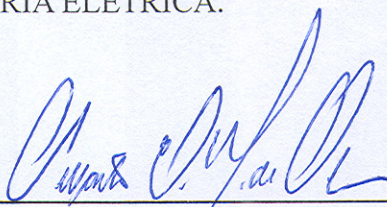


REPRESENTAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO EM PROGRAMAS DE  
CURTO-CIRCUITO

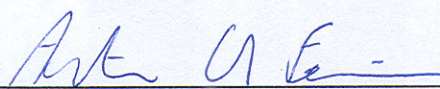
Juan Ignacio Patricio Rossi Gonzalez

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO  
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

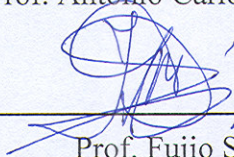
Aprovada por:



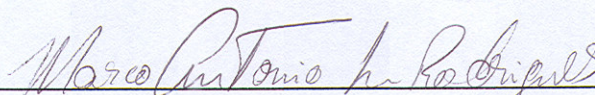
Prof. Sebastião Ercules Melo de Oliveira, D.Sc.



Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.



Prof. Fujio Sato, D.Sc.



Dr. Marco Antonio Macciola Rodrigues, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2007



GONZALEZ, JUAN IGNACIO PATRICIO

ROSSI

Representação de Relés de Proteção em  
Programas de Curto-Circuito [Rio de Janeiro]  
2007

XIII, 137 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação – Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, COPPE

1. Modelagem de Relés
2. Proteção de Sistemas
3. Curto-Circuito

I. COPPE/UFRJ    II. Título (série)

Dedico este trabalho aos meus pais.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Sebastião Oliveira pela valiosa orientação e por suas contribuições para desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao colega Ronaldo Vieira Barcelos por sua grande ajuda e por compartilhar generosamente seus conhecimentos.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Prof. Antonio Carlos Ferreira, Prof. Fujio Sato e Dr. Marco Antonio Rodrigues, por sua presença e por seus comentários e sugestões.

Agradeço aos meus colegas de CEPEL pelo convívio agradável e motivador.

Agradeço ao CEPEL por viabilizar este trabalho e às empresas do Grupo Eletrobrás por patrocinarem o CEPEL.

Agradeço à minha família.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## REPRESENTAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO EM PROGRAMAS DE CURTO-CIRCUITO

Juan Ignacio Patricio Rossi Gonzalez

Setembro / 2007

Orientador: Sebastião Ercules Melo de Oliveira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta as características de implementação da representação de relés de proteção em um programa de cálculo de curto-circuito. São apresentados modelos e algoritmos dos seguintes relés: sobrecorrente instantâneo de fase (código ANSI 50), sobrecorrente instantâneo de neutro (ANSI 50N), sobrecorrente temporizado de fase (51), sobrecorrente temporizado de neutro (51N), direcional de fase (67), direcional de neutro (67N), relés de distância (21) de fase ou de neutro, com característica mho, com diversas opções de polarização e características quadrilaterais definidas no plano R-X.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## MODELLING OF PROTECTIVE RELAYS IN SHORT CIRCUIT CALCULATION PROGRAMS

Juan Ignacio Patricio Rossi Gonzalez

September / 2007

Advisor: Sebastião Ercules Melo de Oliveira

Department: Electrical Engineering

This work presents the characteristics of implementation for modeling protective relays in a short circuit calculation program. The following models are presented: instantaneous phase overcurrent relays (ANSI code: 50), instantaneous residual overcurrent relays (50N), inverse-time phase overcurrent relays (51), inverse-time residual overcurrent relays (51N), phase directional relays (67), residual directional relays (67N) and distance phase and ground relays (21), with mho characteristic, with several options of polarization and quadrilateral characteristics defined in the R – X plane.

# SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	x
Lista de Tabelas .....	xiii
<b>CAPÍTULO 1</b> Introdução .....	1
1.1 Histórico .....	3
1.2 Objetivo.....	10
1.3 Estrutura do texto .....	10
<b>CAPÍTULO 2</b> Fundamentos de Proteção de Sistemas de Potência .....	12
2.1 Classificação das faltas .....	14
2.2 Conseqüências dos curtos-circuitos .....	15
2.3 Tipos básicos de sistemas de proteção .....	15
2.4 Finalidade dos sistemas de proteção .....	16
<b>CAPÍTULO 3</b> Modelagem e Representação de Relés de Proteção.....	18
3.1 Estrutura de dados .....	19
3.2 Dados comuns a todos os modelos .....	20
3.3 Relé de Sobrecorrente Instantâneo de Fase (50).....	23
3.3.1 Dados .....	23
3.3.2 Atuação .....	24
3.4 Relé de Sobrecorrente Instantâneo de Neutro (50N) .....	25
3.4.1 Dados .....	25
3.4.2 Atuação .....	26
3.5 Relé de Sobrecorrente Temporizado de Fase (51).....	27
3.5.1 Dados .....	28
3.5.2 Atuação .....	29
3.6 Relé de Sobrecorrente Temporizado de Neutro (51N) .....	30
3.6.1 Dados .....	31
3.6.2 Atuação .....	31
3.7 Relé de Sobrecorrente Direcional de Fase (67).....	32
3.7.1 Dados .....	34
3.7.2 Atuação .....	36
3.8 Relé de Sobrecorrente Direcional de Neutro (67N).....	38
3.8.1 Dados .....	39

3.8.2 Atuação .....	41
3.9 Relé de Sobretensão de Fase (59) .....	42
3.9.1 Dados .....	43
3.9.2 Atuação .....	43
3.10 Relé de Sobretensão de Neutro (59 N e 59G) .....	44
3.10.1 Dados .....	44
3.10.2 Atuação .....	44
3.11 Conceitos básicos da proteção de distância .....	45
3.11.1 Impedâncias aparentes .....	45
3.11.2 Zonas de proteção .....	49
3.11.3 Características obtidas por comparação de fase.....	50
3.12 Relé de Distância de Fase (21).....	54
3.12.1 Dados .....	54
3.12.2 Atuação .....	56
3.13 Relé de Distância de Terra (21N ou 21G).....	61
3.13.1 Dados .....	61
3.13.2 Atuação .....	62
CAPÍTULO 4 Resultados.....	68
4.1 Sistema teste.....	68
4.1.1 Parâmetros dos relés.....	69
4.2 Validação das proteções de Sobrecorrente e de Sobretensão.....	79
4.2.1 Faltas monofásicas sólidas .....	79
4.2.2 Faltas trifásicas sólidas.....	85
4.2.3 Faltas monofásicas com resistência de 40Ω.....	90
4.2.4 Conclusões sobre a implementação dos relés de Sobrecorrente e de Sobretensão.....	96
4.3 Validação das proteções de Distância .....	96
4.3.1 Faltas monofásicas sólidas .....	96
4.3.2 Faltas fase-fase sólidas.....	103
4.3.3 Faltas monofásicas com resistência de 40Ω.....	109
4.3.4 Conclusões sobre a implementação dos relés de Distância .....	115
CAPÍTULO 5 Conclusões e Trabalhos Futuros .....	116
5.1 Conclusões .....	116
5.2 Trabalhos Futuros .....	119



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	120
Apêndice A .....	123

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zonas de proteção .....	17
Figura 2 – Identificação de terminal de circuito onde se encontra o relé de proteção.....	21
Figura 3 – Exemplo de conexão dos TCs e relés de sobrecorrente instantâneos (50) e (50N).....	23
Figura 4 – Exemplo de conexão de TCs e relés de sobrecorrente temporizados (51) e (51N).....	27
Figura 5 – Gráfico de relação corrente versus tempo de atuação de um relé de sobrecorrente temporizado. .	27
Figura 6 – Exemplo de aplicação de relés direcionais.....	33
Figura 7 – Ângulo de máximo torque de um relé direcional com polarização cruzada.....	35
Figura 8 – Ângulos superior e inferior, para relés com característica no plano R-X.....	36
Figura 9 - Ângulo de máximo torque de um relé direcional com polarização $V_0, I_0$ .....	40
Figura 10 – Falta trifásica.....	45
Figura 11 – Plano R-X: Representação da linha de transmissão (azul) e de impedâncias aparentes calculadas para faltas ao longo da linha.....	46
Figura 12 – Representação da característica de um relé MHO no plano R-X.....	47
Figura 13 – Representação da característica de um relé QUADRILATERAL .....	48
Figura 14 – Representação da duas zonas de proteção de um relé MHO.....	49
Figura 15 – Característica MHO obtida pela comparação de ângulos de fase.....	51
Figura 16 – Reta no plano R-Z obtida pela comparação de ângulos de fase .....	53
Figura 17 – Característica MHO .....	54
Figura 18 – Característica QUADRILATERAL 1 .....	55
Figura 19 – Característica QUADRILATERAL 2 .....	55
Figura 20 – Representação gráfica da LT Angra – C. Paulista e de sua vizinhança.....	69
Figura 21 - Falta A-T a 10% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A .....	81
Figura 22 - Falta A-T a 30% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A .....	81
Figura 23 - Falta A-T a 50% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A .....	82
Figura 24 - Falta A-T a 70% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A .....	82
Figura 25 – Falta A-T a 90% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A .....	83
Figura 26 - Falta A-T na SE C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	83
Figura 27 - Falta A-T a 10% da LT C. Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	84
Figura 28 - Falta A-T a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A .....	84

Figura 29 - Falta A-B-C a 10% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	86
Figura 30 - Falta A-B-C a 30% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	87
Figura 31 - Falta A-B-C a 50% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	87
Figura 32 - Falta A-B-C a 70% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	88
Figura 33 - Falta A-B-C a 90% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	88
Figura 34 - Falta A-B-C na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	89
Figura 35 - Falta A-B-C a 10% da LT C. Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	89
Figura 36 - Falta A-B-C a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	90
Figura 37 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 10% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	92
Figura 38 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 30% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	92
Figura 39 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 50% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	93
Figura 40 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 70% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	93
Figura 41 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 90% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	94
Figura 42 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	94
Figura 43 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 10% da LT C.Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A....	95
Figura 44 - Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	95
Figura 45 – Falta A-T a 10% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	99
Figura 46 – Falta A-T a 30% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	99
Figura 47 – Falta A-T a 50% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	100
Figura 48 – Falta A-T a 70% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	100

Figura 49 – Falta A-T a 90% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	101
Figura 50 – Falta A-T na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	101
Figura 51 – Falta A-T, a 10% da LT C.Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	102
Figura 52 – Falta A-T a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	102
Figura 53 – Falta A-B a 10% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	105
Figura 54 – Falta A-B a 30% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	105
Figura 55 – Falta A-B a 50% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	106
Figura 56 – Falta A-B a 70% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	106
Figura 57 – Falta A-B a 90% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	107
Figura 58 – Falta A-B na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	107
Figura 59 – Falta A-B, a 10% da LT C.Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	108
Figura 60 – Falta A-B, a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	108
Figura 61 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 10% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	111
Figura 62 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 30% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	111
Figura 63 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 50% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	112
Figura 64 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 70% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	112
Figura 65 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 90% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	113
Figura 66 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	113
Figura 67 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 10% da LT C.Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	114
Figura 68 – Falta A-T, com 40 $\Omega$ de resistência de falta, a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A.....	114

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do Relé Instantâneo de Fase (50).....	70
Tabela 2: Parâmetros do Relé Instantâneo de Neutro (50N) .....	70
Tabela 3: Parâmetros do Relé Temporizado de Fase (51) .....	70
Tabela 4: Parâmetros do Relé Temporizado de Neutro (51N) .....	70
Tabela 5: Parâmetros do Relé Temporizado de Fase (51) .....	71
Tabela 6: Parâmetros do Relé Temporizado de Fase (51) .....	71
Tabela 7: Parâmetros do Relé de Sobretensão de Fase (59).....	72
Tabela 8: Parâmetros do Relé de Sobrecorrente de Neutro (59G).....	72
Tabela 9: Parâmetros do Relé de Distância (21 - Unidade de FASE) – Característica MHO, Zona 1 .....	73
Tabela 10: Parâmetros do Relé de Distância (21 - Unidade de FASE) – Característica MHO, Zona 2 .....	73
Tabela 11: Parâmetros do Relé de Distância (21 - Unidade de FASE) – Característica MHO, Zona 3 .....	73
Tabela 12: Relé de Distância (21G - Unidade de TERRA) – Característica MHO, Zona 1 .....	74
Tabela 13: Relé de Distância (21G - Unidade de TERRA) – Característica MHO, Zona 2.....	74
Tabela 14: Relé de Distância (21G - Unidade de TERRA) – Característica MHO, Zona 3.....	74
Tabela 15: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 1 .....	75
Tabela 16: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 2.....	75
Tabela 17: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 3.....	75
Tabela 18: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 1.....	76
Tabela 19: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 2.....	76
Tabela 20: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 3.....	76
Tabela 21: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 1 .....	77
Tabela 22: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 2.....	77
Tabela 23: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 3.....	77
Tabela 24: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 1.....	78
Tabela 25: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 2.....	78
Tabela 26: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 3.....	78
Tabela 27: Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente e sobretensão para faltas monofásicas ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista .....	79
Tabela 28: Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente e sobretensão para faltas trifásicas ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista .....	85
Tabela 29: Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente e sobretensão para faltas monofásicas com resistência de $40\Omega$ ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista .....	91
Tabela 30: Tempos de atuação dos relés de distância para faltas monofásicas ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista .....	97
Tabela 31: Tempos de atuação dos relés de distância para faltas fase-fase ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista .....	104
Tabela 32: Tempos de atuação dos relés de distância para faltas para faltas monofásicas com resistência de $40\Omega$ ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista.....	110

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A operação e o planejamento dos sistemas elétricos demandam estudos nos quais se possa simular o comportamento dos equipamentos existentes frente às tensões e correntes às quais serão submetidos em condições normais de operação, durante manobras como inserção, rejeição de carga, religamento, e frente a ocorrências de curtos-circuitos, de maneira a dimensioná-los e ajustá-los corretamente, permitindo que tenham o melhor funcionamento possível e vida útil prolongada.

Durante muito tempo, tais simulações eram realizadas em analisadores de rede analógicos que representavam o sistema elétrico em escala reduzida e nos quais se ajustavam valores de resistores, reatores, capacitores, cargas e geradores, sendo estes últimos representados por fontes de tensão com amplitude e ângulo de fase ajustáveis.

Com o desenvolvimento e a evolução dos computadores digitais, passou a ser viável efetuar tais simulações através de cálculos matemáticos que reproduzem a resposta dos diversos equipamentos. Desde então, a modelagem e a simulação computacional do desempenho dos sistemas de potência têm sido uma prática comum em empresas, centros de pesquisas e universidades. Modelos para representação dos equipamentos de sistemas de potência têm sido desenvolvidos e utilizados em softwares para cálculo de curtos-circuitos, fluxo de potência, transitórios eletromecânicos, transitórios eletromagnéticos, entre outros. Cada tipo de estudo dá ênfase a determinados fenômenos, exigindo diferentes tipos de dados para sua realização e representando o comportamento dos diversos tipos de equipamentos presentes em um sistema elétrico com maior ou menor grau de detalhe.

Existem modelos sofisticados para representação de geradores, inclusive de seus controles, de linhas de transmissão, de transformadores, etc., e que podem ser disponibilizados para utilização nos estudos elétricos referidos.



Os resultados dos estudos de curto-circuito podem ser utilizados para atendimento a diferentes aplicações, dentre as quais pode-se destacar: o estudo de sistemas de proteção, o dimensionamento de equipamentos frente a condições de curto, a análise posterior de ocorrências, de maneira a se explicitar as causas dos defeitos e a se definir se a proteção atuou corretamente ou não, a avaliação de afundamentos temporários de tensão para estudos de qualidade de energia etc.

Os resultados típicos obtidos pelo cálculo de curto-circuito são os fasores, na frequência fundamental, representativos das correntes e das tensões que se desenvolvem em qualquer ponto do sistema, no instante imediatamente após uma falta.

O objetivo dos estudos de proteção é o ajuste dos parâmetros dos relés, de diversos tipos, presentes no sistema, com a finalidade de que estes eliminem as faltas que venham a ocorrer com rapidez e seletividade, desligando apenas os equipamentos estritamente necessários para extinguir cada defeito.

Para efetuar tais ajustes e, uma vez selecionados, testar sua adequação, é comum a realização de simulações de um conjunto de faltas em pontos específicos do sistema, a fim de verificar se cada relé atuará de maneira correta e no tempo esperado.

Efetuar cálculos manualmente, a partir das correntes e tensões de falta obtidas em uma simulação de curto-circuito, com o objetivo de se avaliar, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante e do conjunto de ajustes aplicados, se um dado relé atuará ou não, é algo extremamente trabalhoso e com grande propensão a erros. Portanto, é um recurso desejável em um programa de cálculo de curtos-circuitos que se disponibilize modelos de relés para que estes possam ser representados em uma rede, da mesma forma como é feito com outros equipamentos como linhas de transmissão, geradores, transformadores, etc., e que tais modelos efetuem os cálculos necessários para, a partir das correntes e tensões obtidas, determinar, de forma automática, o comportamento de cada relé durante um defeito.

A representação dos relés, a princípio, seria uma tarefa de médio grau de dificuldade. O maior desafio seria cobrir a enorme quantidade de modelos destes

equipamentos disponíveis no mercado e as especificidades de cada um. Entretanto, o que torna o problema mais complexo é o fato de que os fabricantes de relés, por razões comerciais, são, normalmente, resistentes à divulgação de informações detalhadas sobre o funcionamento de seus equipamentos. No contexto atual, considerando que os novos relés fabricados são, em sua quase totalidade, digitais, os princípios operacionais passam a ser apenas algoritmos computacionais, diferentemente do que ocorria com os relés eletromecânicos, nos quais os princípios operativos dependiam de características construtivas e da interação de grandezas físicas, e, por isto, sua dedução matemática nem sempre era trivial, especialmente para simulações transitórias. Apesar dessa relativa facilidade de representação dos relés digitais, o acesso às características exatas destes pode ser bastante restrito, pela razão citada acima, dependendo do tipo do dispositivo e de seu fabricante.

Ao longo do tempo, por conta de estudos e pesquisas conduzidas por engenheiros de empresas de eletricidade, acadêmicos, fabricantes de relés e outros, os princípios operativos básicos de alguns tipos de relés foram sendo divulgados. No item seguinte são revisados alguns trabalhos na área de modelagem de relés de proteção.

## **1.1 Histórico**

A seguir são citados, em ordem cronológica, alguns trabalhos sobre o tema da modelagem de relés, assim como seus pontos principais, com a finalidade de contextualizar o problema.

Em [3], de autoria de E. O. Schweitzer e outros e publicado em 1980, são descritas características de um dos primeiros relés de sobrecorrente digitais desenvolvidos: características do hardware utilizado, filtros digitais para determinar a magnitude da corrente através de equações baseadas em funções de Walsh, com alterações de maneira a serem computacionalmente eficientes, a implementação de algoritmo capaz de simular a relação corrente *versus* tempo de um relé de sobrecorrente eletromecânico, simulando o progresso do disco de indução ao longo do tempo, formas de adaptar a curva obtida a qualquer característica que se deseje pelo ajuste de

parâmetros apropriados e de representar a desoperação do relé, instantânea, para representar um relé estático, ou temporizada, em caso de relé eletromecânico.

Em [4] e [5], de autoria de R. J. Martilla e publicados em 1981, é proposta uma forma alternativa para avaliar a operação de relés mho com polarização por tensão memorizada ou polarização cruzada. O autor relata que o método convencional para avaliação da operação de relés tipo mho é a confrontação da impedância aparente obtida pela divisão de tensão e corrente aplicadas ao relé com a característica R-X do mesmo, mas que esta característica só permanece inalterada nos equipamentos com polarização convencional. Nos relés com outros tipos de polarização, a característica no plano R-X se modifica de acordo com as condições de carregamento pré-falta e do tipo de defeito, especialmente se a linha estiver em um sistema malhado, com contribuições nos dois terminais, e precisaria ser recalculada para cada situação. Considerando que a característica mho pode ser obtida pela comparação de fase dos vetores abaixo:

$$S_1 = K_1 \cdot V_\phi - I_\phi \cdot Z_C \quad (1)$$

$$S_2 = K_2 \cdot V_\phi + K_3 \cdot I_\phi \cdot Z_C + K_4 \cdot V_{POL} \quad (2)$$

Sendo  $Z_C$  a impedância ajustada,  $V_\phi$  e  $I_\phi$  tensão e corrente apropriadas para cada tipo de falta (a, bc, etc),  $K_1, K_2, K_3, K_4$  constantes complexas e  $V_{POL}$  a tensão de polarização, o autor mostra que caso seja utilizada a impedância aparente  $Z'_\phi$  dada pela expressão (3) abaixo, será possível utilizar uma característica circular no plano R-X, passando pela origem e pelo ponto  $Z_C$  e que não se modificará, independentemente do carregamento ou do tipo de falta aplicado.

$$Z'_\phi = \frac{V'_\phi}{I'_\phi} = \frac{K_2 \cdot V_\phi + K_3 \cdot I_\phi \cdot Z_C + K_4 \cdot V_{POL}}{I_\phi (1 + K_3) + \frac{K_4 \cdot V_{POL} + (K_2 - K_1) \cdot V_\phi}{Z_C}} \quad (3)$$

O autor menciona também que, caso  $K_3$  seja ajustado com valor diferente de zero,

seu efeito será adicionar um *offset* na característica R-X do relé, e que  $K_4$  diferente de zero provocará *offset* na direção negativa para faltas adiante e na direção positiva para faltas reversas, reduzindo as chances de que opere de maneira incorreta. No segundo artigo, são avaliados os resultados de relés mho com polarização convencional, com pequena parcela de polarização cruzada e polarização por corrente, com polarização convencional combinada com polarização cruzada, e com polarização utilizando tensão de seqüência positiva (20% pré-falta), frente a diferentes tipos de faltas e na presença de carregamento pré-falta. O autor conclui que os dois primeiros tipos de relés são os mais propensos a operar durante faltas reversas, que o terceiro tipo tem melhora significativa frente a faltas desbalanceadas, mas que os três primeiros tipos tiveram desempenho insatisfatório frente a faltas trifásicas. O quarto tipo seria o menos propenso a operar em faltas reversas, sendo a tensão de seqüência positiva a responsável por melhorar o desempenho frente a faltas desbalanceadas e a tensão de seqüência positiva memorizada a responsável pela correta decisão para faltas trifásicas.

Em [6], de Z. Peng e outros e publicado em 1985, é proposta uma modelagem de estados de espaços para simular o comportamento transitório de relés mho eletromecânicos e são mostrados os resultados de sua implementação.

Em [7], Cauthen e McCannon descrevem um sistema computacional, parcialmente implementado, com o objetivo de se constituir em ferramenta de produtividade e apoio a engenheiros encarregados por estudos e especificação de sistemas de proteção. O sistema consistia em combinação de softwares interativos, de base de dados de sistemas elétrico e de proteção e de recursos gráficos residindo em ambiente de estação de trabalho com o objetivo de promover redução no tempo de execução de estudos rotineiros e de prover novos recursos para enfrentamento de situações especiais. Os autores do artigo informam que vários módulos do programa já se encontravam finalizados e em fase de testes.

Os autores de [8] apresentam, inicialmente, uma discussão sobre os relés de distância dos tipos mho e quadrilateral, ressaltando suas principais características, dentre as quais podemos citar seu caráter eminentemente direcional e a tolerância, sem

sobrealcance, a determinados níveis de resistência de falta. Argumentam, ainda, que enquanto a fixação de três (ou quatro) zonas de proteção para um determinado relé de distância tipo mho pode exigir 18 (ou 24) comparadores, para um sistema de proteção quadrilateral um número ainda maior de comparadores pode se fazer necessário.

Uma das propostas existentes era a de construção de um relé de distância em que, primeiro, realizava-se um único cálculo de impedância aparente  $Z = V / I$  e, então, verificava-se se o valor obtido se situava no interior de determinada forma geométrica, retangular ou mesmo quadrilateral, de forma a ser útil para todas as zonas de proteção. Embora sistemas de proteção de distância tenham sido especificados utilizando tal metodologia, verificou-se que o desempenho dos relés associados se degradava sob diversas condições práticas de transferência de potência pré-falta e resistência de arco durante as faltas. O artigo examina a degradação referida e mostra que a característica circular passando pela origem equivale ao elemento mho auto-polarizado, em geral exibindo atuação com desempenho relativamente pobre.

Finalmente o artigo apresenta alguns métodos que exibem desempenho muito superior e os autores enfatizam que os mesmos foram desenvolvidos com base em métodos de polarização bem melhores.

Schweitzer e outros em [9] apresentam informações básicas de projeto dos relés de distância e direcionais, dando ênfase à relação existente entre os novos métodos numéricos e os métodos antigos estabelecidos para os relés estáticos e eletromecânicos. Os autores também discutem assuntos de interesse para a área de proteção como o projeto de um novo elemento direcional de seqüência negativa, um método alternativo para o problema de efeito da carga sobre a característica de operação, a visualização dos comparadores de múltiplas entradas como uma família de comparadores de duas entradas, etc.. Finalmente, eles apontam um problema exibido pelos seletores de falta que utilizam o ângulo entre as correntes de seqüências zero e negativa, apresentando uma solução que compara estimativas das resistências de falta para a terra e entre fases.

Os autores de [10], inicialmente, enumeram os tipos de informações que em geral constituem uma base típica de dados para representação de relé de proteção: a)

identificação do relé, incluindo número de identificação do modelo, nome do fabricante, número de série e, opcionalmente, a indicação da função do relé e qual equipamento protege; b) ajustes do relé: posição de alavancas e contatos dos relés e indicação de grandezas controladas, tais como o alcance em ohms dos relés de distância, que são função dos ajustes fixados; c) indicação da subestação na qual o relé está localizado; d) informações sobre os testes realizados e resultados obtidos; e) informações sobre que disjuntores são ativados pelo relé e suas capacidade de interrupção; f) informações sobre os transdutores de tensão e corrente (DCP's, TP's e TC's) tais como modelo, fabricante, número de série, relação de transformação e forma de conexão dos enrolamentos. Esta base de dados deve também ter capacidade para acomodar dados de uma grande variedade de dispositivos tais como relés de sobrecorrente, relés de distância, fusíveis, religadores, seccionadoras, relés de tensão, relés de sincronismo, relés diferenciais, etc.. Entre os usuários potenciais desta base de dados se incluem os engenheiros de proteção, os técnicos de manutenção, os operadores do sistema elétrico e pessoal de campo.

Os autores do artigo apresentam as características básicas de algumas bases de dados disponíveis para representação de relés, ressaltando suas vantagens e desvantagens, e descrevem um novo modelo de base de dados que foi implementado com sucesso e que se mostra flexível para inclusão de novos elementos, de fácil utilização e que pode acomodar uma variedade ampla de tipos de relés de proteção.

McLaren e outros, em [11], descrevem a utilização passada e presente da modelagem para representação dos relés de proteção, discutem as características dos vários tipos de modelos disponíveis, as informações necessárias para construí-los e o processo de validação dos mesmos e afirmam que os modelos do tipo fasorial já são amplamente utilizados pelos engenheiros de proteção. Os autores registram, entretanto, a importância da utilização de outra classe de modelos, os modelos ditos transitórios. A importância crescente destes modelos, apropriados para a análise de problemas mais complexos de proteção, é comprovada pela sua utilização cada vez mais freqüente. Os autores também apontam para possíveis utilizações, presentes e futuras, dos modelos anteriormente referidos.



Roberts e outros, em [12], apresentam as configurações básicas para projeto de elementos direcionais, avaliam diversas combinações de entrada de tais elementos e analisam como tais combinações afetam a determinação da direcionalidade em caso de faltas simples e complexas. Eles discutem, ainda, formas antigas e modernas de polarização destes elementos, problemas de segurança operativa dos elementos direcionais clássicos, o melhor desempenho de um elemento direcional de seqüência negativa em comparação com os elementos tradicionais em aplicações de maior complexidade e o desempenho de um outro elemento direcional, porém polarizado com grandezas de seqüência positiva. Examinam, ainda, o desempenho real do elemento direcional de seqüência negativa acima referido durante uma falta fase-terra em um sistema de transmissão de 345 kV, com compensação série.

Em [13], Moraes e outros relatam o desenvolvimento de um ambiente computacional capaz de simular o comportamento dinâmico de sistemas de potência frente a perturbações na rede elétrica, incluindo a atuação de relés e de outros sistemas de proteção. Parte do projeto consiste em criar modelos de relés e de sistemas especiais de proteção (SEPs) que considerem características de operação e princípios de atuação particulares de cada equipamento.

O ambiente é composto por um software para simulação de transitórios eletromecânicos e por uma base de dados de relés de proteção presentes no Sistema Interligado Nacional. A estruturação de uma base de dados de relés, associada à simulação transitória, se constitui em uma importante ferramenta de apoio às análises do planejamento operacional, permitindo representar também SEPs e trazendo, assim, maior exatidão aos estudos operacionais.

Em [14], os autores descrevem em detalhes como desenvolver e integrar algoritmos de relés de proteção ao software de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP, utilizando funções programadas em linguagem C. Foi utilizada como exemplo a implementação de um relé de distância digital, considerando características como: a) classificação da falta, de forma a determinar quais elementos de medição devem ser considerados no cálculo da impedância de defeito, b) o cálculo da

impedância vista pelo relé a partir de um método de solução de equação diferencial de primeira ordem e c) o teste da condição de trip dentro das zonas características de proteção especificadas pelo engenheiro de proteção.

Listam vantagens deste tipo de implementação frente ao uso de modelos criados na linguagem padrão disponibilizada pelo programa e ao pós-processamento de arquivos de saída. É possível inserir o próprio código-fonte dos algoritmos implementados no *firmware* do relé digital real, o que otimiza o tempo despendido no desenvolvimento de protótipos e evita a introdução de erros durante a transcrição da linguagem C para a linguagem nativa do ATP. Além disso, a simulação pode ser executada em “malha fechada”, de maneira que não só pode ser determinado se os dispositivos de proteção atuarão ou não, mas também representados os efeitos da abertura de disjuntores comandados pelos relés sobre o comportamento da rede elétrica, o que é uma das maiores vantagens desta representação.

Na presente dissertação de mestrado, diversos modelos para representação de relés de proteção disponíveis na literatura foram analisados e integrados a um programa de curto-circuito de maneira a expandir as capacidades deste e a sua utilidade para os estudos de proteção. A partir da seleção destes modelos, torna-se possível, além de calcular as amplitudes de correntes e tensões ao longo do sistema durante a ocorrência de defeitos, definir os tempos de atuação destes relés para fins de coordenação e ajuste de seus parâmetros. Foi adotada uma estrutura para armazenamento dos dados dos relés compatível com os formatos disponíveis em outros programas, capaz de acomodar informações de tipos diversos de relés e sendo expansível, de maneira a permitir a agregação de novos elementos de proteção que possam vir a ser desenvolvidos. São apresentados diversos aspectos desta implementação. É oportuno mencionar que a modelagem de relés cujos ajustes dependem de simulações dinâmicas, como os relés de perda de sincronismo e os relés de taxa de variação de frequência, está fora do escopo da dissertação já que as informações requeridas para tal não podem ser obtidas a partir dos resultados de programas de curto-circuito.

