Campus de São Carlos

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL DIGITAL DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE**

Autor: Eduardo Coelho Navarro

Orientador: Prof. Dr. Denis Vinícius Coury

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DIGITAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 08 / 10 / 02

Ass.: _____

Eduardo Coelho Navarro

DEDALUS - Acervo - EESC

31100037123

Dissertação apresentada 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 Vinicius Coury

São Carlos
2002

Class. TESE- EESC.
Cutt. 13836
Tombo T0253/02
Sysno 1277159

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

N322p Navarro, Eduardo Coelho
Proteção diferencial digital de linhas de transmissão
com compensação série / Eduardo Coelho Navarro. -- São
Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.

Área: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Linhas de
transmissão. 3. Relés de proteção. 4. Relés digitais.
5. Relés diferenciais. 6. GPS. 7. Compensação série.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **EDUARDO COELHO NAVARRO**

Dissertação defendida e julgada em 22-08-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **JOSÉ AQUILES BAESSO GRIMONI**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Dedico este trabalho à minha esposa
Renata, pelo constante apoio e incentivo,
e ao meu filho Bruno.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso Pai.

Ao Prof. Dr. Denis Vinicius Coury, cuja valiosa orientação e incentivo foram fundamentais para realização deste trabalho.

À pesquisadora Dra. Maria Cristina Tavares e ao amigo Edison Aparecido Goes pelo auxílio nas simulações computacionais utilizando o ATP.

Aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP por toda colaboração e conhecimento.

Aos meus pais Elizio e Wanir, pelo grande apoio e estímulo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 RELÉS DE PROTEÇÃO.....	4
2.1 O Relé Diferencial.....	6
2.2 O Relé Digital.....	9
2.3 O Relé Diferencial Digital para Linhas de Transmissão e o Uso do GPS.....	13
3 LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	18
3.1 Proteções de Banco de Capacitores Série.....	19
3.2 Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série.....	22
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
5 SIMULAÇÕES DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ATP.....	34
5.1 Cálculo dos Parâmetros das Linhas de Transmissão.....	37
5.1.1 Comparação entre os Valores Teóricos e Calculados.....	42
5.2 Cálculo dos Parâmetros das Fontes Equivalentes.....	45
5.3 Simulações de Faltas.....	46
6 A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	56
6.1 Desenvolvimento do Algoritmo Proposto.....	57
6.2 Cálculo do Circuito Equivalente da Linha de Transmissão.....	60
6.3 Aquisição de Dados e Filtragem Analógica dos Sinais.....	63
6.4 Reamostragem dos Sinais e o Filtro de Fourier (FFT).....	65

6.5 Cálculo das Correntes Compensadas.....	66
6.6 Medição do Tempo de Detecção da Falta e Abertura.....	67
6.7 Curva Característica Diferencial.....	70
7 A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	
– TESTES REALIZADOS.....	72
7.1 Curvas Características do Relé Diferencial para o Sistema sem Compensação Série.....	73
7.2 Curvas Características do Relé Diferencial para o Sistema com Compensação Série.....	77
7.3 Tempos de Operação do Algoritmo Proposto para o Sistema com Compensação Série	82
8 CONCLUSÕES.....	87
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICE I – Programa Desenvolvido em Matlab.....	93
APÊNDICE II – Resultados das Simulações de Faltas Internas à LT AGV-RPR ...	100
APÊNDICE III – Sistema Elétrico sem Compensação Série Resultados das Simulações de Faltas Externas à LT AGV-RPR.	105
APÊNDICE IV – Sistema Elétrico com Compensação Série Resultados das Simulações de Faltas Externas à LT AGV-RPR.	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – O Relé diferencial.....	6
FIGURA 02 – O relé diferencial e a falta externa.....	7
FIGURA 03 – O relé diferencial e a falta interna	7
FIGURA 04 – Curva característica do relé diferencial.....	8
FIGURA 05 – Arquitetura de um Relé Digital.....	12
FIGURA 06 – Sistema de Proteção Digital Diferencial.....	16
FIGURA 07 – Característica $V \times I$ do MOV	20
FIGURA 08 – Diagrama de proteção de um banco de capacitor	20
FIGURA 09 – Diagrama unifilar do sistema sem compensação série sob estudo.....	35
FIGURA 10 – Diagrama unifilar do sistema com compensação série sob estudo.....	36
FIGURA 11 – Perfil da Torre tipo S.....	39
FIGURA 12 – Arquivo da rotina <i>Line Constants</i> para as LTs AGV-RPR e RPR-SBO.....	40
FIGURA 13 – Arquivo da rotina <i>Line Constants</i> para LTs AGV-ARA e ARA-SBO.....	41
FIGURA 14 – Tipos de falta	46
FIGURA 15 – Diagrama unifilar do sistema usado para simulações de faltas.....	48
FIGURA 16 – Arquivo de entrada para simulação de falta CA.....	49
FIGURA 17 – Correntes e tensões medidas na barra A0.....	51
FIGURA 18 – Correntes e tensões medidas na barra R0.....	51
FIGURA 19 – Arquivo de entrada para simulação de falta AB no sistema com compensação série	52
FIGURA 20 – Correntes e tensões medidas na barra A0.....	55
FIGURA 21 – Correntes e tensões medidas na barra R0.....	55
FIGURA 22 – Fluxograma do algoritmo para proteção diferencial de LT.....	56
FIGURA 23 – Seção II da linha de transmissão.....	58
FIGURA 24 – Modelo da linha sem falta diferencial.....	58

FIGURA 25 – Curva característica diferencial.....	60
FIGURA 26 – Modelo Π equivalente da LT.....	61
FIGURA 27 – Resposta em frequência do filtro passa-baixa.....	63
FIGURA 28 – Resultado do filtro passa-baixa.....	64
FIGURA 29 – Formas de ondas de reamostragem e do filtro FFT	65
FIGURA 30 – Correntes compensadas I_x (vermelho) e I_y (azul)	66
FIGURA 31 – Gráfico Detecção x Tempo da fase A para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR	68
FIGURA 32 – Gráfico Abertura x Tempo da fase A para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR	68
FIGURA 33 – Gráfico Detecção x Tempo da fase B para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR.....	69
FIGURA 34 – Gráfico Abertura x Tempo da fase B para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR.....	69
FIGURA 35 – Curva diferencial para falta A-T em 10% da LT AGV – ARA.....	70
FIGURA 36 – Ampliação da curva diferencial da linha sob falta.....	71
FIGURA 37 – Diagrama unifilar sem compensação e indicação das faltas.....	72
FIGURA 38 – Diagrama unifilar com compensação e indicação das faltas.....	72
FIGURA 39 – Curva diferencial para falta em 10% da LT AGV-ARA.....	73
FIGURA 40 – Curva diferencial para falta em 10% da LT RPR-SBO.....	73
FIGURA 41 – Curva diferencial para falta AT em 10% da LT AGV-RPR.....	74
FIGURA 42 – Curva diferencial para falta AT em 90% da LT AGV-RPR.....	74
FIGURA 43 – Curva diferencial para falta ABT em 10% da LT AGV-RPR.....	75
FIGURA 44 – Curva diferencial para falta ABT em 10% da LT AGV-RPR.....	75
FIGURA 45 – Curva diferencial para falta ABC em 75% da LT AGV-RPR.....	76
FIGURA 46 – Curva diferencial para falta em 10% da LT AGV – ARA.....	77
FIGURA 47 – Curva diferencial para falta em 10% da LT RPR-SBO.....	78
FIGURA 48 – Curva diferencial para falta AT em 25% da LT AGV-RPR.....	79
FIGURA 49 – Curva diferencial para falta AT em 75% da LT AGV-RPR.....	79
FIGURA 50 – Curva diferencial para falta AB em 10% da LT AGV-RPR.....	80
FIGURA 51 – Curva diferencial para falta AB em 90% da LT AGV-RPR.....	80
FIGURA 52 – Curva diferencial para falta ABC em 50% da LT AGV-RPR.....	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo AT aplicadas na LT AGV-RPR (sistema com compensação série).....	83
TABELA 02 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo AB aplicadas na LT AGV-RPR (sistema com compensação série).....	84
TABELA 03 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo ABT aplicadas na LT AGV-RPR (sistema com compensação série).....	85
TABELA 04 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo ABC aplicadas na LT AGV-RPR (sistema com compensação série).....	86
TABELA 05 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo AT aplicadas na LT AGV-RPR (sistema sem compensação série).....	101
TABELA 06 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo AB aplicadas na LT AGV-RPR (sistema sem compensação série).....	102
TABELA 07 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo ABT aplicadas na LT AGV-RPR (sistema sem compensação série).....	103
TABELA 08 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo ABC aplicadas na LT AGV-RPR (sistema sem compensação série).....	104
TABELA 09 – Faltas externas do tipo AT aplicadas na LT AGV-ARA (sistema sem compensação série).....	105
TABELA 10 – Faltas externas do tipo AT aplicadas na LT RPR-SBO (sistema sem compensação série).....	105
TABELA 11 – Faltas externas do tipo AB aplicadas na LT AGV-ARA (sistema sem compensação série).....	106
TABELA 12 – Faltas externas do tipo AB aplicadas na LT RPR-SBO (sistema sem compensação série).....	106
TABELA 13 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT AGV-ARA (sistema sem compensação série).....	106

TABELA 14 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT RPR-SBO (sistema sem compensação série).....	107
TABELA 15 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT AGV-ARA (sistema sem compensação série).....	107
TABELA 16 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT RPR-SBO (sistema sem compensação série).....	107
TABELA 17 – Faltas externas do tipo AT aplicadas na LT AGV-ARA (sistema com compensação série).....	108
TABELA 18 – Faltas externas do tipo AT aplicadas na LT RPR-SBO (sistema com compensação série).....	108
TABELA 19 – Faltas externas do tipo AB aplicadas na LT AGV-ARA (sistema com compensação série).....	109
TABELA 20 – Faltas externas do tipo AB aplicadas na LT RPR-SBO (sistema com compensação série).....	109
TABELA 21 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT AGV-ARA (sistema com compensação série).....	109
TABELA 22 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT RPR-SBO (sistema com compensação série).....	110
TABELA 23 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT AGV-ARA (sistema com compensação série).....	110
TABELA 24 – Faltas externas do tipo ABT aplicadas na LT RPR-SBO (sistema com compensação série).....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	– <i>Alternative Transients Program</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
SEP	– Sistemas Elétricos de Potência
LT	– Linha de Transmissão
TC	– Transformador de Corrente
TP	– Transformador de Potencial
S/H	– <i>Sample and Hold</i>
MUX	– <i>Multiplex</i>
A/D	– Analógico/Digital
EUA	– Estados Unidos da América
RX	– Canal de Recepção de Dados
TX	– Canal de Transmissão de Dados
OPGW	– <i>Optical Ground Wire</i>
MOV	– <i>Metal Oxide Varistor</i>
FM	– Frequência Modulada
PCM	– <i>Pulse Code Modulation</i>
RNA	– Rede Neural Artificial
CC	– Corrente Contínua
EMTP	– <i>Electromagnetic Transients Program</i>
DFT	– Transformada Discreta de Fourier
FFT	– Transformada Rápida de Fourier
AGV	– Água Vermelha
RPR	– Ribeirão Preto
SBO	– Santa Barbara d'Oeste
ARA	– Araraquara
ASCII	– <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ACSR	– <i>Aluminum Cable Steel Reinforced</i>
VMID	– Altura do cabo condutor medida no meio do vão.

Tipos de Falta:

- AT – Faltas envolvendo a fase A e a Terra
- BT – Faltas envolvendo a fase B e a Terra
- CT – Faltas envolvendo a fase C e a Terra
- AB – Faltas envolvendo as fases A e B
- BC – Faltas envolvendo as fases B e C
- CA – Faltas envolvendo as fases C e A
- ABT – Faltas envolvendo as fases A, B e a Terra
- BCT – Faltas envolvendo as fases B, C e a Terra
- CAT – Faltas envolvendo as fases C, A e a Terra
- ABC – Faltas trifásicas

LISTA DE SÍMBOLOS

V	– tensão
I	– corrente
$I_d, I_{\text{diferencial}}$	– corrente diferencial
$I_{op}, I_{\text{operação}}$	– corrente de operação
$I_r, I_{\text{restrição}}$	– corrente de restrição
I_1	– corrente do terminal 1
I_2	– corrente do terminal 2
I_{MIN}	– corrente mínima de operação
K	– constante de ajuste de sensibilidade do relé diferencial
I_F	– corrente de falta
V_{pl}	– nível de proteção do capacitor série
C	– capacitância
Z_0	– impedância de seqüência zero
Z_1	– impedância de seqüência positiva
R_0	– resistência de seqüência zero
R_1	– resistência de seqüência positiva
L_0	– indutância de seqüência zero
L_1	– indutância de seqüência positiva
V_{base}	– tensão de base
S_{base}	– potência de base
ω	– freqüência angular
CAR	– chave controlada por tempo na LT Agua Vermelha - Ribeirão Preto
CRS	– chave controlada por tempo na LT Ribeirão Preto - Santa Bárbara d'Oeste
CAQ	– chave controlada por tempo na LT Agua Vermelha - Araraquara
A0	– barra número zero da subestação Agua Vermelha
R0	– barra número zero da subestação Ribeirão Preto
I_i	– corrente do terminal i

I_{s1}	– corrente shunt do terminal i
I_i'	– corrente compensada do terminal i
Z_{s1}	– impedância da fonte 1
Z_{s2}	– impedância da fonte 2
V_1	– tensão do terminal 1
V_2	– tensão do terminal 2
V_3	– tensão compensada do terminal 1
V_4	– tensão compensada do terminal 2
Z_{c1}	– impedância do capacitor 1
Z_{c2}	– impedância do capacitor 2
I_1	– corrente do terminal 1
I_2	– corrente do terminal 2
I_{s1}	– corrente shunt do terminal 1
I_{s2}	– corrente shunt do terminal 2
I_x	– corrente compensada do terminal 1
I_y	– corrente compensada do terminal 2
γ	– constante de propagação
α	– constante de atenuação
β	– velocidade de propagação
λ	– comprimento de onda
f	– frequência
z_c	– impedância característica da linha de transmissão
l	– comprimento
Y	– admitância
f_{ap}	– frequência da banda de passagem
R_p	– atenuação máxima na banda de passagem
f_{aa}	– frequência da banda de atenuação
R_a	– atenuação mínima na banda de atenuação

RESUMO

NAVARRO, E. C. (2002). *Proteção diferencial digital de linhas de transmissão com compensação série*. São Carlos, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A proteção diferencial é o esquema preferido para proteção de equipamentos e linhas de transmissão. A proteção diferencial exige que informações de todos terminais da zona sob proteção sejam usados para calcular a corrente diferencial. Se esta corrente excede um determinado limite significa que uma falta pode existir na zona protegida. Tais cálculos devem ser executados em cada terminal, conseqüentemente deve existir um rápido canal de comunicação entre todos os terminais da linha.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do algoritmo de uma proteção diferencial digital de linhas de transmissão com compensação série. O algoritmo proposto foi implementado em Matlab e foi testado com os mais diferentes tipos de faltas simuladas no programa ATP (*Alternative Transients Program*). Os resultados comprovam o correto funcionamento do algoritmo.

O uso de tecnologias atuais de sincronização por GPS (*Global Positioning System*) e transmissão de dados em banda larga, resolvem antigos problemas da implementação de proteções diferenciais em linhas de transmissão.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência, Linhas de Transmissão, Relés de Proteção, Relés Digitais, Relés Diferenciais, GPS, Compensação Série.

ABSTRACT

NAVARRO, E. C. (2002). *Digital differential protection of series compensated transmission lines*. São Carlos, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The differential protection is the preferred scheme to protect equipment and transmission lines. The differential protection needs information from all terminals of a protected zone to be used to calculate the differential current. If the current exceeds the threshold level, it means that a fault may exist in the protected zone. These computations must be made on each terminal, consequently a fast communication channel connecting all terminals must exist.

This work presents the development of a digital differential protection algorithm for series compensated transmission lines. The algorithm was implemented in Matlab and it was tested with the most different variety of faults simulated with ATP (Alternative Transients Program) software. The results proved the correct operation of the algorithm.

The use of modern technologies of synchronization such as GPS (Global Positioning System) and data transmission by wide band solved old problems presented by the implementation of differential protection in transmission lines.

Key words: Power Systems, Transmission Lines, Protection Relay, Digital Relay, Differential Relay, GPS, Series Compensated Lines.

1 - INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são compostos por sistemas de geração, transmissão e distribuição e são projetados para fornecer energia elétrica de qualidade e de forma ininterrupta. Todos estes elementos estão sujeitos a inúmeros tipos de faltas. Devido à sua extensão e exposição a intempéries, é nas linhas de transmissão que ocorrem a maior parte das faltas. Atualmente, devido a grande expansão e complexidade dos SEP, torna-se cada vez mais importante o desenvolvimento de relés de proteção mais rápidos e eficientes.

A função dos relés de proteção é provocar a rápida remoção de qualquer elemento do sistema elétrico de potência sob curto-circuito, ou sob operação anormal que possa causar danos ou interferência na efetiva operação do resto do sistema [1]. A ocorrência de curto-circuito pode ser provocada por falhas permanentes ou transitórias em qualquer ponto dos SEP.

Os relés eletromecânicos foram os primeiros a serem projetados e são, ainda, maioria nas usinas e subestações. Esses relés atuam através de forças que são produzidas pela interação eletromagnética entre correntes e fluxos da mesma forma que ocorre em um motor elétrico. De forma geral, os relés eletromecânicos respondem a uma ou mais entradas: tensão, corrente, produto entre a tensão, corrente e o ângulo entre estes fasores ou então pela força física produzida por molas. A baixa confiabilidade desses relés representa seu grande problema. Eles dependem da interação de forças que podem se alterar com o tempo. As molas, eixos, discos e outros componentes mecânicos do relé vão sofrendo um processo natural de

desgaste, que muitas vezes reduz a confiabilidade do relé, pois podem provocar a falha de operação.

Os relés de estado sólido foram desenvolvidos posteriormente e possuem desempenho e características mais sofisticadas em relação aos eletromecânicos. O desenvolvimento de dispositivos semicondutores, e outros componentes eletrônicos, possibilitou a criação dos mesmos. Todas as funções e características disponíveis nos relés eletromecânicos podem ser implementadas nos equipamentos de estado sólido constituídos de componentes discretos ou circuitos integrados. Os relés de estado sólido utilizam componentes de baixa potência com pouca tolerância a altas temperaturas, umidade, sobrecorrentes e sobretensões. Estas características os tornam mais suscetíveis a falhas devido ao ambiente hostil de subestações e usinas. Entretanto, esses relés possuem menor tamanho físico e maior desempenho e flexibilidade em relação aos eletromecânicos, além de não serem prejudicados por vibrações e poeira.

Os relés digitais são baseados no uso de microprocessadores e vêm sendo implantados com sucesso em unidades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica nos últimos anos. Os principais sistemas de proteção diferencial até então desenvolvidos foram implementados com a tecnologia digital.

Pode-se dizer que a proteção diferencial é o método de proteção preferido para o sistema elétrico de potência. Transformadores, geradores, e barramentos são, normalmente, protegidos por relés diferenciais. As Linhas de Transmissão (LT) equipadas com capacitores de compensação série ou linhas multi-terminais apresentam problemas que são mais bem resolvidos com proteções diferenciais. A disponibilidade atual de medições sincronizadas usando tecnologia GPS (*Global*

Positioning System) e de melhorias na tecnologia de comunicação torna possível a real proteção diferencial de linhas de transmissão.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo para um relé de proteção diferencial digital de linha de transmissão com compensação série. É demonstrado também que o algoritmo desenvolvido pode ser usado para proteção de linhas de transmissão com compensação série inserida ou não.

