto de falta e a localização do relé para diferentes tipos de falta. Porém é possível notar que a resistência de seqüência zero foi omitida no desenvolvimento das equações.

A.2. Derivação da equação geral

Para incluir a resistência de seqüência zero omitida no desenvolvimento anterior, a linha de transmissão é moldada como:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = k_r R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + k_l L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}
\tag{A.10}$$

onde v_a , v_b e v_c e i_a , i_b e i_c são quantidades de fase. Os parâmetros k_r e k_l são o tamanho da linha pela resistência e pela indutância respectivamente. A matriz R e L são a matriz resistência e indutância para a linha interna respectivamente. Assumindo transposição perfeita, temos:

$$R = \begin{bmatrix} R_s & R_m & R_m \\ R_m & R_s & R_m \\ R_m & R_m & R_s \end{bmatrix} \text{ e } L = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix}$$

onde os índices s e m significam própria e mútua respectivamente. Os índices 0 e + são usados na representação da seqüência zero e positiva respectivamente. A relação entre os parâmetros são [38]

$$\begin{aligned} L^+ &= L_s - L_m \\ R^+ &= R_s - R_m \\ L^0 &= L_s + 2L_m \\ R^0 &= R_s + 2R_m \end{aligned} \tag{A.11}$$

de A.11 tem-se que:

$$\begin{aligned} 3L_m &= L^0 - L^+ \\ 3R_m &= R^0 - R^+ \end{aligned} \tag{A.12}$$

por substituição de A.12 em A.10, a equação é rescrita como:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = k_r R^+ \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + k_r (R^0 - R^+) \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} + k_l (L^0 - L^+) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} \tag{A.13}$$

onde a corrente de seqüência zero é dada pela equação A.8.

A.3. Equação geral para uma falta *fase-terra*

Assumindo uma falta fase-terra ocorrendo na fase a e a uma distância k do relé, o valor instantâneo da tensão v_a , que é a tensão da fase a no ponto do relé, pode ser calculada usando a equação A.4 para linhas não transpostas e a equação A.10 ou A.13 para linhas idealmente transpostas.

Utilizando os valores instantâneos da tensão, da corrente e da taxa de mudança da corrente, a tensão v_a pode ser obtida utilizando-se a equação A.13, tal que:

$$v_a = k_r [R^+ i_a + (R^0 - R^+) i_0] + k_l \left[L^+ \frac{di_a}{dt} + (L^0 - L^+) \frac{di_0}{dt} \right]$$

e a expressão é escrita da forma geral:

$$v = k_r i_r + k_l \frac{di_l}{dt} \quad \text{A.14}$$

com

$$\begin{aligned} v &= v_a \\ i_r &= R^+ i_a + (R^0 - R^+) i_0 \\ i_l &= L^+ i_a + (L^0 - L^+) i_0 \end{aligned} \quad \text{A.15}$$

A.4. Equação geral para uma falta *fase-fase e fase-fase-terra*

Considere a falta entre as fases a e b a uma distância k . Se a falta possuir uma conexão à terra $i_0 \neq 0$, caso contrário, sem a conexão $i_0 = 0$. Em ambos os casos, a equação será

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = k_r R^+ \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + k_r (R^0 - R^+) \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} + k_l (L^0 - L^+) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} \quad \text{A.16}$$

a segunda linha é subtraída da primeira e temos:

$$(v_a - v_b) = k_r R^+ (i_a - i_b) + k_l L^+ \frac{d}{dt} (i_a - i_b) \quad A.17$$

escrevendo sob uma forma geral a equação A.16

$$v = k_r i_r + k_l \frac{di_l}{dt}$$

com

$$\begin{aligned} v &= v_a \\ i_r &= R^+ (i_a - i_b) \\ i_l &= L^+ (i_a - i_b) \end{aligned} \quad A.18$$

A.5. Equação geral para uma falta trifásica

Considerando uma falta trifásica simétrica a uma distância k . Desde que a falta é simétrica, $i_0 = 0$ e:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = k_r R^+ \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad A.19$$

usando a componente $\alpha\beta$ definidas por

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{com} \quad M = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad A.20$$

as quantidades trifásicas são consideradas em duas novas quantidades que são ortogonais no sentido que as duas linhas de M são ortogonais. Teremos depois:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = k_r R^+ \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + k_l L^+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{A.21}$$

Na literatura, a transformação completa é sempre chamada de transformação- $\alpha\beta 0$ e então inclui a componente de sequência zero.