## **1.2 Objetivo**

A proposta deste trabalho é implementar modelos de relés de sobrecorrente, relés direcionais, de distância e de sobretensão, baseados em fasores das componentes fundamentais de correntes e tensões, em um programa de cálculo de curtos-circuitos, de maneira que, para cada falta simulada, o software possa informar, em função dos parâmetros ajustados e de maneira automática, em quanto tempo cada disjuntor comandado por estes será aberto. São descritas a modelagem utilizada em cada caso, os algoritmos empregados para determinar o comportamento de cada tipo de relé de proteção, os dados que se fazem necessários para descrever os dispositivos e seus ajustes, características da implementação etc.

Espera-se que este desenvolvimento traga ganhos em termos de redução do esforço e do tempo envolvidos no ajuste de elementos de proteção e na verificação da adequação dos ajustes feitos, auxilie na verificação da coordenação dos relés e reduza, através da automatização do processo, de possíveis erros de cálculo e de parametrização dos dispositivos.

## **1.3 Estrutura do texto**

Esta dissertação foi organizada da seguinte maneira:

No capítulo 1 procura-se mostrar, de uma forma geral, a importância do assunto modelagem de relés de proteção para a área de sistemas elétricos de potência, ressaltando a necessidade de se integrar aos programas de cálculo de curto-circuito facilidades para representação de relés de proteção. Em seguida, são discutidas diversas referências tratando deste tema e apresentados os objetivos do trabalho de pesquisa.

O capítulo 2 tenta mostrar a utilidade dos sistemas de proteção e das medidas de proteção sistêmica para a operação correta e continuidade de suprimento de energia aos sistemas elétricos de potência, focalizando as causas mais frequentes que resultam em ocorrências do tipo curto-circuito.

No capítulo 3 são apresentados os algoritmos e as estruturas de dados dos relés de proteção que foram implementados, como parte integrante do presente trabalho de pesquisa, em uma versão experimental do programa de curto-circuito ANAFAS de propriedade do CEPEL, focalizando os tipos de relés normalmente representados neste tipo de programa.

No capítulo 4 estão organizados os resultados de simulação computacional de diferentes casos de curto-circuito aplicados ao longo de um circuito de transmissão de uma determinada configuração do Sistema Interligado Nacional. A partir da análise destes resultados, é possível validar o conjunto de implementações efetuadas e, em adição, observar o comportamento dos relés representados.

As conclusões finais e alguns temas para investigação posterior dentro do assunto do tema da dissertação são apresentados no capítulo 5.

## CAPÍTULO 2

### Fundamentos de Proteção de Sistemas de Potência

A proteção dos sistemas elétricos é assunto da maior importância tanto para a continuidade de sua operação quanto para a segurança dos equipamentos associados, já que estes estão sujeitos a falhas de operação no seguimento a ocorrências como queda de condutores, falhas de isolamentos, descargas atmosféricas etc. Estas ocorrências resultam em correntes de curto-circuito e tensões potencialmente muito altas ou muito reduzidas que, dependendo do tipo de defeito, podem danificar os equipamentos utilizados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, assim como equipamentos presentes nas unidades consumidoras e podem também interromper processos industriais e o próprio fornecimento de energia elétrica. Isto pode resultar em prejuízos financeiros elevados para as empresas concessionárias de energia elétrica, em função de queima de equipamentos e falta de energia por períodos de longa duração e mesmo, mais importante, em risco de perda de vidas.

É importante considerar que a avaliação da qualidade de um sistema de proteção e dos benefícios associados à sua utilização não pode ser feita simplesmente pelo seu custo, já que deve-se considerar a redução dos gastos resultantes de sua utilização ao se observar que os custos dos sistemas de geração, transmissão e distribuição seriam muito mais elevados para fazer frente a todos os possíveis modos de falha na hipótese de ausência dos sistemas de proteção. Por exemplo, a ausência do sistema de proteção tradicional contra sobretensões com varistores a óxido de zinco aplicado a capacitores série resultaria em custos bem maiores da própria compensação série, já que o isolamento destes capacitores deveria ser bem sobredimensionado para resistir ao aumento de solicitação frente a sobretensões bem maiores.

Sendo assim, é extremamente necessário que os sistemas elétricos de potência adquiram capacidade de detecção de situações e condições operativas anormais e que

estas situações anômalas possam ser eliminadas da forma mais efetiva possível, visando eliminar o problema com o menor transtorno para sua operação normal. Esta capacidade de detecção das situações anormais deve ser exercida a partir da especificação de bons sistemas de proteção primária, mas com índices de confiabilidade extremamente elevados que podem ser conseguidos principalmente com a especificação dos sistemas de proteção de retaguarda. Outra característica importante associada aos sistemas de proteção é a seletividade, qual seja, sua capacidade de eliminação dos defeitos em cada ocorrência, com desligamento de apenas os equipamentos elétricos estritamente necessários, desta forma minimizando-se os efeitos e os prejuízos acima referidos. A falta de seletividade resulta, normalmente, em aumento dos efeitos danosos resultantes das faltas e curto-circuitos.

Além da propriedade de seletividade acima referida, outras características importantes que os sistemas de proteção devem exibir são grande sensibilidade, velocidade de operação e confiabilidade. Estes sistemas incorporam os relés de proteção e, ainda, os disjuntores, estes com a função de extinção das correntes de curto e isolamento rápido dos equipamentos sob falta. A se considerar que em razão da evolução extremamente rápida experimentada pela tecnologia numérica e pelos microprocessadores, pode-se esperar qualidade de resposta do sistema de proteção cada vez maior, mesmo na presença de efeitos complexos resultantes de saturação de transformadores de corrente, presença de frequências harmônicas e sub-harmônicas, etc.. Outra facilidade associada à tecnologia digital diz respeito às possibilidades de transferência de massas maiores de dados entre subestações, a velocidades cada vez maiores, através de redes de comunicação dedicadas, em fibra ótica. A utilização da capacidade de comunicação resulta em sistemas de proteção mais complexos, porém de resposta muito mais confiável quando comparados com sistemas cuja operação seja baseada apenas em medições locais.

Dentre as inúmeras vantagens resultantes da incorporação de microprocessadores aos sistemas de proteção digitais temos a possibilidade de obtenção de características de operação especiais que não podem ser obtidas com a tecnologia dos relés eletromecânicos, a redução sensível na carga a ser alimentada pelos elementos de transdução dos



sinais de tensão e corrente (transformadores de corrente e de potencial), a capacidade de auto-diagnóstico, etc.

## **2.1 Classificação das faltas**

As faltas que ocorrem ao longo dos circuitos de transmissão e/ou nas estações geradoras e de manobra de um sistema elétrico de potência podem ser classificadas como transitórias, semi-transitórias ou permanentes.

- As faltas transitórias podem ser extintas rapidamente, bastando isolar o equipamento com defeito por alguns milissegundos e religá-lo. Um exemplo de ocorrência transitória seria uma descarga atmosférica caindo em uma linha de transmissão e provocando a formação de um arco elétrico entre duas fases ou entre uma fase e a torre. Para extinção deste tipo de falta, é em geral suficiente interromper a alimentação da LT em ambas as extremidades por alguns ciclos de maneira a deionizar o ar e religar o circuito para restabelecer a operação em condição de normalidade.
- As faltas semi-transitórias podem ser extintas desligando e religando um circuito mais de uma vez. Isto ocorre com maior frequência em níveis de tensão mais reduzidos. Exemplo: um galho de árvore toca duas fases e provoca um curto-circuito. Pode ser necessário desligar e religar o circuito até três vezes para carbonizar o galho de maneira a que caia no chão e pare de provocar a falta.
- As faltas permanentes são aquelas em que não se consegue restabelecer um circuito defeituoso apenas desligando-o e religando-o em seguida. Exemplos: Ruptura de isolamento de cabos elétricos subterrâneos, rompimento de cabo condutor de linha aérea, etc..

## **2.2 Conseqüências dos curtos-circuitos**

Pode-se enumerar alguns efeitos nocivos ao sistema que são causados pela ocorrência de faltas que não venham a ser eliminadas rapidamente:

- Danos em geradores, transformadores, barramentos de subestações e outros equipamentos devido ao superaquecimento provocado por altas correntes de curto-circuito e/ou devido aos esforços mecânicos resultantes.
- Faltas que formem arcos elétricos que são um risco potencial de incêndios e danificam de maneira permanente os equipamentos. Um incêndio pode vir a se alastrar por outros equipamentos da subestação, a menos que a corrente de falta seja eliminada pela ação conjunta de relés de proteção e disjuntores. Os relés detectam a ocorrência do defeito e enviam comando para que os disjuntores interrompam a alimentação.
- Faltas que possam provocar redução sensível nos perfis de tensão de áreas do sistema, afetando a operação das cargas elétricas e quedas de frequência conduzindo a possível efeito de instabilidade da geração interligada e desconexão de unidades geradoras em cascata.
- Desbalanços de tensão e correntes de seqüência negativa provocados por faltas assimétricas que, se não eliminados, possam resultar em superaquecimento dos equipamentos.

## **2.3 Tipos básicos de sistemas de proteção**

Pode-se dividir os sistemas de proteção em dois tipos básicos:

- Elementos de Reação: Estes são construídos de maneira a reconhecer condições anormais de operação e a tomar medidas para eliminar o problema. Tais condições anormais podem se configurar em correntes excessivamente altas, tensões excessivamente baixas ou outras formas. De maneira geral, a medida corretiva aplicada é o isolamento da região do

sistema sujeita à anormalidade e de forma que o restante do sistema possa operar normalmente. Exemplos destes dispositivos são os relés de sobrecorrente, de distância etc.

- Elementos de Prevenção ou Salvaguarda: São projetados para reconhecer determinadas anormalidades no sistema e a tomar medidas para levar o sistema a uma condição de menor risco operacional. Pode-se citar como exemplo os Esquemas de Controle de Emergências (ECEs).

## **2.4 Finalidade dos sistemas de proteção**

A função básica dos relés de proteção é a de detectar e isolar a área afetada pelo defeito do restante do sistema elétrico através da operação dos disjuntores associados. Isto deve ser feito o mais rapidamente possível para manter a segurança e garantir a continuidade do fornecimento de energia.

A qualidade da atuação dos relés de proteção depende de quatro fatores:

- Sensibilidade: Capacidade de perceber um defeito. Correntes de curto e variações de tensão podem não ser suficientemente perceptíveis para que o relé se dê conta de que há uma condição anormal. Isto pode ocorrer quando há impedâncias de defeito altas.
- Seletividade: Capacidade de retirar de operação exclusivamente o elemento faltoso, causando o menor transtorno ao restante do sistema. Por exemplo: para uma falta interna a uma linha, apenas os disjuntores de suas extremidades devem operar. Caso qualquer outro disjuntor opere simultaneamente, haverá interrupção desnecessária na alimentação de cargas. Isto pode até resultar em problemas de manutenção de estabilidade transitória para o sistema de transmissão nas tensões mais elevadas e, ainda, problemas de falta de tensão em barramentos que fiquem indevidamente isolados do sistema de alta tensão, até dificultando a alimentação

normal à rede de sub-transmissão.

- Velocidade: O defeito deve ser eliminado o mais rapidamente possível, reduzindo a exposição dos equipamentos às correntes de falta, o que reduz as solicitações mecânicas e seu aquecimento e diminui a aceleração de rotor dos geradores síncronos durante o período de falta, o que poderia resultar em perda de sincronismo.

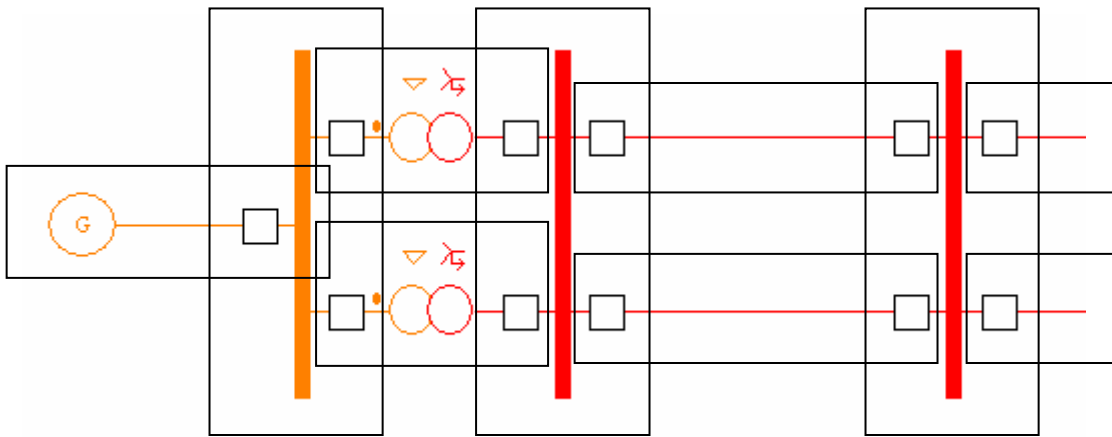


Figura 1 – Zonas de proteção

- Confiabilidade: O conjunto de relés e disjuntores não pode deixar de operar quando se fizer necessário. Estes dispositivos permanecem a maior parte do tempo sem ser solicitados e precisam estar sob manutenção permanente, evitando, por exemplo, que o óleo de disjuntor perca sua capacidade de isolamento.

## CAPÍTULO 3

### Modelagem e Representação de Relés de Proteção

Foram definidos e implementados alguns modelos de relés no programa de cálculo de curto-circuito ANAFAS [19,20], desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

Nesta primeira abordagem, buscou-se dar prioridade aos relés digitais, tendo em vista que os novos relés fabricados utilizam, em sua quase totalidade, esta tecnologia e que existe, nas empresas de eletricidade, a tendência de substituir gradualmente proteções eletromecânicas e estáticas por relés numéricos, devido às vantagens citadas anteriormente [16].

A determinação das correntes ao longo do sistema elétrico e das tensões de barramento em um programa de curto-circuito é realizada através de um processo de simulação envolvendo variáveis algébricas e que fornece os valores de módulo e ângulo de fase da componente fundamental das correntes e tensões em qualquer ponto do sistema, no instante imediatamente posterior à falta. Já que não se trata, portanto, de um processo de simulação dinâmica descrito por equações diferenciais lineares e/ou não lineares, os modelos de relés aqui implementados são puramente estáticos.

A solução do problema através da representação puramente algébrica referida para os relés de proteção auxilia no ajuste dos sistemas de proteção na medida em que se pode observar o comportamento destes elementos diante do efeito de alguns fenômenos como *infeeds* e *outfeeds* de corrente, resistências de falta, fontes de sequência zero próximas (transformadores delta-estrela), condições de carregamento antes do momento da falta etc, e tem sido largamente incorporada aos programas comerciais de análise de faltas [7,10,11]. Entretanto, cabe ressaltar que estes modelos não são ideais para analisar o comportamento dos relés frente a fenômenos como a entrada em operação de transformadores e linhas de transmissão, presença significativa de componentes

harmônicas nos sinais de entrada dos relés, faltas que evoluem de um primeiro tipo para um segundo (por exemplo, uma falta inicialmente do tipo fase-terra, que evolui para fase-fase-terra), simulação do efeito de disjuntores que operem sob número múltiplo de desligamentos para extinguir um defeito, etc..

Outra premissa adotada, diante da dificuldade de se obter as características exatas e os algoritmos associados aos diferentes tipos de relés, protegidos por seus fabricantes devido a razões comerciais [11], foi a de implementar modelos genéricos para representação destes elementos e que permitem simular suas principais características operativas. Tais modelos são facilmente ajustáveis, dão informações significativas sobre os modos de operação de cada tipo de relé, auxiliam no ajuste dos parâmetros dos dispositivos reais e permitem perceber possíveis erros grosseiros nos ajustes [11]. Entretanto, não são adequados para avaliar situações marginais, especialmente no caso das proteções de distância que empregam algoritmos mais complexos. Muitos dos dispositivos de sobrecorrente atuais empregam características normalizadas de corrente versus tempo [1,2], o que torna os modelos destes, mesmo os genéricos, bastante fiéis à realidade. No caso dos relés de sobrecorrente direcionais, alguns tipos de polarização comuns são de fácil representação.

Foram definidos, além dos algoritmos que determinam a atuação de cada tipo de relé, os dados de entrada necessários. A seguir são descritos tanto os dados quanto os algoritmos implementados, em pseudo-linguagem.

### **3.1 Estrutura de dados**

Como os arquivos de dados utilizados pelo programa ANAFAS para descrever a topologia da rede elétrica são fornecidos em formato texto, a entrada de dados de relés foi feita seguindo o mesmo padrão. Entretanto, a estrutura de dados foi implementada de maneira a ser flexível, para acomodar tipos de dispositivos que diferem entre si, e de modo a ser expansível, permitindo que sejam adicionados novos elementos que venham a surgir sem necessidade de reestruturá-la.



Para tanto, é necessário [10]:

- Armazenar alguns dados de caráter geral, descritos no próximo item, que são comuns à maioria dos relés.
- Armazenar os valores dos parâmetros de cada relé sequencialmente (“Parâmetro 1”, “Parâmetro 2”, “Parâmetro 3” etc), sem a preocupação com o significado de cada um deles.
- Armazenar, separadamente e para cada tipo de dispositivo, o nome de cada atributo (“Nome Atributo 1”, “Nome Atributo 2”, “Nome Atributo 3” etc.).

O armazenamento separado dos valores dos parâmetros dos relés e de seus nomes ou do significado de cada um destes é o que proporciona a flexibilidade e expansibilidade referidas. Tendo sido adotada esta estrutura de dados, é possível, futuramente, implementar estes modelos em um formato de banco de dados [20].

### 3.2 Dados comuns a todos os modelos

Verificou-se que alguns parâmetros para representação dos relés de proteção são de natureza comum a todos os tipos de relés. Estes dados comuns são descritos abaixo.

- **Identificação do Terminal de Circuito:** Cada relé precisa ser posicionado em uma extremidade de circuito. É nesta extremidade que serão medidos os fasores de tensão e corrente que alimentam o dispositivo. Além disso, considera-se que os relés comandarão o disjuntor desta extremidade. O terminal de circuito é definido por **BF** (“Número da Barra *From*”), **BT** (“Número da Barra *To*”) e **NC** (“Número do Circuito”, para o caso de circuitos paralelos). Há também o campo opcional **EXTR**, para indicar em que extremidade deste circuito o relé se encontra. Se este último campo não estiver preenchido, o programa considerará que o relé está posicionado na extremidade indicada por BF.

Exemplo:

Para posicionar um relé na LT Angra 500kV (67) – Cachoeira Paulista 500kV (66), no terminal de Angra 500kV, deve-se informar o número da barra de origem (“67”), o número da barra de destino (“66”), o número do circuito (por exemplo NC = 1 ou, quando não houver circuitos em paralelo, NC pode ficar em branco), e o número do barramento onde o relé está conectado (“67”. Como a barra 67 é a barra *From* do circuito, pode-se deixar o campo em branco). O terminal especificado é representado na Figura 2.



Figura 2 – Identificação de terminal de circuito onde se encontra o relé de proteção

- **Nome:** Pode-se atribuir um nome, com até 20 caracteres, para identificar cada relé. Este nome aparecerá nos relatórios de resultados e ajuda a diferenciar os que estiverem em um mesmo terminal de circuito.
- **Tipo:** Esta informação indica o tipo do relé especificado. O tipo determinará quais serão os algoritmos empregados na determinação da atuação do dispositivo. Além disso, cada tipo necessitará, além dos dados comuns, de alguns dados específicos. Foram implementados os seguintes tipos, que seguem a nomenclatura definida em [15]:
  - 50 – sobrecorrente instantâneo de fase;
  - 50N – sobrecorrente instantâneo de neutro;
  - 51 – sobrecorrente temporizado de fase;
  - 51N – sobrecorrente temporizado de neutro;

- 67 – relé direcional de fase;
- 67N – relé direcional de neutro;
- 21 – relé de distância de fase (detecta faltas fase-fase, fase-fase-terra e trifásicas);
- 21N ou 21G – relé de distância de neutro (detecta faltas fase-terra e trifásicas);
- 59 – relé de sobretensão de fase;
- 59N ou 59G – relé de sobretensão de neutro.

Gradualmente poderão ser adicionados novos modelos de relés ao programa, assim como seus algoritmos correspondentes, o que torna a base de dados expansível. Caso seja incluído no arquivo de dados um relé cujo modelo ainda não seja suportado, seus dados serão armazenados, mas o relé não será incluído no processo de cálculo do tempo de atuação das proteções.

- **Condição:** Permite definir se o dispositivo se encontra “Ligado” ou “Desligado”. Caso esteja desligado, será desconsiderado durante o cálculo do tempo de atuação dos elementos de proteção. É útil para analisar o tempo de atuação das unidades de retaguarda, ao se permitir o desligamento momentâneo das proteções primárias ou de qualquer outra que se queira.
- **Relação de Transformação do TC (RTC):** Este dado é necessário para calcular o módulo das correntes no secundário de cada Transformador de Corrente que alimentará um determinado grupo de relés. Considera-se que o ângulo de fase das correntes secundárias será o mesmo das correntes primárias. É dado necessário para os modelos que utilizam o módulo da corrente em seus cálculos (todos exceto os relés 59).
- **Relação de Transformação do TP (RTP):** Dado necessário para calcular o módulo das tensões nos enrolamentos secundários do Transformador de Potencial que servirão como sinais de entrada para os relés. É necessário para os modelos que utilizam o módulo da tensão, como os relés 21 e 59.

- **Tipo de conexão:** Informa o tipo de conexão dos transformadores de instrumento, podendo ser “estrela” ou “delta”. O tipo de conexão modifica as correntes e tensões que alimentam o relé. Neste trabalho, esta consideração não foi incluída nas rotinas de cálculo. Porém, como a proposta é a de criar uma base de dados expansível, o dado foi mantido.

### 3.3 Relé de Sobrecorrente Instantâneo de Fase (50)

A unidade de sobrecorrente instantânea de fase monitora as correntes nas três fases do terminal onde se encontra instalada (Figura 3). Caso qualquer corrente de fase supere o valor ajustado, o relé envia “instantaneamente” sinal de abertura ao disjuntor. O termo “instantâneo” significa que não há retardo intencional. Sua atuação é muito rápida, da ordem de pequena fração de segundo. É possível especificar o tempo de retardo, que representa o atraso intencional no encaminhamento do sinal de comando de abertura.

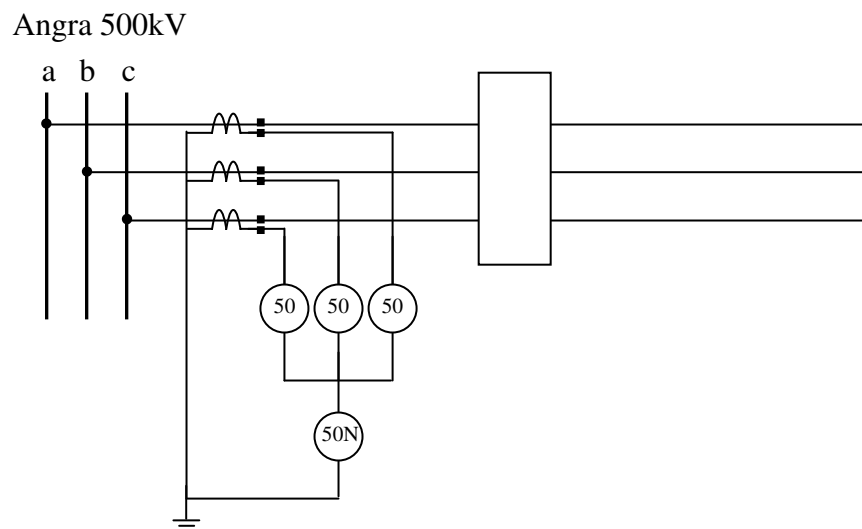


Figura 3 – Exemplo de conexão dos TCs e relés de sobrecorrente instantâneos de fase (50) e de neutro (50N)

#### 3.3.1 Dados

Além dos dados comuns mencionados anteriormente, os relés de sobrecorrente instantâneos de fase precisam das seguintes informações:

- **Corrente de Pickup (A):** Valor do módulo da corrente no secundário do TC a partir do qual o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional, fornecido opcionalmente. Pode representar o tempo até o envio de sinal de abertura ao disjuntor, o tempo de abertura do disjuntor, um retardo intencional ou qualquer outro tipo de demora que se julgue necessário. Se for deixado em branco, o programa considerará que o relé atua instantaneamente.

### 3.3.2 Atuação

A seguir é descrita a lógica que determina se o relé atuará ou não.

O programa calculará, para qualquer falta, o valor do módulo da corrente terminal primária das três fases onde se encontra o relé, “Ia\_prim”.

Determinará o valor das correntes que circularão nos enrolamentos secundários do TC, “Ia\_sec”, “Ib\_sec” e “Ic\_sec”:

$$\begin{aligned}
 I_{a\_sec} &= I_{a\_prim} / RTC \\
 I_{b\_sec} &= I_{b\_prim} / RTC \\
 I_{c\_sec} &= I_{c\_prim} / RTC
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Se qualquer das três ficar acima do valor de *Pickup*, o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor. Na Equação (5), “Tempo\_a”, “Tempo\_b” e “Tempo\_c” são as variáveis que guardam o tempo de atuação de cada fase:

$$\begin{aligned}
 \text{Se } ( I_{a\_sec} > \text{Pickup} ) & \text{ Então } \text{Tempo}_a = 0 \\
 \text{Se } ( I_{b\_sec} > \text{Pickup} ) & \text{ Então } \text{Tempo}_b = 0 \\
 \text{Se } ( I_{c\_sec} > \text{Pickup} ) & \text{ Então } \text{Tempo}_c = 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

O tempo de atuação da unidade 50 será o menor entre os tempos das unidades das fases A, B e C. Na Equação (6), “Tempo” guarda o tempo de atuação da unidade 50 e é inicializado com um valor bastante alto:

$$\begin{aligned}
& \text{Tempo} = 9999.0 \\
& \text{Se (Tempo\_a < Tempo) Ent\~{a}o Tempo} = \text{Tempo\_a} \\
& \text{Se (Tempo\_b < Tempo) Ent\~{a}o Tempo} = \text{Tempo\_b} \\
& \text{Se (Tempo\_c < Tempo) Ent\~{a}o Tempo} = \text{Tempo\_c}
\end{aligned} \tag{6}$$

Finalmente, deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \tag{7}$$

O resultado final é o tempo de atuação da unidade instantânea de fase para o curto-circuito em questão.

### 3.4 Relé de Sobrecorrente Instantâneo de Neutro (50N)

A unidade de sobrecorrente instantânea de neutro monitora a corrente residual do terminal onde se encontra instalada (Figura 3). A corrente residual é a soma das três correntes de fase, Ia, Ib e Ic, e é percentualmente muito reduzida em operação normal, especialmente nas redes de alta tensão. Caso a corrente de neutro supere o valor ajustado, o relé envia sinal de abertura ao disjuntor. É possível especificar um tempo de retardo que pode representar a demora do próprio dispositivo em atuar, a demora do disjuntor até completar a abertura, ou ambos.

#### 3.4.1 Dados

Além dos dados comuns, os relés de sobrecorrente instantâneos de neutro precisam das seguintes informações:

- **Corrente de Pickup (A):** Valor do módulo da corrente no secundário do TC, a partir do qual o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor. Se for deixado em branco, o programa considerará que o relé atua instantaneamente.

- **Grandeza de Operação:** Especifica a grandeza que será aplicada no relé. A grandeza padrão é a corrente residual, ou “3I0”. Foi implementada também a opção “I0”. Futuramente, pode ser importante acrescentar as opções “3I2” e “I2”, para que o relé atue por corrente de seqüência negativa.

### 3.4.2 Atuação

A lógica implementada para determinar o tempo de atuação do relé é descrita a seguir.

O programa calculará, para qualquer falta, o valor do módulo da componente de seqüência zero da corrente terminal primária onde se encontra o relé, “I0\_prim”.

Determinará o valor da corrente que circulará no enrolamento secundário do TC, “I0\_sec”:

$$I0\_sec = I0\_prim / RTC \quad (8)$$

Se a corrente secundária ficar acima do valor de *Pickup*, o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor. A Equação (9) vale para a opção de grandeza de operação “3I0”. “Tempo” é a variável que guarda o tempo de atuação do dispositivo, e é inicializada com um valor bastante alto.

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= 9999.0 \\ \text{Se } (3 \cdot I0\_sec > \text{Pickup}) \text{ Então } \text{Tempo} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (10)$$

O resultado final é o tempo de atuação da unidade instantânea de neutro para o curto-circuito em questão.

### 3.5 Relé de Sobrecorrente Temporizado de Fase (51)

A unidade de sobrecorrente temporizada de fase monitora as correntes nas três fases do terminal onde se encontra instalada, de maneira semelhante à proteção instantânea (Figura 4).

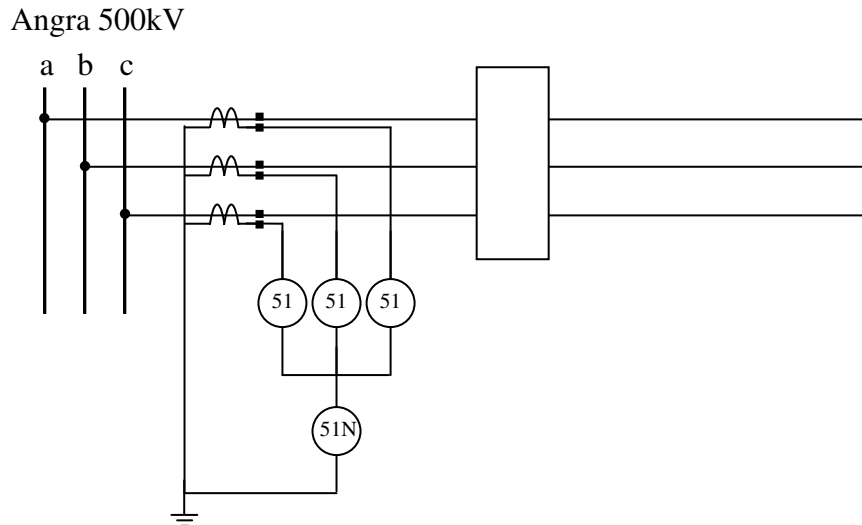


Figura 4 – Exemplo de conexão de TCs e relés de sobrecorrente temporizados de fase (51) e de neutro (51N)

O que a diferencia é que seu tempo de atuação depende da intensidade da corrente de curto. Se a corrente for alta, o relé atua rapidamente. Se a corrente for baixa, o tempo de atuação é maior (Figura 5).