As simulações de faltas neste trabalho foram realizadas através do *software* ATP (*Alternative Transients Program*), utilizando-se parâmetros do sistema elétrico de 440kV do Estado de São Paulo. As simulações produziram uma base de dados com várias faltas, de características diversas, para os testes do algoritmo de proteção diferencial digital proposto.

O Capítulo 2 introduz os principais conceitos sobre relés de proteção, principalmente no que se refere a relés digitais e diferenciais. O Capítulo 3 faz uma breve revisão sobre compensação série de linhas de transmissão e sobre os problemas referentes à proteção deste tipo de LT. No Capítulo 4, encontra-se uma revisão bibliográfica, onde são apresentados os principais trabalhos na área de proteção diferencial de linhas de transmissão. O Capítulo 5 detalha as simulações de faltas nas linhas de transmissão realizadas com o *software* ATP. No Capítulo 6 é apresentado o desenvolvimento do algoritmo proposto para proteção diferencial de LT. Os testes realizados e os resultados obtidos são descritos no Capítulo 7. As conclusões finais são apresentadas no Capítulo 8.

2 – RELÉS DE PROTEÇÃO

A eliminação rápida e discriminada de qualquer falta nas linhas de transmissão, subestações ou geradores, é importante para a estabilidade do sistema elétrico de potência. Desta forma, os relés de proteção minimizam a extensão dos defeitos e permitem a recomposição do sistema. Os relés são auxiliados em sua tarefa de proteção por disjuntores que são capazes de desconectar o elemento faltoso, isolando-o completamente do sistema. Os disjuntores são localizados de tal forma que cada gerador, transformador, barramento, linha de transmissão, etc., possam ser completamente separados do resto do sistema. Esses disjuntores devem ter capacidade suficiente para suportar momentaneamente e interromper a máxima corrente de curto-circuito.

A correta operação dos relés depende também das medições das correntes e tensões do elemento protegido. Os transformadores de corrente e de tensão fornecem isolamento da alta tensão do circuito de potência e alimentam os relés com amplitude proporcional àquela do circuito primário mas, suficientemente reduzida em magnitude.

Sensibilidade, seletividade, velocidade, confiabilidade e segurança são requisitos básicos de qualquer relé de proteção. O relé de proteção deve ser suficientemente sensível, de tal forma que opere sob condições reais que produzam a mínima tendência de operação. Deve, também, identificar o elemento defeituoso desligando a menor porção do sistema, selecionando, quando é necessária, a operação instantânea ou temporizada. A alta velocidade de atuação é necessária, pois

minimiza a extensão dos danos aos equipamentos e pessoas além de permitir a operação do resto do sistema, sem comprometer sua estabilidade. O relé deve, também, ser confiável operando sempre nas condições para as quais foi projetado. A segurança do relé garante sua estabilidade diante de qualquer outro tipo de falta fora de sua característica de operação.

A grande maioria dos relés utilizados em sistemas de potência podem ser classificados como [2]:

- **Relés de Magnitude:** Estes relés respondem à magnitude dos sinais de entrada. Um exemplo típico é o relé de sobrecorrente que responde às alterações na magnitude do sinal de corrente fornecido como entrada.
- **Relés Direcionais:** Estes respondem ao ângulo de fase entre dois sinais de entrada em corrente alternada. Um relé direcional pode comparar o ângulo de fase entre uma corrente e uma tensão de entrada. Ainda, os ângulos de fases de duas correntes podem ser comparados.
- **Relés de Razão:** Estes respondem à razão de dois sinais de entrada expressos como fasores. Os exemplos mais comuns desse tipo de relé são as várias versões de relés de impedância ou de distância que usam a razão entre os fasores de tensão e corrente de cada fase.
- **Relés com Canal Piloto:** Estes utilizam informações de terminais remotos como sinais de entrada. Este tipo de proteção geralmente comunica a decisão feita por um relé local, para outros relés de terminais remotos de uma LT.
- **Relés Diferenciais:** Estes respondem à magnitude resultante da soma algébrica de duas ou mais entradas. Na sua forma mais comum, os relés respondem à soma algébrica das correntes que fluem em uma determinada zona de proteção. Pode-

se usar a soma algébrica para representar a corrente de qualquer falta que possa existir dentro da zona de proteção. O relé diferencial é o objeto de estudo deste trabalho e um detalhamento maior sobre sua teoria de funcionamento é fornecido na seção a seguir.

2.1 - O Relé Diferencial

A proteção diferencial toma diferentes formas de acordo com o equipamento ou sistema que ela protege. Este tipo de proteção pode ser definido como “relé que opera quando um vetor de diferença de duas ou mais grandezas elétricas similares excede um determinado nível”[1]. Diferentes tipos de relés, quando conectados de modo correto, podem operar como um relé diferencial. Em outras palavras, é a forma que o relé é conectado em um circuito que o define como proteção diferencial.

FIGURA 1 – O Relé diferencial

A grande maioria das aplicações de proteções diferenciais é do tipo diferencial de corrente. O exemplo mais simples de tal arranjo é o relé diferencial amperimétrico ilustrado na Figura 1. A porção tracejada do circuito representa o elemento do sistema protegido pelo relé diferencial. Este elemento pode ser uma parte de um circuito, um enrolamento de um gerador, um barramento, um transformador, uma linha de transmissão, etc. Um transformador de corrente é conectado em cada extremidade do elemento do sistema. Os secundários dos

transformadores de corrente (TC) são conectados ao enrolamento de um relé de sobrecorrente.

FIGURA 2 – O relé diferencial e a falta externa

O exemplo mais comum é o relé diferencial percentual de corrente mostrado na Figura 2, usualmente chamado apenas de relé diferencial. Se os dois TCs da Figura 2 possuem a mesma relação de transformação e estão corretamente conectados, as correntes secundárias, simplesmente circulam entre os dois TCs como mostrado pelas setas, e não fluem pelo relé diferencial, seja para uma carga ou uma falta localizada em X . Isto é válido para TCs ideais e sem saturação.

FIGURA 3 – O relé diferencial e a falta interna

Para um curto-circuito em qualquer lugar entre os dois TCs, mostrado na Figura 3, a corrente diferencial resultante da soma das correntes secundárias fluirá pelo relé. A corrente diferencial necessária para operação desse relé é variável devido ao uso de enrolamento de restrição. A corrente diferencial no enrolamento de operação é resultante da soma vetorial das correntes dos TCs:

$$I_{\text{diferencial}} = I_{\text{operação}}$$

$$I_{\text{operação}} = |I_1 + I_2| \quad (1.1)$$

Esta corrente de operação deve ser maior que um percentual de restrição resultante da soma das amplitudes individuais dos TCs.

$$I_{\text{restrição}} = K \cdot [|I_1| + |I_2|] \quad (1.2)$$

A característica de operação para tal relé é mostrada na Figura 4. Assim, exceto para condições de baixa corrente, a razão da corrente diferencial de operação pela corrente de restrição é um percentual constante.

FIGURA 4 – Característica de operação do relé diferencial

Pode-se aplicar este mesmo princípio a um elemento do sistema que possua várias conexões. Da mesma forma que no caso anterior, todos os TCs devem possuir mesma relação de transformação e devem ser conectados de tal forma que nenhuma corrente circule pelo relé quando a corrente total que sai seja igual à corrente que entra no elemento protegido. Transformadores de Potência de vários enrolamentos, linhas de transmissão com derivações, geradores e barramentos são possíveis aplicações de proteção diferencial de múltiplas conexões.

Os TCs normalmente usados para proteção não transformam as correntes primárias tão precisamente sob condições transitórias, especialmente durante o início de um curto-circuito. Sob tais condições, correntes idênticas no primário dos TCs

podem provocar correntes secundárias diferentes. Isto ocorre devido a pequenas diferenças nas propriedades magnéticas ou à presença de diferentes magnetismos residuais dos TCs e, quanto maior a corrente transitória, ou de curto-circuito, maior poderá ser a corrente diferencial resultante.

Existe grande interesse no desenvolvimento de relés diferenciais pois esta forma de proteção é inerentemente mais seletiva do que outras filosofias de proteção. Entretanto, cada tipo de elemento do sistema apresenta dificuldades típicas que podem tornar difícil a utilização da proteção diferencial como aplicação universal. Por muito tempo, o uso de tal proteção em linhas de transmissão maiores que 20 km era impossibilitado pela necessidade de sincronização de medição e de transmissão de grande quantidade de dados de uma subestação para outra. Entretanto, todos os problemas relativos à proteção diferencial de LT vêm sendo solucionados pela aplicação de novas tecnologias nessa área. Alguns destes aspectos serão detalhados ao longo deste trabalho.

2.2 – O Relé Digital

O desenvolvimento de relés computadorizados teve início na década de 60, quando o computador começava a substituir muitas das ferramentas de análise na área de potência. Os cálculos de curto-circuito, fluxo de carga e estabilidade foram as primeiras implementações de soluções computadorizadas em SEP. A aplicação desta tecnologia em relés seria o próximo passo. Entretanto, essa aplicação era economicamente inviável e os computadores da época não suportavam a alta velocidade exigida pelas funções de proteção. A evolução dos computadores foi tão rápida que viabilizou técnica e economicamente os relés digitais [2]. Atualmente a

grande maioria dos projetos de novas subestações aplica exclusivamente relés de proteção digitais. Os relés de proteção eletromecânicos e eletrônicos instalados em subestações antigas vêm, também, sendo substituídos por modernos relés digitais.

Entre as vantagens dos relés digitais pode-se destacar [2]:

- **Custo:** No início, o custo dos relés digitais era equivalente a 10 a 20 vezes o custo dos relés convencionais. O custo dos relés digitais foi bastante reduzido e sua velocidade de processamento aumentou substancialmente. Para a maioria dos sistemas de proteção, deve-se considerar o custo competitivo dos relés digitais.
- **Confiabilidade e Auto-diagnose:** O relé digital pode ser programado para monitorar constantemente grande parte de seus sistemas de *hardware* e *software*, detectando assim qualquer defeito interno que possa existir. Na ocorrência de um defeito o relé pode se colocar fora de serviço e gerar um alarme ao sistema central. Esta característica é um dos mais importantes argumentos técnicos a favor desses relés.
- **Integração Digital:** Os computadores e a tecnologia digital têm se tornado a base da maioria dos sistemas empregados nas subestações. Medições, comunicação, telemetria e controle são todos baseados em computadores. Nas subestações modernas os relés digitais devem estar integrados naturalmente nesses sistemas.
- **Flexibilidade Funcional:** O relé digital pode ser programado para executar diversas funções. Desta forma ele também pode executar muitas outras tarefas na subestação tais como: medição, monitoramento, controle, etc.. Este relé pode ainda possuir característica adaptativa, modificando sua atuação em várias funções, para torná-las mais adequadas às condições dos SEP.

Os relés digitais consistem de sub-sistemas com funções bem definidas. O diagrama de blocos da Figura 5 mostra os principais sub-sistemas de um relé computadorizado.

- Os transformadores de entrada diminuem as tensões e correntes de entrada a níveis adequados aos microprocessadores. Os transformadores também permitem a isolamento galvânica entre as placas eletrônicas da proteção e os sinais provenientes dos TCs e TPs.
- Os sinais transitórios possuem grande quantidade de componentes harmônicas de alta ordem. Um filtro analógico passivo passa baixa é usado como filtro *anti-aliasing* impedindo que as altas frequências sejam amostradas com o objetivo de se evitar erros no processamento digital dos sinais.
- Um circuito *Sample and Hold* amostra as entradas analógicas em um mesmo instante e disponibiliza os sinais ao multiplexador. Este circuito evita a deformação provocada pela amostragem sequencial e conseqüente operação incorreta da proteção.
- O MUX (*Multiplex*) permite que seja usado apenas um conversor A/D (Analógico Digital) para várias entradas analógicas. As entradas analógicas são conectadas uma a uma pelo multiplexador ao conversor A/D.
- No conversor A/D os sinais analógicos são convertidos para a forma digital em intervalos definidos de amostragem.
- O módulo de entrada lógica informa o processador sobre o estado de chaves, disjuntores, seccionadoras e sobre a atuação de outras proteções.

- O processador controla o funcionamento do relé, faz a filtragem digital dos sinais para extração da componente fundamental, se pertinente, executa os cálculos e decide atuações.
- O módulo de saída lógica é responsável pelas atuações de disjuntores e alarmes decididos pelo processamento.

FIGURA 5 – Arquitetura de um Relé Digital

2.3 – O Relé Diferencial Digital para Linhas de Transmissão e o Uso do GPS

As linhas de transmissão formam a maior parte de um sistema elétrico de potência. Os relés de distância são os mais usados para proteção das LT, mas apresentam algumas limitações quando há faltas com altas resistências ou mesmo na proteção de LT com compensação série. A proteção diferencial de LT é imune à estes dois problemas pois usa as correntes medidas nas extremidades das linhas para realizar o cálculo da corrente diferencial resultante.

Em proteções diferenciais de corrente baseadas em microprocessadores cada amostra dos dados representa o valor instantâneo do sinal da corrente em um instante de tempo. Para se garantir que amostras obtidas em uma extremidade da LT possam ser comparadas com as obtidas na outra extremidade, deve-se prover alguma forma de sincronização de tempo. Desta maneira, o efeito das variações do atraso do canal no desempenho da proteção pode ser ignorado.

O Working Group H-7 [3] descreve o conceito de amostragem sincronizada em sistemas elétricos de potência para obtenção simultânea dos fasores de tensão e corrente em instantes específicos de tempo. São examinados vários métodos para prover sinais sincronizados com análise das vantagens e desvantagens de cada um. Uma vez que a escolha e o projeto do sistema de sincronização são cruciais para o sucesso de qualquer proteção orientada por ângulo de fase ou diferencial, no que se refere à precisão e confiabilidade, os autores concluem que somente dois dos sistemas pesquisados são capazes de suportar as aplicações de proteção: GPS ou os canais dedicados de fibra óptica, já disponíveis em muitas linhas de transmissão.

O GPS é um sistema de posicionamento, navegação e coordenação de tempo, baseado em satélites, desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América. Os sinais de tempo precisos e sinais de frequência estáveis são tão importantes quanto os sinais de navegação. Eles servem como fontes de sincronismo para comunicações globais, transações eletrônicas de todos tipos, redes de distribuição e transmissão de eletricidade, e inúmeras outras aplicações.

O GPS implementa o conceito de “diferença de tempo de chegada” usando a posição precisa de cada satélite e relógios atômicos próprios para gerar mensagens de navegação que são continuamente transmitidas por cada satélite do sistema. Essas mensagens podem ser recebidas e processadas por usuários em qualquer lugar do planeta para determinar sua posição e tempo com precisão de alguns metros e nanosegundos, respectivamente [4]. O sistema completo consiste de três segmentos: espaço, controle e usuário [5]:

- O segmento controle é composto por uma estação de controle *Master*, localizada em Colorado Springs (EUA), e outras estações monitoras em diferentes locais na terra. O segmento controle verifica a trajetória de cada satélite e envia, periodicamente, para o satélite sua predição de posição futura e correções de tempo. Essas correções são transmitidas do satélite para o usuário como parte da mensagem de navegação.
- O segmento espaço é constituído de 24 satélites em órbita circular. Estes satélites estão distribuídos em seis planos orbitais distantes aproximadamente 20200 km da superfície terrestre. Cada um dos satélites transmite sinais que incluem mensagem de navegação informando a posição atual e correção de tempo. Suas

posições orbitais asseguram que em qualquer ponto da terra e a qualquer momento os sinais de, pelo menos, quatro satélites possam ser recebidos.

- O segmento usuário é o próprio circuito eletrônico do usuário. Deve receber os sinais de, no mínimo, quatro satélites, calcular as diferenças de tempo e determinar sua posição. Não existe limite quanto ao número de receptores que podem usar simultaneamente o sistema, pois os satélites transmitem sinais para todos ao invés de direcionar as transmissões a um receptor específico.

A confiabilidade do sistema GPS é próxima do ideal pois [3]:

- É mantido pelo departamento de defesa americano para propósitos críticos de defesa e tem construído uma clientela civil grande e forte; será então seguramente conservado;
- Possui grande redundância devido ao conceito de múltiplos satélites, de reservas em órbitas e de relógio atômico em cada um;
- É disponível a qualquer tempo e em qualquer ponto da terra onde possa existir um sistema elétrico de potência;
- Com sua alta resolução (inferior à milissegundos) é adequado às exigências de precisão de aplicações de proteção e portanto não requer calibrações frequentes do receptor;
- O mercado está diminuindo o preço de cada receptor e aumentando a disponibilidade de produtos;
- Já se obteve experiência suficiente em sistemas GPS para se verificar seu bom desempenho em cada aplicação.

Em fevereiro de 1999, a União Européia anunciou a decisão de desenvolver um sistema de navegação por satélite europeu, chamado Galileu divulgado como

sendo compatível com o padrão de sinal GPS, embora planejado para ser um sistema independente [4]. Os satélites que irão compor o sistema Galileu têm previsão de lançamento a partir de 2006 e início de operação após dois anos. Esse sistema poderá ser usado como sistema alternativo ao GPS.

A Figura 6 mostra um sistema de proteção diferencial digital que utiliza os sinais do GPS para sincronização das medições em ambas subestações.

FIGURA 6 – Sistema de proteção diferencial digital

Os receptores GPS usados para sincronização de medição do relé diferencial são instalados em cada subestação das extremidades de uma LT [6]. As correntes das três fases são medidas pelos TCs. Garante-se a sincronização da amostragem em uma precisão de tempo na ordem de $1\mu s$ pois o GPS fornece o sinal de referência de tempo externo. As amostras sincronizadas em cada extremidade da LT são processadas e codificadas pelo relé local. Este relé transmite então seus dados para o relé remoto via um canal de comunicação. Simultaneamente o relé local recebe os dados do relé remoto por meio do mesmo canal.

A decisão de desligamento é tomada por um algoritmo matemático que calcula a corrente diferencial que flui pela LT. A corrente diferencial é a diferença vetorial entre os valores medidos da corrente da LT em cada extremidade. A decisão de desligamento é tomada se a diferença for superior a um valor limiar calculado pela soma escalar das correntes da LT. Desde que uma falta na LT protegida produz uma corrente diferencial, a falta será detectada pela proteção. Consequentemente, consegue-se a extinção rápida de qualquer tipo de falta na LT protegida.

A transferência dos dados pode ser feita por qualquer meio de comunicação que satisfaça as necessidades de cada sistema de proteção diferencial. Além disto, cada sistema de comunicação possui características próprias que devem ser consideradas para sua especificação: canais de voz telefônicos, sistemas microondas, rádios digitais, satélites, cabos OPGW (*Optical Ground Wire*), etc. O próprio canal de comunicação de dados pode ser usado também para sincronização das medições naquelas aplicações onde o projeto dispensar o GPS.

3 – LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Os parâmetros-série das linhas de transmissão, resistência e reatância indutiva, são responsáveis por quedas de tensão nas linhas. A reatância indutiva é responsável também, pelo ângulo de potência da linha. A compensação pode ser feita por meio de capacitores ligados em série, capazes de reduzir ou anular os efeitos da indutância da LT. Desta forma, a compensação série possibilita um meio econômico de maximizar a transferência de potência e melhorar a eficiência da transmissão de energia para longas distâncias.

As vantagens do uso de capacitores série em uma linha de transmissão, além da melhoria nos limites de estabilidade estática e transitória, garantem uma melhor distribuição de cargas no sistema, uma redução das perdas da transmissão e um melhor nível de tensão do sistema durante faltas.