Anexo B

B.1. Componentes de Clarke - $\alpha\beta 0$

Um conjunto de três vetores de tensões e correntes pertencentes a um sistema trifásico por ser substituído por qualquer sistema diferente. A componente simétrica é um destes sistemas.

Embora os componentes simétricos sejam, seguramente, a técnica mais amplamente empregada na análise de sistemas de potência para analisar as situações de um sistema desequilibrado, elas são, na realidade um dos muitos sistemas de componentes possíveis. Algumas classes de problemas podem ser mais facilmente resolvidas por um outro sistema de componentes. O mais usual é o dos componentes $\alpha, \beta, 0$.

Este sistema é, também, denominado “*Componentes de Clarke*” ou “*Componentes $\alpha \beta 0$* ”, devido à ampla aplicação deste método por Edith Clarke durante a década de 1940.

Tanto as quantidades alfa como beta são conservativas isto é, a soma de suas contribuições para as fases a, b e c é zero, como acontece nas redes de seqüência positiva e negativa de componentes simétricas, não faz diferença alguma, no que se refere aos componentes $\alpha\beta$, se os neutros estiverem aterrados ou não.

B.2. Teorema fundamental

O teorema fundamental de componentes simétricas, isto é, o teorema que é expresso pela relação:

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad \text{B.1}$$

desenvolvendo a equação B.1, obtém-se:

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2 \\ I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \\ I_c &= I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \end{aligned} \quad \text{B.2}$$

substituindo nas equações B.2 os valores de a^2 e de a na forma binomial, e fatorando a parte real e a imaginária, obtemos

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2 \\ I_b &= I_0 + \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_1 + \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_2 \\ I_c &= I_0 + \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_1 + \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_2 \end{aligned} \quad \text{B.3}$$

ou seja

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 + (I_1 + I_2) + 0 \cdot (I_1 - I_2)j \\ I_b &= I_0 - \frac{1}{2}(I_1 + I_2) + \frac{\sqrt{3}}{2}(I_1 - I_2)j \\ I_c &= I_0 - \frac{1}{2}(I_1 + I_2) - \frac{\sqrt{3}}{2}(I_1 - I_2)j \end{aligned} \quad \text{B.4}$$

em termos matriciais, a equação B.3 é expressa por

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 + I_2 \\ (I_1 - I_2)j \end{pmatrix} \quad \text{B.5}$$

ou ainda

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} I_0 + \begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} (I_1 + I_2) + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} (I_1 - I_2)j \quad \text{B.6}$$

a equação acima nos mostra a existência de outras três seqüências, nas quais a seqüência dada é decomposta. Fazendo

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_\alpha \\ j(I_1 - I_2) &= I_\beta \end{aligned} \quad \text{B.7}$$

resulta

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} I_0 + \begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} I_\alpha + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} I_\beta \quad \text{B.8}$$

as seqüências I_0 , I_α e I_β representam as componentes de Clarke.

ou

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} \quad \text{B.9}$$

Com a fase a como referência em um sistema trifásico, as componentes α , β e 0 das tensões e correntes são definidas como:

- a componente α nas fases b e c são iguais, opostas em sinal e metade de sua magnitude de α na fase a ;
- a componente β nas fases b e c são iguais, opostas em sinal e na fase a é nulo;
- a componente 0 é igual nas três fases.

A componente α flui pela fase a e retorna metade pela fase b e metade pela fase c . A componente β da corrente circula na fase b e c . A componente 0 , em sistemas simétricos é nula

onde M é a matriz de transformação.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \quad \text{B.10}$$

a matriz de transformação é não singular, logo admite inversa, assim

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad \text{B.11}$$

$$M^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{pmatrix} \quad \text{B.12}$$