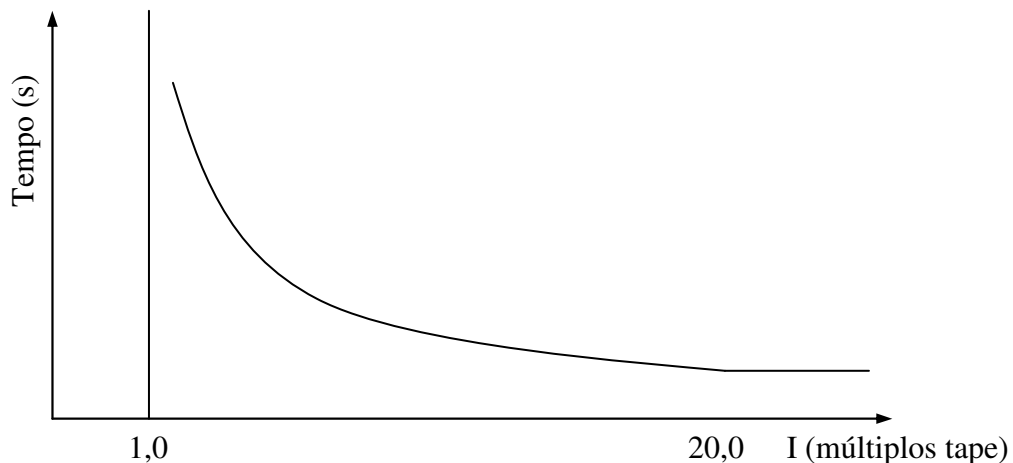


Figura 5 – Gráfico de relação corrente versus tempo de atuação de um relé de sobrecorrente temporizado.



Foram implementadas as curvas da Norma IEC [1] “A” (Normal Inversa), “B” (Muito Inversa) e “C” (Extremamente Inversa). A forma de implementação permite que outras sejam acrescentadas ao programa futuramente.

As três fases são monitoradas e o tempo de atuação da unidade 51 será o menor entre as três. É possível especificar um tempo de retardo que será somado ao tempo final.

### 3.5.1 Dados

Além dos dados comuns, os relés de sobrecorrente temporizados de fase precisam destas informações:

- **Multiplicador de Tempo:** Corresponde à “alavanca de tempo” dos relés eletromecânicos. O tempo de atuação obtido pela curva é multiplicado por este valor, permitindo obter os tempos de atuação desejados.
- **Tape de Corrente (A):** As curvas características permitem obter o tempo de atuação em função da corrente em “múltiplos do tape”. Portanto, é necessário informar o valor do Tape ajustado. Supondo uma corrente secundária de 40 A, se o Tape utilizado for o de 2 A, a corrente, em múltiplos do Tape, será 20. Se o Tape for o de 4 A, a corrente em múltiplos será 10.
- **Tipo de Curva:** Tipo de curva característica do relé. Foram implementadas as curvas IEC [1]. Portanto, o tipo de curva pode ser “IEC-Norm” (tipo “A”, ou Normal Inversa), “IEC-Muit” (tipo “B”, ou Muito Inversa), “IEC-Extr” (tipo “C”, ou Extremamente Inversa) ou “Tdefinid” (Tempo Definido), sendo esta última a característica na qual o tempo de atuação é o mesmo para qualquer corrente acima de 2,0 múltiplos do tape.
- **Tempo Definido (s):** Apenas para a característica Tempo Definido. Deve-se informar o tempo de atuação do relé caso a corrente passe de 2 múltiplos do tape.

- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor, válido para qualquer característica corrente *versus* tempo.

### 3.5.2 Atuação

A seguir é descrita a lógica que determina se o relé temporizado atuará ou não.

O programa calculará, para qualquer falta, o valor do módulo da corrente terminal primária das três fases onde se encontra o relé, “Ia\_prim”.

Determinará o valor das correntes que circularão nos enrolamentos secundários do TC, “Ia\_sec”, “Ib\_sec” e “Ic\_sec”:

$$\begin{aligned} I_{a\_sec} &= I_{a\_prim} / RTC \\ I_{b\_sec} &= I_{b\_prim} / RTC \\ I_{c\_sec} &= I_{c\_prim} / RTC \end{aligned} \tag{11}$$

É necessário calcular as correntes em múltiplos do Tape, “Ia\_mult”, “Ib\_mult” e “Ic\_mult”:

$$\begin{aligned} I_{a\_mult} &= I_{a\_sec} / Tape \\ I_{b\_mult} &= I_{b\_sec} / Tape \\ I_{c\_mult} &= I_{c\_sec} / Tape \end{aligned} \tag{12}$$

Através das correntes, em múltiplos do Tape, deve-se calcular o tempo de atuação em cada fase, dependendo dos parâmetros ajustados. Supondo que se utilize a curva IEC Muito Inversa, o cálculo seria como se vê abaixo, para cada fase. Primeiro é necessário inicializar o tempo de atuação da fase (Tempo\_a) com um valor alto. Segundo a Norma, também é necessário, caso a corrente seja maior que 20 múltiplos, reduzi-la para 20, pois, acima deste valor, o tempo de atuação será o mesmo (o tempo de atuação para 35 múltiplos do tape é o mesmo que para 20 múltiplos do tape).

Outra consideração é que só se deve calcular o tempo para valores de corrente maiores ou iguais a 2 múltiplos. “K” representa o Multiplicador de Tempo.

$$\begin{aligned}
& \text{Tempo\_a} = 9999.0 \\
& \text{Se ( Ia\_mult > 20 ) Ent\~{a}o Ia\_mult = 20} \\
& \\
& \text{Se ( Ia\_mult >= 2 ) Ent\~{a}o} \\
& \quad \text{Tempo\_a} = K \cdot 13,5 / (\text{Ia\_mult} - 1) \\
& \text{Fim Se}
\end{aligned} \tag{13}$$

Os tempos de atua\~{c}o de cada fase ficar\~{a}o armazenados nas vari\~{a}veis “Tempo\_a”, “Tempo\_b” e “Tempo\_c”. O tempo de atua\~{c}o da unidade 51 ser\~{a} o menor entre os tr\~{e}s. Na Equa\~{c}o (14), “Tempo” guarda o tempo de atua\~{c}o da unidade 51 e \u00e9 inicializado com um valor bastante alto:

$$\begin{aligned}
& \text{Tempo} = 9999.0 \\
& \text{Se ( Tempo\_a < Tempo ) Ent\~{a}o Tempo = Tempo\_a} \\
& \text{Se ( Tempo\_b < Tempo ) Ent\~{a}o Tempo = Tempo\_b} \\
& \text{Se ( Tempo\_c < Tempo ) Ent\~{a}o Tempo = Tempo\_c}
\end{aligned} \tag{14}$$

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”, obtendo, assim, o tempo de atua\~{c}o final:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \tag{15}$$

### 3.6 Rel\u00e9 de Sobrecorrente Temporizado de Neutro (51N)

A unidade de sobrecorrente temporizada de neutro monitora a corrente residual no terminal onde se encontra instalada (Figura 4). Existem modelos que s\~{a}o sensibilizados n\~{a}o pela corrente residual, mas pela componente de seq\u00fancia negativa da corrente. Estes podem ser incorporados ao programa futuramente, caso seja necess\~{a}rio.

Assim como a prote\~{c}o temporizada de fase, a de neutro possui caracter\u00edsticas de tempo que variam de acordo com a intensidade da corrente (Figura 5). Para estes dispositivos, foram implementadas tamb\u00e9m as curvas da Norma IEC [1], sendo poss\u00edvel

adicionar outras futuramente. É possível especificar um tempo de retardo que será somado ao tempo final.

### 3.6.1 Dados

Além dos dados comuns, os relés de sobrecorrente temporizados de neutro necessitam informações adicionais:

- **Multiplicador de Tempo:** O tempo de atuação obtido pela curva é multiplicado por este valor, da mesma forma que nos relés 51.
- **Tape de Corrente (A):** Necessário para o cálculo das correntes em múltiplos do tape.
- **Tipo de Curva:** Tipo de curva característica do relé. Estão disponíveis as curvas IEC [1], “IEC-Norm” (Normal Inversa) , “IEC-Muit” (Muito Inversa), “IEC-Extr” (Extremamente Inversa) ou “Tdefinid” (Tempo Definido).
- **Tempo Definido (s):** Apenas para a característica Tempo Definido. Deve-se informar o tempo de atuação do relé caso a corrente passe de 2 múltiplos do tape.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor.
- **Grandeza de Operação:** Especifica a grandeza que será aplicada no relé. A grandeza padrão é a corrente residual, “3I0”. Pode-se selecionar também a opção “I0”.

### 3.6.2 Atuação

A seguir é descrito o algoritmo que determina o tempo de atuação do relé.

O programa calcula, para qualquer falta, o valor do módulo da componente de seqüência zero da corrente terminal primária onde se encontra o relé, “I0\_prim”.

Deve-se calcular o valor da corrente que circula no secundário do TC, “I0\_sec”.

$$I0\_sec = I0\_prim / RTC \quad (16)$$

Em seguida, se obtêm o valor de corrente em múltiplos do tape, “3I0\_mult”. O cálculo abaixo considera a opção de grandeza de operação “3I0”.

$$3I0\_mult = 3 \cdot I0\_sec / Tape \quad (17)$$

Através das correntes, em múltiplos do Tape, deve-se calcular o tempo de atuação do relé, em função da curva característica escolhida e dos parâmetros ajustados. Supondo a curva IEC Extremamente Inversa, o cálculo seria como se vê abaixo. O tempo de atuação (variável Tempo) é inicializado com um valor alto. É feita a correção para correntes acima de 20 múltiplos do tape e o tempo de atuação é calculado apenas para valores de corrente maiores ou iguais a 2 múltiplos. “K” representa o Multiplicador de Tempo.

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= 9999.0 \\ \text{Se } (3I0\_mult > 20) &\text{ Então } 3I0\_mult = 20 \\ & \\ \text{Se } (3I0\_mult \geq 2) &\text{ Então} \\ \text{Tempo} &= K \cdot 80,0 / [(Ia\_mult)^2 - 1] \\ \text{Fim Se} \end{aligned} \quad (18)$$

Para obter o tempo de atuação final, é necessário ainda somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (19)$$

### **3.7 Relé de Sobrecorrente Direcional de Fase (67)**

A unidade de sobrecorrente direcional de fase monitora correntes e tensões no terminal onde se encontra instalada. Pode ter uma unidade de sobrecorrente instantânea, uma unidade temporizada ou ambas. O que a diferencia das proteções de sobrecorrente do tipo 50 e 51 é que esta busca enviar sinal de abertura ao disjuntor apenas para faltas

que se encontrem adiante do relé. Caso uma falta esteja localizada atrás do relé, por mais severa que seja a corrente, a unidade 67 ficará bloqueada e não irá atuar.

Por exemplo, pode-se verificar na Figura 6 que, para faltas internas à linha entre Angra 500kV e C. Paulista 500kV, é desejável que apenas os disjuntores 3 e 4 sejam abertos. Caso se empregue relés de proteção não direcionais, os disjuntores 2, 5 e 6 podem abrir para faltas na LT Angra - C. Paulista, pois estes monitoram apenas o módulo das correntes de curto, e não seu sentido.

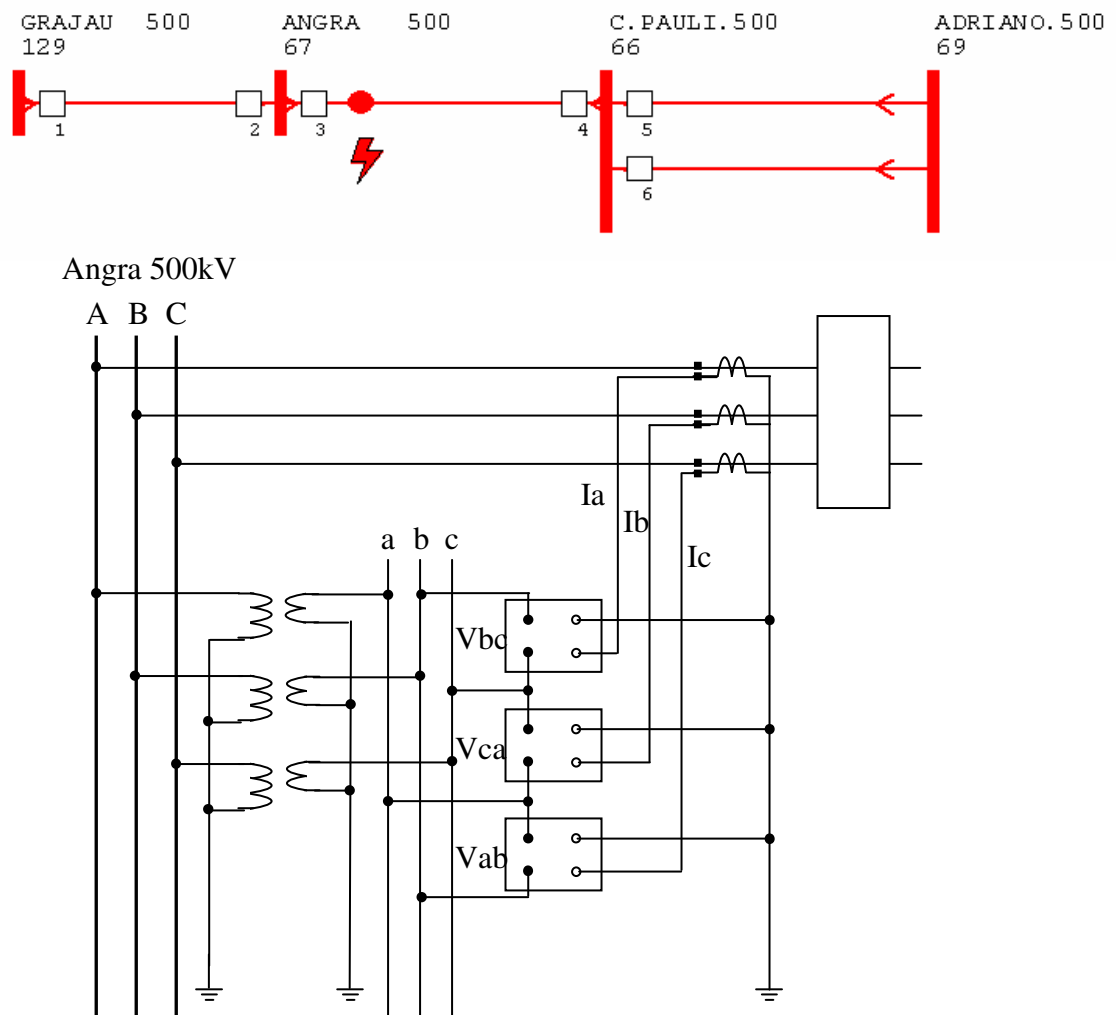


Figura 6 – Exemplo de aplicação de relés direcionais

Portanto, além das funções de sobrecorrente vistas nas unidades 50 e 51, a unidade 67 precisa ser capaz de detectar o sentido da corrente de curto-circuito. Isto é

feito pela comparação entre o ângulo de fase da corrente e o da tensão de polarização [12,16]. Para a unidade da fase A, a comparação poderia ser entre o ângulo da corrente da fase A e o da tensão A-terra. Entretanto, para faltas próximas ao disjuntor 3, a tensão A-terra pode ser muito próxima de zero, dificultando a comparação. Para resolver esta situação, é comum utilizar polarização cruzada, comparando a fase da corrente A com, por exemplo, a tensão fase-fase B-C.

Foi implementada a polarização citada acima (90 graus). Entretanto, outros tipos de polarização [12] podem ser adicionados posteriormente.

### 3.7.1 Dados

Além dos dados comuns, os relés de sobrecorrente direcionais de fase precisam de informações adicionais:

- **Indicador Unidade Instantânea:** Define se a unidade instantânea do relé está ou não habilitada (“L”= Unidade instantânea Ligada. “D”= Unidade instantânea Desligada).
- **Corrente de Pickup – Unidade Instantânea (A):** Se a unidade instantânea estiver habilitada, este será o valor do módulo da corrente no secundário do TC a partir do qual o relé atuará instantaneamente.
- **Indicador de Unidade Temporizada:** Define se a unidade temporizada do relé está ou não habilitada (“L”= Unidade temporizada Ligada. “D”= Unidade temporizada Desligada).
- **Multiplicador de Tempo:** O tempo de atuação obtido pela curva característica é multiplicado por este valor, permitindo obter os tempos de atuação desejados.
- **Tape de Corrente (A):** Valor utilizado no cálculo das correntes em múltiplos do tape.
- **Tipo de Curva:** Tipo de curva característica do relé. Disponíveis as curvas “IEC-Norm” (Normal Inversa) , “IEC-Muit” (Muito Inversa), “IEC-Extr”

(Extremamente Inversa) ou “Tdefinid” (Tempo Definido).

- **Tempo Definido (s):** Apenas para a característica Tempo Definido. Deve-se informar o tempo de atuação do relé caso a corrente passe de 2 múltiplos do tape.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor, válido para qualquer característica corrente *versus* tempo.
- **Tipo de Direcional:** Deve-se especificar qual é o tipo de polarização ou de algoritmo empregado na detecção do sentido da corrente de curto. O tipo padrão é “Polarização 90graus”.
- **Ângulo 1 (°):** Nos relés com polarização cruzada, deve-se informar o ângulo de máximo conjugado (Figura 7), sendo o valor padrão igual a 30°, caso nada seja informado. Em relés direcionais com característica determinada no plano R-X, deve-se informar o ângulo inferior (Figura 8).
- **Ângulo 2 (°):** Apenas para relés com característica no plano R-X. Deve-se informar o ângulo superior (Figura 8).

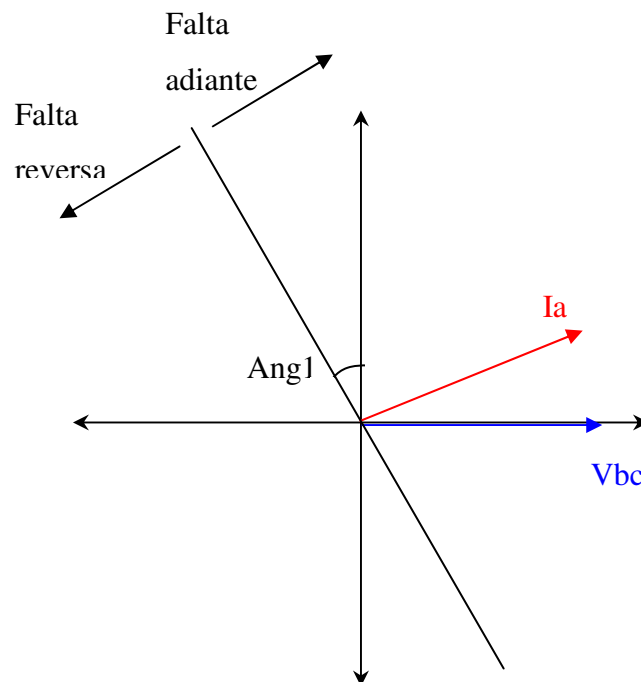


Figura 7 – Ângulo de máximo torque de um relé direcional com polarização cruzada



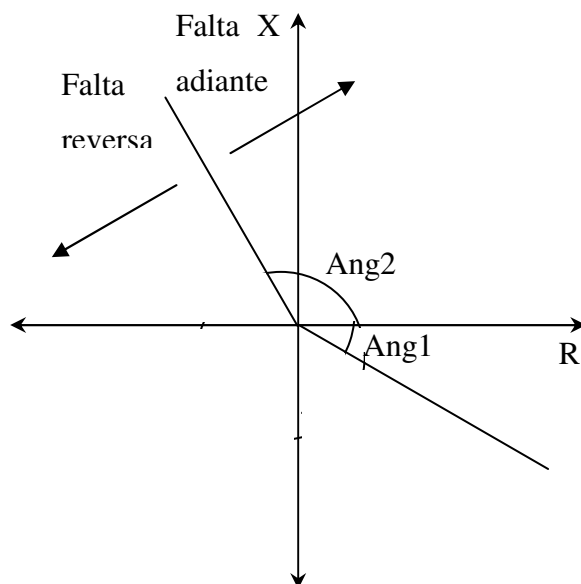


Figura 8 – Ângulos superior e inferior, para relés com característica no plano R-X

### 3.7.2 Atuação

A seguir é descrita a lógica que determina o tempo de atuação do relé direcional de fase.

Primeiro deve-se determinar, para cada fase, se a falta está adiante ou atrás do relé. As três fases são inicializadas:

$$\begin{aligned}
 \text{Adiante} &= 1 \\
 \text{Reversa} &= 0 \\
 \text{Direção}_a &= \text{Reversa} \\
 \text{Direção}_b &= \text{Reversa} \\
 \text{Direção}_c &= \text{Reversa}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Em seguida se faz a comparação de fases das correntes e tensões adequadas. Para a fase A deve-se subtrair do ângulo da tensão fase-fase BC (“Vbc\_ang”) o da corrente da fase A (“Ia\_ang”). Neste momento, é necessário somar o ângulo de máximo conjugado do relé (a referência é a tensão Vbc, como se vê na Figura 7). Se a diferença

angular for maior que  $-90^\circ$  e menor que  $+90^\circ$ , a falta está adiante do relé.

$$\begin{aligned} \text{Diferenca\_angular\_a} &= \text{Vbc\_ang} - \text{Ia\_ang} + \text{Ang1} \\ \text{Se } (\text{Diferenca\_angular\_a} > -90 \text{ E } \text{Diferenca\_angular\_a} < +90) & \\ \text{Então} & \\ \text{Direção\_a} &= \text{Adiante} \end{aligned} \quad (21)$$

Se a falta estiver adiante, o tempo de atuação será determinado pelas unidades de sobrecorrente instantânea e temporizada. Os tempos de atuação da fase A (Tempo\_a), da unidade instantânea da fase A (Tempo\_a\_inst) e da unidade temporizada da fase A (Tempo\_a\_temp) precisam ser inicializados com um valor alto.

$$\begin{aligned} \text{Tempo\_a} &= 9999,0 \\ \text{Tempo\_a\_inst} &= 9999,0 \\ \text{Tempo\_a\_temp} &= 9999,0 \end{aligned} \quad (22)$$

Em seguida, somente se a falta for adiante, são calculadas as correntes secundária (Ia\_sec) e em múltiplos do tape (Ia\_mult). Se a unidade instantânea estiver habilitada (Unidade\_inst == Ligado) e a corrente secundária for maior que o valor de pickup (Ia\_sec > Pickup), o tempo de atuação (Tempo\_a\_inst) será zero. Se a unidade temporizada estiver habilitada (Unidade\_temp == Ligado) e a corrente, em múltiplos do tape, for maior que 2, calcula o tempo de atuação da unidade temporizada pela equação da curva característica escolhida (neste exemplo, curva Muito Inversa), sendo “K” o Multiplicador de Tempo.

$$\begin{aligned} \text{Se } (\text{Direção\_a} == \text{Adiante}) \text{ Então} & \\ \text{Ia\_sec} &= \text{Ia\_prim} / \text{RTC} \\ \text{Ia\_mult} &= \text{Ia\_sec} / \text{Tape} \\ \text{Se } (\text{Unidade\_inst} == \text{Ligado} \text{ E } \text{Ia\_sec} > \text{Pickup}) \text{ Então} & \\ \text{Tempo\_a\_inst} &= 0 \\ \text{Fim Se} & \\ \text{Se } (\text{Unidade\_temp} == \text{Ligado} \text{ E } \text{Ia\_mult} \geq 2) \text{ Então} & \\ \text{Tempo\_a\_temp} &= \text{K} \cdot 13,5 / (\text{Ia\_mult} - 1) \end{aligned} \quad (23)$$

Fim Se  
Fim Se

O tempo de atuação da fase A (Tempo\_a) será o menor entre o tempo de atuação da unidade instantânea da fase e o tempo de atuação da unidade temporizada da mesma fase.

$$\begin{aligned} \text{Se } (\text{Tempo\_a\_inst} < \text{Tempo\_a}) \text{ Então } \text{Tempo\_a} &= \text{Tempo\_a\_inst} \\ \text{Se } (\text{Tempo\_a\_temp} < \text{Tempo\_a}) \text{ Então } \text{Tempo\_a} &= \text{Tempo\_a\_temp} \end{aligned} \quad (24)$$

O tempo de atuação da unidade 67 será o menor entre as fases A, B e C:

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= 9999.0 \\ \text{Se } (\text{Tempo\_a} < \text{Tempo}) \text{ Então } \text{Tempo} &= \text{Tempo\_a} \\ \text{Se } (\text{Tempo\_b} < \text{Tempo}) \text{ Então } \text{Tempo} &= \text{Tempo\_b} \\ \text{Se } (\text{Tempo\_c} < \text{Tempo}) \text{ Então } \text{Tempo} &= \text{Tempo\_c} \end{aligned} \quad (25)$$

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”, obtendo, assim, o tempo de atuação final:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (26)$$

### **3.8 Relé de Sobrecorrente Direcional de Neutro (67N)**

A unidade de sobrecorrente direcional de neutro monitora correntes e tensões residuais no terminal onde se encontra instalada. Grandezas de seqüência negativa também podem ser monitoradas [12]. Pode-se habilitar uma unidade de sobrecorrente instantânea, uma unidade temporizada ou ambas. Seu princípio operativo é semelhante ao da proteção direcional de fase, ou seja, só enviar sinal de abertura ao disjuntor se a falta estiver adiante.

Foi implementada a polarização por tensão de seqüência zero [12,16]. outros tipos de polarização podem ser adicionados posteriormente.

### 3.8.1 Dados

Além dos dados comuns, os relés de sobrecorrente direcionais de neutro precisam das seguintes informações:

- **Indicador Unidade Instantânea:** Define se a unidade instantânea do relé está ou não habilitada (“L” ou “D”).
- **Corrente de Pickup – Unidade Instantânea (A):** Se a unidade instantânea estiver habilitada, este será o valor do módulo da corrente no secundário do TC a partir do qual o relé atuará instantaneamente.
- **Indicador de Unidade Temporizada:** Define se a unidade temporizada do relé está ou não habilitada (“L” ou “D”).
- **Multiplicador de Tempo:** O tempo de atuação obtido pela curva característica é multiplicado por este valor.
- **Tape de Corrente (A):** Valor utilizado no cálculo das correntes em múltiplos do tape.
- **Tipo de Curva:** Tipo de curva característica do relé. Disponíveis as curvas “IEC-Norm” (Normal Inversa) , “IEC-Muit” (Muito Inversa), “IEC-Extr” (Extremamente Inversa) ou “Tdefinid” (Tempo Definido).
- **Tempo Definido (s):** Apenas para a característica Tempo Definido. Deve-se informar o tempo de atuação do relé.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor.
- **Tipo de Direcional:** Deve-se especificar qual é o tipo de polarização ou de algoritmo empregado na detecção do sentido da corrente de curto. O tipo padrão é “Polarização V0,I0”, que determina a direção da corrente pela comparação do ângulo de fase da corrente residual (que equivale a três vezes a componente de

seqüência zero) e da tensão residual (três vezes a componente de seqüência zero da tensão).

- **Ângulo 1 ( $^{\circ}$ ):** Nos relés com polarização “ $V_0, I_0$ ”, deve-se informar o ângulo de máximo conjugado (Figura 9), sendo o valor padrão, caso nada seja informado,  $-90^{\circ}$  (é importante ressaltar que o ângulo padrão é negativo). Em relés direcionais com característica determinada no plano R-X, deve-se informar o ângulo inferior (Figura 8).
- **Ângulo 2 ( $^{\circ}$ ):** Apenas para relés com característica no plano R-X. Deve-se informar o ângulo superior (Figura 8).
- **Grandeza de Operação:** Especifica a grandeza que será aplicada no relé. A grandeza padrão é a corrente residual, “ $3I_0$ ”.

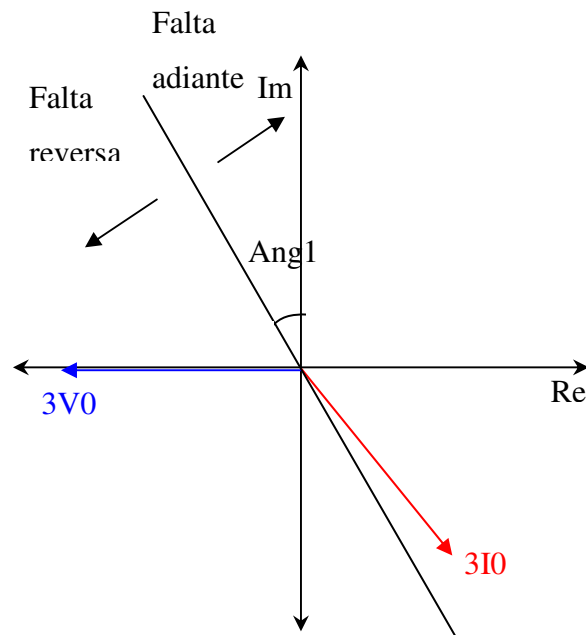


Figura 9 - Ângulo de máximo torque de um relé direcional com polarização  $V_0, I_0$

### 3.8.2 Atuação

A seguir é descrita a lógica que determina o tempo de atuação do relé direcional de neutro.

Primeiro deve-se determinar se a falta está adiante ou atrás do relé. Inicialização:

$$\begin{aligned} \text{Adiante} &= 1 \\ \text{Reversa} &= 0 \\ \text{Direção} &= \text{Reversa} \end{aligned} \quad (27)$$

Em seguida se faz a comparação de fases das correntes e tensões adequadas. No relé com polarização “V0,I0”, deve-se subtrair do ângulo da componente de seqüência zero da tensão (“V0\_ang”) o da corrente da fase A (“Ia\_ang”) e 180°. É necessário somar o ângulo de máximo conjugado do relé. Se a diferença angular for maior que -90° e menor que +90°, a falta está adiante do relé.

$$\begin{aligned} \text{Diferenca\_angular} &= (\text{V0\_ang} + 180) - \text{I0\_ang} + \text{Ang1} \\ \text{Se } (\text{Diferenca\_angular} > -90 \text{ E } \text{Diferenca\_angular} < +90) &\text{ Então} \\ \text{Direção} &= \text{Adiante} \end{aligned} \quad (28)$$

Se a falta estiver adiante, o tempo de atuação será determinado pelas unidades de sobrecorrente instantânea e temporizada. Os tempos de atuação da unidade instantânea (Tempo\_inst), da unidade temporizada (Tempo\_temp) e do relé (Tempo) precisam ser inicializados com um valor alto.

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= 9999,0 \\ \text{Tempo\_inst} &= 9999,0 \\ \text{Tempo\_temp} &= 9999,0 \end{aligned} \quad (29)$$

Somente se a falta for adiante, são calculadas as correntes secundária (3I0\_sec) e em múltiplos do tape (3I0\_mult). Se a unidade instantânea estiver habilitada (Unidade\_inst == Ligado) e a corrente secundária for maior que o valor de pickup (3I0\_sec > Pickup), o tempo de atuação (Tempo\_inst) será zero. Se a unidade

temporizada estiver habilitada ( $Unidade\_temp == Ligado$ ) e a corrente, em múltiplos do  $tape$ , for maior que 2, calcula o tempo de atuação da unidade temporizada pela equação da curva característica escolhida, sendo “K” o Multiplicador de Tempo.

```

Se ( Direção == Adiante ) Então
  3IO_sec = 3 . IO_prim / RTC
  3IO_mult = 3IO_sec / Tape
  Se ( Unidade_inst == Ligado E 3IO_sec > Pickup ) Então
    Tempo_inst = 0
  Fim Se
  Se ( Unidade_temp == Ligado E 3IO_mult >= 2 ) Então
    Tempo_temp = K . 13,5 / (3IO_mult - 1)
  Fim Se
Fim Se

```

(30)

O tempo de atuação do relé (Tempo) será o menor entre o tempo de atuação da unidade instantânea e o tempo de atuação da unidade temporizada.

```

Tempo = 9999.0
Se (Tempo_inst < Tempo) Então Tempo = Tempo_inst
Se (Tempo_temp < Tempo) Então Tempo = Tempo_temp

```

(31)

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”, obtendo, assim, o tempo de atuação final:

$$Tempo = Tempo + Tadicional \quad (32)$$

### 3.9 Relé de Sobretensão de Fase (59)

A proteção de sobretensão de fase monitora permanentemente as tensões nas três fases, enviando sinal de abertura ao disjuntor caso qualquer uma destas supere um valor ajustado. Durante uma falta monofásica, é comum que a tensão nas fases sãs fique elevada. O modelo que representa estes relés é bastante simples.