Diante das vantagens apresentadas pela compensação série, sua instalação em linhas existentes pode adiar ou mesmo evitar a construção de uma nova linha, resultando também em vantagens financeiras. Em geral, a aplicação de capacitores série é economicamente viável em linhas de transmissão maiores que 300 km.. Entretanto, pode-se aplicá-los em linhas mais curtas se a linha faz parte de um sistema de transmissão longo. Normalmente os capacitores série são especificados para compensar entre 25 a 75% da reatância indutiva da linha [7].

Da mesma forma que a corrente de carga da linha circula pelo capacitor, as correntes de falta também o fazem por um curto período de tempo. Isto provoca sobretensões e exige proteções que serão detalhadas na seção a seguir.

3.1 - Proteções de Banco de Capacitores Série

Uma falta interna em uma linha com compensação série, bem como, uma falta externa, podem provocar sobretensões no banco de capacitores enquanto persistir a corrente de curto-circuito. Isto ocorre porque a corrente de falta pode ser muito maior que a corrente nominal do banco de capacitores. Geralmente os bancos de capacitores, que são construídos para operarem com tensão nominal em seus terminais, não suportam essas sobretensões pois, se assim fossem especificados, seriam de custo muito mais alto. Por este motivo, são instalados equipamentos adicionais de proteção do capacitor, que limitam a sobretensão.

Os sistemas de proteção de banco de capacitores que utilizam varistores de óxido metálico (MOV) foram difundidos após os anos 80. Até então, os capacitores eram protegidos por *gaps*, que atuavam se a tensão atingisse níveis inaceitáveis. A maioria das instalações mais novas usa esquemas de proteção mais completos com varistores de óxido metálico [8]. A característica do óxido metálico (Figura 7) é tal que, diante da tensão nominal de operação, comporta-se como um elemento de alta impedância e, somente uma corrente de fuga flui através deste. O aumento da tensão aplicada acima da tensão nominal faz com que o material inicie a condução de uma quantidade crescente de corrente, enquanto a tensão permanece quase constante. Desde que a tensão aplicada diminua novamente ao nível nominal o material interrompe a condução de corrente. O nível proteção para ajuste do MOV (V_{pl}) é a tensão máxima resultante no capacitor diante da máxima corrente de falta especificada.

FIGURA 7 – Característica $V \times I$ do MOV

A Figura 8 mostra um diagrama simplificado da proteção de um banco de capacitor série. O sistema de proteção consiste de quatro elementos básicos: MOV, *gap*, dispositivo limitador de corrente e uma chave *bypass*. Este esquema de proteção é muito utilizado atualmente. Por este motivo, foi escolhido para implementação da LT compensada simulada no ATP, usada para o desenvolvimento do algoritmo, objeto principal deste trabalho.

FIGURA 8 - Diagrama de proteção de um banco de capacitor

Para muitos sistemas não é economicamente viável projetar um MOV com capacidade de absorção de energia para o pior caso de faltas internas na linha. Geralmente, a melhor opção é projetar o MOV que seja capaz de absorver a energia no pior caso de falta externa. Assim, para faltas externas, o MOV conduz provendo proteção contra sobretensão durante faltas externas e re-inserção do capacitor. Para faltas internas à linha, o MOV continua protegendo o capacitor, mas a proteção do MOV e o sistema de controle disparam o *gap* para limitar a energia absorvida pelo MOV em um valor abaixo de seu limite de projeto. Isto evita o sobreaquecimento e conseqüentes danos aos discos do MOV.

A corrente do *gap* é eliminada quando o disjuntor da linha abre ou então quando a chave *bypass* fecha. Em algumas aplicações, o controle inicia o fechamento da chave *bypass* no mesmo instante que o *gap* é disparado, ou a chave *bypass* pode ser fechada somente se a corrente permanecer no *gap* por um tempo mais longo. A chave pode ser usada, também, para inserção manual ou retirada de serviço do capacitor.

O dispositivo limitador de corrente é conectado em série com o *gap* e com a chave *bypass*. Consiste de um reator de baixa reatância que pode ser ligado em paralelo com uma resistência. Esse dispositivo limita a alta corrente de descarga do capacitor durante a atuação do *gap*.

3.2 –Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série

O uso de capacitores série em linhas de transmissão apresenta vários problemas para os esquemas convencionais de proteção de LTs. As proteções de comparação de fase, comparação direcional ou proteção de distância são, geralmente, projetados para linhas e fontes indutivas e dependem de relações entre as fases das correntes e tensões. A instalação de capacitores modifica essas relações. As inversões de tensão e de corrente são os principais efeitos indesejáveis provocados pelo capacitor série sob a óptica da proteção.

Durante uma falta na LT compensada pode ocorrer uma das inversões citadas. A inversão de tensão ocorre quando a impedância do capacitor é menor do que a impedância da fonte. Por outro lado, a inversão de corrente ocorre quando a impedância do capacitor é maior do que a impedância da fonte. Em ambos os casos as proteções referentes a esta LT podem operar indevidamente, ou mesmo, não operar.

Além dos efeitos já descritos, a operação da proteção do banco de capacitores, que inclui *gaps*, MOVs e chaves *bypass*, também provoca transitórios e desequilíbrios que devem ser considerados no projeto do sistema de proteção da LT de tal forma a garantir sua confiabilidade.

A localização do capacitor no meio da LT e a compensação inferior a 50% da reatância positiva da linha reduzem os fenômenos adversos mencionados. O estudo de todos os efeitos inerentes à compensação série permite a otimização dos ajustes das proteções existentes e também, a pesquisa de novos relés de proteção. Este é o objetivo do algoritmo da proteção diferencial digital para linhas de transmissão proposto neste trabalho.

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde o desenvolvimento dos primeiros relés diferenciais a fio piloto até os dias de hoje, muitas pesquisas têm sido realizadas buscando-se incrementar as aplicações de relés diferenciais para proteção de linhas de transmissão. Muitas dessas pesquisas resultaram na fabricação de relés de proteção usados atualmente.

A seguir são descritas as principais contribuições encontradas para o atual estágio tecnológico dos sistemas de proteção diferenciais de LT.

Kitagawa et al. [9] apresentam os estudos teóricos e experimentais do primeiro relé diferencial que utiliza FM (Frequência Modulada) para transmissão das medições de correntes de cada terminal. Os valores instantâneos são modulados e transferidos via sistema de comunicação microondas. Uma banda de frequência de voz, de 300 a 3400Hz, é dedicada para cada corrente. A transmissão de dados em FM, apesar de apresentar excelente qualidade, também está sujeita a ruídos como qualquer outro processo. Diante disto, os autores exploram também, as principais causas e efeitos dos ruídos. Os relés desenvolvidos podem ser aplicados tanto em LT de dois terminais como em LT com derivações. Foi usada uma associação do relé diferencial com relé sub-tensão como critério de partida, para se evitar a operação indevida da proteção no caso de LT com faltas externas.

McCleer e Mir [10] destacam a insensibilidade dos relés diferenciais convencionais para faltas de alta impedância devido à corrente de restrição resultante, quando o equipamento protegido está submetido à alta corrente de carga. Existe maior possibilidade deste problema ocorrer em LT radiais ou naquelas que

interligam grandes estações geradoras com outras fontes fracas. É proposta uma nova técnica, denominada Δ -diferencial, que usa apenas as correntes de falta para as funções de proteção, onde o algoritmo desenvolvido cancela as correntes de pré-falta. Esta técnica pode ser aplicada na proteção de geradores, transformadores, barramentos e linhas de transmissão. A teoria foi testada em um protótipo em laboratório que apresentou bom desempenho até mesmo para resistências de falta de valor elevado. Os autores analisam ainda os efeitos dos erros dos TCs mas sem demonstrar o comportamento do relé Δ -diferencial diante dos efeitos adversos, que podem ocorrer durante faltas externas, resultantes da saturação dos TCs.

Sun e Ray [11] propõem um sistema de proteção diferencial que faz uso das vantagens da fibra óptica quanto a sua imunidade aos efeitos causados por tensões externas e diferenças de potencial de terra entre subestações. A influência de tensões externas está relacionada de alguma forma com as causas de 90% de operações indevidas ou falhas de desligamento por relés a fio piloto. O relé proposto também usa novas técnicas para os métodos de comparação de fase. Os sinais de correntes são compostos em um único sinal, eliminando completamente a dependência da fase e amplitude. A composição dos sinais torna impossível a seleção de fase e por consequência impede o desligamento monopolar. Uma vez que a modulação em frequência disponível na época não possuía suficiente velocidade e precisão exigida por essa aplicação, foi desenvolvida a modulação pulso-período, em que, o período da portadora é variado linearmente em função da amplitude do sinal. A filosofia de operação desse relé não depende do tamanho das LT. Entretanto, deve-se considerar a extensão máxima dos canais de fibra óptica e os meios para contornar este fator

limitante, tais como: fontes e detetores de luz mais sofisticados e o uso de repetidores de sinal.

Sugiyama et al. [12] desenvolveram um sistema de proteção diferencial baseado também, na transmissão de dados por fibras ópticas. Após extensivos testes do protótipo desenvolvido, um sistema similar foi instalado com sucesso para proteção de uma LT subterrânea de 275kV com 8,5km de extensão. Os sinais de medição de corrente são multiplexados, convertidos e transmitidos para a extremidade remota da LT por meio da fibra óptica. Quando recebidos, os sinais ópticos são convertidos novamente em sinais elétricos analógicos e então demultiplexados. Como as formas de onda são transmitidas como sinais PCM (*Pulse Code Modulation*), a seção de discriminação do relé diferencial poderia ser também digital. Entretanto, os autores optaram pelo uso de correntes analógicas reconstruídas pois assim minimiza-se a necessidade de sincronização precisa da medição entre as duas subestações. Deve-se ressaltar que as medidas adotadas na pesquisa contribuíram para o expressivo aumento da confiabilidade do relé. Além das vantagens do uso de fibras ópticas, foram implementados dispositivos de monitoração em todo sistema de proteção e comunicação.

Aggarwal e Johns [13] apresentam um estudo bastante amplo sobre proteção diferencial de LT com derivação. Propõem o uso de transmissão de dados em banda larga entre as subestações, oferecido por equipamentos digitais e fibras ópticas. A proteção é baseada no esquema Mestre-Escravo no qual uma subestação é denominada mestre e é responsável pela recepção dos sinais de medição das subestações remotas, e deve decidir o desligamento dos disjuntores das três subestações. Foi utilizado o conceito de transformação modal das correntes medidas

de tal modo que apenas dois sinais analógicos são convertidos e transmitidos por cada subestação. O primeiro componente modal é formado pela diferença entre as correntes das fases *a* e *c*. O segundo componente resulta da diferença entre as correntes das fases *a* e *b*. Esta transformação proporciona certa economia no *hardware* do relé diferencial e nos sistemas de comunicação, mas impede a identificação da fase faltosa. O desempenho do relé proposto se mostrou bastante satisfatório em todas simulações realizadas. Ao esquema do relé diferencial foi adicionado um critério de decisão, com conseqüente aumento de segurança, no qual exige-se a tendência de atuação diferencial por quatro amostras consecutivas para se obter a ordem final de desligamento.

Aggarwal e Johns [14] também propõem uma abordagem alternativa para proteção diferencial convencional, baseada na derivação dos sinais diferenciais que são funções das correntes e tensões medidas em cada extremidade da LT. Essa técnica torna desnecessária a compensação do nível de decisão do relé diferencial devido às correntes capacitivas, possibilitando assim, maior sensibilidade a menores níveis de correntes de faltas. Este sistema utiliza-se também do princípio Mestre Escravo e transmissão de dados por fibra óptica. Os sinais de corrente e tensão são proporcionais ao modo aéreo uma vez que é usada a mesma transformação modal proposta em [13]. Esta solução foi adotada pelos autores pois aumenta a estabilidade da proteção em LT de circuitos duplos. As simulações em computador do sistema comprovaram seu correto funcionamento e buscaram investigar, principalmente, as seguintes condições: resistência de falta elevada, desempenho independente da capacidade da fonte, tempo de operação repetitivo para faltas em diferentes

localizações e ainda, a imunidade aos efeitos de saturação dos TCs para faltas internas e externas.

Ordacgi, López e Moraes [15] descrevem o primeiro sistema de proteção diferencial analógico, baseado em canais de comunicação FM (Frequência Modulada) por fibras ópticas, instalado no Brasil. É o sistema de proteção primária adotado para as quatro linhas de transmissão de 500 kV que interligam a usina de Itaipu e a subestação de Foz do Iguaçu. O sistema de proteção é constituído pelo esquema diferencial segregado por fase em modo de operação Mestre-Escravo e a comunicação é composta por quatro canais ópticos modulados em frequência. A adoção desta tecnologia permitiu conjugar diversas vantagens tais como alta confiabilidade, seletividade, estabilidade e perfeita seleção de fase, exigidas por um sistema elétrico que chega a transmitir 6,6 GVA.

Aggarwal, Husseini e Redfern [16] apresentam a implementação prática e os testes em laboratório do esquema de proteção diferencial de alta velocidade para aplicação em LT de extra alta tensão com derivação proposto em [8]. O sistema é baseado no sistema Mestre-Escravo com transmissão por fibra óptica e transformação modal das correntes. É enfatizado neste trabalho o projeto do comparador do relé e das unidades associadas de aquisição de dados.

Lobos [17] propôs um método de proteção diferencial de LT usando componentes simétricas. A proteção compara a função tempo (coseno) com a função ortogonal (seno) das componentes simétricas de sequência positiva das extremidades da LT. A função tempo é calculada de acordo com o algoritmo SD4c e a função ortogonal de acordo com o algoritmo SD4s. Por este método obtém-se tempos de

operação menores do que 8ms com frequência de amostragem de 500Hz ou 4ms para frequência de amostragem de 1kHz.

Ernest et al. [18] desenvolveram a proteção de LT por comparação de carga. São investigados os três principais problemas da proteção diferencial convencional, todos relacionados à comunicação:

- Perda da proteção diferencial se o canal de comunicação falhar;
- Exigência de grande capacidade de comunicação;
- Necessidade de compensação precisa do atraso do canal.

Mede-se a amplitude dos sinais em Ampere/segundos (i.e. Coulomb). A comparação de carga é baseada no princípio da conservação de carga em um nó. No esquema desenvolvido a informação de comparação de carga de cada fase é enviada somente uma vez por ciclo. É enviada apenas, informação do semi-ciclo positivo das correntes de fase e do semi-ciclo negativo da corrente residual. Esta técnica reduz em 50% as necessidades de capacidade de comunicação. A curva característica dessa proteção é similar a da diferencial convencional exceto pelo fato de que sua curva é menor e quase paralela ao eixo x até níveis razoáveis de corrente de restrição. A operação do novo relé é o resultado da combinação das características dos relés de comparação de fase com comparação de amplitude. Embora o método proposto possua vantagens em relação às outras proteções diferenciais, ele é inerentemente mais lento pois deve esperar por um cruzamento por zero ao final do semi-ciclo positivo da corrente de fase (e semi-ciclo negativo para corrente residual) antes de transmitir a informação para o terminal remoto. Outra desvantagem deste método é sua dependência de cruzamentos por zero e a necessidade de semi-ciclos de, pelo menos, 6ms. Isto significa que o esquema proposto é incapaz de detectar faltas no

caso de correntes corrompidas (alta frequência). Esta característica do método também provoca grande atraso na operação para faltas internas com alto nível de componente Corrente Contínua (CC) que pode ocorrer perto de estações geradoras. Nestes casos de faltas, a onda de corrente pode não possuir cruzamentos por zero durante vários ciclos.

Albrecht et al. [19] apresentam os conceitos básicos de uma abordagem digital para as necessidades de comunicação de um sistema do novo esquema de proteção por comparação de carga apresentado em [18]. O sistema de comunicação foi projetado prevendo a utilização de apenas 4 fios de canais de voz. É necessário também o envio de várias mensagens auxiliares adicionais às informações de comparação de carga. Essas mensagens auxiliares incluem transferência de desligamento direto, desligamento de alta velocidade, desligamento por fonte fraca, disjuntor aberto, etc. A comparação de carga é projetada para funcionar em conjunto com vários tipos diferentes de meios de comunicação: circuitos analógicos de voz telefônicos e microondas, canais digitais de faixa larga e fibras ópticas. Desde que a proteção é destinada tanto para uso de canais de voz como canais de banda larga o projeto foi focado no pior caso: modem de 7200bps. Havendo correto funcionamento nesta taxa de comunicação, o sistema irá operar corretamente, também, para qualquer outra taxa ou sistema melhor que o adotado.

Yamaura, Kurosawa e Ayakawa [20] propõem melhorias à técnica de compensação de corrente de carga capacitiva da LT nos relés diferenciais PCM. Estes relés foram aplicados comercialmente nos anos 80 e são, muito usados como proteção principal da maioria dos sistemas de extra alta tensão no Japão. Foi aplicado um circuito de *hardware* para operação diferencial de cada tensão do terminal para

compensar a corrente de carga, e então, aplicou-se uma aproximação diferencial modificada de cada tensão do terminal baseada em cálculo numérico para compensação da corrente de carga. Um dispositivo transmite os sinais do relé diferencial PCM em um formato específico, gera um sinal de sincronização para amostragem dos sinais em ambas subestações e os envia ao relé. O nível de ruído branco dos dados convertidos pelo A/D de 16 bits é reduzido para 25% do nível de ruído dos dados da versão anterior que utiliza o conversor A/D de 12 bits. A redução do ruído é importante pois os erros fixos aumentam na proporção direta ao número de terminais, produzindo assim, efeitos na sensibilidade para detecção de faltas.

Redfern e Chiwaya [21] utilizam novas técnicas para proteção diferencial de alimentadores de baixa e média tensão usando as capacidades limitadas de transferência de dados de um canal digital de voz. O algoritmo desacopla as medições de corrente da frequência do sistema de potência e de sua forma de onda, obtendo com isso, alta tolerância aos erros introduzidos pelos atrasos dos canais de comunicação. O principal objetivo dos autores foi investigar a habilidade do método proposto diante dos limites de comunicação impostos pela comunicação em 2400 bps. Esta técnica compara os dados obtidos localmente com dados referenciais locais, denominados sinais de polarização, para produzir um sinal não senoidal que caracteriza as correntes trifásicas locais. São obtidos dois sinais usando processo similar, mas com referência ortogonal para fornecer dados de amplitude e fase.

Li et al. [8] apresentam a utilização do GPS para sincronização de amostragem e seus efeitos na operação em um relé de proteção diferencial numérico. Foi usado o programa ATP para simulação uma LT de 33kV com faltas de diferentes tipos e localizações. Os testes foram realizados em um simulador de proteção,

desenvolvido pelos autores, que pode operar de dois modos: medição perfeitamente sincronizada por GPS em cada subestação e operação não sincronizada associada com erros de tempo de amostragem. Os resultados obtidos mostraram claramente que a sincronização precisa da amostragem melhora muito a sensibilidade e reduz o tempo de resposta do sistema de proteção.