### 3.9.1 Dados

Além dos dados comuns, os relés de sobretensão de fase precisam das seguintes informações:

- **Valor Máximo de Tensão (V):** Define o valor de tensão no secundário do TP a partir do qual o relé mandará sinal de abertura ao disjuntor.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor.

### 3.9.2 Atuação

A seguir é descrita a lógica que determina a atuação do relé.

O programa calculará, para qualquer falta, o valor do módulo da tensão terminal primária das três fases onde se encontra o relé, “Va\_prim”.

Deve-se determinar o valor das tensões nos enrolamentos secundários do TP, “Va\_sec”, “Vb\_sec” e “Vc\_sec”:

$$\begin{aligned}V_{a\_sec} &= V_{a\_prim} / RTP \\V_{b\_sec} &= V_{b\_prim} / RTP \\V_{c\_sec} &= V_{c\_prim} / RTP\end{aligned}\tag{33}$$

Se qualquer das três ficar acima do valor ajustado, o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor. Na equação abaixo, “Tempo\_a”, “Tempo\_b” e “Tempo\_c” são as variáveis que guardam o tempo de atuação de cada fase:

$$\begin{aligned}\text{Se } ( V_{a\_sec} > V_{ajustado} ) \text{ Então } \text{Tempo}_a &= 0 \\ \text{Se } ( V_{b\_sec} > V_{ajustado} ) \text{ Então } \text{Tempo}_b &= 0 \\ \text{Se } ( V_{c\_sec} > V_{ajustado} ) \text{ Então } \text{Tempo}_c &= 0\end{aligned}\tag{34}$$

O tempo de atuação da unidade 59 será o menor entre os tempos das fases A, B e C. Na equação (35, “Tempo” guarda o tempo de atuação da unidade 59 e é inicializado



com um valor bastante alto:

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= 9999.0 \\ \text{Se } (\text{Tempo}_a < \text{Tempo}) &\text{ Ent\~{a}o } \text{Tempo} = \text{Tempo}_a \\ \text{Se } (\text{Tempo}_b < \text{Tempo}) &\text{ Ent\~{a}o } \text{Tempo} = \text{Tempo}_b \\ \text{Se } (\text{Tempo}_c < \text{Tempo}) &\text{ Ent\~{a}o } \text{Tempo} = \text{Tempo}_c \end{aligned} \tag{35}$$

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \tag{36}$$

O resultado final é o tempo de atuação da unidade para o curto-circuito em questão.

### 3.10 Relé de Sobretensão de Neutro (59 N e 59G)

A proteção de sobretensão de neutro monitora a tensão residual, enviando sinal de abertura ao disjuntor caso esta supere um valor ajustado. A tensão residual é medida em um secundário de TP com conexão em delta aberto e equivale a três vezes a componente de seqüência zero da tensão.

#### 3.10.1 Dados

Além dos dados comuns, os relés de sobretensão de neutro precisam das seguintes informações:

- **Valor Máximo de Tensão (V):** Define o valor de tensão residual (3V0) no secundário do TP a partir do qual o relé mandará sinal de abertura ao disjuntor.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor.

#### 3.10.2 Atuação

O programa calculará, para qualquer falta, o valor do módulo da componente de

seqüência zero da tensão terminal primária no barramento próximo ao relé, “V0\_prim”.

Deve-se calcular o valor da tensão residual aplicada ao relé, “3V0\_sec”:

$$3V0\_sec = 3 \cdot V0\_prim / RTP \quad (37)$$

Se a tensão acima ficar acima do valor ajustado, o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor. Na equação abaixo, “Tempo” é a variável que guarda o tempo de atuação do dispositivo:

$$\text{Se } (3V0\_sec > V\_ajustado) \text{ Então Tempo} = 0 \quad (38)$$

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (39)$$

### 3.11 Conceitos básicos da proteção de distância

A proteção de distância monitora correntes e tensões no terminal de linha onde se encontra instalada e busca determinar, para cada situação de falta, se esta se localiza dentro ou fora do circuito que protege. Isto é feito por diferentes processos e o que se mostra mais didático é o que utiliza o cálculo da impedância aparente.

#### 3.11.1 Impedâncias aparentes

Supondo a falta A-B-C representada abaixo e admitindo que, na falta equilibrada, a componente de seqüência zero das correntes de curto vale zero, a tensão na fase A da barra à esquerda será igual à queda de tensão na linha,  $I_a \cdot Z_1$ .

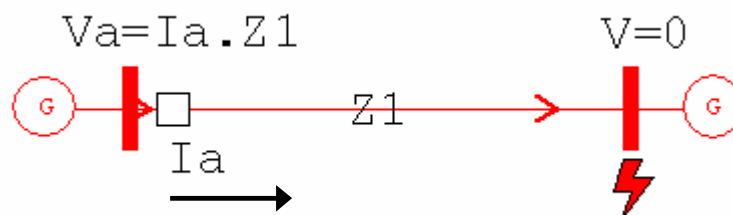


Figura 10 – Falta trifásica

A impedância aparente percebida por um relé de distância instalado no terminal esquerdo e que monitore a fase A valerá  $V_a/(I_a+K0.3I_0)$ , ou simplesmente  $V_a/I_a$  ( $I_0$  nulo na falta equilibrada). A comparação da impedância aparente com a impedância série de seqüência positiva da linha ( $Z_1$ ) permitiria determinar o ponto onde ocorreu a falta. Por exemplo:

- Se  $V_a/I_a = 0,50 \cdot Z_1$ , a falta provavelmente ocorreu a 50% da linha.
- Se  $V_a/I_a = 0,25 \cdot Z_1$ , a falta provavelmente ocorreu a 25% da linha (mais próximo ao relé).
- Se  $V_a/I_a = 1,10 \cdot Z_1$ , a falta provavelmente ocorreu fora da linha.

O plano R-X (Figura 11) permite visualizar melhor as grandezas obtidas. A linha de transmissão está representada em azul. Normalmente, uma linha de alta tensão apresenta reatância muito maior que a resistência. Portanto, o ângulo de sua impedância é próximo de  $90^\circ$ . Ao aplicar uma falta na metade da linha e dividir o fasor da tensão

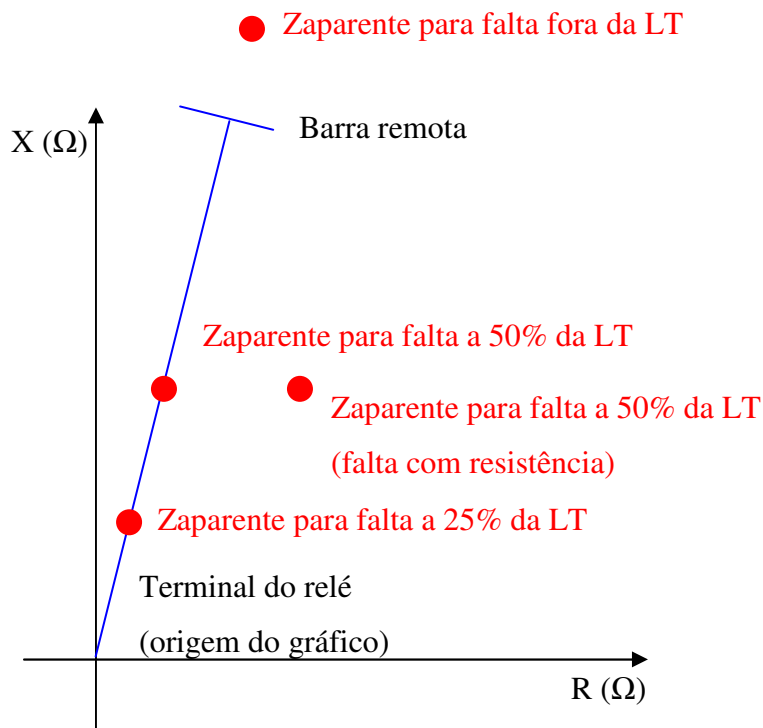


Figura 11 – Plano R-X: Representação da linha de transmissão (azul) e de impedâncias aparentes calculadas para faltas ao longo da linha

verificada durante a falta pelo fasor de corrente de curto-circuito, a impedância aparente resultante terá o mesmo ângulo de fase que a impedância  $Z_1$  e a metade de seu módulo. O ponto calculado está representado em vermelho. Outros pontos também são representados: Falta a 25% da LT, falta fora da LT e falta a 50%, porém com resistência de arco, o que desloca a impedância aparente para a direita.

Apesar de o método da impedância aparente não ser empregado pela maioria dos relés de distância, é usual utilizar o plano R-X para ilustrar a atuação e as características operacionais destes dispositivos.

Existem vários tipos de relés de distância e uma das propriedades que diferencia uns dos outros é a sua característica estática no plano R-X. Por exemplo, os relés de tipo MHO apresentam uma característica circular que passa pela origem (Figura 12). Caso uma falta seja percebida dentro do círculo, o relé opera. Caso fique fora, o relé não opera.

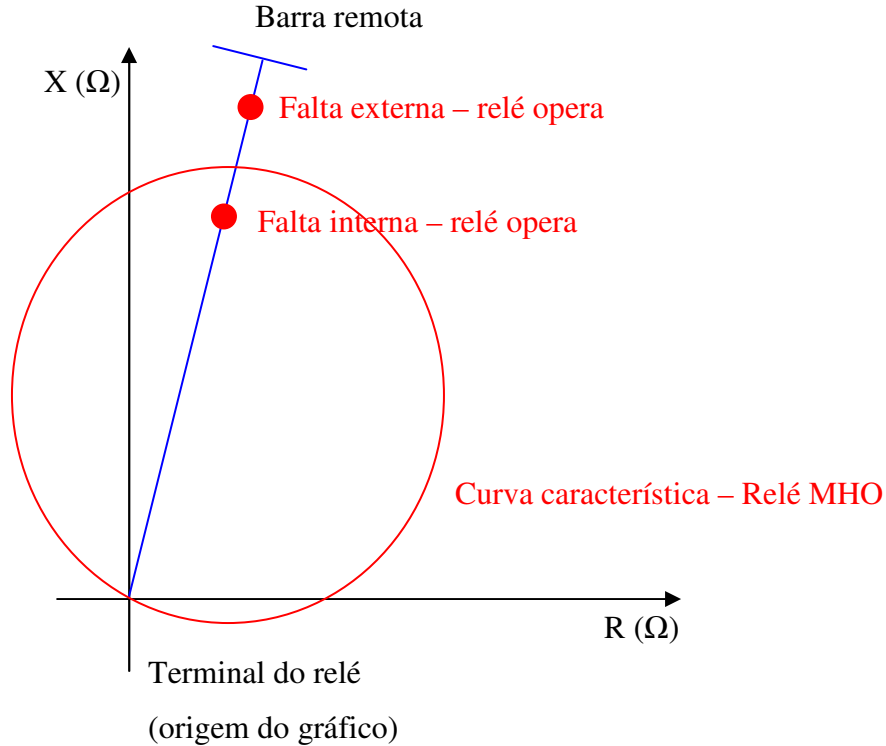


Figura 12 – Representação da característica de um relé MHO no plano R-X

Os relés de tipo QUADRILATERAL (Figura 13) apresentam uma característica descrita por retas no plano R-X.

A impedância aparente, durante as faltas fase-fase, precisa ser calculada por três unidades:

- Unidade AB: Detecta faltas entre as fases A e B. Obtêm a impedância aparente calculando  $(V_a - V_b) / (I_a - I_b)$ , ou  $V_{ab} / I_{ab}$ .
- Unidade BC: Detecta faltas entre as fases B e C. Obtêm a impedância aparente calculando  $V_{bc} / I_{bc}$ .
- Unidade CA: Detecta faltas entre as fases C e A. Obtêm a impedância aparente calculando  $V_{ca} / I_{ca}$ .

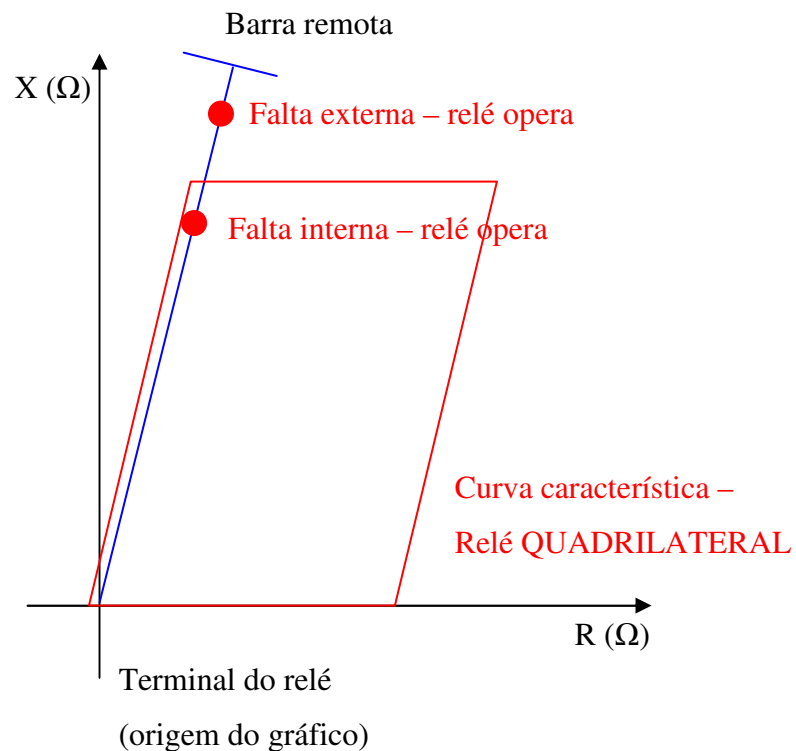


Figura 13 – Representação da característica de um relé QUADRILATERAL

Para as faltas fase-terra, também são necessárias três unidades:

- Unidade AT: Detecta faltas A-T. Obtêm a impedância aparente calculando  $V_a / (I_a + K_0.I_n + M_0.I_n')$ , onde “K0” vale  $(1/3).(Z_0 - Z_1) / Z_1$ , “In” é a

corrente residual, ou  $3.I_0$ , “M0” vale  $(1/3).(Z_{m0}/Z_0)$  e  $I_n'$  a corrente residual da linha acoplada. É comum desprezar o termo “M0.In”.

- Unidade BT: Detecta faltas B-T. Obtêm a impedância aparente calculando  $V_b / (I_b + K_0.I_n + M_0.I_n')$ .
- Unidade CT: Detecta faltas C-T. Obtêm a impedância aparente calculando  $V_c / (I_c + K_0.I_n + M_0.I_n')$ .

Para cobrir os 10 tipos básicos de faltas (A-B, A-B-T, B-C, B-C -T, C-A, C-A -T, A-T, B-T, C-T e A-B-C), um relé de distância precisa ter as seis unidades citadas acima (AB, BC, CA, AT, BT e CT).

### 3.11.2 Zonas de proteção

É usual que os relés de distância digitais apresentem três ou mais zonas de proteção ajustáveis (Figura 14), inclusive zonas reversas, que detectam defeitos que ocorram atrás do dispositivo. Em geral, os parâmetros são ajustados da seguinte maneira:

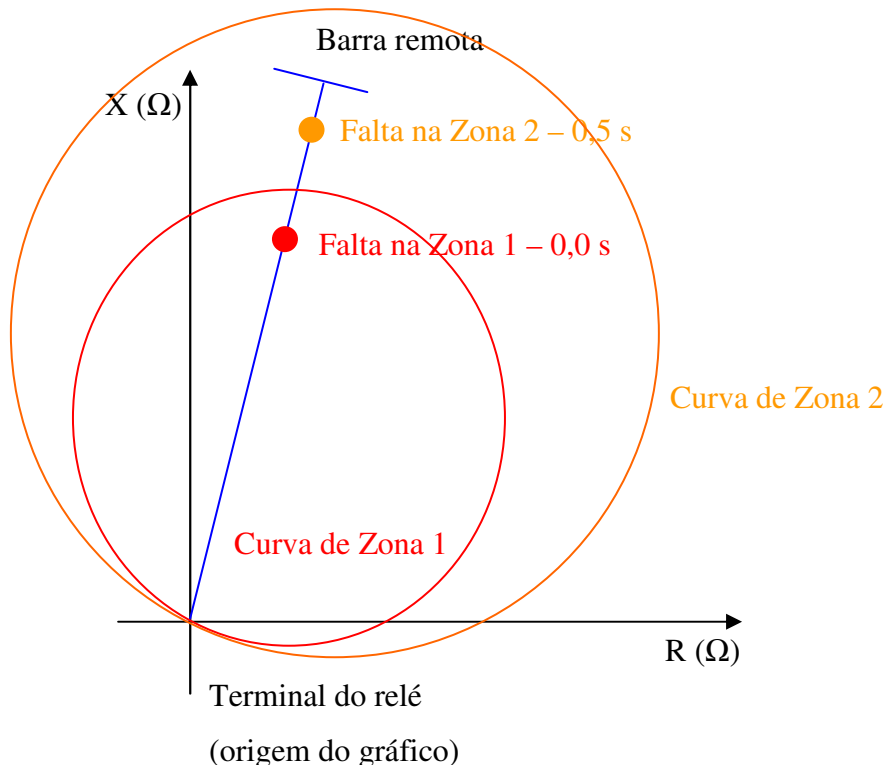


Figura 14 – Representação da duas zonas de proteção de um relé MHO

- Primeira Zona: Deve atuar instantaneamente para faltas até 85% da linha. Desta forma, garante-se rápida eliminação de defeitos internos à LT e se evita que o relé, por erros de medição de correntes, saturação de transformadores de instrumentos ou outros motivos, atue para faltas localizadas pouco após seu o terminal remoto.
- Segunda Zona: Deve operar, em 500 ms, para faltas até 125% da linha. Assim, faltas até 85% são eliminadas instantaneamente pela Zona 1, faltas entre 85 e 100% são eliminadas em 500 ms pela Zona 2, e a Zona 2 funciona como backup para faltas pouco após o terminal remoto, caso a proteção primária falhe.
- Terceira Zona: Deve cobrir até o final da linha adjacente mais curta em 1s, funcionando como proteção de retaguarda.

Foi mencionado acima que os relés de distância atualmente não utilizam o método do cálculo das impedâncias aparentes. Isto se deve ao fato de que o desempenho deste não é satisfatório, sendo propenso a operações indevidas, como a atuação durante faltas reversas.

### 3.11.3 Características obtidas por comparação de fase

Uma forma mais utilizada para obter a característica MHO nos relés modernos é a comparação do ângulo de fase de dois vetores:

$$\begin{aligned} S1 &= Z_r \cdot I - V \\ S2 &= V \end{aligned} \tag{40}$$

Onde “Zr” representa a impedância ajustada no relé MHO, “I” e “V” representam tensões e correntes apropriadas. Caso o ângulo entre S1 e S2 fique entre  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ , o relé envia sinal de abertura.

Em uma unidade BC, por exemplo, a condição de trip seria:

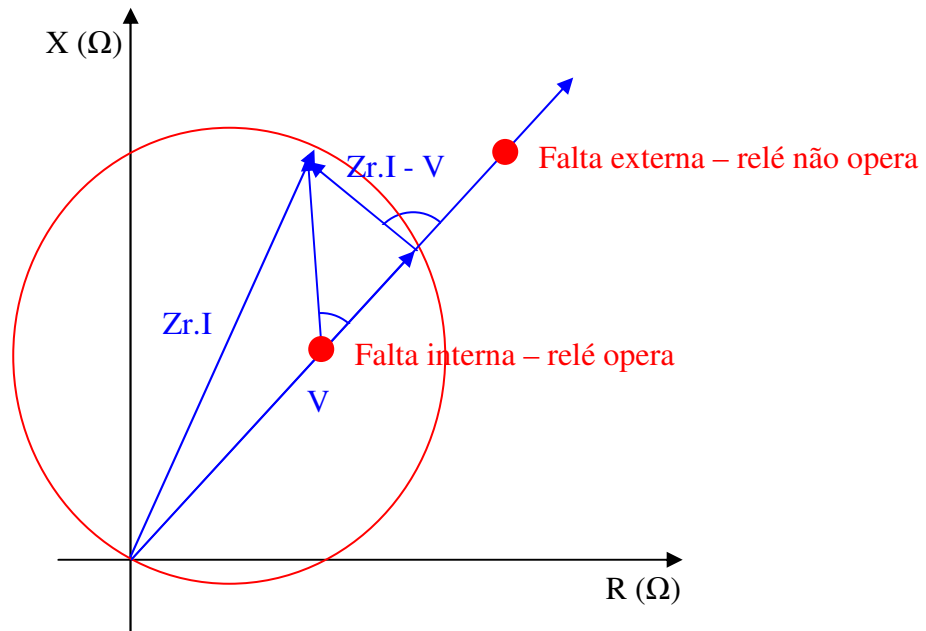


Figura 15 – Característica MHO obtida pela comparação de ângulos de fase

$$S1 = Z_r \cdot I_{bc} - V_{bc}$$

$$S2 = V_{bc}$$

$$\text{Tempo} = 9999.0 \tag{41}$$

$$\text{Se } [(S1\_ang - S2\_ang) > -90.0 \text{ E } (S1\_ang - S2\_ang) < +90.0 ]$$

$$\text{Tempo} = 0.0$$

Fim se

Em uma unidade AT, a condição seria:

$$I = I_a + K0.3I0$$

$$S1 = Z_r \cdot I - V_a$$

$$S2 = V_a$$

$$\text{Tempo} = 9999.0 \tag{42}$$

$$\text{Se } [(S1\_ang - S2\_ang) > -90.0 \text{ E } (S1\_ang - S2\_ang) < +90.0 ]$$

$$\text{Tempo} = 0.0$$

Fim se



Em qualquer dos tipos de unidade, fase-fase ou fase-terra, uma falta B-C ou A-T imediatamente após o relé pode levar a tensão correspondente a zero. Neste caso, o vetor S2 torna-se zero, impedindo que se execute a comparação de ângulo de fase. Fica impossível determinar se o dispositivo atuará como desejado ou não. O mesmo acontece para faltas trifásicas, logo após o relé, para todas as seis unidades (AB, BC, CA, AT, BT e CT).

Para contornar este problema e garantir a atuação do relé, é usual empregar tensões de polarização na determinação do vetor S2:

$$\begin{aligned} S1 &= Z_r \cdot I - V \\ S2 &= V_{pol} \end{aligned} \tag{43}$$

Desta forma, em uma unidade BC, por exemplo, passaríamos a ter a condição:

$$\begin{aligned} S1 &= Z_r \cdot I_{bc} - V_{bc} \\ S2 &= V_{pol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= 9999.0 \\ \text{Se } [(S1_{ang} - S2_{ang}) > -90.0 \text{ E } (S1_{ang} - S2_{ang}) < +90.0] \\ \text{Tempo} &= 0.0 \\ \text{Fim se} \end{aligned} \tag{44}$$

Algumas tensões de polarização comuns para os relés MHO são:

- Para a unidade BC:  $V_a$  (polarização cruzada, cobre faltas B-C próximas ao relé),  $V_a$  de memória (polarização cruzada com tensão pré-falta, cobre faltas B-C e A-B-C próximas ao relé),  $V_{a1}$  de memória (polarização com tensão de seqüência positiva pré-falta, cobre faltas B-C e A-B-C próximas ao relé).
- Para a unidade AT:  $V_{bc}$  (polarização cruzada, cobre faltas A-T próximas ao relé),  $V_{a1}$  de memória (polarização com tensão de seqüência positiva pré-falta, cobre faltas A-T e A-B-C próximas ao relé).

Para representar as retas que determinam a característica QUADRILATERAL, pode-se também empregar a comparação de fases. Neste caso a comparação seria, para determinar uma das retas de uma unidade BC:

$$S1 = Z_r \cdot I_{bc} - V_{bc}$$

$$S2 = Z_r \cdot I_{bc}$$

$$\text{Tempo} = 9999.0 \quad (45)$$

$$\text{Se } [(S1_{\text{ang}} - S2_{\text{ang}}) > -90.0 \text{ E } (S1_{\text{ang}} - S2_{\text{ang}}) < +90.0 ]$$

$$\text{Tempo} = 0.0$$

Fim se

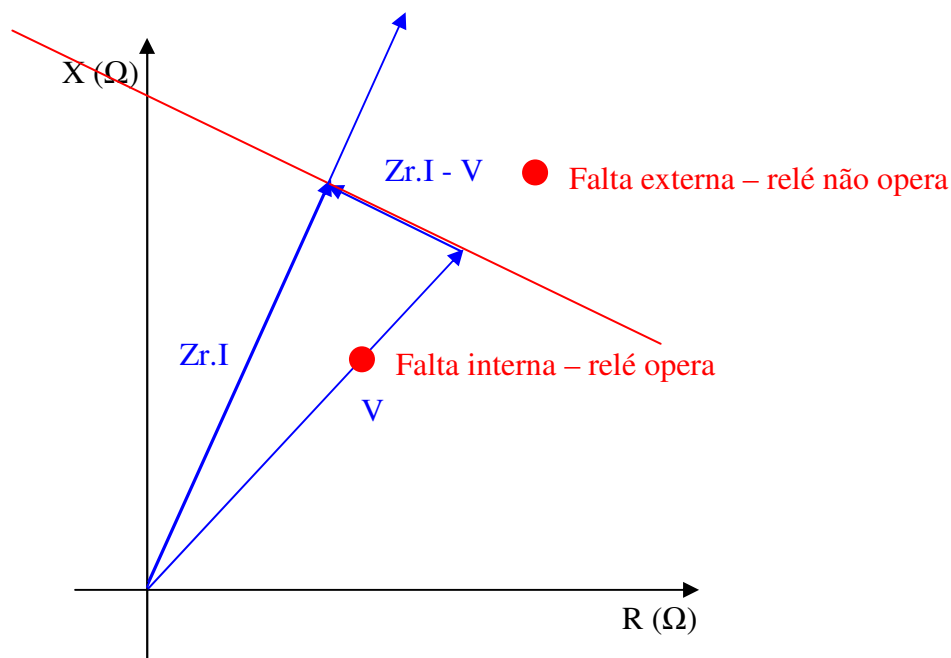


Figura 16 – Reta no plano R-Z obtida pela comparação de ângulos de fase

Para compor uma característica quadrilateral, são necessárias ao menos quatro retas como a descrita acima, e todas devem acusar a detecção da falta simultaneamente para que a unidade envie sinal ao disjuntor.

### 3.12 Relé de Distância de Fase (21)

O relé de distância de fase é composto pelas unidades AB, BC e CA. Nesta implementação está previsto que cada relé pode ter características diferentes, e cada característica pode empregar diferentes formas de polarização. Cada relé dispõe de apenas uma zona de proteção. Caso o relé real possua várias zonas, cada uma deve ser representada individualmente, como se verá no Capítulo de resultados desta dissertação. Futuramente poder-se-á implementar modelos com mais de uma zona de maneira relativamente simples.

#### 3.12.1 Dados

Além dos dados comuns a todos os relés, os de distância de fase precisam das seguintes informações:

- **Valor Mínimo de Corrente (A):** Define o valor mínimo de corrente em cada laço (AB, BC e CA) que deve estar presente para que o relé opere.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor.

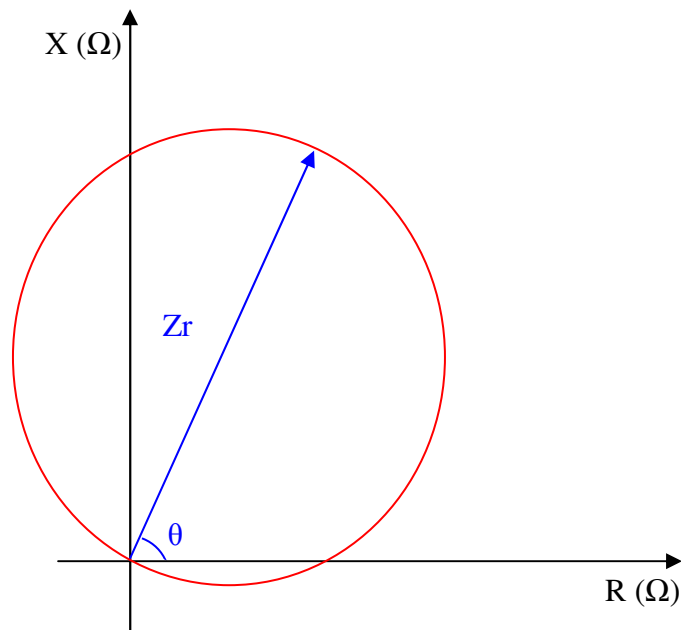


Figura 17 – Característica MHO

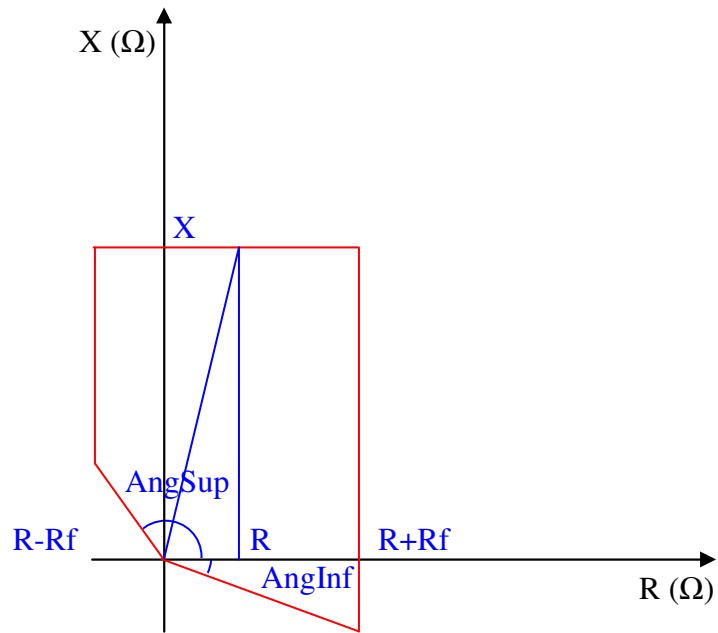


Figura 18 – Característica QUADRILATERAL 1

- **Característica:** Determina a característica do relé de distância. Estão disponíveis as opções MHO, QUADRILATERAL 1 e QUADRILATERAL 2. Os demais dados dependem da característica escolhida.

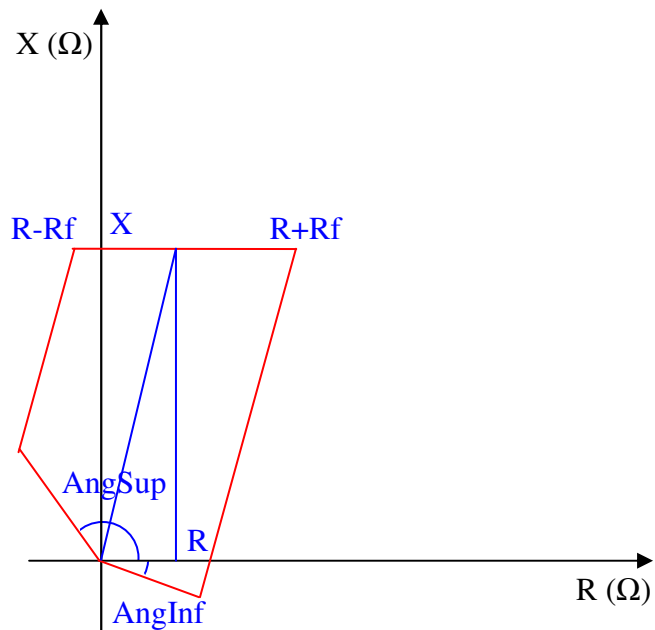


Figura 19 – Característica QUADRILATERAL 2

- **Relé MHO – Módulo da Impedância ( $\Omega$ ):** Permite informar ao programa o módulo da impedância  $Z_r$  (Figura 17).
- **Relé MHO – Ângulo da Impedância ( $^\circ$ ):** Permite informar ao programa o ângulo da impedância  $Z_r$  (Figura 17).
- **Relé MHO – Polarização:** Pode-se especificar a polarização do relé.
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Reatância X ( $\Omega$ ):** Especificação do valor de reatância coberto pela unidade (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Resistência R ( $\Omega$ ):** Especificação do valor de resistência coberto pela unidade (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Resistência de Falta  $R_f$  ( $\Omega$ ):** Especificação do valor de resistência adicional devido a impedância de defeito coberto pela unidade (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Ângulo Inferior  $AngInf$  ( $^\circ$ ):** Especificação do ângulo inferior da unidade direcional (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Ângulo Superior  $AngSup$  ( $^\circ$ ):** Especificação do ângulo superior da unidade direcional (Figuras 18 e 19).

### 3.12.2 Atuação

A seguir é descrita a lógica que determina o tempo de atuação do relé.

Para cada unidade, é necessário determinar as correntes e tensões aplicadas ao relé. Primeiro, deve-se considerar a relação de transformação dos TCs e TPs:

$$\begin{aligned}
 I_{a\_sec} &= I_{a\_prim} / RTC \\
 I_{b\_sec} &= I_{b\_prim} / RTC \\
 I_{c\_sec} &= I_{c\_prim} / RTC \\
 V_{a\_sec} &= V_{a\_prim} / RTP
 \end{aligned}
 \tag{46}$$

$$Vb\_sec = Vb\_prim / RTP$$

$$Vc\_sec = Vc\_prim / RTP$$

Em seguida, obter as correntes e tensões para cada unidade (AB, BC e CA):

$$Iab\_sec = Ia\_sec - Ib\_sec$$

$$Ibc\_sec = Ib\_sec - Ic\_sec$$

$$Ica\_sec = Ic\_sec - Ia\_sec$$

$$Vab\_sec = Va\_sec - Vb\_sec$$

$$Vbc\_sec = Vb\_sec - Vc\_sec$$

$$Vca\_sec = Vc\_sec - Va\_sec$$

(47)

Para a unidade MHO, foi implementado o método da comparação de ângulos de fase. Portanto, deve-se escolher a tensão de polarização, calcular os fasores apropriados e comparar seus ângulos. Supondo polarização convencional, a determinação da atuação da unidade BC seria:

$$Vpol = Vbc$$

$$S1 = Zr . Ibc - Vbc$$

$$S2 = Vpol$$

(48)

$$Tempo\_bc = 9999.0$$

$$Se \ [ (S1\_ang - S2\_ang) > -90.0 \ E \ (S1\_ang - S2\_ang) < +90.0 ]$$

$$Tempo\_bc = 0.0$$

Fim se

O tempo de atuação do relé será o menor de suas unidades:

$$Tempo = 9999.0$$

$$Se \ (Tempo\_ab < Tempo) \ Ent\tilde{a}o \ Tempo = Tempo\_ab$$

$$Se \ (Tempo\_bc < Tempo) \ Ent\tilde{a}o \ Tempo = Tempo\_bc$$

$$Se \ (Tempo\_ca < Tempo) \ Ent\tilde{a}o \ Tempo = Tempo\_ca$$

(49)

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”, obtendo, assim, o tempo de atuação final:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (50)$$

Para as unidades QUADRILATERAIS, por motivo de simplicidade para esta primeira abordagem, foi implementado o método que considera as impedâncias aparentes percebidas pelo relé. Este método não é utilizado na maioria dos relés reais, mas, como modelo genérico, pode orientar quanto à operação ou não do dispositivo.

Primeiro é necessário calcular, para cada unidade, a impedância aparente. Abaixo se vê o cálculo para a unidade BC da impedância e dos valores correspondentes de resistência e reatância aparentes:

$$\begin{aligned} Z_{bc\_aparente} &= V_{bc\_sec} / I_{bc\_sec} \\ X_{bc\_aparente} &= Z_{bc\_aparente\_mod} * \text{sen} (Z_{bc\_aparente\_ang}) \\ R_{bc\_aparente} &= Z_{bc\_aparente\_mod} * \text{cos} (Z_{bc\_aparente\_ang}) \end{aligned} \quad (51)$$

Em seguida, são necessários cinco testes. Para a unidade QUADRILATERAL 1, estes são: primeiro se verifica se a impedância aparente ficou abaixo da reta de reatância.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_X} &= 0 \\ \text{Se } ( X_{bc\_aparente} < X_{ajuste} ) \text{ Então } \text{Teste\_X} &= 1 \end{aligned} \quad (52)$$

Em seguida, se a impedância aparente ficou à esquerda da primeira reta de resistência.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_RD} &= 0 \\ \text{Se } ( R_{bc\_aparente} < R_{ajuste} + R_{f\_ajuste} ) \text{ Então } \text{Teste\_RD} &= 1 \end{aligned} \quad (53)$$

Se ficou à direita da segunda reta de resistência:

$$\begin{aligned} \text{Teste\_RE} &= 0 \\ \text{Se } ( R_{bc\_aparente} > R_{ajuste} - R_{f\_ajuste} ) \text{ Então } \text{Teste\_RE} &= 1 \end{aligned} \quad (54)$$

Se ficou acima da primeira reta da unidade direcional.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_DS} &= 0 \\ X_{\text{auxiliar\_sup\_bc}} &= \tan(\text{AnfSup}) * R_{\text{bc\_aparente}} \\ \text{Se } ( X_{\text{bc\_aparente}} > X_{\text{auxiliar\_sup\_bc}} ) \text{ Ent\~{a}o } &\text{Teste\_DS} = 1 \end{aligned} \quad (55)$$

Se ficou acima da segunda reta da unidade direcional.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_DI} &= 0 \\ X_{\text{auxiliar\_inf\_bc}} &= -\tan(\text{AnfSup}) * R_{\text{bc\_aparente}} \\ \text{Se } ( X_{\text{bc\_aparente}} > X_{\text{auxiliar\_inf\_bc}} ) \text{ Ent\~{a}o } &\text{Teste\_DI} = 1 \end{aligned} \quad (56)$$

Os cinco testes precisam acusar simultaneamente a presença da falta para que a unidade atue.

$$\begin{aligned} \text{Tempo\_bc} &= 9999.0 \\ \text{Se } ( \text{Teste\_X} == 1 \text{ E } \text{Teste\_RD} == 1 \text{ E } \text{Teste\_RE} = 1 \text{ E } \\ &\text{Teste\_DS} = 1 \text{ E } \text{Teste\_DI} = 1 ) \text{ Ent\~{a}o} \\ \text{Tempo\_bc} &= 0.0 \\ \text{Fim se} \end{aligned} \quad (57)$$

Para a característica QUADRILATERAL 2, apenas o teste das resistências é feito de maneira diferente. O processo completo é: primeiro se verifica se a impedância aparente ficou abaixo da reta de reatância.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_X} &= 0 \\ \text{Se } ( X_{\text{bc\_aparente}} < X_{\text{ajuste}} ) \text{ Ent\~{a}o } &\text{Teste\_X} = 1 \end{aligned} \quad (58)$$

Em seguida, se a impedância aparente ficou acima da reta de resistência mais à direita. A reta é dada pela expressão abaixo. “X1” e “R1” significam a reatância e a resistência de seq ncia positiva da linha:

$$\begin{aligned} X &= (X1/R1).R - B2 ; \\ B2 &= R_f / \cos [ \text{atan} (X1/R1) ] \end{aligned} \quad (59)$$

Testando resistência aparente:

$$\text{Teste\_RD} = 0 \quad (60)$$



Se (  $X_{bc\_aparente} > (X1/R1) * R_{bc\_aparente} - B2$  ) Então

    Teste\_RD = 1

Fim se

Verifica se a impedância aparente ficou abaixo da reta de resistência mais à esquerda. A reta é dada pela expressão abaixo.

$$X = (X1/R1).R + B1 ; \tag{61}$$

$$B1 = R_f / \text{sen} [ 90^\circ - \text{atan} (X1/R1) ]$$

Testando resistência aparente:

Teste\_RE = 0

Se (  $X_{bc\_aparente} < (X1/R1) * R_{bc\_aparente} + B1$  ) Então (62)

    Teste\_RE = 1

Fim se

Se ficou acima da primeira reta da unidade direcional.

Teste\_DS = 0

$$X_{auxiliar\_sup\_bc} = \text{tan}(\text{AnfSup}) * R_{bc\_aparente} \tag{63}$$

Se (  $X_{bc\_aparente} > X_{auxiliar\_sup\_bc}$  ) Então Teste\_DS = 1

Se ficou acima da segunda reta da unidade direcional.

Teste\_DI = 0

$$X_{auxiliar\_inf\_bc} = -\text{tan}(\text{AnfSup}) * R_{bc\_aparente} \tag{64}$$

Se (  $X_{bc\_aparente} > X_{auxiliar\_inf\_bc}$  ) Então Teste\_DI = 1

Os cinco testes precisam acusar simultaneamente a presença da falta para que a unidade atue.

Tempo\_bc = 9999.0

Se ( Teste\_X == 1 E Teste\_RD == 1 E Teste\_RE = 1 E (65)  
    Teste\_DS = 1 E Teste\_DI = 1 ) Então

    Tempo\_bc = 0.0

Fim se

Para as duas características quadrilaterais, o tempo de do relé será o menor de suas unidades:

$$\begin{aligned} \text{Tempo} &= 9999.0 \\ \text{Se } (\text{Tempo}_{ab} < \text{Tempo}) & \text{ Então } \text{Tempo} = \text{Tempo}_{ab} \\ \text{Se } (\text{Tempo}_{bc} < \text{Tempo}) & \text{ Então } \text{Tempo} = \text{Tempo}_{bc} \\ \text{Se } (\text{Tempo}_{ca} < \text{Tempo}) & \text{ Então } \text{Tempo} = \text{Tempo}_{ca} \end{aligned} \quad (66)$$

Ao tempo resultante é somado o tempo de retardo, “Tadicional”, obtendo o tempo de atuação final:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (67)$$

### 3.13 Relé de Distância de Terra (21N ou 21G)

O relé de distância de terra é muito similar ao de fase. A diferença reside nas tensões e correntes que são aplicadas ao dispositivo. Enquanto o de fase observa  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$ ,  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  e  $I_{ca}$ , o de terra observa  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ . É composto pelas unidades AT, BT e CT.

#### 3.13.1 Dados

Além dos dados comuns a todos os relés, os de distância de terra precisam das seguintes informações:

- **Valor Mínimo de Corrente (A):** Define o valor mínimo de corrente em cada laço (A, B e C) que deve estar presente para que o relé opere.
- **Tempo de Retardo (s):** Tempo adicional para retardar a atuação sobre o disjuntor.
- **Característica:** Determina a característica do relé de distância. Estão disponíveis as opções MHO, QUADRILATERAL 1 e QUADRILATERAL 2.

Os demais dados dependem da característica escolhida.

- **Relé MHO – Módulo da Impedância ( $\Omega$ ):** Permite informar ao programa o módulo da impedância  $Z_r$  (Figura 17).
- **Relé MHO – Ângulo da Impedância ( $^\circ$ ):** Permite informar ao programa o ângulo da impedância  $Z_r$  (Figura 17).
- **Relé MHO – Polarização:** Pode-se especificar a polarização do relé.
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Reatância X ( $\Omega$ ):** Especificação do valor de reatância coberto pela unidade (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Resistência R ( $\Omega$ ):** Especificação do valor de resistência coberto pela unidade (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Resistência de Falta  $R_f$  ( $\Omega$ ):** Especificação do valor de resistência adicional devido a impedância de defeito coberto pela unidade (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Ângulo Inferior  $AngInf$  ( $^\circ$ ):** Especificação do ângulo inferior da unidade direcional (Figuras 18 e 19).
- **Relés QUADRILATERAIS (1 e 2) – Ângulo Superior  $AngSup$  ( $^\circ$ ):** Especificação do ângulo superior da unidade direcional (Figuras 18 e 19).
- **Constante  $K_0$ :** Dado opcional. Pode ser calculado pelo programa.

### 3.13.2 Atuação

A seguir é descrita a lógica que determina o tempo de atuação do relé.

Para cada unidade, é necessário determinar as correntes e tensões aplicadas ao relé. Primeiro, deve-se considerar a relação de transformação dos TCs e TPs:

$$\begin{aligned}I_{a\_sec} &= I_{a\_prim} / RTC \\I_{b\_sec} &= I_{b\_prim} / RTC \\I_{c\_sec} &= I_{c\_prim} / RTC\end{aligned}\tag{68}$$

$$\begin{aligned}
I0\_sec &= I0\_prim / RTC \\
Va\_sec &= Va\_prim / RTP \\
Vb\_sec &= Vb\_prim / RTP \\
Vc\_sec &= Vc\_prim / RTP
\end{aligned}$$

Em seguida, corrigir as correntes de fase pelo fator K0:

$$\begin{aligned}
Iak\_sec &= Ia\_sec + K0 . 3 . I0\_sec \\
Ibk\_sec &= Ib\_sec + K0 . 3 . I0\_sec \\
Ick\_sec &= Ic\_sec + K0 . 3 . I0\_sec
\end{aligned} \tag{69}$$

Para a unidade MHO, foi implementado o método da comparação de ângulos de fase. Portanto, deve-se escolher a tensão de polarização, calcular os fasores apropriados e comparar seus ângulos. Supondo polarização convencional, a determinação da atuação da unidade A seria:

$$\begin{aligned}
Vpol &= Va \\
S1 &= Zr . Iak - Va \\
S2 &= Vpol
\end{aligned} \tag{70}$$

$$\begin{aligned}
Tempo\_a &= 9999.0 \\
\text{Se } [(S1\_ang - S2\_ang) > -90.0 \text{ E } (S1\_ang - S2\_ang) < +90.0] \\
Tempo\_a &= 0.0 \\
\text{Fim se}
\end{aligned}$$

O tempo de atuação do relé será o menor de suas unidades:

$$\begin{aligned}
Tempo &= 9999.0 \\
\text{Se } (Tempo\_a < Tempo) \text{ Então } Tempo &= Tempo\_a \\
\text{Se } (Tempo\_b < Tempo) \text{ Então } Tempo &= Tempo\_b \\
\text{Se } (Tempo\_c < Tempo) \text{ Então } Tempo &= Tempo\_c
\end{aligned} \tag{71}$$

Deve-se somar ao tempo resultante o tempo de retardo, “Tadicional”, obtendo, assim, o tempo de atuação final:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (72)$$

Para as unidades QUADRILATERAIS, por motivo de simplicidade para esta primeira abordagem, foi implementado o método que considera as impedâncias aparentes percebidas pelo relé.

Primeiro é necessário calcular, para cada unidade, a impedância aparente. Abaixo se vê o cálculo para a unidade A da impedância e dos valores correspondentes de resistência e reatância aparentes:

$$\begin{aligned} Z_{a\_aparente} &= V_{a\_sec} / I_{ak\_sec} \\ X_{a\_aparente} &= Z_{a\_aparente\_mod} * \text{sen}(Z_{a\_aparente\_ang}) \\ R_{a\_aparente} &= Z_{a\_aparente\_mod} * \text{cos}(Z_{a\_aparente\_ang}) \end{aligned} \quad (73)$$

Em seguida, são necessários cinco testes. Para a unidade QUADRILATERAL 1, estes são: primeiro se verifica se a impedância aparente ficou abaixo da reta de reatância.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_X} &= 0 \\ \text{Se } (X_{a\_aparente} < X_{ajuste}) &\text{ Então Teste\_X} = 1 \end{aligned} \quad (74)$$

Em seguida, se a impedância aparente ficou à esquerda da primeira reta de resistência.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_RD} &= 0 \\ \text{Se } (R_{a\_aparente} < R_{ajuste} + R_{f\_ajuste}) &\text{ Então Teste\_RD} = 1 \end{aligned} \quad (75)$$

Se ficou à direita da segunda reta de resistência:

$$\begin{aligned} \text{Teste\_RE} &= 0 \\ \text{Se } (R_{a\_aparente} > R_{ajuste} - R_{f\_ajuste}) &\text{ Então Teste\_RE} = 1 \end{aligned} \quad (76)$$

Se ficou acima da primeira reta da unidade direcional.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_DS} &= 0 \\ X_{auxiliar\_sup\_a} &= \text{tan}(\text{AnfSup}) * R_{a\_aparente} \\ \text{Se } (X_{a\_aparente} > X_{auxiliar\_sup\_a}) &\text{ Então Teste\_DS} = 1 \end{aligned} \quad (77)$$

Se ficou acima da segunda reta da unidade direcional.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_DI} &= 0 \\ X_{\text{auxiliar\_inf\_a}} &= -\tan(\text{AnfSup}) * Ra_{\text{aparente}} \\ \text{Se } ( Xa_{\text{aparente}} > X_{\text{auxiliar\_inf\_a}} ) &\text{ Ent\~{a}o } \text{Teste\_DI} = 1 \end{aligned} \quad (78)$$

Os cinco testes precisam acusar simultaneamente a presença da falta para que a unidade atue.

$$\begin{aligned} \text{Tempo\_a} &= 9999.0 \\ \text{Se } ( \text{Teste\_X} == 1 \text{ E } \text{Teste\_RD} == 1 \text{ E } \text{Teste\_RE} = 1 \text{ E} \\ &\text{Teste\_DS} = 1 \text{ E } \text{Teste\_DI} = 1 ) \text{ Ent\~{a}o} \\ \text{Tempo\_a} &= 0.0 \\ \text{Fim se} \end{aligned} \quad (79)$$

Para a característica QUADRILATERAL 2, apenas o teste das resistências é feito de maneira diferente. O processo completo é: primeiro se verifica se a impedância aparente ficou abaixo da reta de reatância.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_X} &= 0 \\ \text{Se } ( Xa_{\text{aparente}} < X_{\text{ajuste}} ) &\text{ Ent\~{a}o } \text{Teste\_X} = 1 \end{aligned} \quad (80)$$

Em seguida, se a impedância aparente ficou acima da reta de resistência mais à direita. A reta é dada pela expressão abaixo:

$$\begin{aligned} X &= (X1/R1).R - B2 ; \\ B2 &= Rf / \cos [ \text{atan} (X1/R1) ] \end{aligned} \quad (81)$$

Testando resistência aparente:

$$\begin{aligned} \text{Teste\_RD} &= 0 \\ \text{Se } ( Xa_{\text{aparente}} > (X1/R1) * Ra_{\text{aparente}} - B2 ) &\text{ Ent\~{a}o} \\ \text{Teste\_RD} &= 1 \\ \text{Fim se} \end{aligned} \quad (82)$$

Verifica se a impedância aparente ficou abaixo da reta de resistência mais à

esquerda. A reta é dada pela expressão abaixo.

$$\begin{aligned} X &= (X1/R1).R + B1 ; \\ B1 &= Rf / \text{sen} [ 90^\circ - \text{atan} (X1/R1) ] \end{aligned} \quad (83)$$

Testando resistência aparente:

$$\begin{aligned} \text{Teste\_RE} &= 0 \\ \text{Se } ( Xa_{\text{aparente}} < (X1/R1) * Ra_{\text{aparente}} + B1 ) &\text{ Então} \\ \text{Teste\_RE} &= 1 \\ \text{Fim se} \end{aligned} \quad (84)$$

Se ficou acima da primeira reta da unidade direcional.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_DS} &= 0 \\ X_{\text{auxiliar\_sup\_a}} &= \text{tan}(\text{AnfSup}) * Ra_{\text{aparente}} \\ \text{Se } ( Xa_{\text{aparente}} > X_{\text{auxiliar\_sup\_a}} ) &\text{ Então } \text{Teste\_DS} = 1 \end{aligned} \quad (85)$$

Se ficou acima da segunda reta da unidade direcional.

$$\begin{aligned} \text{Teste\_DI} &= 0 \\ X_{\text{auxiliar\_inf\_a}} &= -\text{tan}(\text{AnfSup}) * Ra_{\text{aparente}} \\ \text{Se } ( Xa_{\text{aparente}} > X_{\text{auxiliar\_inf\_a}} ) &\text{ Então } \text{Teste\_DI} = 1 \end{aligned} \quad (86)$$

Os cinco testes precisam acusar simultaneamente a presença da falta para que a unidade atue.

$$\begin{aligned} \text{Tempo\_a} &= 9999.0 \\ \text{Se } ( \text{Teste\_X} == 1 \text{ E } \text{Teste\_RD} == 1 \text{ E } \text{Teste\_RE} = 1 \text{ E} \\ &\text{Teste\_DS} = 1 \text{ E } \text{Teste\_DI} = 1 ) \text{ Então} \\ \text{Tempo\_a} &= 0.0 \\ \text{Fim se} \end{aligned} \quad (87)$$

Para as duas características quadrilaterais, o tempo de do relé será o menor de suas unidades:

$$\text{Tempo} = 9999.0 \quad (88)$$

Se ( Tempo\_a < Tempo ) Então Tempo = Tempo\_a

Se ( Tempo\_b < Tempo ) Então Tempo = Tempo\_b

Se ( Tempo\_c < Tempo ) Então Tempo = Tempo\_c

Ao tempo resultante é somado o tempo de retardo, “Tadicional”, obtendo o tempo de atuação final:

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + \text{Tadicional} \quad (89)$$



# CAPÍTULO 4

## Resultados

Os modelos de relés descritos no capítulo anterior foram implementados no programa computacional ANAFAS, para análise de faltas simultâneas. Neste capítulo são apresentados os resultados de simulações feitas com o objetivo de validar a implementação. Os resultados dos curtos simulados são mostrados na interface gráfica do software Sapre-Anafas. Os resultados dos relés são calculados ainda exclusivamente pela versão DOS do Anafas.

Há dois tipos de saídas de dados:

- **Tempo de Atuação:** Esta opção informa, para cada terminal de circuito, que relé opera mais rapidamente para cada falta e qual é o seu tempo de atuação.
- **Resultados dos Relés de Proteção:** Fornece diversas informações de todos os relés de cada terminal, como módulo e ângulo da corrente secundária que o alimenta, corrente secundária em múltiplos do *pickup* etc, e outros dependentes do modelo do dispositivo.

Nas simulações abaixo são apresentados os tempos de atuação de todos os relés frente a cada falta aplicada, para que se possa acompanhar o comportamento dos diversos modelos.

### 4.1 Sistema teste

Nas simulações foi utilizada a base de dados de curto-circuito BR0912PN, configuração de DEZ/2009, versão de 04/05/2007, mantida e distribuída pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). O carregamento pré-falta não é representado. Portanto, a tensão de todas as barras antes das faltas é a nominal e não há corrente fluindo pelos

circuitos.

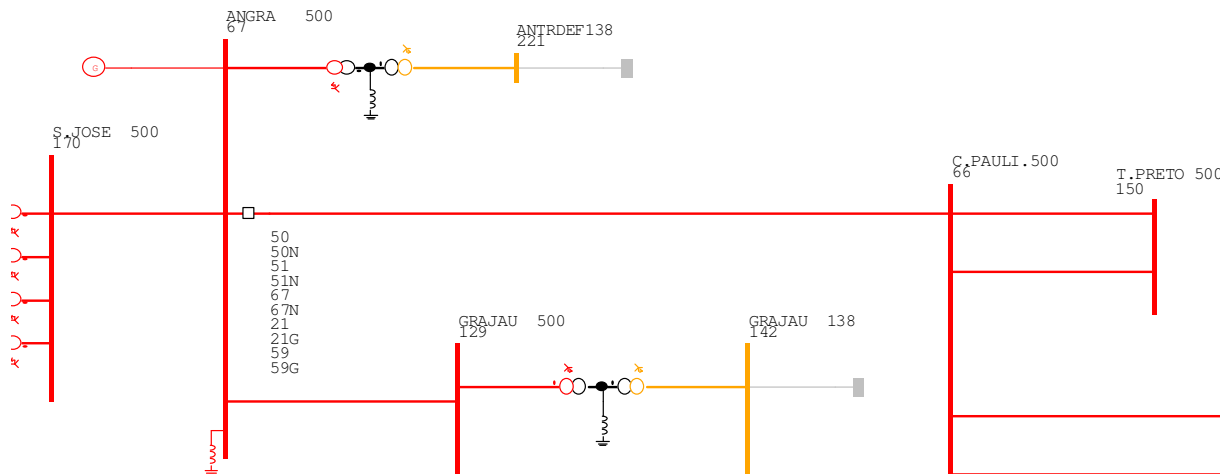


Figura 20 – Representação gráfica da LT Angra – C. Paulista e de sua vizinhança.

Foram acrescentados dados de relés 50, 50N, 51, 51N, 67, 67N, 21, 21G, 59 e 59G no terminal de Angra 500 kV da LT Angra – C. Paulista (Figura 20). Em uma configuração real, dificilmente seriam utilizados todos estes tipos de relés simultaneamente. Entretanto, é útil para a validação verificar o comportamento conjunto destes.

#### 4.1.1 Parâmetros dos relés

Nas Tabelas seguintes são listados os parâmetros dos relés utilizados nas simulações. Todos estão conectados no terminal 67 da LT 67-66:1. A Relação de Transformação do TC (RTC) foi ajustada em 2000:5 (ou 400:1) e a Relação de Transformação do TP 500000:115 (ou 4347,8:1).

**Tabela 1: Parâmetros do Relé Instantâneo de Fase (50)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Instantâneo Fase”
Corrente de <i>Pickup</i>	10,98 A
Tempo de Retardo	0,066 s

**Tabela 2: Parâmetros do Relé Instantâneo de Neutro (50N)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Instantâneo Neutro”
Corrente de <i>Pickup</i>	7,91 A
Tempo de Retardo	0,033 s
Grandeza de Operação	“3I0”

**Tabela 3: Parâmetros do Relé Temporizado de Fase (51)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Temporizado Fase”
Multiplicador de Tempo	0,21
Tape de Corrente	1,5 A
Tipo de Curva	“IEC Normal Inversa”
Tempo de Retardo	0 s

**Tabela 4: Parâmetros do Relé Temporizado de Neutro (51N)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Temporizado Neutro”
Multiplicador de Tempo	0,18
Tape de Corrente	1,5 A
Tipo de Curva	“IEC Normal Inversa”
Grandeza de Operação	“3I0”
Tempo de Retardo	0 s

**Tabela 5: Parâmetros do Relé de Sobrecorrente Direcional de Fase (67)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Direcional Fase”
Indicador Unidade Instantânea	Habilitada (“L”)
Corrente de <i>Pickup</i>	10,98 A
Indicador Unidade Temporizada	Habilitada (“L”)
Multiplicador de Tempo	0,21
Tape de Corrente	1,5 A
Tipo de Curva	“IEC Normal Inversa”
Tempo de Retardo	0 s
Tipo de Direcional	“Vbc,Ia”
Ângulo 1 (Máximo Conjugado)	+30°

**Tabela 6: Parâmetros do Relé de Sobrecorrente Direcional de Neutro (67N)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Direcional Neutro”
Indicador Unidade Instantânea	Habilitada (“L”)
Corrente de <i>Pickup</i>	7,91 A
Indicador Unidade Temporizada	Habilitada (“L”)
Multiplicador de Tempo	0,18
Tape de Corrente	1,5 A
Tipo de Curva	“IEC Normal Inversa”
Tempo de Retardo	0 s
Tipo de Direcional	“V0,I0”
Ângulo 1 (Máximo Conjugado)	-90°
Grandeza de Operação	“3I0”

**Tabela 7: Parâmetros do Relé de Sobretensão de Fase (59)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Sobretensão Fase”
Tensão Máxima	64.80
Tempo de Retardo	1 s

**Tabela 8: Parâmetros do Relé de Sobrecorrente de Neutro (59G)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Sobretensão Neutro”
Tensão Máxima	12.48
Tempo de Retardo	1 s

Nos relés de distância digitais, é usual que um único equipamento disponibilize 3, 4 ou 5 zonas diferentes de proteção. Na modelagem implementada, é necessário representar cada zona como um relé diferente. Posteriormente, poderão ser adicionados novos modelos de relés de distância com diversas zonas em um único elemento. A seguir são informados os dados necessários para representar as três zonas de um relé de distância com característica MHO (3 zonas para faltas fase-fase, 3 para faltas fase-terra), um relé de 3 zonas com característica Quadrilateral 1 (unidade de fase e unidade de terra) e 3 zonas de um relé com característica Quadrilateral 2 (unidade de fase e unidade de terra). No total, são necessárias 18 unidades para representar os três relés.