Adamiak e Premerlani [22] desenvolveram uma nova abordagem à proteção diferencial digital que oferece melhor desempenho em relação à técnica de restrição percentual convencional. É calculada a variância da diferença entre os valores amostrados e os valores estimados pela técnica de Fourier. Esta medição de variância é usada como sinal de restrição quando a forma de onda é distorcida devido à saturação do TC, conteúdo harmônico, ou transitórios de faltas. A restrição adaptativa baseada neste princípio é usada para melhorar a sensibilidade e segurança do esquema proposto e é, dinamicamente modificada de acordo com a magnitude da medição de erro. O algoritmo diferencial emprega um novo método de cálculo da transformada de Fourier que permite à proteção usar sinais parciais de Fourier chamados “*Phaselets*” ao invés da janela fixa normalmente usada. O conceito da janela variável foi proposto para melhorar a resposta do estimador de fasores e, como resultado direto, aumentar a velocidade de operação do relé. Os “*Phaselets*” são somas parciais do produto de amostras do sinal e coeficientes seno/coseno e podem ser agrupados para criação do fasor. Esta técnica permite o cálculo eficiente de fasores sobre janelas de amostras que não são restritas a um múltiplo inteiro de meio ciclo da frequência fundamental. Em condições estáveis os “*Phaselets*” são somados por um ciclo criando um equivalente a uma janela DFT (*Discrete Fourier Transform*) de um ciclo. Quando um distúrbio é detectado na LT, o tamanho da

janela é dinamicamente reduzido ao tamanho de um “*Phaselets*” que inclui somente o conteúdo da falta. A cada novo “*Phaselets*” obtido, o tamanho da janela e a precisão são aumentadas. Desta forma, o estimador de fasor responde mais rapidamente pois os dados de pré-falta foram retirados. Neste trabalho foi proposto que a compensação de corrente capacitiva seja baseada na subtração do termo $C \frac{dv}{dt}$ da corrente medida em cada terminal da LT.

Coury et al. [23] desenvolveram o relé diferencial de corrente, baseado em agentes, que utiliza uma rede de comunicação. Os agentes propostos neste trabalho são rotinas de programas capazes de procurar informações em rede, interagindo com equipamentos e executando tarefas dos relés. Além disto, os agentes são autônomos e cooperativos. Os autores adotam o uso do GPS como solução para a sincronização das medições. A importância da estrutura de comunicação e os problemas relacionados ao tráfego de informações são bastante explorados neste trabalho. Foi usado um simulador de rede nas simulações de comunicações, onde a topologia de rede foi concebida para refletir diferentes níveis de congestionamento que possam ocorrer tanto na Internet como em intranets dedicadas. Os relés diferenciais baseados em agentes foram testados com faltas geradas no *software* PSCAD/EMTDC, que foram simuladas considerando diferentes características de curto-circuito. Os resultados comprovaram a viabilidade desta tecnologia aplicada à proteção de sistemas de potência, além de destacarem suas vantagens.

Kim [24] desenvolveu um algoritmo para proteção diferencial de linhas de transmissão com compensação série. O trabalho descreve o comportamento da simulação em computador do algoritmo proposto, testado para uma LT de 550kV de 200 milhas. O esquema utilizado subtrai das correntes de carga e falta a corrente que

flui pela admitância da LT. São investigados também os limites de funcionamento para resistências de falta extremamente altas. As faltas foram simuladas utilizando-se o programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) e supondo-se medição perfeitamente sincronizada por GPS nas duas subestações.

Novosel et al. [25] apresentam um novo sistema que busca melhorar a medição de alcance de relés de distância e localizadores de falta para linhas com compensação série. Foi implementado um método determinístico e um outro que utiliza redes neurais artificiais (RNA) para calcular a tensão sobre o capacitor. Estes métodos são adequados àquelas instalações com capacitor na extremidade da LT e medição de tensão no lado da barra. O cálculo de tensão proposto pode ser usado por qualquer outro sistema de proteção. A compensação obtida para o comportamento não-linear do capacitor série e dispositivos de proteção associados não é sensível às diferenças dos sistemas onde a compensação está instalada. Os métodos determinísticos e por redes neurais propostos modelam precisamente as não-linearidades de qualquer compensação série. Entretanto, a primeira técnica fornece resultados melhores.

Andrade [26] descreve as principais soluções apontadas por diversos autores para proteção de linhas de transmissão com compensação série utilizando-se relés de distância. O autor detalha a implementação realizada, em Matlab, de um algoritmo de proteção de distância. O algoritmo utiliza a técnica conhecida como “compensação de tensão”. Este método reduz bastante os erros introduzidos pelos capacitores série nos sistemas de proteção de distância. Os testes foram realizados com vários tipos de defeitos em três sistemas diferentes simulados no ATP, demonstrando bom desempenho diante de grande parte dos casos.

5 - SIMULAÇÕES DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ATP

Este Capítulo apresenta uma descrição das simulações de faltas em linhas de transmissão geradas no *software* ATP (*Alternative Transients Program*), necessárias para os testes do algoritmo de proteção diferencial desenvolvido.

O maior número de faltas em sistemas elétricos de potência ocorre nas linhas de transmissão devido à sua extensão física. Estima-se que 85% das faltas nos SEP ocorram em linhas de transmissão, 12% em barramentos e apenas 3% em transformadores/geradores [27]:

As falhas transitórias são as mais comuns em LT, representando aproximadamente 80-85% de todas ocorrências. Têm as descargas atmosféricas como sua principal causa, mas também podem ser causadas por pássaros, árvores caídas, linhas pendentes, queimadas de vegetação, etc. Este tipo de falta desaparece após curto intervalo de tempo ou após um desligamento da LT. A probabilidade de falhas na linha causadas por descargas atmosféricas é de 0,2 a 3 falhas para cada 100km de LT ao ano [27].

As falhas permanentes podem ser causadas por condutores partidos, árvores caídas na linha, quedas de torres, etc. Essas faltas devem, obrigatoriamente, ser localizadas e reparadas antes de normalizar a LT em serviço.

Muitas faltas que ocorrem no sistema elétrico de potência são gravadas em registradores de perturbação. Estas faltas reais registradas seriam úteis para testes de

novos relés de proteção. Entretanto, isto não é possível pois ainda não existe uma grande base de dados disponível. Torna-se necessário então, o uso de programas para simulação de faltas. O *software* ATP efetua a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas por um método que utiliza a matriz admitância nas barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. O programa permite também a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, etc.

Para as simulações de faltas deste trabalho foi escolhido o sistema elétrico do estado de São Paulo que envolve as subestações de AGV (Água Vermelha), RPR (Ribeirão Preto), SBO (Santa Barbara d'Oeste) e ARA (Araraquara), com as respectivas LT e fontes equivalentes – Figura 9. O maior número de faltas foi gerado na LT AGV – RPR, pois é para esta linha de transmissão que será testado o algoritmo de proteção diferencial proposto. Entretanto, são incluídas outras LT e subestações para aproximar o modelo das condições reais e permitir a aplicação de faltas externas ao trecho protegido para as quais o algoritmo deve distinguir e decidir entre a atuação ou não da proteção.

FIGURA 9 – Diagrama unifilar do sistema sem compensação série sob estudo

O mesmo sistema da Figura 9 foi modificado para obtenção de um sistema elétrico de potência que contivesse uma linha de transmissão com compensação série. Utilizou-se os mesmos parâmetros das linhas e do sistema elétrico para simulação das faltas em linhas compensadas. A preparação dos arquivos de simulação da linha compensada foi realizada com o auxílio do *software* ATP-Draw. Este é um programa gráfico que gera os arquivos no formato cartões usados como arquivo de entrada do ATP. O diagrama do SEP com compensação série desenhado no ATP-Draw é mostrado na Figura 10.

FIGURA 10 – Diagrama unifilar do sistema com compensação série sob estudo, desenhado no ATP-Draw

O ATP trabalha com um arquivo de dados em formato texto que pode ser editado em qualquer editor de texto e deve ser gravado em formato ASCII. O ATP lê este arquivo de dados e após efetuar o processamento gera um outro arquivo com todo o estudo efetuado gravado com a extensão LIS. Além desse arquivo de saída, o programa também pode gerar outro de extensão PL4, que apresenta os valores de tensão, corrente, potência e energia, na forma de vetores coluna.

5.1 – Cálculo dos Parâmetros das Linhas de Transmissão

A rotina auxiliar *Line Constants* do *software* ATP permite o cálculo dos parâmetros da L.T.. Esta rotina calcula os valores de sequência positiva e zero referentes às resistências, reatâncias e susceptâncias, considerando a LT com transposição. O arquivo de entrada necessário para este cálculo exige informações sobre os cabos condutores, cabos pára-raios, dimensões das estruturas das torres, resistividade do solo e frequência para os quais os parâmetros elétricos da LT serão calculados. Estes dados são apresentados a seguir:

LT AGV – RPR

Tensão = 440 kV

Comprimento = 322,93 km

Resistividade do solo = 250Ω

CABO PÁRA-RAIOS:

02 cabos pára-raios

Tipo Cabo de aço 3/8"

Resistência CC = $4,188\Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 9,25 mm

Relação T/D = 0,5

VMID = 24,90

ESTRUTURAS

802 Torres - maioria do tipo S

CABO CONDUTOR:

04 cabos condutores por fase

Tipo ACSR Grosbeak 636 MCM

Resistência CC = $0,08990\Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 25,16 mm

Diâmetro Interno T = 9,27 mm

Relação T/D = 0,3684419713831

VMID = 11,50 m

LT RPR – SOB

Tensão = 440 kV

Comprimento = 173,30 km

Resistividade do solo = 250Ω

CABO PÁRA-RAIOS:

02 cabos pára-raios

Tipo Cabo de aço 3/8"

Resistência CC = $4,188\ \Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 9,25 mm

Relação T/D = 0,5

VMID = 24,90

LT AGV – ARA

Tensão = 440 kV

Comprimento = 308,56 km

Resistividade do solo = 250Ω

CABO PÁRA-RAIOS:

02 Cabos do tipo ALMELEC 11,2

Resistência CC = $0,69500\ \Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 11,25 mm

Diâmetro Interno T = 6,75 mm

Relação T/D = 0,60

VMID = 24,90

LT ARA – SOB

Tensão = 440 kV

Comprimento = 140 km

Resistividade do solo = 250Ω

CABO PÁRA-RAIOS:

02 Cabos do tipo ALMELEC 11,2

Resistência CC = $0,69500\ \Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 11,25 mm

Diâmetro Interno T = 6,75 mm

Relação T/D = 0,60

VMID = 24,90

ESTRUTURAS

414 Torres - maioria do tipo S

CABO CONDUTOR:

04 cabos condutores por fase

Tipo ACSR Grosbeak 636 MCM

Resistência CC = $0,08990\ \Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 25,16 mm

Diâmetro Interno T = 9,27 mm

Relação T/D = 0,3684419713831

VMID = 11,50 m

ESTRUTURAS

724 Torres - maioria do tipo S

CABO CONDUTOR:

04 cabos condutores por fase

Tipo ACSR Grosbeak 636 MCM

Resistência CC = $0,08990\ \Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 25,16 mm

Diâmetro Interno T = 9,27 mm

Relação T/D = 0,3684419713831

VMID = 11,50 m

ESTRUTURAS

328 Torres - maioria do tipo S

CABO CONDUTOR:

04 cabos condutores por fase

Tipo ACSR Grosbeak 636 MCM

Resistência CC = $0,08990\ \Omega/\text{km}$

Diâmetro Externo D = 25,16 mm

Diâmetro Interno T = 9,27 mm

Relação T/D = 0,3684419713831

VMID = 11,50 m

Pode-se observar nas informações expostas anteriormente que a LT AGV - RPR possui as mesmas características da LT RPR - SBO e que a LT AGV - ARA possui as mesmas características da LT ARA - SBO, excetuando-se o comprimento e o conseqüente número de torres. A Figura 11 mostra o perfil da torre tipo S que, por representar a grande maioria das torres usadas nestas quatro LT, será usada nos levantamentos dos parâmetros executados no ATP.

FIGURA 11 – Perfil da torre tipo S

Na Figura 12 é listado o arquivo de entrada da rotina *Line Constants* para as LT AGV-RPR e LT RPR-SBO, que possuem os mesmos tipos de cabos e a grande maioria de estruturas de tipo S. O mesmo ocorre com as LT AGV-ARA e LT ARA-SBO e seu arquivo de entrada é listado na Figura 13.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C CALCULO DE PARAMETROS DAS LINHAS DE TRANSMISSAO
C
C AGUA VERMELHA / RIBEIRAO PRETO
C RIBEIRAO PRETO / SANTA BARBARA D OESTE
C
C C:\ATP\LINE_CON\AGV_RPR.DAT
C
C CONDUTORES DE FASE
C Cabo GROSBEAK 636 - ACSR
C T/D=0.36844197
C resist.= 0.08990 R/km
C diametro externo D=2.516cm
C diametro interno T=0.927cm
C
C PARA-RAIOS
C Cabo de ACO EHS 3/8
C T/D=0.5
C resist. = 4.188 R/km
C diametro externo D = 0.925cm
C
C
C LINE CONSTANTS
C METRIC
C
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C P SKIN(RESES ) IX(REACT ) (DIAM ) (HORIZ ) (VTOWER) (VMID ) (SEPAR ) (ALPH) NB
1 .368 .08990 4 2.516 -11.40 23.00 11.5
1 .368 .08990 4 2.516 -11.40 23.40 11.9
1 .368 .08990 4 2.516 -11.00 23.40 11.9
1 .368 .08990 4 2.516 -11.00 23.00 11.5
2 .368 .08990 4 2.516 -0.20 23.00 11.5
2 .368 .08990 4 2.516 -0.20 23.40 11.9
2 .368 .08990 4 2.516 0.20 23.40 11.9
2 .368 .08990 4 2.516 0.20 23.00 11.5
3 .368 .08990 4 2.516 11.00 23.00 11.5
3 .368 .08990 4 2.516 11.00 23.40 11.9
3 .368 .08990 4 2.516 11.40 23.40 11.9
3 .368 .08990 4 2.516 11.40 23.00 11.5
0 .5 4.188 4 0.925 -8.10 32.40 24.9
0 .5 4.188 4 0.925 8.10 32.40 24.9
BLANK card ending conductor cards within "LINE CONSTANTS" data
C
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
250. 600.0 1 1 0
BLANK card ending frequency cards of "LINE CONSTANTS" data
BLANK card ending "LINE CONSTANTS" data cases
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