**Tabela 9: Parâmetros do Relé de Distância (21 - Unidade de FASE) – Característica MHO, Zona 1**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z1 MHO”
Característica	“MHO”
Módulo Impedância (Zr_Mod)	2,8987 $\Omega$
Ângulo Impedância (Zr_Ang)	86,5°
Tempo de Retardo	0 s
Tensão de Polarização	“VBC pré-falta”

**Tabela 10: Parâmetros do Relé de Distância (21 - Unidade de FASE) – Característica MHO, Zona 2**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z2 MHO”
Característica	“MHO”
Módulo Impedância (Zr_Mod)	4,2628 $\Omega$
Ângulo Impedância (Zr_Ang)	86,5°
Tempo de Retardo	0,5 s
Tensão de Polarização	“VBC pós-falta”

**Tabela 11: Parâmetros do Relé de Distância (21 - Unidade de FASE) – Característica MHO, Zona 3**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z3 MHO”
Característica	“MHO”
Módulo Impedância (Zr_Mod)	11,4 $\Omega$
Ângulo Impedância (Zr_Ang)	86,5°
Tempo de Retardo	1,0 s
Tensão de Polarização	“VBC pós-falta”

**Tabela 12: Relé de Distância (21G - Unidade de TERRA) – Característica MHO, Zona 1**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z1 MHO”
Característica	“MHO”
Módulo Impedância (Zr_Mod)	2,8987 $\Omega$
Ângulo Impedância (Zr_Ang)	86,5°
Tempo de Retardo	0 s
Tensão de Polarização	“VA pós-falta”

**Tabela 13: Relé de Distância (21G - Unidade de TERRA) – Característica MHO, Zona 2**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z2 MHO”
Característica	“MHO”
Módulo Impedância (Zr_Mod)	4,2628 $\Omega$
Ângulo Impedância (Zr_Ang)	86,5°
Tempo de Retardo	0,5 s
Tensão de Polarização	“VA pós-falta”

**Tabela 14: Relé de Distância (21G - Unidade de TERRA) – Característica MHO, Zona 3**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z3 MHO”
Característica	“MHO”
Módulo Impedância (Zr_Mod)	11,4 $\Omega$
Ângulo Impedância (Zr_Ang)	86,5°
Tempo de Retardo	1,0 s
Tensão de Polarização	“VA pós-falta”

**Tabela 15: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 1**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z1 QUAD1”
Característica	“QUAD1”
Reatância (X)	2,8933 $\Omega$
Resistência (R)	0,1768 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	2,5 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0 s

**Tabela 16: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 2**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z2 QUAD1”
Característica	“QUAD1”
Reatância (X)	4,2548 $\Omega$
Resistência (R)	0,2601 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	3,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0,5 s

**Tabela 17: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 3**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z3 QUAD1”
Característica	“QUAD1”
Reatância (X)	11,3787 $\Omega$
Resistência (R)	0,6959 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	3,5 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	1,0 s



**Tabela 18: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 1**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z1 QUAD1”
Característica	“QUAD1”
Reatância (X)	2,8933 $\Omega$
Resistência (R)	0,1768 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	3,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0 s

**Tabela 19: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 2**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z2 QUAD1”
Característica	“QUAD1”
Reatância (X)	4,2548 $\Omega$
Resistência (R)	0,2601 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	7,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0,5 s

**Tabela 20: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 1, Zona 3**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z3 QUAD1”
Característica	“QUAD1”
Reatância (X)	11,3787 $\Omega$
Resistência (R)	0,6959 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	9,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	1,0 s

**Tabela 21: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 1**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z1 QUAD2”
Característica	“QUAD2”
Reatância (X)	2,8933 $\Omega$
Resistência (R)	0,1768 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	2,5 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0 s

**Tabela 22: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 2**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z2 QUAD2”
Característica	“QUAD2”
Reatância (X)	4,2548 $\Omega$
Resistência (R)	0,2601 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	3,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0,5 s

**Tabela 23: Relé de Distância (21 - FASE) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 3**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z3 QUAD2”
Característica	“QUAD2”
Reatância (X)	11,3787 $\Omega$
Resistência (R)	0,6959 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	3,5 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	1,0 s

**Tabela 24: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 1**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z1 QUAD2”
Característica	“QUAD2”
Reatância (X)	2,8933 $\Omega$
Resistência (R)	0,1768 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	3,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0 s

**Tabela 25: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 2**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z2 QUAD2”
Característica	“QUAD2”
Reatância (X)	4,2548 $\Omega$
Resistência (R)	0,2601 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	7,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	0,5 s

**Tabela 26: Relé de Distância (21G - TERRA) – Característica QUADRILATERAL 2, Zona 3**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Identificação	“Distância Z3 QUAD2”
Característica	“QUAD2”
Reatância (X)	11,3787 $\Omega$
Resistência (R)	0,6959 $\Omega$
Resistência de Falta (Rf)	9,0 $\Omega$
Ângulo Inferior (AngInf)	-15°
Ângulo Superior (AngSup)	+115°
Tempo de Retardo	1,0 s

## 4.2 Validação das proteções de Sobrecorrente e de Sobretensão

A seguir são mostrados os resultados calculados pelo programa para as proteções de sobrecorrente e de sobretensão instaladas no terminal de Angra da linha de transmissão Angra – C. Paulista para faltas simuladas ao longo da linha. São mostrados resultados apenas de faltas monofásicas e trifásicas, pois estas se mostraram suficientes para avaliar o comportamento dos modelos, sem implicar em uma quantidade excessiva de informações.

### 4.2.1 Faltas monofásicas sólidas

Aplicando faltas monofásicas, na fase A, ao longo da linha, são obtidos os resultados resumidos na Tabela 27.

Tabela 27: Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente e sobretensão para faltas monofásicas ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista

Ponto em curto (% da LT Angra – Cachoeira Paulista)								
Relé	1% da LT	10	30	50	70	90	SE	10% da LT
	Angra-S.José						C.Pauli.	C.Pauli.-T.Preto
50	9999	0.066	0.066	0.066	9999	9999	9999	9999
50N	9999	0.033	0.033	0.033	0.033	9999	9999	9999
51	0.805	0.507	0.612	0.712	0.813	0.922	0.985	1.480
51N	1.710	0.411	0.493	0.573	0.660	0.776	0.880	1.390
67	9999	0.000	0.000	0.000	0.813	0.922	0.985	1.480
67N	9999	0.000	0.000	0.000	0.000	0.776	0.880	1.390
59	9999	1.000	1.000	1.000	1.000	9999	9999	1.000
59G	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	9999	9999	9999

Segundo os dados da tabela, o relé instantâneo de fase (código 50), com o *pickup* ajustado em 10,98 A, opera para faltas até pouco mais de 50% da linha e deixa de operar entre 50 e 70 %. Aplicando faltas em intervalos mais curtos, a simulação aponta que o relé cobriria faltas monofásicas até 52% da LT. Na falta reversa, no início da LT Angra – S. José, o relé não atua porque a corrente fica abaixo do *pickup*.

O relé instantâneo de neutro (50N) opera para faltas até 70% da linha e deixa de operar em algum ponto entre 70 e 90%. O ajuste deste dispositivo foi feito de maneira a cobrir 85% da LT e isto pode ser confirmado simulando faltas em 84, 85 e 86%. O relé opera até 85%.

O relé temporizado de fase (51) opera para faltas ao longo de toda a linha. Seu tempo de atuação cresce a medida que a falta se distancia de Angra. Funciona também como proteção de retaguarda para a LT C. Paulista – Tijuco Preto, caso a proteção da própria linha não atue. Pode-se ver que a unidade operaria também para uma falta na LT Angra – S. José, o que normalmente não é desejável.

O relé de neutro (51N) se comporta de maneira similar ao de fase. Opera para faltas ao longo da linha, com tempo de atuação cada vez maior, funciona como retaguarda e opera também na falta reversa.

O relé direcional de fase (67) opera para faltas ao longo da linha. Até pouco mais de 50%, sua unidade instantânea é acionada e seu tempo de atuação é praticamente zero. Para faltas além de 70%, sua unidade instantânea deixa de atuar, restando a temporizada, que opera com tempo cada vez maior. Funciona como retaguarda para a LT C. Paulista – T. Preto. Na falta reversa, apesar da corrente ser elevada, sua unidade direcional bloqueia a atuação.

A unidade direcional de neutro (67N) se comporta de maneira similar à de fase, operando para faltas ao longo da linha, funcionando como retaguarda e bloqueando a atuação durante a falta na LT Angra – S. José.

A unidade de sobretensão de fase (59), com o ajuste de tensão máxima em 64,80 V, operaria para faltas até pouco mais de 70% da LT e na falta em 10% da LT C. Paulista - Tijuco Preto, por conta da elevação de tensão nas fases sãs (B e C). A de neutro (59G), para faltas até 70% e também na falta reversa, já que a falta envolvendo a terra provoca componentes de tensões de sequência zero.

As figuras seguintes (Figura 21 à Figura 28) ilustram as faltas descritas na Tabela 27.

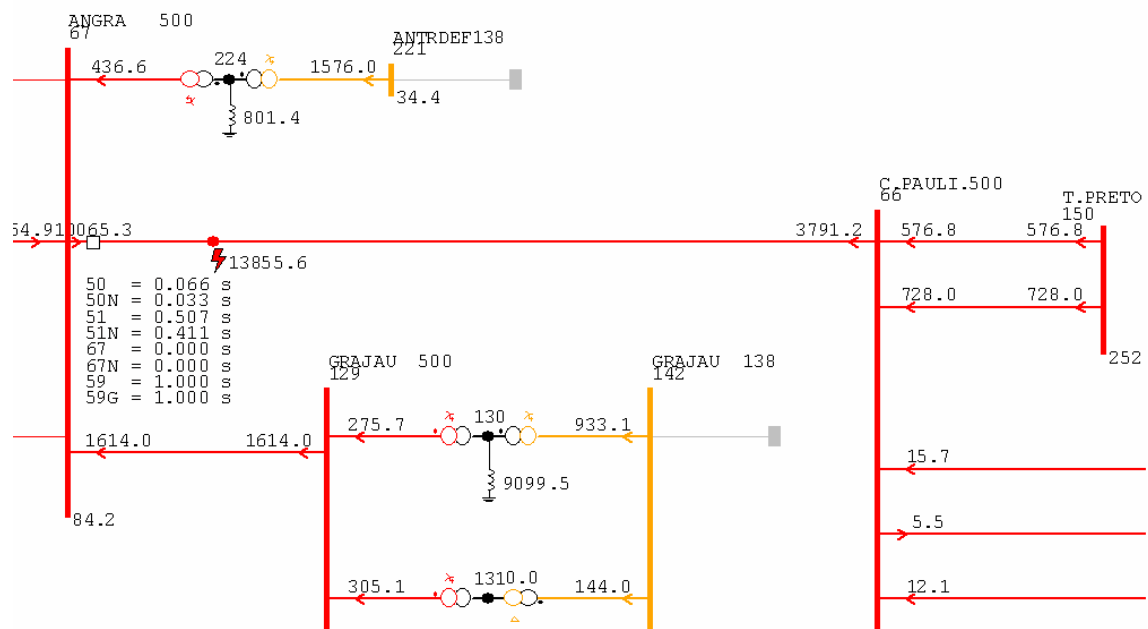


Figura 21 - Falta A-T a 10% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

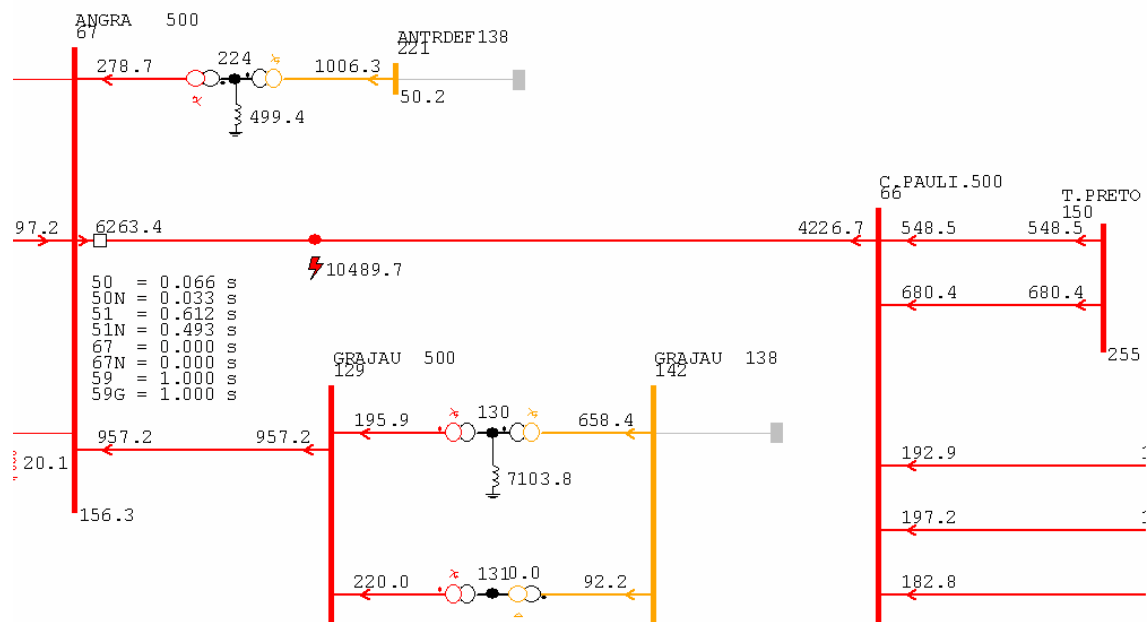


Figura 22 - Falta A-T a 30% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

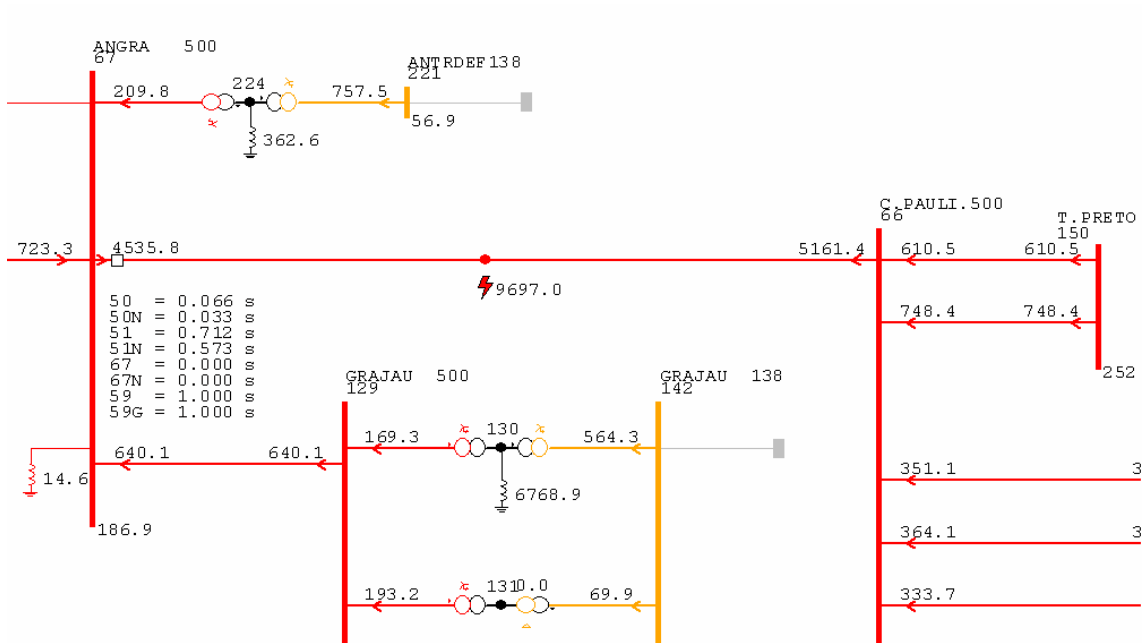


Figura 23 - Falta A-T a 50% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

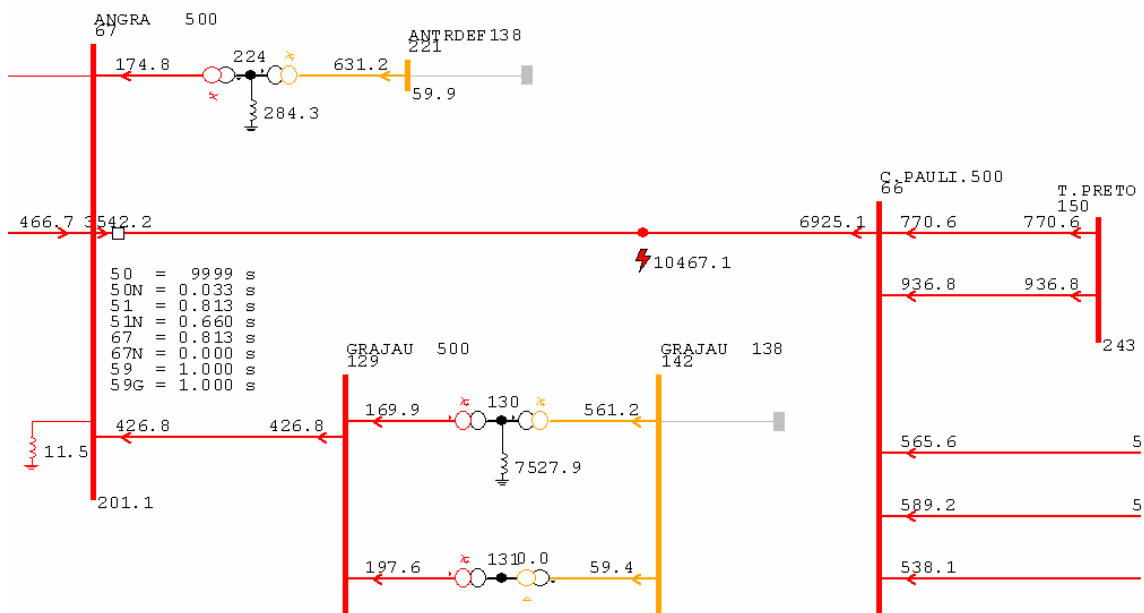


Figura 24 - Falta A-T a 70% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

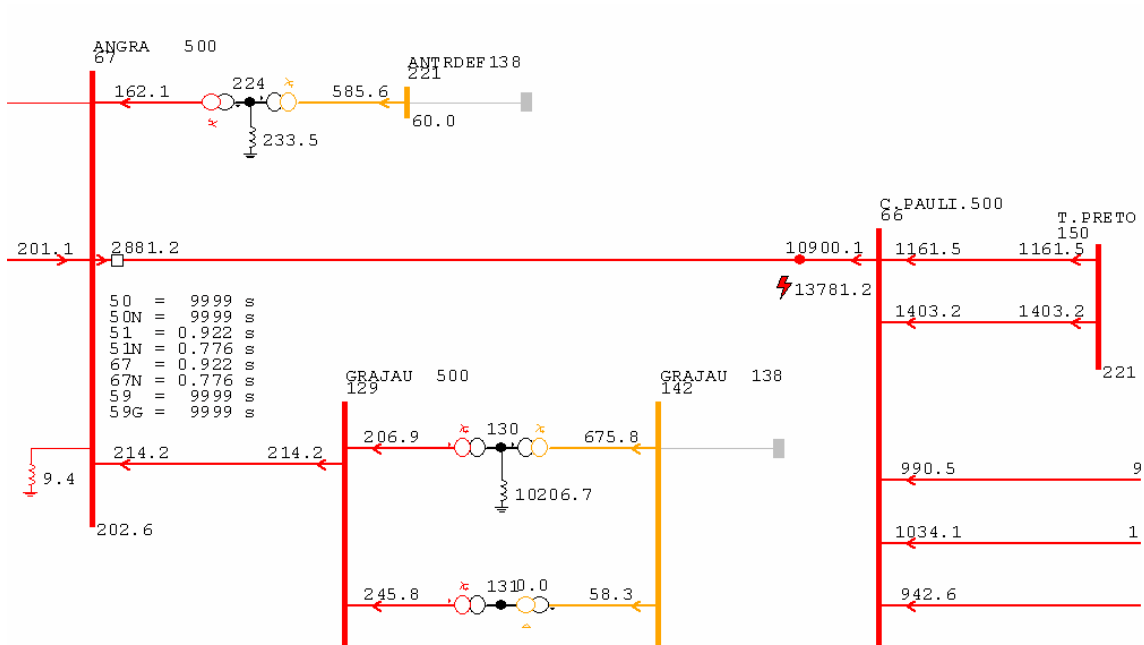


Figura 25 – Falta A-T a 90% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

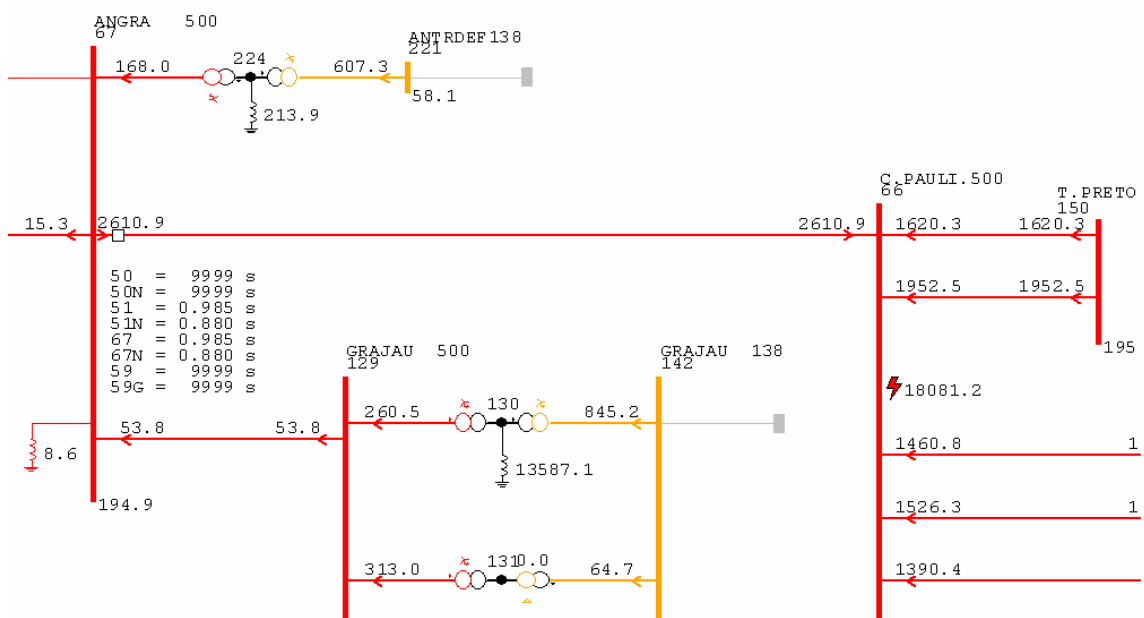


Figura 26 - Falta A-T na SE C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A



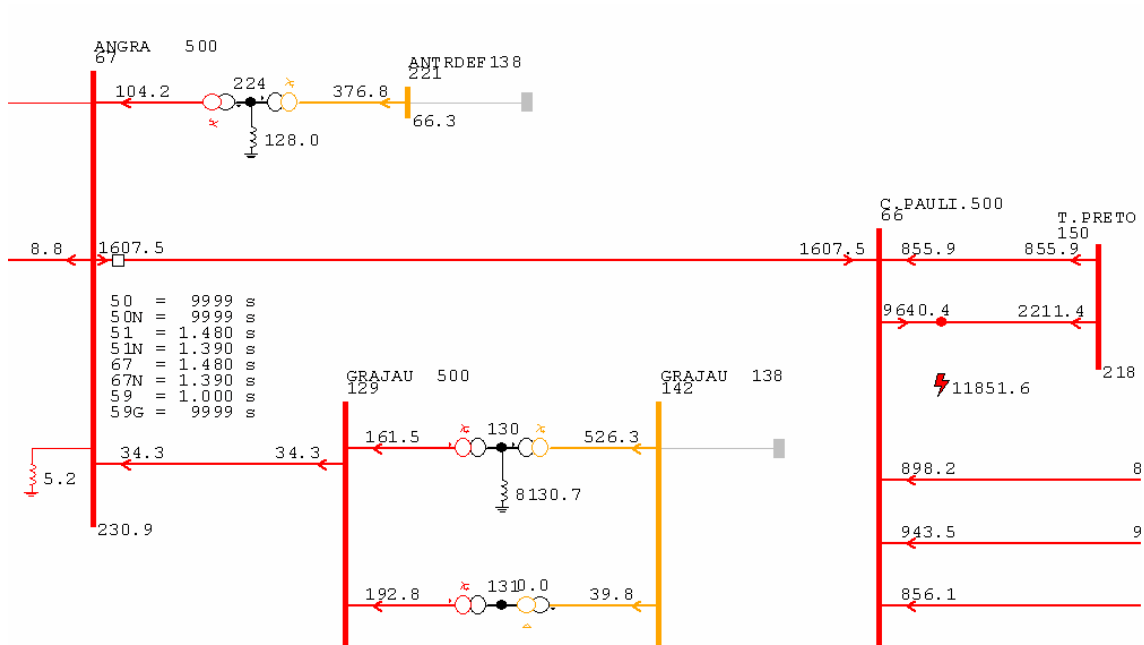


Figura 27 - Falta A-T a 10% da LT C. Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

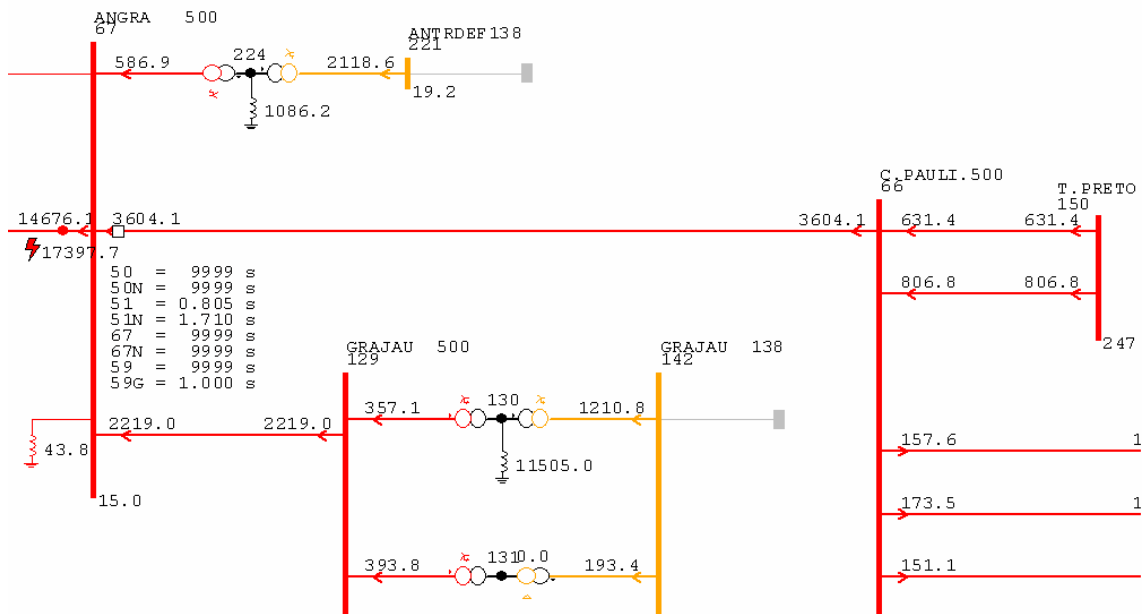


Figura 28 - Falta A-T a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

## 4.2.2 Faltas trifásicas sólidas

Ao aplicar faltas trifásicas ao longo da linha, são obtidos os resultados da Tabela 28.

Tabela 28: Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente e sobretensão para faltas trifásicas ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista

Ponto em curto (% da LT Angra – Cachoeira Paulista)								
Relé	1% da LT Angra-S.José	10	30	50	70	90	SE C.Pauli.	10% da LT C.Pauli.-T.Preto
50	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	9999	9999	9999
50N	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
51	0.703	0.498	0.552	0.607	0.668	0.747	0.809	0.970
51N	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
67	9999	0.000	0.000	0.000	0.000	0.747	0.809	0.970
67N	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
59	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
59G	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999

A unidade de sobrecorrente instantânea de fase (50) agora cobre um trecho maior da linha. Isto ocorre porque as contribuições que circulam nas fases durante um curto-circuito trifásico, nesta configuração e nesta LT, são maiores que as que circulam durante uma falta monofásica e o *pickup* desta unidade é o mesmo para todo tipo de defeito. Operaria também para uma falta atrás do relé.

A unidade de sobrecorrente instantânea de neutro (50N) não opera durante as faltas trifásicas. O mesmo vale para as proteções 51N, 67N e 59G. Isto se deve ao fato de que, durante um defeito equilibrado, as componentes de seqüência zero das correntes e tensões é praticamente nula. O mesmo ocorre em qualquer falta que não envolva a terra, mesmo as desequilibradas (por exemplo, faltas fase-fase).

A proteção temporizada de fase (51) opera para curto ao longo de toda a linha,

funciona como proteção de retaguarda para a LT C. Paulista – T. Preto, porém operaria também na falta reversa.

Já a proteção direcional de fase (67) opera para curto ao longo de toda a linha, funciona como retaguarda e sua unidade direcional bloqueia a atuação durante a falta reversa.

A proteção de sobretensão de fase (59) não opera em nenhum defeito pois, ao contrário das faltas monofásicas, para as quais existe a tendência de que as fases sãs tenham elevação na tensão, nas faltas trifásicas há redução na tensão de todas as fases.

Nas figuras seguintes (Figura 27 à Figura 36) são ilustradas as faltas trifásicas sólidas.