FIGURA 12 - Arquivo da rotina *Line Constants* para as LTs AGV-RPR e RPR-SBO

```

BEGIN NEW DATA CASE
C CALCULO DE PARAMETROS DAS LINHAS DE TRANSMISSAO
C
C AGUA VERMELHA / ARARAQUARA
C ARARAQUARA / SANTA BARBARA D OESTE
C
C C:\ATP\LINE_CON\AGV_ARA.DAT
C
C CONDUTORES DE FASE
C Cabo GROSBEAK 636 - ACSR
C T/D=0.36844197
C resist.= 0.08990 R/km
C diametro externo D=2.516cm
C diametro interno T=0.927cm
C
C PARA-RAIOS
C Tipo ALMELEC 11.2
C T/D= 0.6
C resist. =0.695 R/km
C diametro externo D = 1.125cm
C diametro interno T = 0.675cm
C
C
LINE CONSTANTS
METRIC
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C P SKIN (RESIS ) IX (REACT ) (DIAM ) (HORIZ ) (VTOWER) (VMID ) (SEPAR ) (ALPH) NB
1 .368 .08990 4      2.516 -11.40 23.00 11.50
1 .368 .08990 4      2.516 -11.40 23.40 11.90
1 .368 .08990 4      2.516 -11.00 23.40 11.90
1 .368 .08990 4      2.516 -11.00 23.00 11.50
2 .368 .08990 4      2.516 -0.20 23.00 11.50
2 .368 .08990 4      2.516 -0.20 23.40 11.90
2 .368 .08990 4      2.516 0.20 23.40 11.90
2 .368 .08990 4      2.516 0.20 23.00 11.50
3 .368 .08990 4      2.516 11.00 23.00 11.50
3 .368 .08990 4      2.516 11.00 23.40 11.90
3 .368 .08990 4      2.516 11.40 23.40 11.90
3 .368 .08990 4      2.516 11.40 23.00 11.50
0 .6 .69500 4      1.125 -8.10 32.40 24.90
0 .6 .69500 4      1.125 8.10 32.40 24.90
BLANK card ending conductor cards within "LINE CONSTANTS" data
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
250.      600.0      1 1 0
BLANK card ending frequency cards of "LINE CONSTANTS" data
BLANK card ending "LINE CONSTANTS" data cases
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

FIGURA 13 - Arquivo da rotina *Line Constants* para LTs AGV-ARA e ARA-SBO

5.1.1 – Comparação entre os Valores Teóricos e Calculados

Os resultados da rotina *Line Constants* para as frequências de 60Hz e 600Hz, bem como os valores teóricos são mostrados a seguir. Nos cálculos para as frequência de 60Hz visava-se apenas a validação dos métodos e arquivos usados, o que pode ser comprovado observando-se a pequena diferença entre os valores teóricos e os obtidos nesta frequência. Foram usados arquivos para cálculos dos parâmetros em 600Hz, ao invés de 60Hz, com o objetivo de se utilizar uma correção simplificada da dependência dos valores com a frequência.

LT AGV - RPR

VALORES TEÓRICOS PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

$$Z_0 = 0,32010 + j 1,31413 \, \Omega/\text{km}$$

$$Z_1 = 0,02458 + j 0,338124 \, \Omega/\text{km}$$

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

Seqüência	Resistência ohm/km	Reatância ohm/km	Susceptância Siemens/km
Zero :	3.21272E-01	1.31509E+00	3.06862E-06
Positiva:	2.29842E-02	3.71427E-01	4.45013E-06

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 600 Hz

Seqüência	Resistência ohm/km	Reatância ohm/km	Susceptância Siemens /km
Zero :	1.72906E+00	8.19908E+00	3.15201E-05
Positiva:	4.51009E-02	3.55359E+00	4.63088E-05

LT RPR - SBO

VALORES TEÓRICOS PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

$$Z_0 = 0,320619 + j 1,31487 \Omega/\text{km}$$

$$Z_1 = 0,024577 + j 0,338493 \Omega/\text{km}$$

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

Seqüência	Resistência ohm/km	Reatância ohm/km	Susceptância Siemens/km
Zero :	3.21272E-01	1.31509E+00	3.06862E-06
Positiva:	2.29842E-02	3.71427E-01	4.45013E-06

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 600 Hz

Seqüência	Resistência ohm/km	Reatância ohm/km	Susceptância Siemens/km
Zero :	1.72906E+00	8.19908E+00	3.15201E-05
Positiva:	4.51009E-02	3.55359E+00	4.63088E-05

LT AGV – ARA

VALORES TEÓRICOS PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

$$Z_0 = 0,329380 + j 0,932929 \Omega/\text{km}$$

$$Z_1 = 0,0257230 + j 0,337536 \Omega/\text{km}$$

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

Seqüência	Resistência ohm/km	Reatância ohm/km	Susceptância Siemens/km
Zero :	2.90885E-01	9.54219E-01	3.07354E-06
Positiva:	2.35870E-02	3.70646E-01	4.45046E-06

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 600 Hz

Seqüência	Resistência ohm/km	Reatância ohm/km	Susceptância Siemens/km
Zero :	7.63002E-01	7.99480E+00	3.15723E-05
Positiva:	3.91953E-02	3.54832E+00	4.63123E-05

LT ARA – SBO

VALORES TEÓRICOS PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

$$Z_0 = 0,3332690 + j 0,934811 \Omega/\text{km}$$

$$Z_1 = 0,0262743 + j 0,330503 \Omega/\text{km}$$

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 60 Hz

Seqüência	Resistência	Reatância	Susceptância
	ohm/km	ohm/km	Siemens/km
Zero :	2.90885E-01	9.54219E-01	3.07354E-06
Positive:	2.35870E-02	3.70646E-01	4.45046E-06

VALORES OBTIDOS PELO *ATP-LINE CONSTANTS* PARA FREQUÊNCIA DE 600 Hz

Seqüência	Resistência	Reatância	Susceptância
	ohm/km	ohm/km	Siemens/km
Zero :	7.63002E-01	7.99480E+00	3.15723E-05
Positiva:	3.91953E-02	3.54832E+00	4.63123E-05

O arquivo de entrada do ATP pode ser preparado usando diretamente os valores das resistências, reatâncias e susceptâncias de cada LT, obtidas pelo *ATP Line Constants*. Entretanto, optou-se por usar os valores das resistências, indutância e capacitância. Os valores calculados, que foram inseridos nos arquivos de simulações de falta no ATP, são mostrados abaixo.

LT AGV - RPR e RPR – SBO

Seqüência	Resistência	Indutância	Capacitância
	ohm/km	mH/km	μF/km
Zero :	1.72906E+00	2.17487E+00	8.36097E-03
Positiva:	4.51009E-02	9.42619E-01	1.22838E-02

LT AGV – ARA e ARA – SBO

Seqüência	Resistência	Indutância	Capacitância
	ohm/km	mH/km	μF/km
Zero :	7.63002E-01	2.12069E+00	8.37482E-03
Positiva:	3.91953E-02	9.41221E-01	1.22847E-02

5.2 – Cálculo dos Parâmetros das Fontes Equivalentes

Os dados referentes aos geradores são necessários nos arquivos de entrada do ATP para as simulações de faltas nas L.T. Os valores teóricos destes parâmetros disponíveis em p.u. foram convertidos usando os seguintes valores de base:

$$V_{base} = 440kV$$

$$S_{base} = 100MVA$$

$$\omega = 376,99.$$

FONTE AGUA VERMELHA

$$Z_0 = 8,61E-04 + j 9,46E-03 \text{ pu}$$

$$Z_1 = 3,65E-04 + j 9,49E-03 \text{ pu}$$

$$Z_0 = 1,6669 + j 18,316 \Omega$$

$$Z_1 = 0,7060 + j 18,378 \Omega$$

$$R_0 = 1,6669 \Omega$$

$$L_0 = 4,85847E+01 \text{ mH}$$

$$R_1 = 0,7060 \Omega$$

$$L_1 = 4,87492E+01 \text{ mH}$$

FONTE SANTA BARBARA d'OESTE

$$Z_0 = 6,34E-04 + j 2,77E-02 \text{ pu}$$

$$Z_1 = 1,20E-03 + j 1,37E-02 \text{ pu}$$

$$Z_0 = 12,275 + j 53,595 \Omega$$

$$Z_1 = 2,3285 + j 26,615 \Omega$$

$$R_0 = 12,275 \Omega$$

$$L_0 = 1,42165E+02 \text{ mH}$$

$$R_1 = 2,3285 \Omega$$

$$L_1 = 7,05985E+01 \text{ mH}$$

FONTE ARARAQUARA

$$Z_0 = 5,77E-03 + j 2,65E-02 \text{ pu}$$

$$Z_1 = 7,78E-04 + j 9,47E-03 \text{ pu}$$

$$Z_0 = 11,177 + j 51,261 \Omega$$

$$Z_1 = 1,5070 + j 18,330 \Omega$$

$$R_0 = 11,177 \Omega$$

$$L_0 = 1,35974E+02 \text{ mH}$$

$$R_1 = 1,5070 \Omega$$

$$L_1 = 4,86218E+01 \text{ mH}$$

5.3 – Simulações de Faltas

Existem inúmeras possibilidades de diferentes características de faltas em sistemas elétricos de potência. Nas simulações de faltas deve-se considerar um grande número de variáveis e, para cada alteração nestas características, deve-se executar uma nova simulação. Desta forma são necessárias varias simulações para se obter uma completa base de dados de faltas. Somente assim torna-se possível o teste do algoritmo para proteção digital diferencial de linhas de transmissão. Visando-se este objetivo foram gerados 224 diferentes arquivos de entrada do ATP, simulando faltas no sistema sem compensação série capacitiva. Com auxílio do ATP-Draw, também foram geradas outras 224 faltas no sistema com compensação série capacitiva. A Figura 14 ilustra os dez tipos de faltas usados nas simulações no ATP de ambos os sistemas, que tiveram como variáveis os seguintes itens:

- Distância da Falta = -10, 10, 25, 50, 75, 90, 110 % da LT sob estudo;
- Ângulo de Incidência da Falta = 0° , 90° ;
- Resistência de Falta: 5Ω , 10Ω , 50Ω , 100Ω ;
- Tipo de Falta: AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC.

FIGURA 14 – Tipos de falta

Os arquivos de saída gerados pelo ATP de extensão *.PL4* são usados para os testes do algoritmo de proteção diferencial. São usados também para a impressão das formas de onda das correntes e tensões das barras Água Vermelha e Ribeirão Preto. São medidas correntes e tensões de cada uma das três fases nas duas barras, perfazendo um total de 12 medições. Estas medições excedem as oitenta colunas disponíveis nos arquivos de saída gerados pelo ATP, fazendo com que os valores de medições para cada instante sejam colocados em duas linhas. Foi usado um programa desenvolvido em *Fortran* que corrige este problema em cada um dos arquivos de saída gerado. Este programa também retira as primeiras linhas dispensáveis do arquivo de saída.

São mostradas a seguir o diagrama utilizado nas simulações de um exemplo de falta no sistema sem compensação série, com o respectivo arquivo de entrada do ATP gerado sem o auxílio do ATP-Draw. As formas de ondas resultantes também são mostradas.

O diagrama unifilar da Figura 15 mostra o sistema utilizado para as simulações de faltas sem compensação. A chave CAR, controlada por tempo, se fechada durante as simulações aplica faltas de diferentes tipos na LT AGV – RPR. O mesmo ocorre com a chave CRS que, se fechada, provoca faltas na LT RPR – SBO. A chave CAQ permite a aplicação de faltas reversas.

Mais adiante é apresentado também um arquivo de entrada do ATP, gerado com o auxílio do *software* ATP-Draw, para simulações de faltas no sistema com compensação série.

FIGURA 15 – Diagrama unifilar do sistema sem compensação série usado para simulações de faltas

As Figuras 16A e 16B listam o arquivo de entrada do ATP para a falta na LT

AGV – RPR com as seguintes características:

- Falta Fase-Fase C-A
- Resistência de falta de 100Ω
- Localização da falta = 10% da L.T. AGV – RPR
- Ângulo de incidência = 0° .

```

BEGIN NEW DATA CASE
4.1667-6      .17
      400      5      1      1      1      1
$DISABLE
C:\FIN\CA\01010000.DAT
SISTEMA 4 SUBESTACOES AGV, ARA, RPR, SBO
FALTA NA LT AGV - RPR
FALTA C-A
DISTANCIA = 10 %
ANGULO = 0 Graus
RFpp = 100
$ENABLE
$VINTAGE, 1
C ***CHAVES E RESISTENCIAS DE FALTA***
  CARA  CA      5.000000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CARB      5.000000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CARC  CA      5.000000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CRSA      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CRSB      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CRSC      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CAQA      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CAQB      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CAQC      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CQSA      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CQSB      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CQSC      1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C *** RESISTÊNCIAS, INDUTÂNCIAS e CAPACITÂNCIAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO***
-1A0A  ARA      1.72906E+00 2.17487E+00 8.36097E-03 3.22930E+01 0 00
-2A0B  ARB      4.51009E-02 9.42619E-01 1.22838E-02 3.22930E+01 0 00
-3A0C  ARC
-1ARA  ROA      1.72906E+00 2.17487E+00 8.36097E-03 2.90637E+02 0 00
-2ARB  ROB      4.51009E-02 9.42619E-01 1.22838E-02 2.90637E+02 0 00
-3ARC  ROC
-1R1A  RSA      1.72906E+00 2.17487E+00 8.36097E-03 8.66500E+01 0 00
-2R1B  RSB      4.51009E-02 9.42619E-01 1.22838E-02 8.66500E+01 0 00
-3R1C  RSC
-1RSA  SOA      1.72906E+00 2.17487E+00 8.36097E-03 8.66500E+01 0 00
-2RSB  SOB      4.51009E-02 9.42619E-01 1.22838E-02 8.66500E+01 0 00
-3RSC  SOC
-1A1A  AQA      7.63002E-01 2.12069E+00 8.37482E-03 1.54290E+02 0 00
-2A1B  AQB      3.91953E-02 9.41221E-01 1.22847E-02 1.54290E+02 0 00
-3A1C  AQC
-1AQA  QOA      7.63002E-01 2.12069E+00 8.37482E-03 1.54290E+02 0 00
-2AQB  QOB      3.91953E-02 9.41221E-01 1.22847E-02 1.54290E+02 0 00
-3AQC  QOC
-1Q1A  QSA      7.63002E-01 2.12069E+00 8.37482E-03 7.00000E+01 0 00
-2Q1B  QSB      3.91953E-02 9.41221E-01 1.22847E-02 7.00000E+01 0 00
-3Q1C  QSC
-1QSA  S1A      7.63002E-01 2.12069E+00 8.37482E-03 7.00000E+01 0 00
-2QSB  S1B      3.91953E-02 9.41221E-01 1.22847E-02 7.00000E+01 0 00
-3QSC  S1C
$VINTAGE, 0
C *** RESISTÊNCIAS e INDUTÂNCIAS DAS FONTES ***
51GERAA AA      1.6669 4.85847E+01
52GERAB AB      0.7060 4.87492E+01
53GERAC AC
51GERSA SA      12.275 1.42165E+02
52GERSB SB      2.3285 7.05985E+01
53GERSC SC
51GERQA QA      11.177 1.35974E+02
52GERQB QB      1.5070 4.86218E+01
53GERQC QC
BLANK card terminating network

```

FIGURA 16.A – Arquivo de entrada para simulação de falta C-A

```

C ***MEDICOES DE CORRENTE***
AA  A0A      MEASURING      1
AB  A0B      MEASURING      1
AC  A0C      MEASURING      1
RA  R0A      MEASURING      1
RB  R0B      MEASURING      1
RC  R0C      MEASURING      1
RA  R1A      MEASURING      0
RB  R1B      MEASURING      0
RC  R1C      MEASURING      0
SA  S0A      MEASURING      0
SB  S0B      MEASURING      0
SC  S0C      MEASURING      0
AA  A1A      MEASURING      0
AB  A1B      MEASURING      0
AC  A1C      MEASURING      0
QA  Q0A      MEASURING      0
QB  Q0B      MEASURING      0
QC  Q0C      MEASURING      0
QA  Q1A      MEASURING      0
QB  Q1B      MEASURING      0
QC  Q1C      MEASURING      0
SA  S1A      MEASURING      0
SB  S1B      MEASURING      0
SC  S1C      MEASURING      0

C ***CONTROLE DAS CHAVES DE FALTA***
ARA  CARA  1.250E-02 1.000E+02 0.000E+00      0
ARB  CARB  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
ARC  CARC  1.250E-02 1.000E+02 0.000E+00      0
RSA  CRSA  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
RSB  CRSB  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
RSC  CRSC  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
AQA  CAQA  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
AQB  CAQB  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
AQC  CAQC  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
QSA  CQSA  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
QSB  CQSB  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0
QSC  CQSC  1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00      0

BLANK card terminating switches
14GERAA 0 3.727E+05 6.000E+01 0.000E+00      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERAB 0 3.727E+05 6.000E+01 -1.200E+02      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERAC 0 3.727E+05 6.000E+01 1.200E+02      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERSA 0 3.548E+05 6.000E+01 0.000E+00      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERSB 0 3.548E+05 6.000E+01 -1.200E+02      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERSC 0 3.548E+05 6.000E+01 1.200E+02      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERQA 0 3.727E+05 6.000E+01 0.000E+00      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERQB 0 3.727E+05 6.000E+01 -1.200E+02      0      -1.000E+00 1.000E+02
14GERQC 0 3.727E+05 6.000E+01 1.200E+02      0      -1.000E+00 1.000E+02

BLANK card terminating sources
A0A  A0B  A0C  R0A  R0B  R0C
BLANK card terminating outputs
BLANK card terminating plots
BEGIN NEW DATA CASE

```

FIGURA 16.B – Continuação do arquivo de entrada para simulação de falta C-A

A Figura 17 mostra as correntes e tensões medidas na barra A0 para a falta descrita anteriormente. Na Figura 18 são mostradas as correntes e tensões medidas na barra R0 para a mesma falta.

FIGURA 17 - Correntes e tensões medidas na barra A0

FIGURA 18 - Correntes e tensões medidas na barra R0

As Figuras 19A, 19B e 19C listam o arquivo de entrada gerado pelo ATP-Draw para uma falta A-B na LT AGV-RPR do sistema com compensação série. Esta falta tem resistência de 100Ω , é localizada em 10% da LT e foi simulada com ângulo de incidência de 0° .

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  abril, quarta-feira 24, 2002
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at EFI - NORWAY  1994-1997
C -----
C Miscellaneous Data Card ....
C dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt >
4.1667-6  0.1667
      400      5      1      1      1      0      0      1      0
MODELS
INPUT
  IX0001 {v(CR30A )},
  IX0002 {v(CR20A )},
  IX0003 {i(CRZ2A )},
  IX0004 {v(CR30B )},
  IX0005 {v(CR20B )},
  IX0006 {i(CRZ2B )},
  IX0007 {v(CR30C )},
  IX0008 {v(CR20C )},
  IX0009 {i(CRZ2C )},
OUTPUT
  GAPA ,
  GAPB ,
  GAPC ,
$INCLUDE, C:\ARQUIV~1\ATPDRAW\MOD\FLASH_1.MOD
USE FLASH_1 AS GAPA
INPUT
  V1:= IX0001
  V2:= IX0002
  iczn:= IX0003
DATA
  Pset:= 1.000E+0000
  Eset:= 9.000E+0000
  fdel:= 1.000E+0000
  fdur:= 2.000E+0002
OUTPUT
  GAPA :=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS GAPB
INPUT
  V1:= IX0004
  V2:= IX0005
  iczn:= IX0006
DATA
  Pset:= 1.000E+0000
  Eset:= 9.000E+0000
  fdel:= 1.000E+0000
  fdur:= 2.000E+0002
OUTPUT
  GAPB :=trip
ENDUSE
USE FLASH 1 AS GAPC

```

FIGURA 19.A – Arquivo de entrada para simulação de falta AB no sistema com compensação série

```

INPUT
  V1:= IX0007
  V2:= IX0008
  iczn:= IX0009
DATA
  Pset:= 1.000E+0000
  Eset:= 9.000E+0000
  fdel:= 1.000E+0000
  fdur:= 2.000E+0002
OUTPUT
  GAPC :=trip
ENDUSE
ENDMODELS
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  CR30A CR20A      49.14      0
  CR30B CR20B      49.14      0
  CR30C CR20C      49.14      0
  CRZ2A CRZ1A      .1         0
  CRZ2B CRZ1B      .1         0
  CRZ2C CRZ1C      .1         0
/BRANCH
92CRZ1A CR20A      5555.      0
  1.0796000000000000E+0005-1.0000000000000000E+0000 0.0000000000000000E+0000 1
$INCLUDE, C:\ARQUIV~1\ATPDRAW\USP\ZNO_1.LIB
92CRZ1B CR20B CRZ1A CR20A      5555.      0
92CRZ1C CR20C CRZ1A CR20A      5555.      0
  CR25A CR20A      5. .23      0
  CR25B CR20B      5. .23      0
  CR25C CR20C      5. .23      0
-1CR20A ARA      1.7292.1748 .0084 32.29 0 00
-2CR20B ARB      .0451 .9426 .0123 32.29 0 00
-3CR20C ARC
-1RPRA RSA      1.7292.1748 .0084 5. 0 00
-2RPRB RSB      .0451 .9426 .0123 5. 0 00
-3RPRC RSC
-1RSA SBOA      1.7292.1748 .0084167.65 0 00
-2RSB SBOB      .0451 .9426 .0123167.65 0 00
-3RSC SBOC
-1AQA ARAA      .7632.1206 .0084307.58 0 00
-2AQB ARAB      .0392 .9412 .0123307.58 0 00
-3AQC ARAC
-1AGVA AQA      .7632.1206 .0084 5. 0 00
-2AGVB AQB      .0392 .9412 .0123 5. 0 00
-3AGVC AQC
51AA AGVA      1.6669 48.5847
52AB AGVB      .706 48.7492
53AC AGVC
  XX0075FARC      100.      0
  XX0075FARB      100.      0
  XX0075FARA      100.      0
  FLT2 FRSC      5.      0
  FLT2 FRSB      5.      0
  FLT2 FRSA      5.      0
  FLT3 FAQC      5.      0
  FLT3 FAQB      5.      0
  FLT3 FAQA      5.      0
-1QSA SBOA      .7632.1206 .0084 70. 0 00
-2QSB SBOB      .0392 .9412 .0123 70. 0 00
-3OSC SBOC

```

FIGURA 19.B – Continuação do arquivo de entrada para simulação de falta AB no sistema com compensação série

Case	Source	Ampl.	Freq.	Phase/T0	A1	T1	TSTART	TSTOP
51QA	ARAA	11.177	135.974					
52QB	ARAB	1.507	48.6218					
53QC	ARAC							
51SBOA	SA	12.275	142.165					
52SBOB	SB	2.3285	70.5985					
53SBOC	SC							
-1ARAA	QSA	.7632	.1206	.0084	70.0	00		
-2ARAB	QSB	.0392	.9412	.0123	70.0	00		
-3ARAC	QSC							
FLT4	FQSC	5.						
FLT4	FQSB	5.						
FLT4	FQSA	5.						
-1ARA	ROA	1.7292	.1748	.0084	290.64	00		
-2ARB	ROB	.0451	.9426	.0123	290.64	00		
-3ARC	ROC							
CR25AACR25A		.01						
CR25ABCR25B		.01						
CR25ACCR25C		.01						
/SWITCH								
C	< n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >							
CR30A	CRZ2A	-1.	1.					
CR30B	CRZ2B	-1.	1.					
CR30C	CRZ2C	-1.	1.					
13CR30A	CR25AA						GAPA	
13CR30B	CR25AB						GAPB	
13CR30C	CR25AC						GAPC	
FARC	ARC	1.	10.					
FARB	ARB	.0375	10.					
FARA	ARA	.0375	10.					
FRSC	RSC	1.	10.					
FRSB	RSB	1.	10.					
FRSA	RSA	1.	10.					
FAQC	AQC	1.	10.					
FAQB	AQB	1.	10.					
FAQA	AQA	1.	10.					
AGVA	CR30A					MEASURING		
AGVB	CR30B					MEASURING		
AGVC	CR30C					MEASURING		
RPR A	ROA					MEASURING		
RPR B	ROB					MEASURING		
RPR C	ROC					MEASURING		
FQSC	QSC	1.	10.					
FQSB	QSB	1.	10.					
FQSA	QSA	1.	11.					
/SOURCE								
C	< n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >							
14AA	0	374100.	60.			-1.	10.	
14AB	0	374100.	60.	-120.		-1.	10.	
14AC	0	374100.	60.	120.		-1.	10.	
14QA	0	356100.	60.			-1.	10.	
14QB	0	356100.	60.	-120.		-1.	10.	
14QC	0	356100.	60.	120.		-1.	10.	
14SA	0	350100.	60.			-1.	10.	
14SB	0	350100.	60.	-120.		-1.	10.	
14SC	0	350100.	60.	120.		-1.	10.	
BLANK BRANCH								
BLANK SWITCH								
BLANK SOURCE								
CR30A	CR30B	CR30C	ROA	ROB	ROC			
BLANK OUTPUT								
BLANK PLOT								
BEGIN NEW DATA CASE								
BLANK								

FIGURA 19.C – Continuação do arquivo de entrada para simulação de falta AB no sistema com compensação série

A Figura 20 mostra as correntes e tensões medidas na barra A0 para a falta A-B na LT AGV-RPR do sistema com compensação, descrita acima. Na Figura 21 são mostradas as correntes e tensões medidas na barra R0 para a mesma falta.