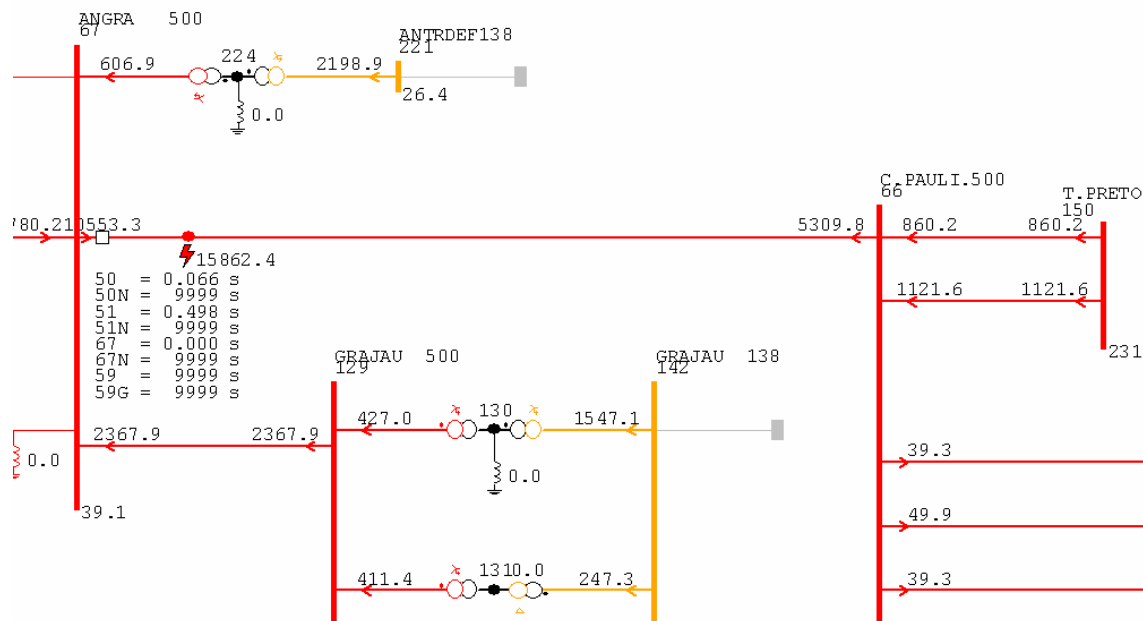


Figura 29 - Falta A-B-C a 10% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

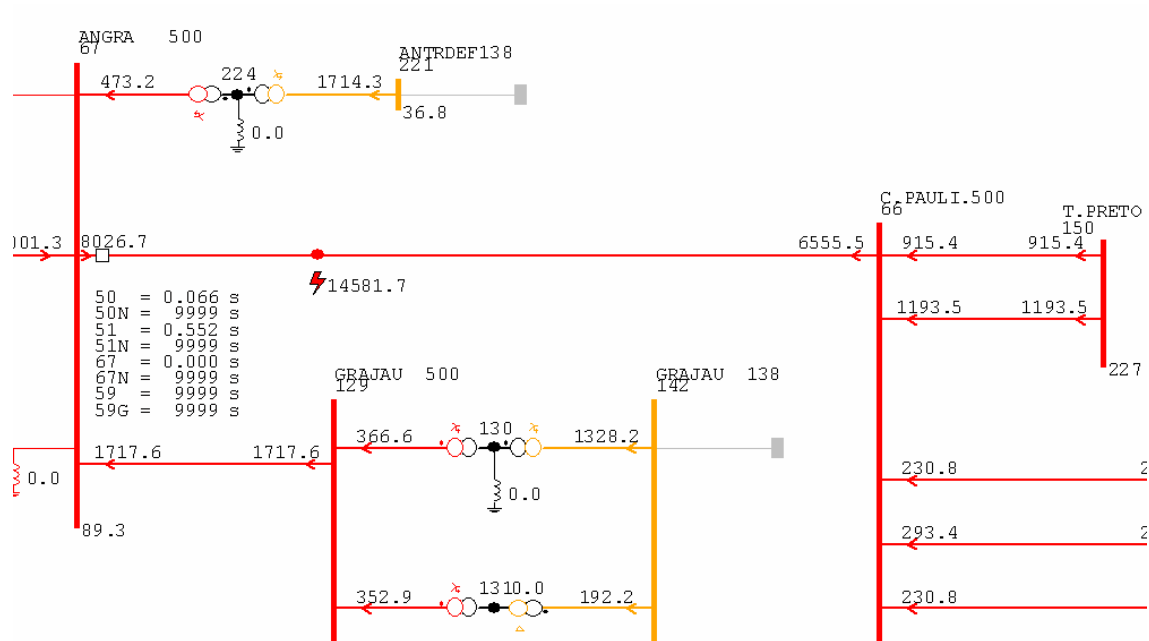


Figura 30 - Falta A-B-C a 30% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

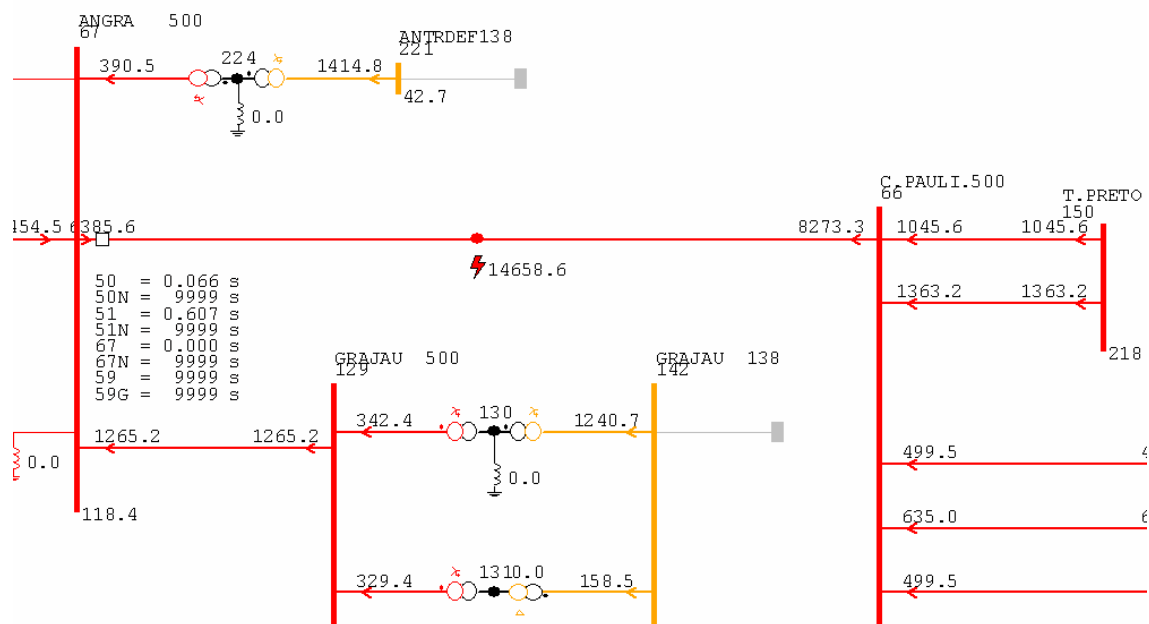


Figura 31 - Falta A-B-C a 50% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

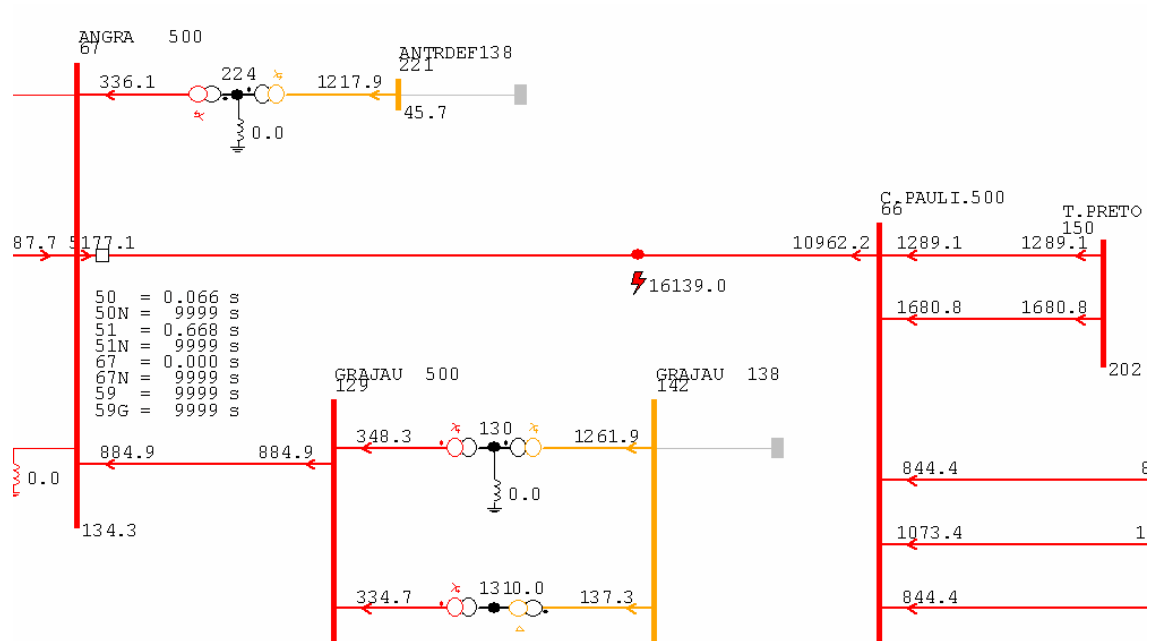


Figura 32 - Falta A-B-C a 70% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

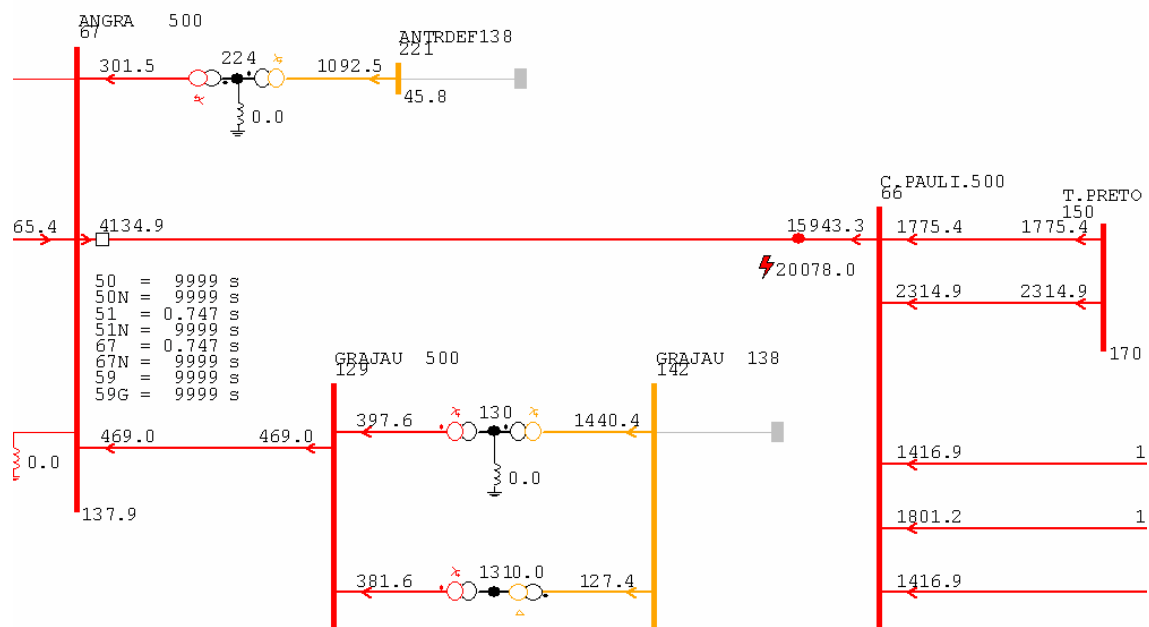


Figura 33 - Falta A-B-C a 90% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

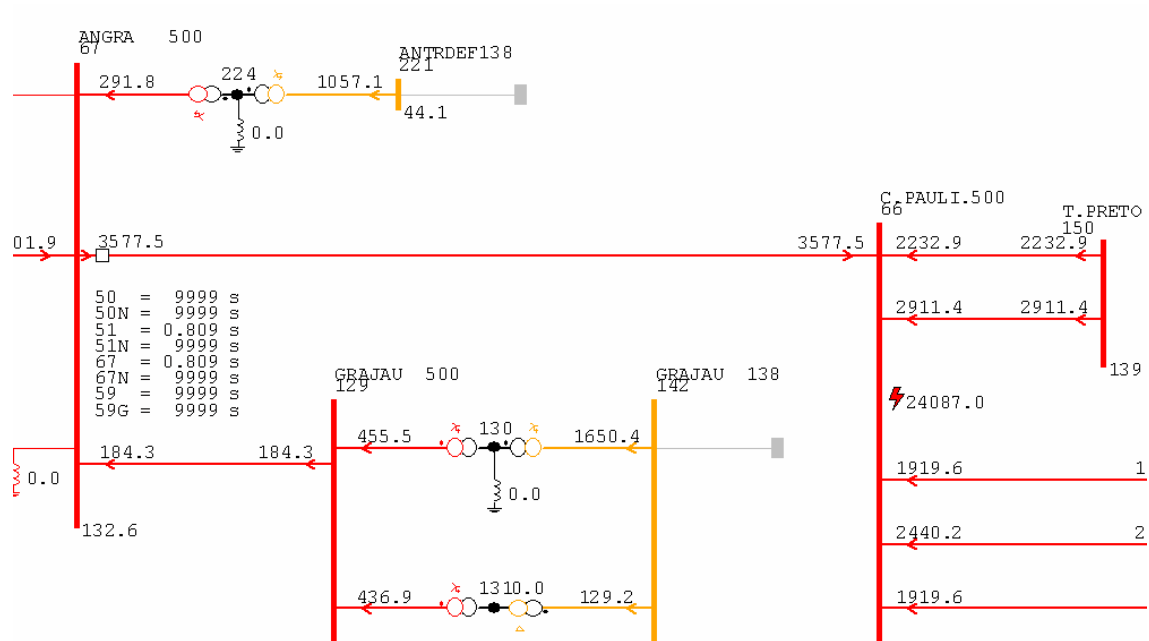


Figura 34 - Falta A-B-C na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

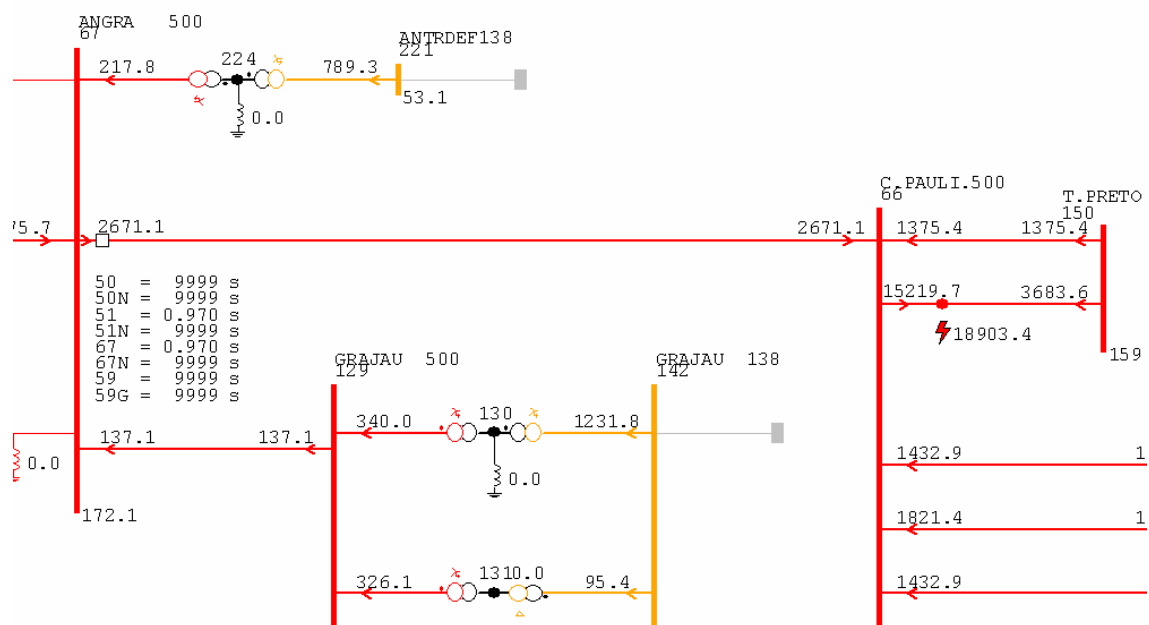


Figura 35 - Falta A-B-C a 10% da LT C. Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

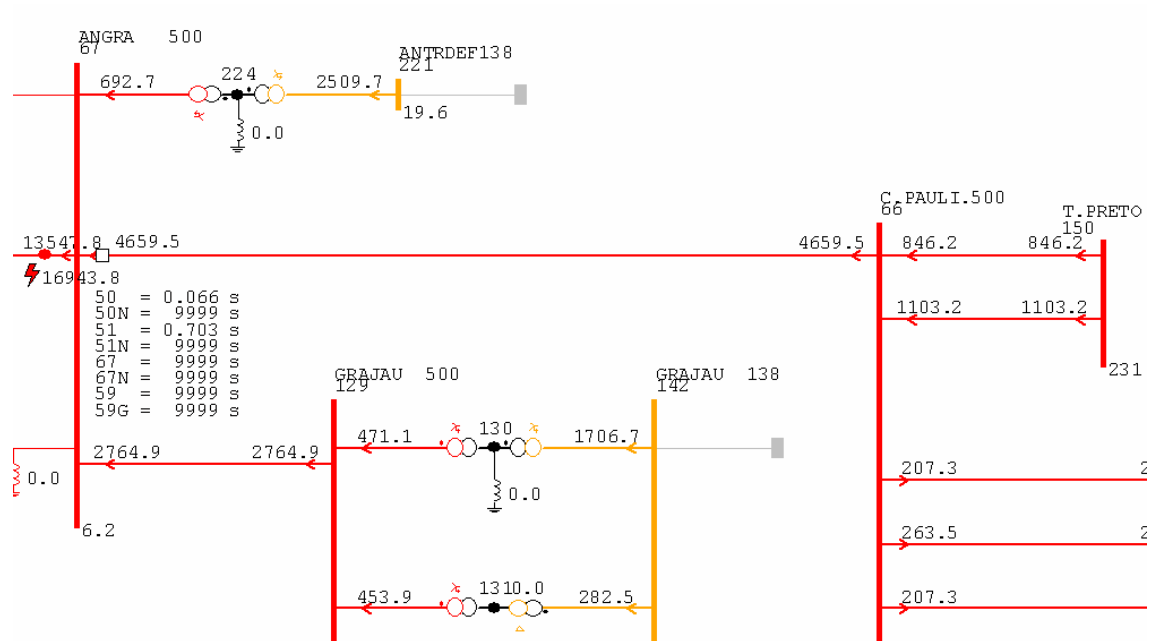


Figura 36 - Falta A-B-C a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

### 4.2.3 Falta monofásicas com resistência de $40\Omega$

Aplicando faltas monofásicas com resistência de 40 ohms ao longo da linha, são obtidos os resultados da Tabela 29.

A unidade instantânea de fase (50) passa a cobrir um percentual bastante reduzido da linha, pouco mais de 10%, tendo em vista que as correntes de curto ficam reduzidas em comparação com aquelas observadas em faltas sólidas.

A unidade instantânea de neutro (50N) cobre um percentual um pouco maior da LT, por volta de 30%.

A unidade temporizada de fase (51) atua para faltas ao longo da linha, porém em um tempo maior, também devido à redução do módulo das correntes de curto-circuito. Atua também na falta reversa.

O relé temporizado de neutro (51N) também atua para faltas ao longo da linha, com um tempo de atuação pouco menor que o da unidade de fase. Não atua na falta reversa porque as correntes são reduzidas.

Tabela 29: Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente e sobretensão para faltas monofásicas com resistência de  $40\Omega$  ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista

Ponto em curto (% da LT Angra – Cachoeira Paulista)								
Relé	1% da LT Angra-S.José	10	30	50	70	90	SE C.Pauli.	10% da LT C.Pauli.-T.Preto
50	9999	0.066	9999	9999	9999	9999	9999	9999
50N	9999	0.033	0.033	9999	9999	9999	9999	9999
51	1.780	0.712	0.829	0.988	1.240	1.910	3.260	5.340
51N	9999	0.566	0.655	0.777	0.982	1.570	3.220	6.720
67	9999	0.000	0.829	0.988	1.240	1.910	3.260	5.340
67N	9999	0.000	0.000	0.777	0.982	1.570	3.220	6.720
59	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
59G	1.000	1.000	1.000	9999	9999	9999	9999	9999

O relé direcional de fase (67) atua para faltas ao longo da linha. A resistência de falta altera bastante o ângulo de fase das correntes de curto. Entretanto, isso não impediu a unidade direcional de detectar corretamente o sentido da corrente na falta reversa e bloquear a atuação sobre o disjuntor.

O relé direcional de neutro se comportou de maneira semelhante à do relé de fase.

O relé de sobretensão de fase (59) opera em todas as faltas e o de neutro (59G) para faltas até pouco mais de 30% da linha.

As figuras seguintes ilustram as faltas com resistência.



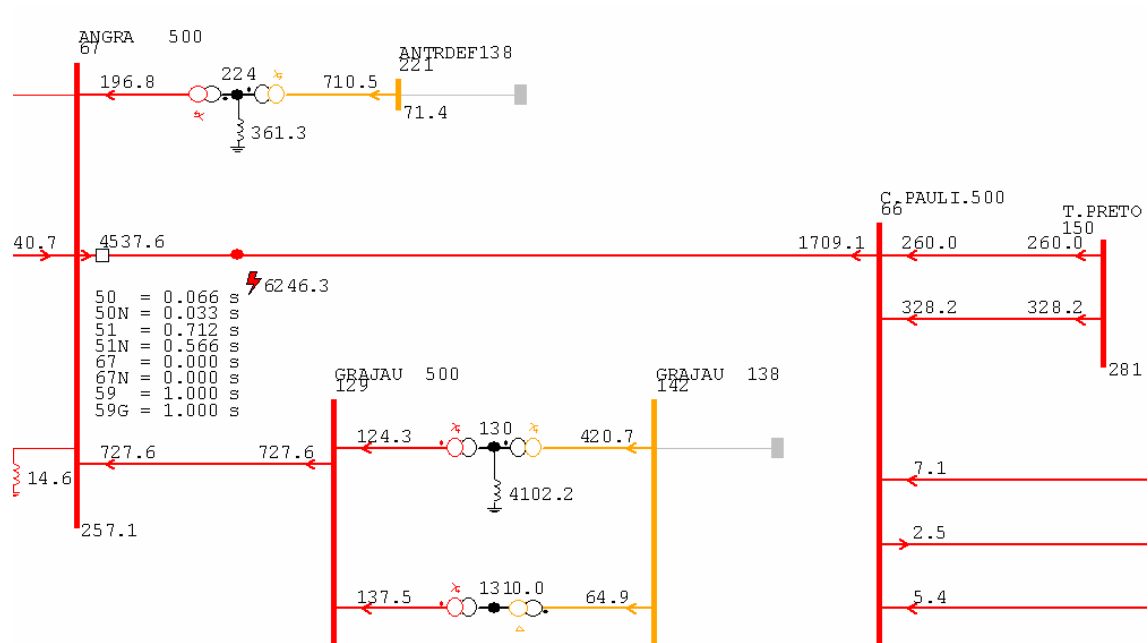


Figura 37 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 10% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

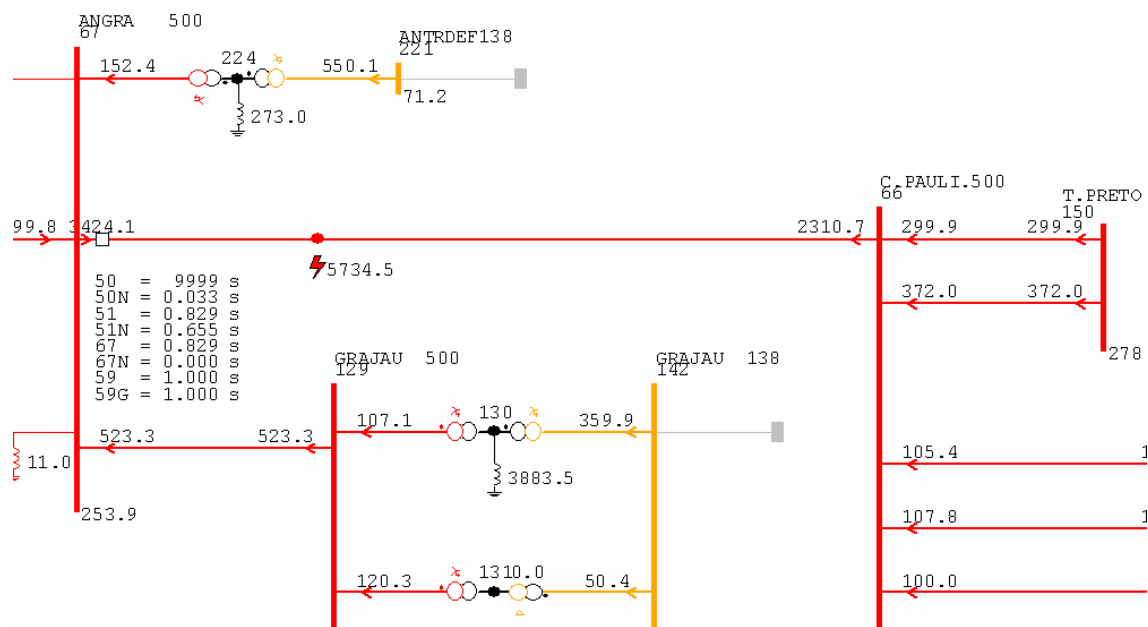


Figura 38 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 30% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

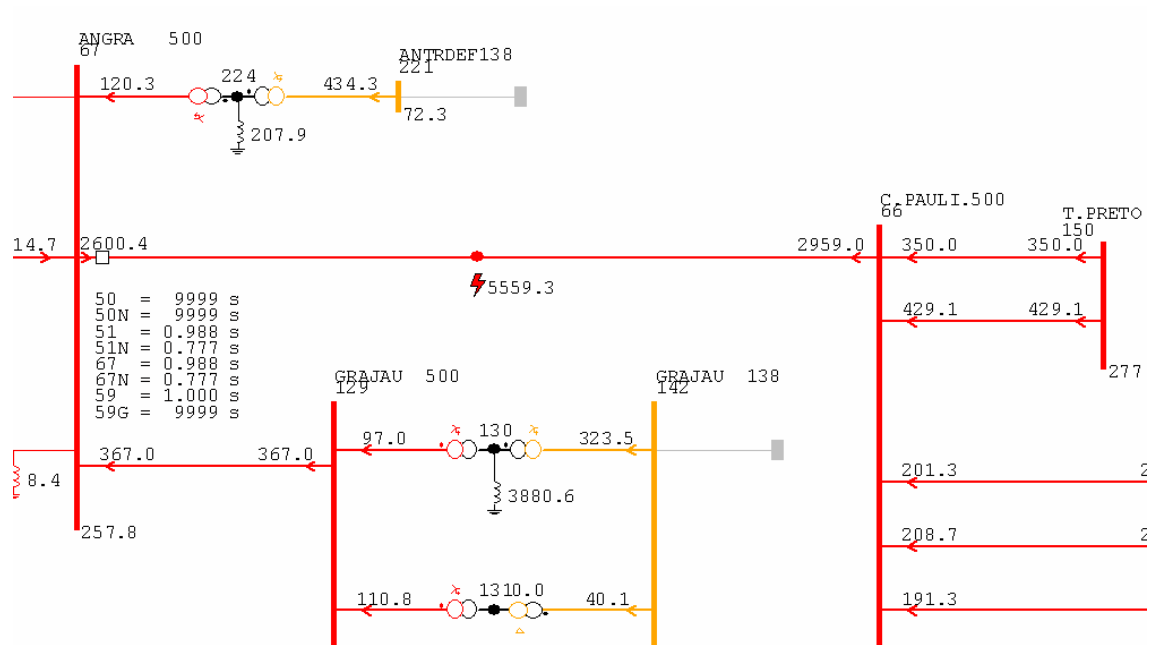


Figura 39 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 50% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

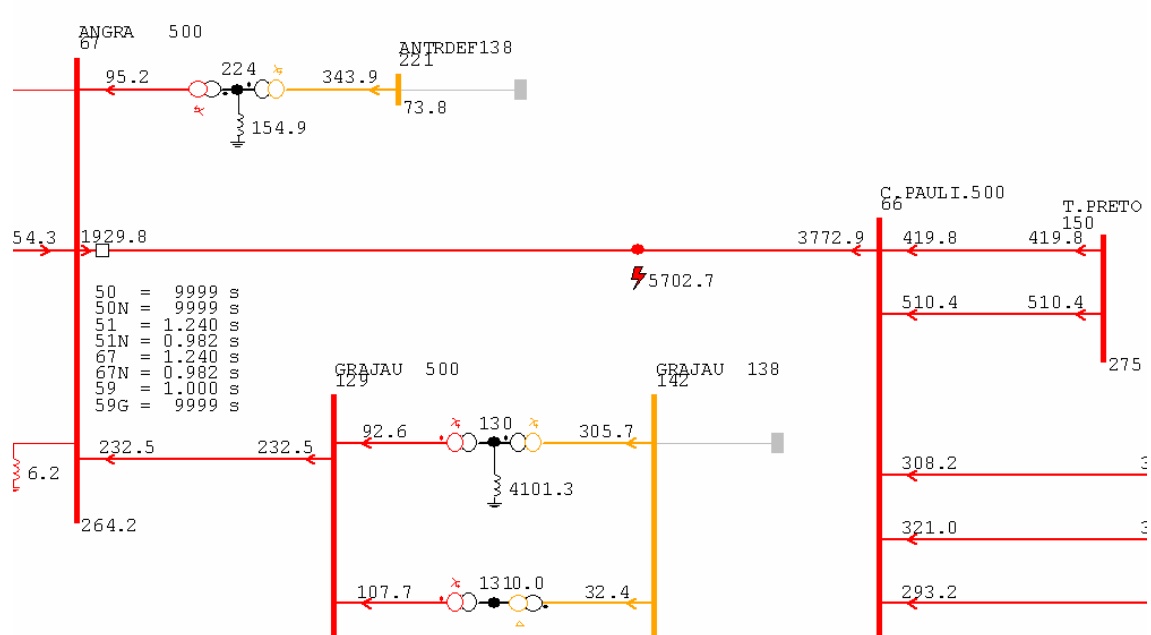


Figura 40 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 70% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

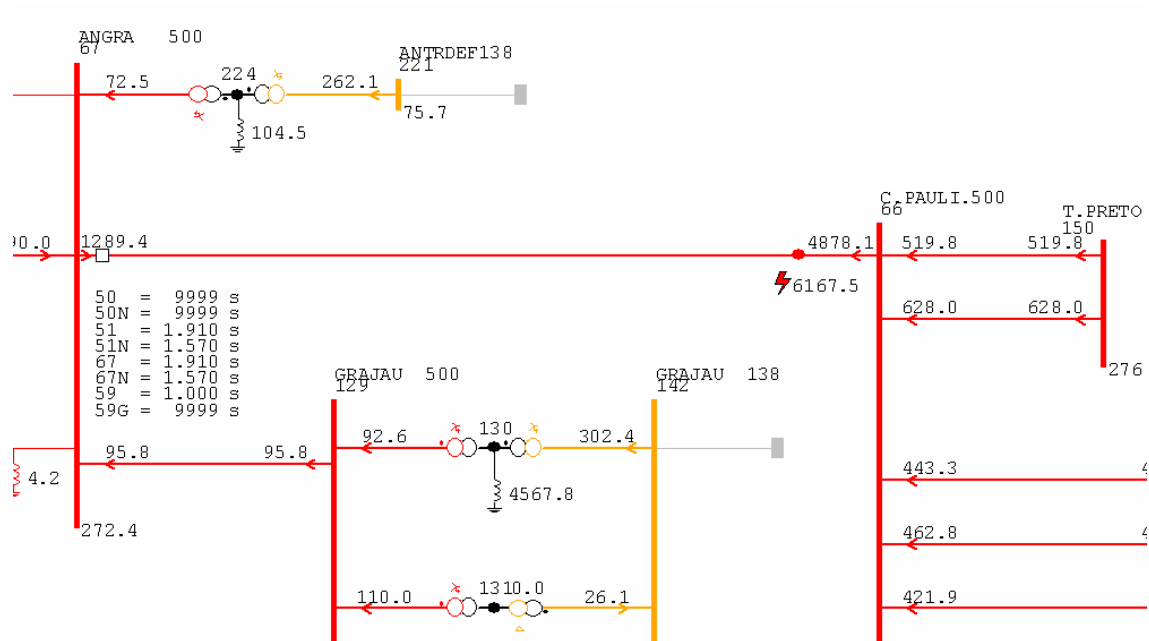


Figura 41 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 90% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

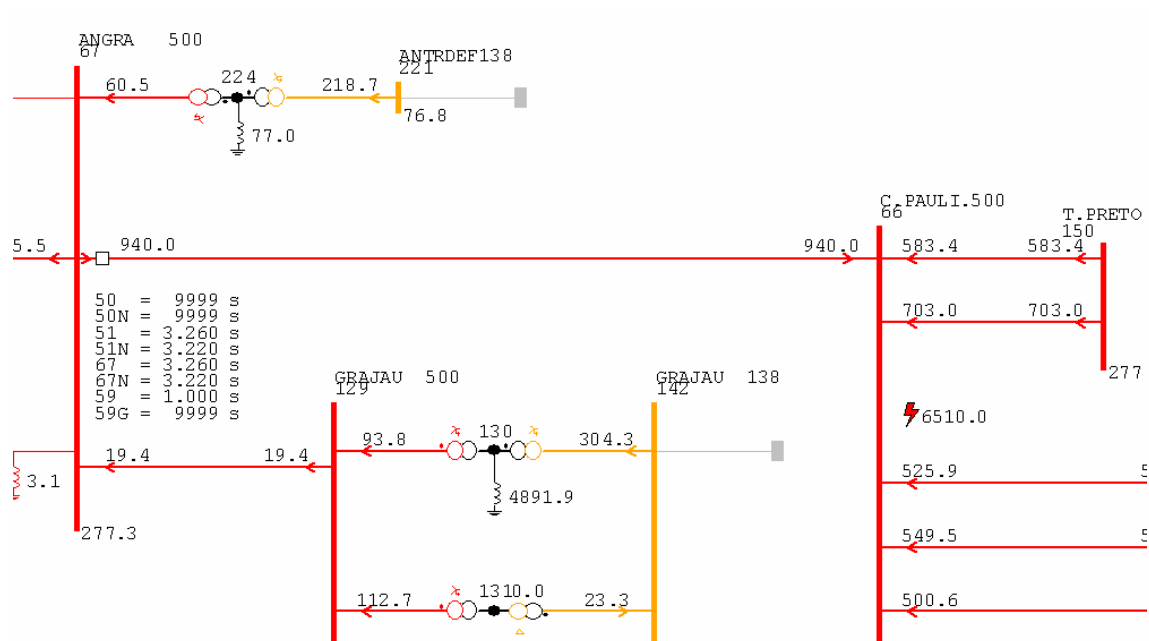


Figura 42 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

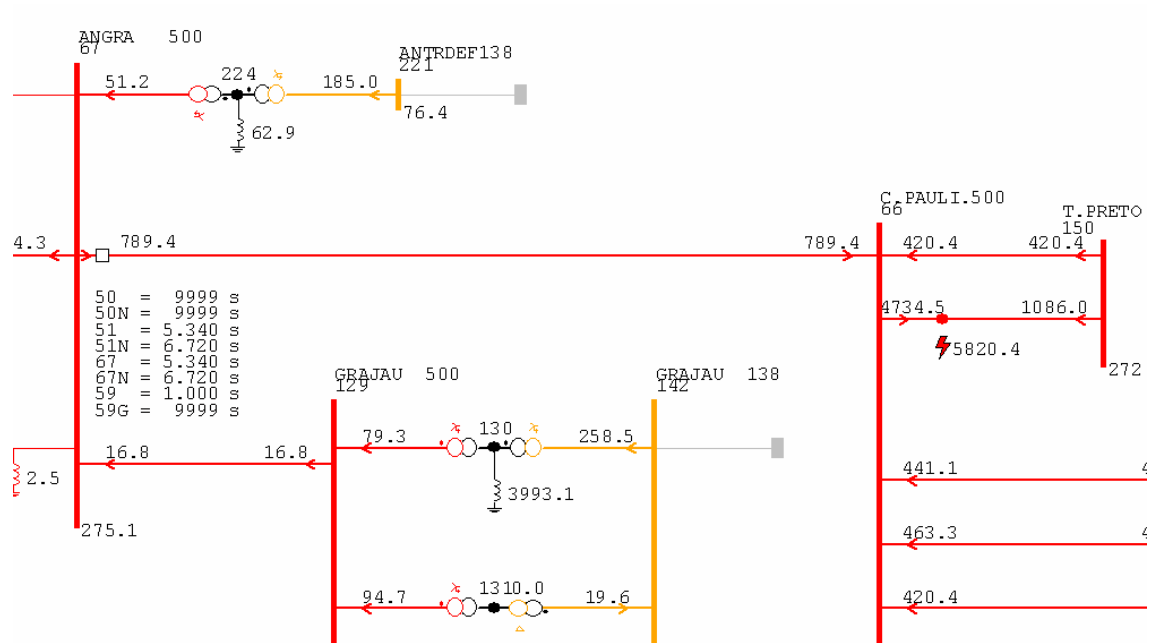


Figura 43 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 10% da LT C.Paulista – T.