FIGURA 20 - Correntes e tensões medidas na barra A0

FIGURA 21 - Correntes e tensões medidas na barra R0

6 – A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O algoritmo proposto para proteção diferencial de LT foi implementado em Matlab e seu desenvolvimento é apresentado neste Capítulo. O fluxograma para tal função é mostrado abaixo na Figura 22 e o programa completo é listado no Apêndice I.

FIGURA 22 – Fluxograma do algoritmo para proteção diferencial de LT

6.1 – Desenvolvimento do Algoritmo Proposto

A proteção digital diferencial pode ser baseada em fasores calculados ou em amostras de correntes de ambos terminais de uma LT [24]. Em ambos os casos é necessária a sincronização das amostras. Os fasores podem ser calculados em uma janela de dados com parte do ciclo fundamental, embora uma janela de dados de ciclo completo ofereça melhor segurança. Se I é a corrente no terminal i (a direção de referência é positiva quando a corrente está fluindo para dentro da zona de proteção), a corrente diferencial pode ser definida como:

$$|I_d| = |\sum I_i| \quad (5.1)$$

A corrente de restrição pode ser construída pela média das correntes de todos os terminais ou pela corrente máxima de todos os terminais como restrição.

A premissa básica para a operação de sistemas de proteção diferencial é que a soma das correntes que entram na zona protegida deve ser igual a zero sob condições normais, caso não haja falta interna à determinada zona de proteção. No caso de linhas de transmissão do sistema de potência, isto pode não ser verdadeiro devido às correntes de carga capacitivas da linha. No caso de linhas de transmissão curtas, a corrente de carga pode ser tratada como um pequeno erro. Neste caso, o erro devido à corrente de carga é coberto pela característica percentual de restrição. No caso de linhas de transmissão longas, a corrente de carga pode ser muito alta para ser tratada como um erro. Quando as correntes de carga são significantes, ou quando os elementos *shunt* da linha são considerados, a corrente diferencial não é zero para condições normais. Assim, no caso de linhas de transmissão longas ou quando a compensação *shunt* está presente, o relé diferencial deve levar em conta a corrente de

carga. A solução proposta é a medição das tensões em cada terminal e o cálculo da corrente *shunt* para subtração da corrente medida.

Usando-se a representação Π multi-fases de uma linha de dois terminais, a corrente *shunt* I_{sI} no terminal i é calculada através da matriz admitância na barra i . Assim ao invés de enviar I_i do terminal i para todos os outros terminais envia-se a corrente compensada I_i' .

$$I_i' = I_i - I_{sI} \quad (5.2)$$

A Figura 23 ilustra a seção Π da linha de transmissão e a Figura 24 representa o modelo equivalente a ser usado pelo algoritmo no cálculo das correntes diferenciais.

FIGURA 23 – Seção Π da linha de transmissão

FIGURA 24 – Modelo da linha sem falta

As correntes I_1 e I_2 , e as tensões V_1 e V_2 são medições sincronizadas obtidas em simulações executadas no ATP. Uma vez que as medições são conhecidas, pode-

se calcular as correntes através dos elementos *shunt* da LT (I_{s1} e I_{s2}) e, então, as correntes I_x e I_y . Estas correntes podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$I_1 = [I_{1a} \ I_{1b} \ I_{1c}]' \quad I_2 = [I_{2a} \ I_{2b} \ I_{2c}]' \quad (5.3)$$

$$V_1 = [V_{1a} \ V_{1b} \ V_{1c}]' \quad V_2 = [V_{2a} \ V_{2b} \ V_{2c}]' \quad (5.4)$$

Então,

$$V_3 = V_1 - I_1 \cdot Z_{c1} \quad (5.5)$$

$$V_4 = V_2 - I_2 \cdot Z_{c2} \quad (5.6)$$

Assim,

$$I_x = I_1 - I_{s1} \quad (5.7)$$

$$I_y = I_2 - I_{s2} \quad (5.8)$$

Usando a lei de corrente de Kirchoff, $I_x = I_y$ para linhas sem faltas. Durante faltas na linha de transmissão, $I_x \neq I_y$. Assim, com o objetivo de detecção da falta deve-se verificar a curva característica diferencial percentual, $I_{op} \times I_r$ na Figura 25 ,onde:

$$I_{op} = |I_x + I_y| \quad (5.9)$$

e

$$I_r = \max \{ |I_x|, |I_y| \} \quad (5.10)$$

I_{op} = corrente de operação

I_r = corrente de restrição

FIGURA 25 – Curva característica diferencial

Deve-se notar que I_1 , I_2 , V_1 e V_2 são todos vetores $[1 \times 3]$, pois a linha de transmissão é uma seção π trifásica e os cálculos devem levar isto em conta.

Normalmente, as linhas de transmissão funcionam com cargas trifásicas equilibradas. Ainda que não apresentem espaçamento equilateral ou que não estejam transpostas, a assimetria resultante será pequena e as fases podem ser consideradas em equilíbrio.

6.2- Cálculo do Circuito Equivalente da Linha de Transmissão

Para se conseguir uma solução exata para qualquer linha de transmissão, bem como para se obter um alto grau de precisão no cálculo de linhas com mais de 160km, deve-se considerar o fato de que os parâmetros de uma linha não são concentrados e sim uniformemente distribuídos ao longo da mesma. Os circuitos T nominal e Π nominal não representam exatamente uma linha de transmissão porque não levam em consideração a distribuição uniforme dos parâmetros da linha [28].

O π equivalente da linha de transmissão AGV-RPR é calculado pois é necessário informar ao algoritmo o valor da admitância da LT. O modelo de linhas longas usado é representado na Figura 26.

FIGURA 26 – Modelo II equivalente da LT

A impedância e susceptância da linha de transmissão AGV–RPR, fornecidas pelo programa ATP, são usadas para o cálculo do π equivalente:

Parâmetros calculados pelo ATP-LINE CONSTANTS:

Seqüência	veloc. km/s	Comp.Onda km	Resist. ohm/km	Reatância ohm/km	Susceptância Siemens/km
Positiva:	2.9309E+05	4.8848E+03	2.2984E-02	3.7143E-01	4.4501E-06

$$z = 2,29842 \times 10^{-2} + j3,71427 \times 10^{-1} \text{ ohm / km}$$

$$y = 0 + j4,45013 \times 10^{-6} \text{ ohm / km}$$

Cálculo da Constante de Propagação - γ

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} \quad (5.11)$$

$$\gamma = \sqrt{(2,29842 \times 10^{-2} + j3,71427 \times 10^{-1}) \cdot (0 + j4,45013 \times 10^{-6})}$$

$$\gamma = 3,9759 \times 10^{-5} + j1,2863 \times 10^{-3}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

$$\alpha = 3,9759 \times 10^{-5}$$

$$\beta = 1,2863 \times 10^{-3} \text{ rad / km}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{1,2863 \times 10^{-3}} = 4884,82 \text{ km} \quad (5.12)$$

$$\text{velocidade} = f \cdot \lambda = 293089,2 \text{ km / s} \quad (5.13)$$

Onde:

γ = constante de propagação

α = constante de atenuação

β = velocidade de propagação

λ = comprimento de onda

f = frequência da LT

Cálculo da Impedância Característica - z_c

$$z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad z_c = 289 - j8,9245 \Omega \quad (5.14)$$

As Equações 5.15 e 5.16 fornecem os valores da impedância e admitância equivalentes da linha de transmissão AGV-RPR.

Cálculo de Z' e $Y'/2$

$$l = 322,93 \text{ km}$$

$$Z' = z_c \cdot \sinh \gamma \cdot l \quad Z' = 7,0013 + j116,5415 \Omega \quad (5.15)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{z_c} \cdot \tanh \frac{\gamma \cdot l}{2} \quad (5.16)$$

$$\frac{Y'}{2} = 6,613 \times 10^{-7} + j7,2904 \times 10^{-4} \text{ S}$$

6.3 – Aquisição de Dados e Filtragem Analógica dos Sinais

Os arquivos de simulações de faltas, que foram gerados no ATP a uma taxa de amostragem de 48kHz, são lidos pelo algoritmo. Os sinais possuem componentes harmônicas de elevada ordem que devem ser filtradas, simulando-se os filtros analógicos passa-baixa existentes nos relés, conforme explicitado no capítulo 2. Para tanto foi implementado um filtro *Butterworth* com as seguintes características:

- Frequência da banda de passagem: $f_{ap} = 500\text{Hz}$;
- Atenuação máxima na banda de passagem: $R_p = 3\text{db}$;
- Frequência da banda de atenuação: $f_{aa} = 1000\text{Hz}$;
- Atenuação mínima na banda de atenuação: $R_a = 12\text{db}$;
- Ordem do filtro = 2.

Na Figura 27 pode-se observar na resposta em frequência do filtro passa-baixa e a atenuação aplicada nas frequências acima de 250Hz. A curva mostra a atenuação de 3db em 500Hz e 12db em 1000Hz, conforme as características definidas em seus parâmetros.

FIGURA 27 – Resposta em frequência do filtro passa-baixa *Butterworth*

A tensão na barra da subestação RPR para uma falta fase A-T a 50% da linha, com ângulo de incidência de 90° , é mostrada abaixo na Figura 28, para ilustrar o efeito do corte das componentes de alta frequência que ocorre com a filtragem. O onda na cor azul é a onda amostrada pelo ATP e a onda em preto é a onda filtrada. Da mesma forma que um filtro real, o filtro implementado também impõe pequeno atraso na onda filtrada. Este atraso é de apenas 0,45ms e não provoca erro algum na decisão do algoritmo pois é igual para todos os sinais.

FIGURA 28 – Resultado do filtro passa-baixa

6.4 – Reamostragem dos Sinais e o Filtro de Fourier (FFT)

Os relés digitais possuem conversores analógicos/digitais que amostram os sinais a uma taxa em torno de 1kHz. Depois da filtragem pelo filtro Butterworth, o algoritmo faz a reamostragem em 960Hz simulando um conversor analógico/digital convencional.

O filtro baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT), implementado no algoritmo, permite a extração da componente fundamental de cada uma das 6 tensões e 6 correntes nos barramentos. Foi utilizado o conceito de janela móvel de dados, onde o cálculo da transformada rápida de Fourier de um ciclo é realizado usando apenas 16 amostras por ciclo. Na Figura 29 a onda em azul é a tensão da fase A reamostrada e a onda em vermelho é a tensão resultante da filtragem FFT. Pode-se observar que a onda reamostrada ainda possui as componentes de alta frequência e a onda em vermelho possui apenas a componente fundamental 60Hz.

FIGURA 29 – Formas de ondas reamostradas e após o uso do filtro FFT

6.5 – Cálculo das Correntes Compensadas

O algoritmo faz os cálculos da corrente que flui pela admitância da linha de modo a subtraí-la da corrente de carga de cada fase antes de executar a função diferencial (Equações 5.7 e 5.8). São estas correntes compensadas da Figura 30 que seriam transmitidas entre as duas subestações nas extremidades da linha protegida em um esquema de proteção diferencial real.

FIGURA 30 – Correntes compensadas I_x (vermelho) e I_y (azul)

6.6 – Medição do Tempo de Detecção da Falta e Ordem de Abertura

A velocidade de operação é um importante requisito dos relés de proteção, conforme já mencionado no Capítulo 2. Foi implementado no algoritmo desenvolvido uma forma de registro do tempo de detecção da falta e posterior ordem de abertura do disjuntor, que permite a medição de seu tempo de operação. A segurança do algoritmo, outro importante requisito da proteção, foi garantida com a adoção de um critério onde se permite a ordem de abertura somente após 16 amostras consecutivas sob falta. Desta forma o desligamento ocorre 1 ciclo após a detecção da falta, garantindo-se que a janela de dados usada para decisão contenha somente dados de pós-falta. Este critério garante que o algoritmo não opere diante de erros provocados por transitórios e também o torna bastante seguro diante de faltas externas mais severas.

O tempo de detecção e de ordem de abertura de cada falta simulada foi registrado em tabelas. Além das tabelas, pode-se visualizar os tempos de operação nos gráficos gerados pelo algoritmo: Detecção x Tempo e Ordem de Abertura x Tempo. As medições de tempo e os gráficos são individuais para cada fase.

A Figura 31 mostra o gráfico Detecção x Tempo referente a uma falta A-T localizada em 50% da LT AGV-RPR, com resistência de falta igual a 5Ω e ângulo de incidência igual a zero graus. O gráfico mostra também, as correntes diferenciais e de restrição, calculadas para a fase A em cada movimento da janela de dados. Pode-se observar que, no instante da aplicação da falta, a corrente diferencial sobe para um nível acima da corrente de restrição, instante no qual ocorre a detecção. O mesmo ocorre na Figura 32 que mostra o gráfico Ordem de Abertura x Tempo, registrado

para mesma falta. Pode-se observar que a linha referente à ordem de abertura muda de nível após o tempo proporcional às 16 amostras de falta.

FIGURA 31 – Gráfico Detecção x Tempo da fase A para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR

FIGURA 32 – Gráfico Ordem de Abertura x Tempo da fase A para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR

Os gráficos das Figuras 33 e 34 se referem à mesma falta descrita anteriormente, mas com medições da fase B. Observa-se que não ocorre a detecção e ordem de abertura porque a corrente de restrição permanece maior que a corrente diferencial, pois trata-se de uma falta A-T.

FIGURA 33 – Gráfico Detecção x Tempo da fase B para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR

FIGURA 34 – Gráfico Ordem de Abertura x Tempo da fase B para uma falta A-T em 50% da LT AGV-RPR

6.7 – Curva Característica Diferencial

O algoritmo decide pela ordem de desligamento ou não da LT de acordo com a curva característica $I_{\text{operação}} \times I_{\text{restrição}}$ típica de relés diferenciais. A corrente diferencial $I_{\text{operação}}$ deve estar acima de um determinado nível proporcional à máxima corrente das fases $I_{\text{restrição}}$. Este nível de decisão é representado pela reta da Figura 35, onde somente os pontos que são referentes à corrente diferencial da fase A, que está sob falta neste caso, se situam acima deste nível e portanto provocariam um desligamento da LT.

FIGURA 35 – Curva diferencial para falta A-T em 10% da LT AGV - ARA

A Figura 35 mostra que o algoritmo detectou e classificou corretamente a falta A-T em 10% da linha de transmissão. Os pontos no gráfico foram definidos da seguinte forma:

o – diferencial da fase A

* – diferencial da fase B

+ – diferencial da fase C

Apesar das correntes diferenciais das fases que não estão sob falta se localizarem abaixo do nível de decisão, a observação visual do gráfico da Figura 35 pode levar à conclusão do contrário devido sua resolução. A Figura 36 é uma ampliação da região onde estão as baixas correntes diferenciais de carga ou das fases não faltosas que permite a comprovação da afirmação anterior. As correntes diferenciais resultantes das outras duas fases não provocam desligamento pois se situam abaixo do nível de decisão.

FIGURA 36 – Ampliação da curva diferencial da linha sob falta

Falta A-T em 10% da linha

○ – diferencial da fase A

* – diferencial da fase B

+ – diferencial da fase C

7 – A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – TESTES REALIZADOS

Foram realizados testes com 160 arquivos gerados no ATP que simulavam diferentes condições de falta na linha de transmissão AGV-RPR, mostrada na Figura 37. Foram testados também, 64 arquivos que simulavam faltas externas à LT protegida, aplicadas nas LTs AGV-ARA e RPR-SBO, para as quais o algoritmo não poderia provocar o desligamento. Nas condições de sistema com carga normal ou altamente carregado, o algoritmo também não provocou desligamento. Todas estas condições foram repetidas para o sistema com compensação série (Figura 38), gerando igual número de simulações e totalizando 448 casos estudados.

FIGURA 37 – Diagrama unifilar sem compensação série com indicação das faltas

FIGURA 38 – Diagrama unifilar com compensação série com indicação das faltas

7.1 – Curvas Características do Relé Diferencial para o Sistema sem Compensação Série

A Figura 39 ilustra a curva característica diferencial para uma falta na LT AGV-ARA e a Figura 40 mostra a curva para uma falta na LT RPR-SBO. Ambas foram simuladas utilizando-se resistência de falta de 5Ω , ângulo de incidência de 0° e localizadas em 10% da LT. Pode-se observar que o algoritmo operou corretamente, pois, todos os pontos se situam abaixo da reta do gráfico mostrando que não há desligamento para faltas externas.

FIGURA 39 – Curva característica diferencial para falta externa localizada em 10% da LT AGV - ARA

FIGURA 40 – Curva característica diferencial para falta externa localizada em 10% da LT RPR-SBO

A Figura 41 apresenta curva característica para uma falta AT, de resistência igual a 5Ω , localizada a 10% da LT AGV-RPR, com ângulo de incidência igual a 0° . Pode-se observar que o algoritmo operou corretamente pois os pontos referentes à fase A se situam acima da reta de decisão. O mesmo ocorre na Figura 42 para uma falta AT, localizada em 90% da mesma LT.

FIGURA 41 – Curva característica diferencial para falta AT localizada em 10% da LT AGV-RPR (falta interna)

FIGURA 42 – Curva característica diferencial para falta AT localizada em 90% da LT AGV-RPR (falta interna)

A Figura 43 mostra a atuação correta do algoritmo para uma falta ABT localizada a 10% da LT AGV-RPR. Foi usada resistência de falta de 50Ω e ângulo de incidência de 0° . A falta da Figura 44 também é uma falta bifásica para terra (ABT), mas é localizada a 90% da LT.

FIGURA 43 – Curva característica diferencial para falta ABT localizada em 10% da LT AGV-RPR (falta interna)

FIGURA 44 – Curva característica diferencial para falta ABT localizada em 90% da LT AGV-RPR (falta interna)

Pode-se observar na Figura 45, que as correntes diferenciais das três fases se situam acima da reta de decisão, isto mostra que é uma falta trifásica. Esta falta foi simulada a 75% da LT AGV-RPR com resistência de 100Ω e ângulo de incidência de 90° . Os pontos que se situam abaixo da reta são referentes às condições de pré-falta.

FIGURA 45 – Curva característica diferencial para falta ABC localizada em 75% da LT AGV-RPR (falta interna)

O algoritmo desenvolvido operou corretamente para os 224 casos estudados no sistema sem compensação série ilustrado na Figura 37. Houve precisa classificação das fases sob falta em todos os casos e ótima estabilidade diante de faltas externas. A média do tempo de abertura do referido algoritmo foi de 18,932 ms.

7.2 – Curvas Características do Relé Diferencial para o Sistema com Compensação Série

O algoritmo usado nestes testes é idêntico ao usado para o sistema sem compensação série. O algoritmo necessita apenas do valor da impedância do capacitor, que não era considerado nos testes anteriores. A Figura 46 ilustra a curva característica diferencial para uma falta ABC na LT AGV. Esta falta foi simulada utilizando-se resistência de falta de 10Ω , ângulo de incidência de 90° e localizada em 10% das LT. Pode-se observar que o algoritmo operou corretamente, pois todos os pontos se situam abaixo da reta do gráfico, mostrando também, que não há desligamento para falta externa na simulação do sistema com compensação.

FIGURA 46 – Curva característica diferencial para falta externa tipo ABC localizada em 10% da LT AGV – ARA

A Figura 47 mostra a curva para uma falta tipo ABC na LT RPR-SBO. A falta foi simulada utilizando-se resistência de falta de 10Ω , ângulo de incidência de 90° e localizada em 10% da LT. Pode-se observar que neste caso o algoritmo também identificou corretamente como uma falta externa. Os pontos calculados da corrente diferencial se situam abaixo da reta do gráfico, mostrando que não há desligamento para esta falta externa.

FIGURA 47 – Curva característica diferencial para falta externa tipo ABC localizada em 10% da LT RPR-SBO

A Figura 48 apresenta curva característica para uma falta AT, de resistência igual a 100Ω , localizada a 25% da LT AGV-RPR, com ângulo de incidência igual a 0° . Pode-se observar que o algoritmo operou corretamente pois os pontos referentes à fase A se situam acima da reta de decisão. O mesmo ocorre na Figura 49 para uma falta AT, localizada em 75% da mesma LT.

FIGURA 48 – Curva característica diferencial para falta AT localizada em 25% da LT AGV-RPR (falta interna)

FIGURA 49 – Curva característica diferencial para falta AT localizada em 75% da LT AGV-RPR (falta interna)

A resposta correta do algoritmo para uma falta AB é mostrada na Figura 50. É uma falta fase-fase, com resistência igual a 5Ω , localizada a 10% da LT AGV-RPR, com ângulo de incidência igual a 0° . A Figura 51 mostra também, a atuação correta para uma falta semelhante localizada em 90%.

FIGURA 50 – Curva característica diferencial para falta AB localizada em 10% da LT AGV-RPR (falta interna)

FIGURA 51 – Curva característica diferencial para falta AB localizada em 90% da LT AGV-RPR (falta interna)

Pode-se observar na Figura 52, que as correntes diferenciais das três fases se situam acima da reta de decisão, o que mostra que é uma falta trifásica. Esta falta foi simulada em 50% da LT AGV-RPR com resistência de 50Ω e ângulo de incidência de 90° . Os pontos que se situam abaixo da reta são referentes às condições de pré-falta.

FIGURA 52 – Curva característica diferencial para falta ABC localizada em 50% da LT AGV-RPR (falta interna)

O algoritmo desenvolvido para um relé diferencial digital também funcionou corretamente para os 224 testes realizados no sistema com compensação série. Houve precisa classificação das fases sob falta em todos casos e ótima estabilidade diante de faltas externas. Comprovou-se ainda, que o algoritmo atua até mesmo para aquelas simulações com resistências de falta elevadas. Tabelas relativas ao tempo de operação do algoritmo proposto são apresentadas no próximo item.

7.3 – Tempo de Operação do Algoritmo Proposto para o Sistema com Compensação Série

Serão apresentados a seguir os resultados referentes às 160 simulações de faltas internas realizadas para a linha de transmissão AGV-RPR com compensação série. São mostrados apenas os resultados das simulações que consideram o capacitor série inserido nesta linha, pois é para este tipo de linha que se propõe o uso do algoritmo de proteção diferencial desenvolvido. O mesmo algoritmo também foi usado nos 160 testes referentes ao sistema real, que não possui a compensação série, seus resultados estão presentes no Apêndice II.

As tabelas indicam a distância, ângulo de incidência e as medições de tempo necessário para o algoritmo detectar a falta e decidir pela abertura. Os tempos que constam das tabelas estão relacionados com o número de amostras necessárias para o algoritmo detectar a falta. Como pode ser observado o tempo médio de operação do algoritmo proposto foi de 19,323 ms.

As tabelas foram divididas por cada tipo de falta:

- AT - Falta entre a fase A e a terra;
- AB - Falta entre as fases A e B;
- ABT - Falta entre as fases A e B envolvendo a terra;
- ABC - Falta trifásica.

Os resultados dos testes das faltas externas simuladas no sistema sem compensação constam de tabelas no Apêndice III. O Apêndice IV contém tabelas com os resultados dos testes das simulações de faltas externas no sistema com compensação. Nas tabelas de ambos os apêndices pode-se verificar que em nenhum dos casos simulados de falta externa houve atuação indevida do algoritmo,

observando-se que não há registro de tempo de medição de detecção e de ordem de abertura.

TABELA 1 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo AT aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	3,125	-	-	18,750	-	-
10	005	90	2,083	-	-	17,708	-	-
10	010	00	3,125	-	-	18,750	-	-
10	010	90	2,083	-	-	17,708	-	-
10	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
10	050	90	2,083	-	-	17,708	-	-
10	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
10	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	010	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
50	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
50	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	010	90	4,167	-	-	19,792	-	-
50	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
50	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
75	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
75	010	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	050	00	6,250	-	-	21,875	-	-
75	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
75	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	010	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-

TABELA 2 – Resultados de tempos de operação para faltas internas tipo AB aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	005	90	2,083	2,083	-	17,708	17,708	-
10	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	010	90	2,083	2,083	-	17,708	17,708	-
10	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-

TABELA 3 – Resultados de tempos de operação das faltas internas tipo ABT aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
10	005	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
10	010	00	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
10	010	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
10	050	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
10	050	90	4,167	4,167	-	19,792	20,833	-
10	100	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
10	100	90	4,167	7,292	-	19,792	22,917	-
25	005	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
25	005	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
25	010	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
25	010	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
25	050	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
25	050	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
25	100	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
25	100	90	4,167	5,208	-	19,792	21,875	-
50	005	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
50	005	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
50	010	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
50	010	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
50	050	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
50	050	90	4,167	5,208	-	19,792	20,833	-
50	100	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
50	100	90	4,167	5,208	-	19,792	22,917	-
75	005	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
75	005	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
75	010	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
75	010	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
75	050	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
75	050	90	4,167	5,208	-	19,792	20,833	-
75	100	00	5,208	5,208	-	20,833	20,833	-
75	100	90	4,167	5,208	-	19,792	21,875	-
90	005	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
90	005	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
90	010	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
90	010	90	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
90	050	00	5,208	4,167	-	20,833	19,792	-
90	050	90	4,167	5,208	-	19,792	20,833	-
90	100	00	5,208	5,208	-	20,833	20,833	-
90	100	90	4,167	5,208	-	19,792	22,917	-

TABELA 4 – Resultados de tempos de operação das faltas internas tipo ABC aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	3,125	2,083	2,083	18,750	17,708	17,708
10	005	90	2,083	3,125	2,083	17,708	18,750	17,708
10	010	00	3,125	2,083	2,083	18,750	17,708	17,708
10	010	90	2,083	3,125	2,083	17,708	18,750	17,708
10	050	00	3,125	2,083	3,125	18,750	17,708	18,750
10	050	90	2,083	5,208	3,125	17,708	20,833	18,750
10	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
10	100	90	3,125	5,208	3,125	18,750	20,833	18,750
25	005	00	3,125	2,083	3,125	18,750	17,708	18,750
25	005	90	2,083	5,208	3,125	17,708	20,833	18,750
25	010	00	3,125	2,083	3,125	18,750	17,708	18,750
25	010	90	2,083	5,208	3,125	17,708	20,833	18,750
25	050	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
25	050	90	3,125	5,208	3,125	18,750	20,833	18,750
25	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
25	100	90	3,125	5,208	3,125	18,750	20,833	18,750
50	005	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
50	005	90	2,083	5,208	3,125	17,708	20,833	18,750
50	010	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
50	010	90	2,083	5,208	3,125	17,708	20,833	18,750
50	050	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
50	050	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
50	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
50	100	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	005	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
75	005	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	010	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
75	010	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	050	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
75	050	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
75	100	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	005	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
90	005	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	010	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
90	010	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	050	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
90	050	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
90	100	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750

8 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os procedimentos e parâmetros utilizados nas simulações de faltas em linhas de transmissão do sistema elétrico paulista, bem como o desenvolvimento de um algoritmo de proteção digital diferencial para linhas de transmissão com compensação série.

Os parâmetros obtidos através da rotina *Line Constants* do programa ATP se mostraram muito próximos aos dados teóricos disponíveis para as linhas de transmissão sob estudo. O programa ATP permitiu as simulações de todos os tipos de faltas necessários para a geração de uma base de dados visando desenvolvimento e testes do algoritmo proposto. Durante os testes foi comprovado o excelente desempenho do algoritmo para todos tipos de faltas gerados no programa ATP. O programa detectou e classificou corretamente, logo nas primeiras amostras, todas as faltas testadas demonstrando alta sensibilidade, seletividade e velocidade. É um algoritmo bastante seguro pois comprovou ser imune às condições de faltas externas e de carga para as quais não deve ocorrer desligamento da LT. Em 448 simulações diferentes para linhas sob falta ou linhas em funcionamento normal o algoritmo operou corretamente, independentemente da presença do capacitor inserido na LT. O mesmo algoritmo foi usado para os sistemas com e sem compensação série capacitiva. Não foi necessário nenhuma modificação para o caso do capacitor ser retirado de operação, o que não ocorre com os outros tipos de proteção.

É importante ressaltar que, a implementação de tal algoritmo em um relé diferencial digital comercial torna-se possível pois o GPS resolve o problema da

sincronização das medições nas subestações interligadas pelas linhas de transmissão. A instalação de cabos de fibra óptica interligando duas ou mais subestações ou a disponibilidade de rádios digitais permite a transmissão de dados em alta velocidade, além de permitirem a sincronização das medições.

A proteção de linhas de transmissão com compensação série, que normalmente apresenta dificuldades para proteção por outras filosofias, foi executada com sucesso pelo algoritmo diferencial desenvolvido. Os estudos futuros devem verificar a sensibilidade do algoritmo a erros de sincronismo e aos efeitos da saturação dos TCs e, devem ainda, buscar a implementação de outros algoritmos de retaguarda (sobrecorrente, distância, etc..) para o caso da perda do meio de comunicação. A aplicação do algoritmo em outros sistemas elétricos, com diferentes características e com diferentes relações entre a impedância da fonte e a do capacitor, podem também, ser objeto da continuidade deste trabalho.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mason, C. R. *"The art and science of protective relaying"*. New York, John Wiley and Sons, 1956.
- [2] Phadke, A. G.; Thorp, J. S. *"Computer relaying for power systems"*. New York, John Wiley and Sons Inc, 1988.
- [3] Working Group H-7. *"Synchronized sampling and phasor measurement for relaying and control"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.9, n.1, p.442-452, Jan., 1994.
- [4] McNeff, J. G. *"The global positioning system"*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v.50, n.3, May 2002.
- [5] Parkinson, B. W.; Spilker Jr., J. J. *"Global positioning system: theory and applications"*. Washington, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1996.
- [6] Li, H.Y.; Southern, P.A.; Crossley, P. A.; Potts, S.; Pickering, S.D.A.; Counce, B.R.J.; Weller, G.C. *"A new type of differential feeder protection relay using the global positioning system for data synchronization"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.12, n.3, p.1090-1097, Jan., 1997.
- [7] Alexander, G. E.; Andrichak, J. G.; Rowe, S. D.; Wilkinson, S. B. *"Series compensated line protection – A practical evaluation"*. General Electric Publication, 1998. <http://www.geindustrial.com/pm/notes/ger3736.htm> (31 May).
- [8] IEEE. *"Series capacitor bank protection"*. IEEE Transactions on Power Relaying, Special Publication. 1998.

- [9] Kitagawa, M.; Andow, F.; Yamaura, M.; Okita, Y. "*Newly developed FM current-differential carrier relaying system and Its field experiences*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-97, n.6, , p.2272-2281, Nov./Dec., 1978.
- [10] McCleer, P. J.; Mir, M. "*A new technique of differential carrier relaying: The Δ -differential relay*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-101, n.10, p.4164-4170, Oct., 1982.
- [11] Sun, S. C.; Ray, R. E. "*A current differential relay system using fiber optics communications*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-102, n.2, p.410-419, Feb., 1983.
- [12] Sugiyama, T.; Kano, T.; Hatata, M.; Azuma, S. "*Development of a PCM current differential relaying system using fiber-optic data transmission*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-103, n.1, p.152-159, Jan., 1984.
- [13] Aggarwal, R. K.; Johns, A.T. "*Development of a new high speed 3-terminal line protection scheme*". IEEE Transactions on Power Delivery, v.PWRD-1, n.1, p.125-134, Jan., 1986.
- [14] Aggarwal, R. K.; Johns, A.T. "*A differential line protection scheme for power systems based on composite voltage and current measurements*". IEEE Transactions on Power Delivery, v.4, n.3, p.1595-1601, July, 1989.
- [15] Ordacgi, J. M.; López, L. A.; Moraes, L. C. "*A primeira proteção diferencial de linha com comunicação via fibra óptica do Brasil*". Revista Brasileira de Engenharia, v.6, n.1, 1990.

- [16] Aggarwal, R. K.; Husseini, A. H.; Redfern, M. A. *"Design and testing of a new microprocessor-based current differential relay for EHV teed feeders"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.6, n.3, p.991-999, July, 1991.
- [17] Lobos, T. *"Digital line differential protection using symmetrical components"*. Electric Power System Research, n.22, p.85-89, 1991.
- [18] Ernest, L. J.; Hinman, W. L.; Quam, D. H.; Thorp, J. S. *"Charge comparison protection of transmission lines – Relaying concepts"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.7, n.4, p.1834-1852, Oct., 1992.
- [19] Albrecht, N. P.; Fleck, W. C.; Fodero, K. J.; Ince, R. J. *"Charge comparison protection of transmission lines – Communications concepts"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.7, n.4, p.1853-1860, Oct. 1992.
- [20] Yamaura, M.; Kurosawa, Y.; Ayakawa, H. *"Improvement of internal charging current compensation for transmission line differential protection"*. Japan, Toshiba Corporation. 1992.
- [21] Redfern, M. A.; Chiwaya, A. A. W. *"A new approach to digital current differential protection for low and medium voltage feeder circuits using a digital voice-frequency grade communications channel"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.9, n.3, p.1352-1358, July 1994.
- [22] Adamiak, M. G., Premerlani, W. *"A new approach to current differential protection for transmission lines"*. Electric Council of New England - Protective Relaying Committee Meeting, General Elétric Publication. Oct. 1998.
- [23] Coury, D.V.; Thorp, J.S.; Hopkinson, K.M.; Birman, K.P. *"An agent-based current differential relay for use with a utility intranet"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.17, n.1, p.47-53, Jan. 2002.

- [24] Kim, B. B. *"Current differential protection of transmission lines"*. New York, Cornell University. 1996.
- [25] Novosel, D.; Bachmann, B.; Hart, D.; Hu, Y.; Saha, M.S. *"Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods"*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.11, n.4, p.1728-1736, Oct. 1996.
- [26] Andrade, J. G. B. M. *"Proteção de distância para linhas de transmissão com compensação série"*. São Paulo. 95p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2001.
- [27] Larson, J. *"General line protection course"*. Sweden, Asea Brown Boveri. 1998
- [28] Stevenson Jr., W. D. *"Elementos de análise de sistemas de potência"*. Rio de Janeiro, McGraw-Hill do Brasil. 1986.

APÊNDICE I

Programa desenvolvido em Matlab Proteção Diferencial Digital de Linhas de Transmissão

```
% Encontra a característica percentual diferencial das fases A B C.
% Escrito para LT AGV-RPR com capacitor série na extremidade da LT.
% Algoritmo ajustado para Frequência de amostragem = 48kHz e 960Hz.
% As correntes diferenciais são calculadas utilizando-se os
% fasores encontrados após a aplicação do filtro FFT.

clear all;
load c:\faltacap\abc\AT101000.sai; % O arquivo de saída do ATP
                                   (48kHz) é carregado.

arquivo = AT101000;

LOAD_ARQUIVO = 'OK'

Fs = 48000; % Frequência de amostragem do arquivo .pl4 gerado no ATP
fs = 960; % Frequência de reamostragem equivalente ao conversor A/D

% Ys = Y/2 shunt;
Ys = 6.613e-7+i*7.29042e-4;

Zc1=i*53.98; % Valor do Capacitor Série 1
Zc2=i*0; % Valor do Capacitor Série 2

%*****
%                               Filtro Butterworth passa-baixa anti-aliasing
%*****
%*****FILTRAGEM DO SINAL*****

% disp(' ');
% fap=input('Entre com a freq. da banda de passagem: fap = ');
% Rp=input('Entre com a atenuação máx. na banda de passagem: Rp = ');
% faa=input('Entre com a freq. da banda de atenuação: faa = ');
% Ra=input('Entre com a atenuação mín. na banda de atenuação: Ra = ');
% Fs2=input('Entre com a freq. de amostragem para filtro: Fs = ');

fap=500;
Rp=3;
faa=1000;
Ra=12;
Fs2=Fs;

%      SELECAO DA ORDEM DO FILTRO

[N,w] = buttord(2*fap/Fs2,2*faa/Fs2,Rp,Ra);
```

[illegible]

```

%*****
% Rotina filtra (FFT) o arquivoRE que contem as correntes e tensões.
% Após a filtragem, o sinal é reconstruído utilizando-se somente a
% componente 60Hz. Esta reconstrução do sinal, na forma de amostras
% discretas no tempo, é utilizada exclusivamente para impressão de
% gráficos.
% Os cálculos das correntes diferenciais são realizados usando-se os
% fasores (60Hz) resultantes da FFT para cada janela móvel de dados.
% É usada a funcao fft do Matlab.
%*****

dta = 1/fs;           % Taxa de amostragem do conversor.
ns = 16;              % Numero de amostras usadas por ciclo.
nc = 1;               % Numero de ciclos.
%t = 0:dta:0.6;

Tam = size(arquivoRE,1); % Salva em 'Tam' o numero de linhas do
                        % 'arquivoRE'

Q = 2*pi/ns;
ta = 0.001:dta:(10*nc/60); % Vetor tempo de amostras.
arquivofft2 = zeros((Tam-ns+1),12); % Cria uma matriz para registrar
                                % todas as componentes 60Hz
                                % calculadas por FFT.

Contador = zeros(1,3); % Cria Matriz 1x3 para Contador.
TimerDet = zeros(1,3); % Cria Matriz para Registrar
                        % Tempo de Detecção de Falta
                        % em cada Fase.

TimerTrip = zeros(1,3); % Cria Matriz 1x3 para Registrar
                        % Tempo de Decisão do Trip
                        % em Cada Fase.

SinalTrip = zeros((Tam-ns),3); % Cria Matriz p/ Sinal de Trip
SinalDet = zeros((Tam-ns),3); % Cria Matriz p/ Sinal de Trip
Imin = 200; % Ajuste da corrente mínima de operação do algoritmo.
K = 0.2; % Ajuste da sensibilidade de operação do algoritmo.

%*****
% Loop 'for' para cálculo do FFT de todas colunas do arquivoRE
% utilizando janela de dados movel de 16 amostras (cada 16 linhas da
% matriz arquivoRE).
% Dentro do loop são calculadas também as correntes shunt Is1 e Is2,
% além das correntes diferenciais I1 e I2.
%*****

for L = 1:(Tam-ns); % L = ponteiro de linhas do 'arquivoRE' de
                  % entrada

    arquivofft = fft (arquivoRE(L:(L+ns-1),2:13),ns); % Calcula FFT
                                                    % em cada janela 16 amostras

    %FFT1= 'OK'

    a1 = 2*real(arquivofft(2,:))/ns; % Compon. 60Hz Real
    b1 = -2*imag(arquivofft(2,:))/ns; % Compon. 60Hz Imagin.
    %alb1= 'OK'

```



```
arquivofft2(L,:) = arquivofft(2,:)/8; % Salva o fasor calculado
% (60Hz), desta janela, em um
% arquivo auxiliar.
% Apenas para registro.

Vagv(L,:) = arquivofft2 (L,1:3); % Salva em Vagv os fasores das
% tensões S/E AGV

Vrpr(L,:) = arquivofft2 (L,4:6); %Salva em Vrpr os fasores das
% tensões S/E RPR

I1(L,1:3) = arquivofft2 (L,7:9); % Salva em Vagv os fasores das
% correntes da S/E AGV
I2(L,1:3) = arquivofft2 (L,10:12); % Salva em Vrpr os fasores das
% correntes da S/E RPR

Is1(L,1:3) = Ys*(Vagv(L,:)-(Zc1*I1(L,:))); % Calcula a corrente
% shunt Is1
Is2(L,1:3) = Ys*(Vrpr(L,:)-(Zc2*I2(L,:))); % Calcula a corrente
% shunt Is2

Ix(L,1:3) = I1(L,1:3) - Is1(L,1:3); % Calcula corrente compensada Ix
Iy(L,1:3) = I2(L,1:3) - Is2(L,1:3); % Calcula corrente compensada Iy

ID(L,:)=abs(Ix(L,:)+Iy(L,:)); % Calcula corrente diferencial ID
IR(L,:)=max(abs(Ix(L,:)),abs(Iy(L,:))); % Calcula corr. restrição IR

%*****
% Classificação da Falta e Medição dos Tempos de Detecção e Ordem de
% Abertura. Deve-se subtrair o tempo de pré-falta dos tempos medidos
%*****
NivelSinal = 1000; % Ajusta nível do Sinal de Detecção e Trip para
% Gráfico

if ID(L,1) > K*IR(L,1)
    if ID(L,1) > Imin
        if Contador(1,1) == 0
            TimerDet(1,1) = (L+ns-1)*1/960; % Registra o tempo detecção
            % da falta na Fase A
            Ldet = L
        end
        SinalDet(L,1) = NivelSinal;
        Contador(1,1) = Contador(1,1)+1; % Incrementa Contador Fase A
        if Contador(1,1) >= 16
            if Contador(1,1) == 16
                TimerTrip(1,1) = (L+ns-1)*1/960;%Registra Ordem Abertura
                % após 16 Detecções Consecutivas.
                Ltrip = L
            end
            SinalTrip(L,1) = NivelSinal;
        else
            end
    else
        if Contador > 0
            Contador (1,1) = Contador(1,1)-1; % Decrementa Contador da
            % Fase A
        end
    end
end
```

```

if ID(L,2) > K*IR(L,2)
    if ID(L,2) > Imin
        if Contador(1,2) == 0
            TimerDet(1,2) = (L+ns-1)*1/960; % Registra o tempo detecção
                                           % da falta na Fase B
        end
        SinalDet(L,2) = NivelSinal;
        Contador(1,2) = Contador(1,2)+1; % Incrementa Contador Fase B
        if Contador(1,2) >= 16
            if Contador(1,2) == 16
                TimerTrip(1,2) = (L+ns-1)*1/960;%Registra Ordem Abertura
                                   % após 16 Detecções Consecutivas.
            end
            SinalTrip(L,2) = NivelSinal;
        else
            end
        else
            if Contador > 0
                Contador (1,2) = Contador(1,2)-1; % Decrementa Contador da
                                                    % Fase B
            end
        end
    end
end

if ID(L,3) > K*IR(L,3)
    if ID(L,3) > Imin
        if Contador(1,3) == 0
            TimerDet(1,3) = (L+ns-1)*1/960; % Registra o tempo detecção
                                           % da falta na Fase C.
        end
        SinalDet(L,3) = NivelSinal;
        Contador(1,3) = Contador(1,3)+1; % Incrementa Contador Fase C
        if Contador(1,3) >= 16
            if Contador(1,3) == 16
                TimerTrip(1,3) = (L+ns-1)*1/960;%Registra Ordem Abertura
                                   % após 16 Detecções Consecutivas.
            end
            SinalTrip(L,3) = NivelSinal;
        else
            end
        else
            if Contador > 0
                Contador (1,3) = Contador(1,3)-1; % Decrementa Contador da
                                                    % Fase C
            end
        end
    end
end

%*****
%*****
% Loop para reconstruir as ondas de tensão e corrente originais
% usando apenas a frequência fundamental
%*****
for i = 1:ns
    fundamental(L+i-1,:) = a1*cos(2*pi*ta(i)/(ns*dta)) +
                           b1*sin(2*pi*ta(i)/(ns*dta));
end
%*****
end

```

```

FFT_DIFF= 'OK'
%           Fim da Rotina Filtro FFT e Calculo Diferencial
%*****

% Cálculo do valor eficaz de cada um dos fasores obtidos.
I1rms = abs(I1) / sqrt(2);
I2rms = abs(I2) / sqrt(2);
Vagvrms = abs(Vagv) / sqrt(2);
Vrprrms = abs(Vrpr) / sqrt(2);
Is1rms = abs(Is1) / sqrt(2);
Is2rms = abs(Is2) / sqrt(2);
Ixrms = abs(Ix) / sqrt(2);
Iyrms = abs(Iy) / sqrt(2);

%*****
%           Gráficos das Correntes Diferenciais x Restrição
%*****

plotTrip = 1; % (0) Não faz Gráficos      (1) Faz Gráficos
if plotTrip == 1;
    figure (4)
    plot (ta(16:160),ID(1:145,1), 'b-');
    hold on
    plot (ta(16:160),IR(1:145,1), 'm.:');
    plot (ta(16:160),SinalDet(1:145,1), 'kx:');
    zoom
    grid on
    xlabel('Tempo (ms)');
    ylabel('Corrente (A)');
    title('(-)Diferencial    (o)Restrição    (x)Detecção');

    figure (5)
    plot (ta(16:160),ID(1:145,2), 'b-');
    hold on
    plot (ta(16:160),IR(1:145,2), 'm.:');
    plot (ta(16:160),SinalDet(1:145,2), 'kx:');
    zoom
    grid on
    xlabel('Tempo (ms)');
    ylabel('Corrente (A)');
    title('(-- )Diferencial    (o)Restrição    (x)Detecção');

    figure (6)
    plot (ta(16:160),ID(1:145,3), 'b-');
    hold on
    plot (ta(16:160),IR(1:145,3), 'm.:');
    plot (ta(16:160),SinalDet(1:145,3), 'kx:');
    zoom
    grid on
    xlabel('Tempo (ms)');
    ylabel('Corrente (A)');
    title('(-- )Diferencial    (o)Restrição    (x)Detecção');

    figure (7)
    plot (ta(16:160),ID(1:145,1), 'b-');
    hold on
    plot (ta(16:160),IR(1:145,1), 'm.:');

```



```

plot (ta(16:160),SinalTrip(1:145,1),'rx:');
zoom
grid on
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');
title('(--Diferencial (o)Restrição (x)Ordem de Abertura');

figure (8)
plot (ta(16:160),ID(1:145,2),'b-');
hold on
plot (ta(16:160),IR(1:145,2),'m.:');
plot (ta(16:160),SinalTrip(1:145,2),'rx:');
zoom
grid on
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');
title('(--Diferencial (o)Restrição (x)Ordem de Abertura ');

figure (9)
plot (ta(16:160),ID(1:145,3),'b-');
hold on
plot (ta(16:160),IR(1:145,3),'m.:');
plot (ta(16:160),SinalTrip(1:145,3),'rx:');
zoom
grid on
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');
title('(--Diferencial (o)Restrição (x)Ordem de Abertura');

figure(10);
plot (tempore(1:82,1),arquivoRE(2:83,5),'b');
hold on
plot (tempore(1:82,1),fundamental(1:82,4),'r');
zoom;
grid on
xlabel('Tempo (seg)');
ylabel('Tensão(Volts)');
title('Azul - Onda Reamostrada Vermelho - Onda FFT');

end

z = max(IR);
z=max(z);
figure(11);
plot(IR(:,1),ID(:,1),'o',IR(:,2),ID(:,2),'*',IR(:,3),ID(:,3),'+',[0
z],[Imin Imin+K*z],'k');
grid on
zoom
xlabel(' Ir')
ylabel(' Iop')
title('(o) Fase A (*) Fase B (+) Fase C ');

TimerDet = TimerDet * 1000 % Mostra Tempo Detecção da Falta em (ms).
TimerTrip = TimerTrip * 1000 %Mostra Tempo Abertura de Falta em (ms)

% Fim Gráficos
%*****
% Fim do Programa
%*****

```

APÊNDICE II

Sistema Elétrico sem Compensação Série Resultados das Simulações de Faltas Internas à LT AGV-RPR

Serão apresentados a seguir os resultados referentes às 160 simulações de faltas internas realizadas para a linha de transmissão AGV-RPR sem compensação série.

As tabelas indicam a distância, ângulo de incidência e as medições de tempo necessário para o algoritmo detectar a falta e decidir pelo desligamento. Os tempos que constam das tabelas estão relacionados com o número de amostras necessárias para que o algoritmo detecte a falta. Uma vez detectada a falta, o algoritmo aguarda 16 amostras consecutivas sob condições de falta, para operar a abertura. As tabelas foram divididas por tipo de falta:

- AT - Falta monofásica entre a fase A e a terra;
- AB - Falta bifásica entre as fases A e B;
- ABT - Falta bifásica entre as fases A e B envolvendo a terra;
- ABC - Falta trifásica.

TABELA 5 – Resultados de tempos de operação das faltas internas tipo AT aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta (%)	R Falta (Ω)	Ângulo Incidência ($^{\circ}$)	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	3,125	-	-	18,750	-	-
10	005	90	2,083	-	-	17,708	-	-
10	010	00	3,125	-	-	18,750	-	-
10	010	90	2,083	-	-	17,708	-	-
10	050	00	3,125	-	-	18,750	-	-
10	050	90	2,083	-	-	17,708	-	-
10	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
10	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	010	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
25	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
25	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
50	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
50	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	010	90	3,125	-	-	18,750	-	-
50	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
50	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
50	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
75	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
75	010	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
75	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
75	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
75	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	005	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	005	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	010	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	010	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	050	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	050	90	3,125	-	-	18,750	-	-
90	100	00	4,167	-	-	19,792	-	-
90	100	90	3,125	-	-	18,750	-	-

TABELA 6 – Resultados de tempos de operação das faltas internas tipo AB aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	2,083	2,083	-	17,708	17,708	-
10	005	90	2,083	2,083	-	17,708	17,708	-
10	010	00	2,083	2,083	-	17,708	17,708	-
10	010	90	2,083	2,083	-	17,708	17,708	-
10	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	100	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-

TABELA 7 – Resultados de tempos de operação das faltas internas tipo ABT aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	3,125	2,083	-	18,750	17,708	-
10	005	90	2,083	3,125	-	17,708	18,750	-
10	010	00	3,125	2,083	-	18,750	17,708	-
10	010	90	2,083	3,125	-	17,708	18,750	-
10	050	00	3,125	2,083	-	18,750	17,708	-
10	050	90	2,083	3,125	-	17,708	18,750	-
10	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
10	100	90	3,125	6,250	-	18,750	21,875	-
25	005	00	4,167	4,167	-	19,792	19,792	-
25	005	90	2,083	3,125	-	17,708	18,750	-
25	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	010	90	2,083	3,125	-	17,708	18,750	-
25	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
25	100	90	4,167	5,208	-	19,792	22,917	-
50	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
50	100	90	3,125	4,167	-	18,750	20,833	-
75	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
75	100	00	4,167	3,125	-	19,792	18,750	-
75	100	90	3,125	4,167	-	18,750	21,875	-
90	005	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	005	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	010	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	010	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	050	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	050	90	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	100	00	3,125	3,125	-	18,750	18,750	-
90	100	90	3,125	4,167	-	18,750	21,875	-

TABELA 8 – Resultados de tempos de operação das faltas internas tipo ABC aplicadas na LT AGV-RPR

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
10	005	00	3,125	2,083	2,083	18,750	17,708	17,708
10	005	90	2,083	3,125	2,083	17,708	18,750	17,708
10	010	00	3,125	2,083	2,083	18,750	17,708	17,708
10	010	90	2,083	3,125	2,083	17,708	18,750	17,708
10	050	00	3,125	2,083	2,083	18,750	17,708	17,708
10	050	90	2,083	5,208	3,125	17,708	20,833	18,750
10	100	00	3,125	3,125	3,125	18,750	18,750	18,750
10	100	90	2,083	5,208	3,125	17,708	20,833	18,750
25	005	00	3,125	2,083	3,125	18,750	17,708	18,750
25	005	90	2,083	3,125	3,125	17,708	18,750	18,750
25	010	00	3,125	2,083	3,125	18,750	17,708	18,750
25	010	90	2,083	3,125	3,125	17,708	18,750	18,750
25	050	00	3,125	3,125	3,125	18,750	18,750	18,750
25	050	90	3,125	5,208	3,125	18,750	20,833	18,750
25	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
25	100	90	3,125	5,208	3,125	18,750	20,833	18,750
50	005	00	3,125	2,083	3,125	18,750	17,708	18,750
50	005	90	2,083	6,250	3,125	17,708	21,875	18,750
50	010	00	3,125	2,083	3,125	18,750	17,708	18,750
50	010	90	2,083	6,250	3,125	17,708	21,875	18,750
50	050	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
50	050	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
50	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
50	100	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	005	00	3,125	3,125	3,125	18,750	18,750	18,750
75	005	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	010	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
75	010	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	050	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
75	050	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
75	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
75	100	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	005	00	3,125	3,125	3,125	18,750	18,750	18,750
90	005	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	010	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
90	010	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	050	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
90	050	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750
90	100	00	4,167	3,125	3,125	19,792	18,750	18,750
90	100	90	3,125	6,250	3,125	18,750	21,875	18,750

APÊNDICE III

Sistema Elétrico sem Compensação Série Resultados das Simulações de Falhas Externas à LT AGV-RPR Falhas Simuladas nas LTs AGV-ARA e RPR-SBO

TABELA 9 – Falhas externas do tipo AT aplicadas na LT AGV-ARA

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
(%)	(Ω)	($^{\circ}$)						
-10	005	00	-	-	-	-	-	-
-10	005	90	-	-	-	-	-	-
-10	010	00	-	-	-	-	-	-
-10	010	90	-	-	-	-	-	-
-10	050	00	-	-	-	-	-	-
-10	050	90	-	-	-	-	-	-
-10	100	00	-	-	-	-	-	-
-10	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 10 – Falhas externas do tipo AT aplicadas na LT RPR-SBO

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
(%)	(Ω)	($^{\circ}$)						
110	005	00	-	-	-	-	-	-
110	005	90	-	-	-	-	-	-
110	010	00	-	-	-	-	-	-
110	010	90	-	-	-	-	-	-
110	050	00	-	-	-	-	-	-
110	050	90	-	-	-	-	-	-
110	100	00	-	-	-	-	-	-
110	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 11 – Falhas externas do tipo AB aplicadas na LT AGV-ARA

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
-10	005	00	-	-	-	-	-	-
-10	005	90	-	-	-	-	-	-
-10	010	00	-	-	-	-	-	-
-10	010	90	-	-	-	-	-	-
-10	050	00	-	-	-	-	-	-
-10	050	90	-	-	-	-	-	-
-10	100	00	-	-	-	-	-	-
-10	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 12 – Falhas externas do tipo AB aplicadas na LT RPR-SBO

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
110	005	00	-	-	-	-	-	-
110	005	90	-	-	-	-	-	-
110	010	00	-	-	-	-	-	-
110	010	90	-	-	-	-	-	-
110	050	00	-	-	-	-	-	-
110	050	90	-	-	-	-	-	-
110	100	00	-	-	-	-	-	-
110	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 13 – Falhas externas do tipo ABT aplicadas na LT AGV-ARA

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
-10	005	00	-	-	-	-	-	-
-10	005	90	-	-	-	-	-	-
-10	010	00	-	-	-	-	-	-
-10	010	90	-	-	-	-	-	-
-10	050	00	-	-	-	-	-	-
-10	050	90	-	-	-	-	-	-
-10	100	00	-	-	-	-	-	-
-10	100	90	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE IV

Sistema Elétrico com Compensação Série Resultados das Simulações de Falhas Externas à LT AGV-RPR Falhas Simuladas nas LTs AGV-ARA e RPR-SBO

TABELA 17 – Falhas externas do tipo AT aplicadas na LT AGV-ARA

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
(%)	(Ω)	($^{\circ}$)						
-10	005	00	-	-	-	-	-	-
-10	005	90	-	-	-	-	-	-
-10	010	00	-	-	-	-	-	-
-10	010	90	-	-	-	-	-	-
-10	050	00	-	-	-	-	-	-
-10	050	90	-	-	-	-	-	-
-10	100	00	-	-	-	-	-	-
-10	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 18 – Falhas externas do tipo AT aplicadas na LT RPR-SBO

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
(%)	(Ω)	($^{\circ}$)						
110	005	00	-	-	-	-	-	-
110	005	90	-	-	-	-	-	-
110	010	00	-	-	-	-	-	-
110	010	90	-	-	-	-	-	-
110	050	00	-	-	-	-	-	-
110	050	90	-	-	-	-	-	-
110	100	00	-	-	-	-	-	-
110	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 19 – Falhas externas do tipo AB aplicadas na LT AGV-ARA

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
-10	005	00	-	-	-	-	-	-
-10	005	90	-	-	-	-	-	-
-10	010	00	-	-	-	-	-	-
-10	010	90	-	-	-	-	-	-
-10	050	00	-	-	-	-	-	-
-10	050	90	-	-	-	-	-	-
-10	100	00	-	-	-	-	-	-
-10	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 20 – Falhas externas do tipo AB aplicadas na LT RPR-SBO

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
110	005	00	-	-	-	-	-	-
110	005	90	-	-	-	-	-	-
110	010	00	-	-	-	-	-	-
110	010	90	-	-	-	-	-	-
110	050	00	-	-	-	-	-	-
110	050	90	-	-	-	-	-	-
110	100	00	-	-	-	-	-	-
110	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 21 – Falhas externas do tipo ABT aplicadas na LT AGV-ARA

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
-10	005	00	-	-	-	-	-	-
-10	005	90	-	-	-	-	-	-
-10	010	00	-	-	-	-	-	-
-10	010	90	-	-	-	-	-	-
-10	050	00	-	-	-	-	-	-
-10	050	90	-	-	-	-	-	-
-10	100	00	-	-	-	-	-	-
-10	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 22 – Falta externas do tipo ABT aplicadas na LT RPR-SBO

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
110	005	00	-	-	-	-	-	-
110	005	90	-	-	-	-	-	-
110	010	00	-	-	-	-	-	-
110	010	90	-	-	-	-	-	-
110	050	00	-	-	-	-	-	-
110	050	90	-	-	-	-	-	-
110	100	00	-	-	-	-	-	-
110	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 23 – Falta externas do tipo ABC aplicadas na LT AGV-ARA

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
-10	005	00	-	-	-	-	-	-
-10	005	90	-	-	-	-	-	-
-10	010	00	-	-	-	-	-	-
-10	010	90	-	-	-	-	-	-
-10	050	00	-	-	-	-	-	-
-10	050	90	-	-	-	-	-	-
-10	100	00	-	-	-	-	-	-
-10	100	90	-	-	-	-	-	-

TABELA 24 – Falta externas do tipo ABC aplicadas na LT RPR-SBO

Distância Falta	R Falta	Ângulo Incidência	Medição do Tempo de Detecção (ms)			Medição do Tempo de Ordem de Abertura (ms)		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
110	005	00	-	-	-	-	-	-
110	005	90	-	-	-	-	-	-
110	010	00	-	-	-	-	-	-
110	010	90	-	-	-	-	-	-
110	050	00	-	-	-	-	-	-
110	050	90	-	-	-	-	-	-
110	100	00	-	-	-	-	-	-
110	100	90	-	-	-	-	-	-