Preto: Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão.

Contribuições em ampères, referentes à fase A

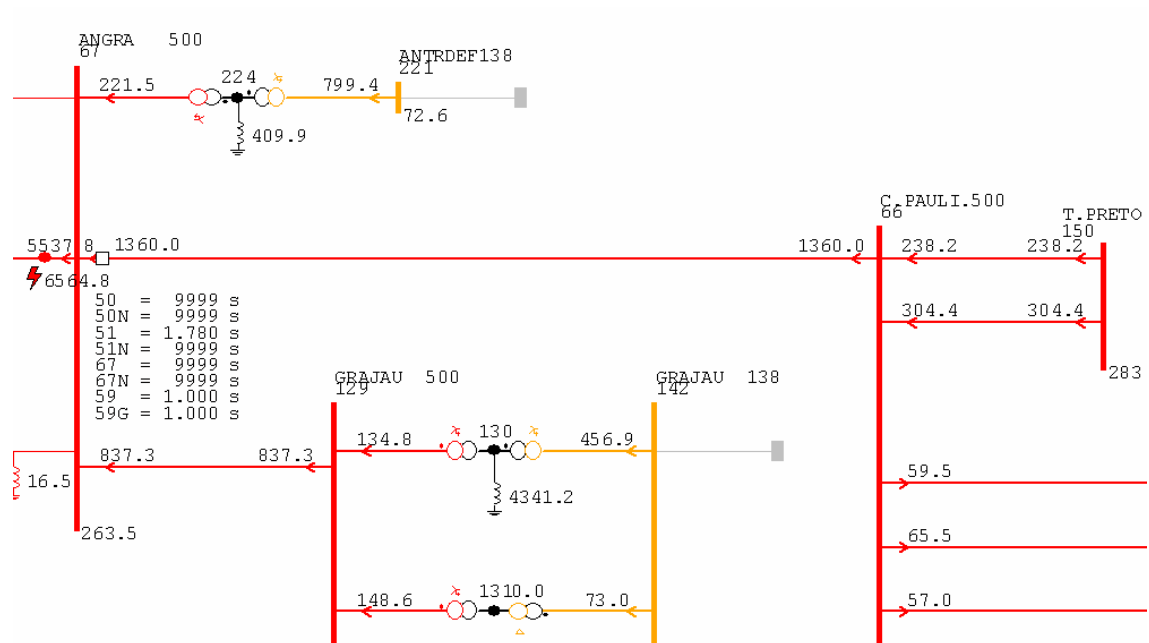


Figura 44 - Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 1% da LT Angra – S. José:

Tempo de atuação das proteções de sobrecorrente e de sobretensão. Contribuições em ampères, referentes à fase A

#### **4.2.4 Conclusões sobre a implementação dos relés de Sobrecorrente e de Sobretensão**

Os relés 50, 50N, 51, 51N, 67, 67N, 59 e 59G tiveram um comportamento adequado e dentro das expectativas durante as simulações. Não foi encontrado nenhum erro que invalide os modelos. Os modelos implementados permitem verificar o comportamento esperado dos relés frente a faltas com resistência, *infeeds*, *outfeeds*, carregamento pré-falta (não foi simulado, mas pode ser representado) etc.

### **4.3 Validação das proteções de Distância**

A seguir são mostrados os resultados calculados pelo programa para as proteções de distância instaladas no mesmo terminal (Angra 500 kV) frente às faltas simuladas ao longo da linha. São mostrados resultados de faltas monofásicas e de faltas fase-fase. As monofásicas são importantes para determinar o comportamento dos relés de terra. As fase-fase, para determinar o comportamento das unidades de fase.

#### **4.3.1 Faltas monofásicas sólidas**

A Tabela 30 resume os tempos de atuação obtidos para as unidades de distância ao aplicar faltas monofásicas, na fase A, ao longo da linha Angra – C. Paulista. Entenda-se por “-1%” uma falta aplicada a 1% da LT Angra-S.José (falta reversa) e por “110%”, falta em 10% da LT C.Paulista.-T.Preto (falta externa à linha Angra – C. Paulista).

Pode-se observar o comportamento dos modelos que representam as unidades de FASE. Seria desejável que nenhuma destas unidades operasse durante uma falta fase-terra. Entretanto, a unidade AB do relé com característica MHO opera para faltas monofásicas até pouco mais de 50% da LT, a unidade CA do mesmo opera até pouco mais de 30% da linha, e a unidade CA dos relés com característica Quadrilateral 1 e Quadrilateral 2 opera até pouco mais de 10%. Em todos estes casos, a atuação da unidade de fase não gera problemas, pois as unidades de terra correspondentes atuariam de qualquer maneira e em menos tempo.

Tabela 30: Tempos de atuação dos relés de distância para faltas monofásicas ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista

Ponto em curto (% da LT Angra – Cachoeira Paulista)								
Relé	-1%	10	30	50	70	90	SE C.Pauli.	110%
<b>Unidades de FASE</b>								
<b>MHO</b>								
Z1	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	AB,CA 1.0	AB,CA 1.0	AB 1.0	9999	9999	9999	9999
<b>QUAD1</b>								
Z1	9999	CA 0.0	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	CA 0.5	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	CA 1.0	9999	9999	9999	9999	9999	9999
<b>QUAD2</b>								
Z1	9999	CA 0.0	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	CA 0.5	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	CA 1.0	9999	9999	9999	9999	9999	9999
<b>Unidades de TERRA</b>								
<b>MHO</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	0.0	0.0	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>QUAD1</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	0.0	0.0	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>QUAD2</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	0.0	0.0	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Preocupante seria se, durante uma falta fase-terra no início de uma linha adjacente (“110% da linha”), para a qual deveria operar apenas a unidade A de segunda zona (Z2) de um dos relés após 500 milissegundos, uma das unidades de fase de primeira zona, por exemplo a AB Z1, operasse, abrindo o terminal instantaneamente para uma falta externa à linha.

A atuação das unidades de TERRA está perfeitamente normal. A primeira zona dos três tipos (Mho, Quadrilateral 1 e Quadrilateral 2) opera instantaneamente para faltas até pouco mais de 70% (foram ajustadas de maneira a cobrir 85% da linha), a segunda zona cobre até pouco além da SE C. Paulista, e a terceira opera como retaguarda, em um intervalo de tempo maior, para faltas nas linhas que saem de C. Paulista.

Nenhuma unidade operou na falta reversa.

Um comentário importante é que, neste caso, como a impedância série de seqüência positiva da LT tem ângulo próximo a 90 graus, as características Quadrilateral 1 e Quadrilateral 2 ficam muito parecidas, já que as retas que definem os limites de resistência de falta da característica Quadrilateral 2 ficam quase perpendiculares ao eixo R do plano R-X, assim como as da característica Quadrilateral 1.

As faltas simuladas são ilustradas nas figuras seguintes.

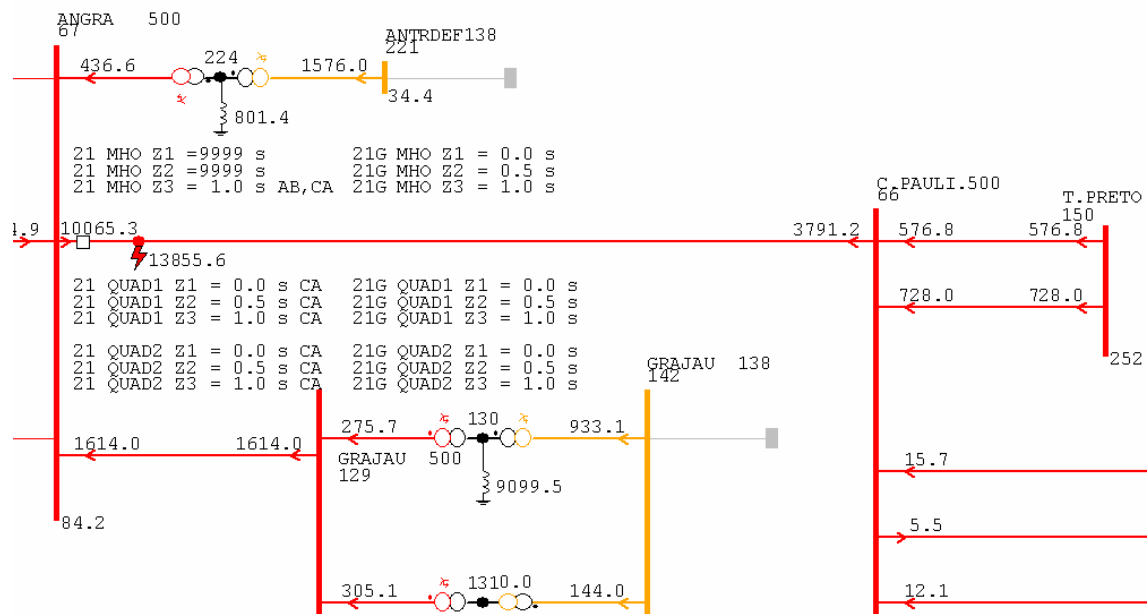


Figura 45 – Falta A-T a 10% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

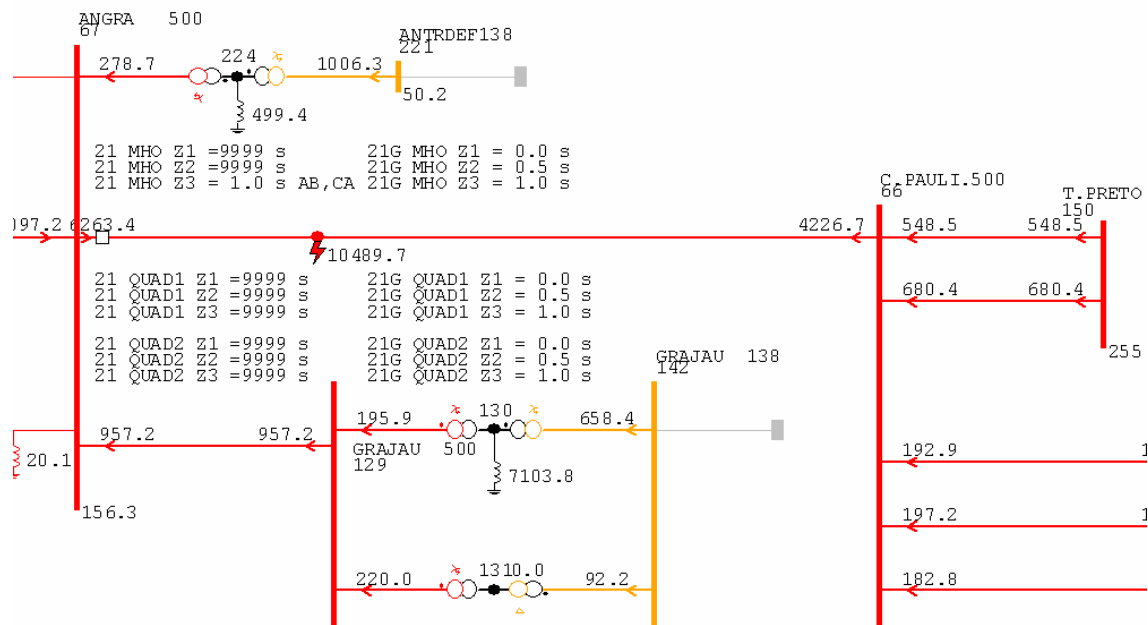


Figura 46 – Falta A-T a 30% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A



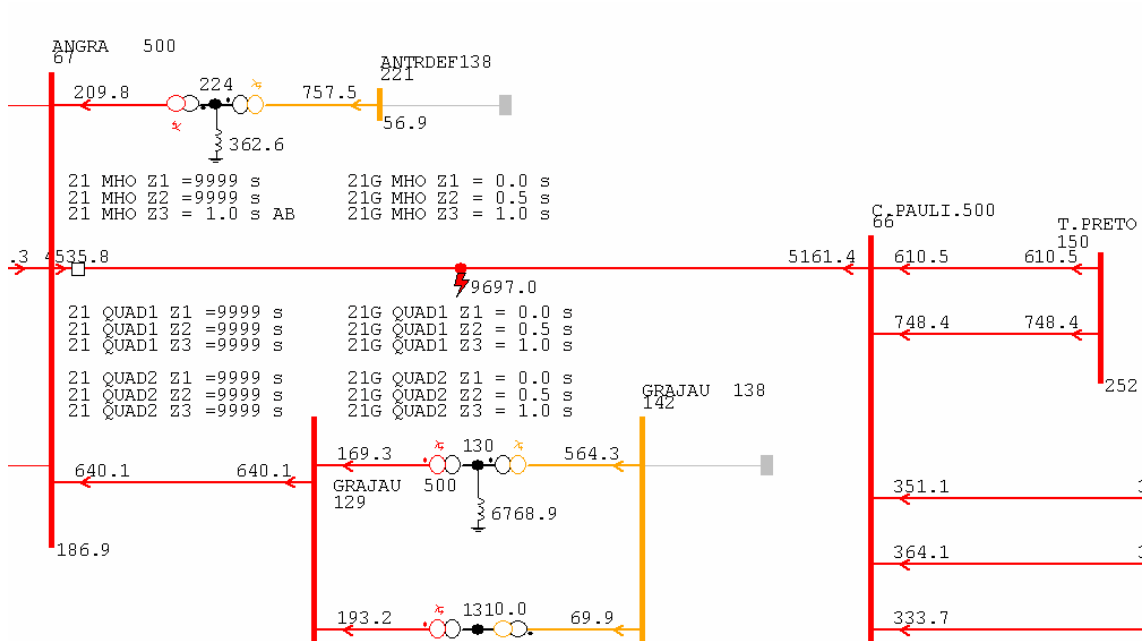


Figura 47 – Falta A-T a 50% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

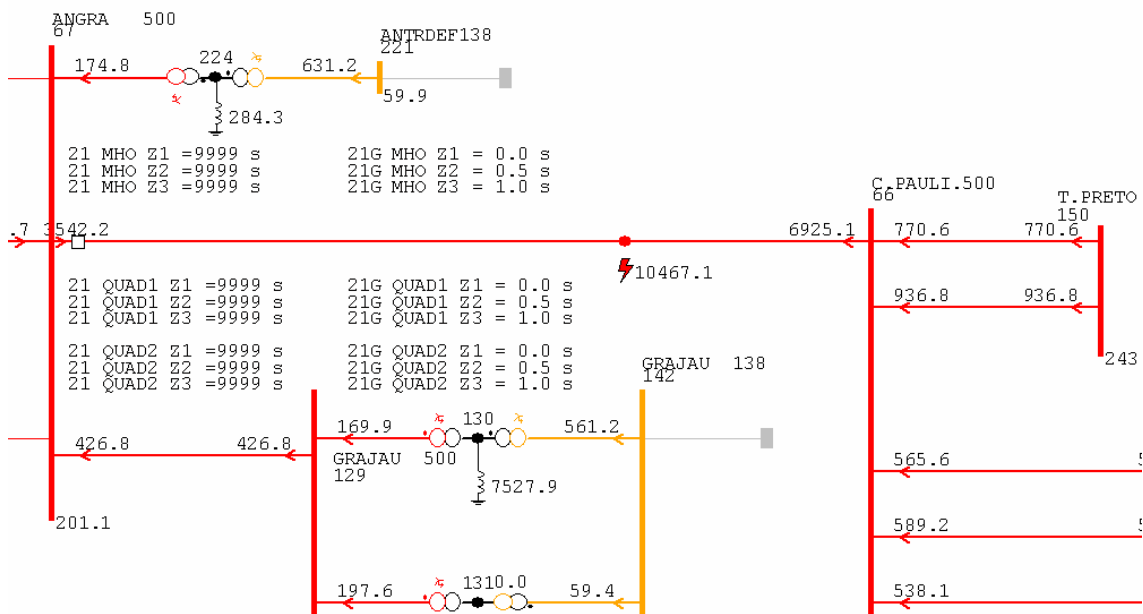


Figura 48 – Falta A-T a 70% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

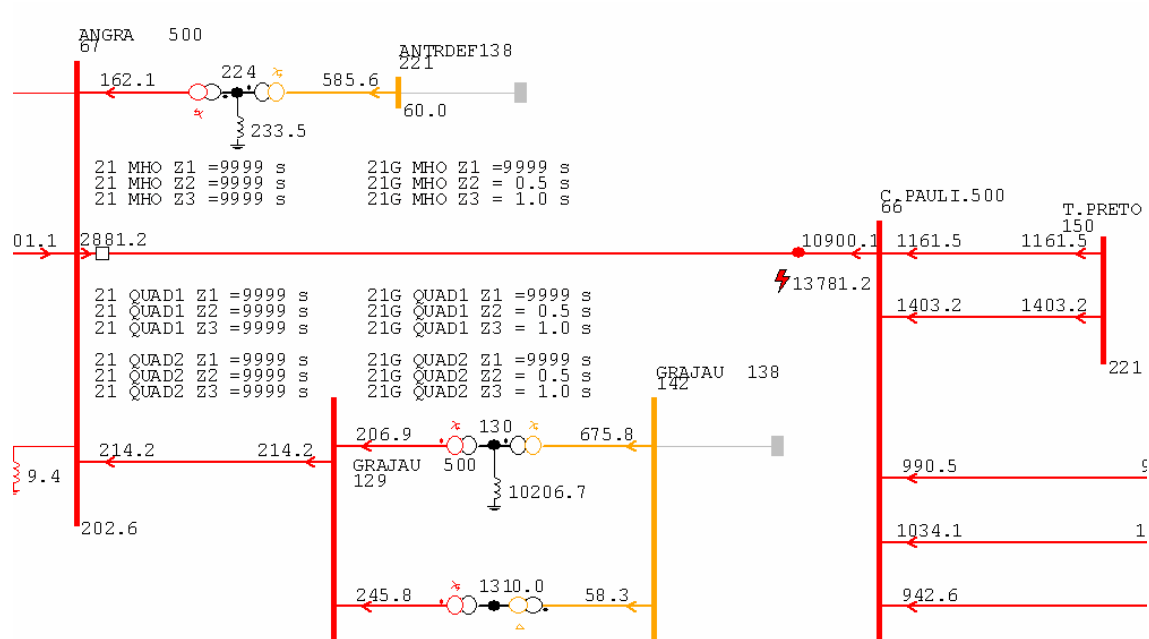


Figura 49 – Falta A-T a 90% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

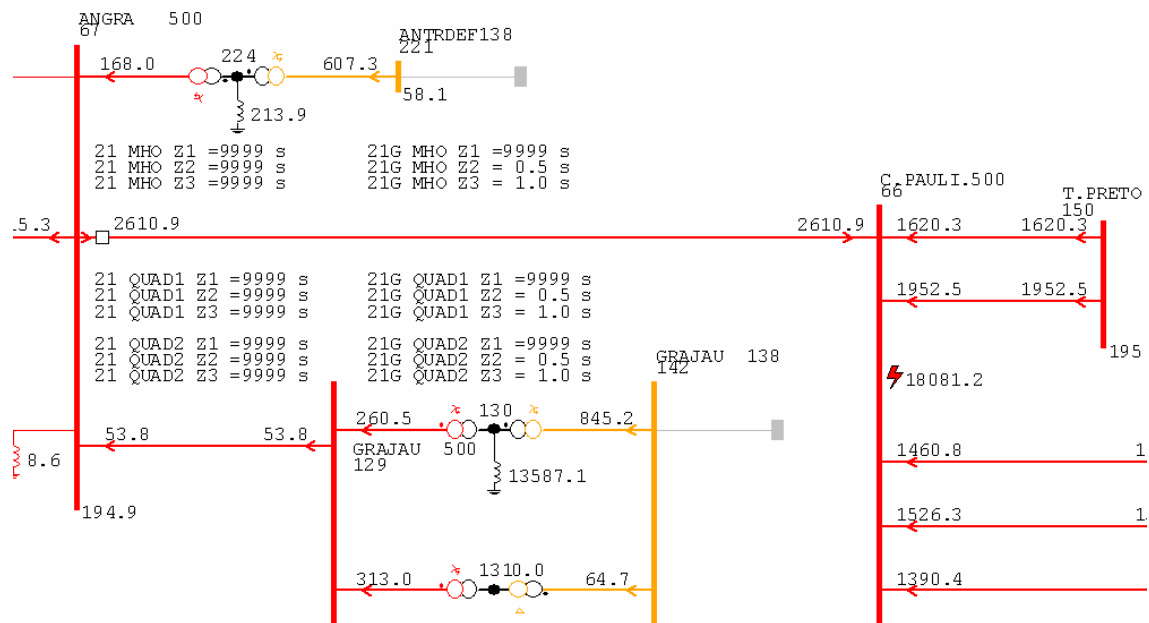


Figura 50 – Falta A-T na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

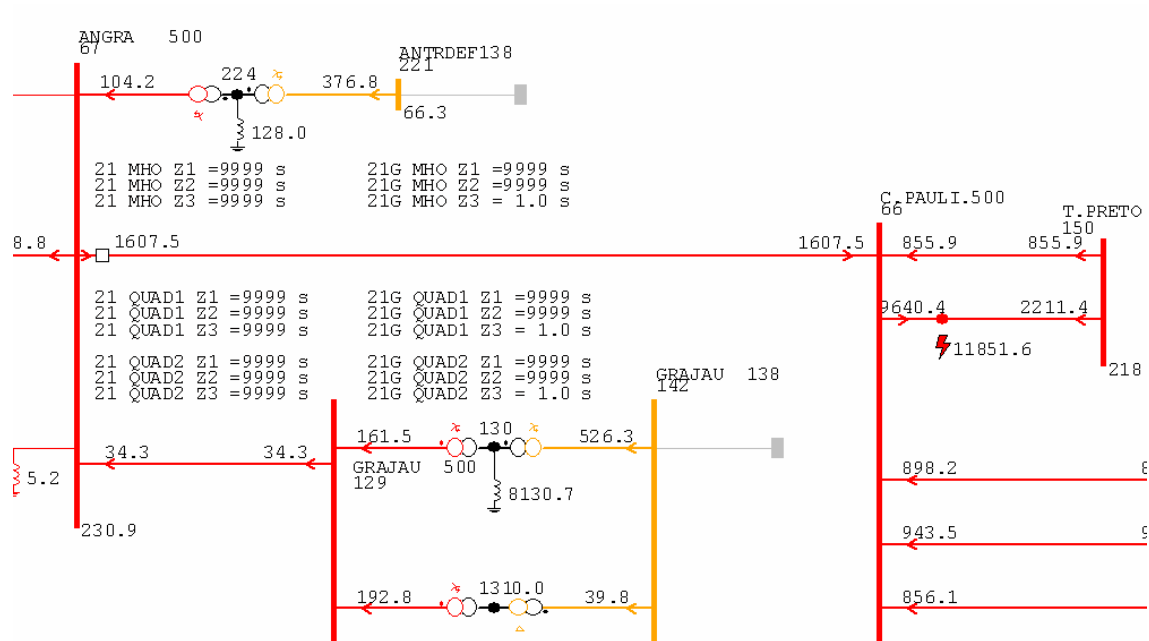


Figura 51 – Falta A-T, a 10% da LT C.Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

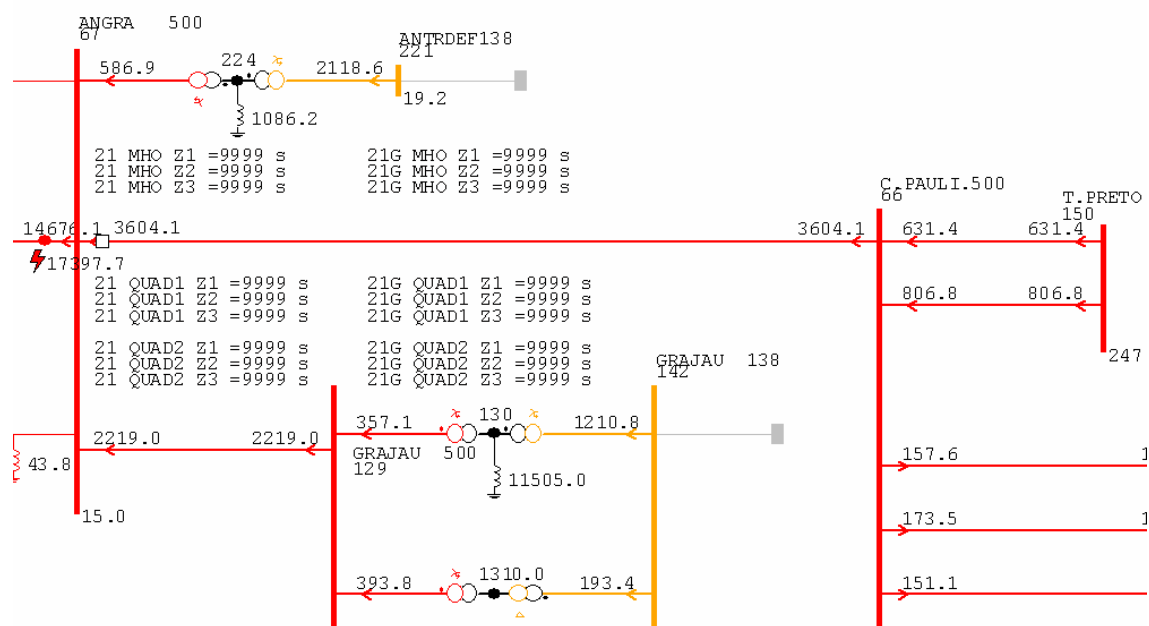


Figura 52 – Falta A-T a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

### 4.3.2 Faltas fase-fase sólidas

A Tabela 31 resume os tempos de atuação obtidos para as unidades de distância ao aplicar faltas fase-fase, nas fases A e B, ao longo da linha Angra – C. Paulista. Novamente, “-1%” significa falta aplicada a 1% da LT Angra-S.José (falta reversa) e “110%”, falta em 10% da LT C.Paulista.-T.Preto (falta externa à linha Angra – C. Paulista).

Desta vez convêm avaliar primeiro os relés de TERRA. Seria desejável que nas faltas bifásicas sem envolver a terra, estas unidades não operassem.

Na unidade com característica Mho, as unidades A e B de terceira zona (Z3) atuam para faltas até pouco depois da SE C. Paulista, porém sempre após as unidades AB de zona 1 ou zona 2 (Z1 e Z2). Portanto, não há qualquer problema neste caso.

Nos relés com característica Quadrilateral 1 e 2, a unidade A de primeira zona (Z1) atua para faltas A-B até mais de 70% da linha, o que não é adequado. Tendo em vista que a impedância aparente percebida pelo relé para uma falta fase-fase a 10% da LT, por exemplo, vale  $1.50 \Omega$  com ângulo de fase de  $10.9^\circ$ , ou seja, com módulo significativo e bastante resistiva, é provável que uma redução no valor ajustado de resistência de falta evitasse esta atuação. Como as unidades de terra atuam em todas as faltas com tempo inferior ou igual ao das de fase, isto também não causa problemas.

Quanto às unidades de FASE, sua atuação está correta para as faltas adiante dos relés, todas as unidades de primeira zona estão cobrindo até por volta de 85% da linha, as de segunda zona cobrem o início das linhas adjacentes e as de terceira cobrem até o fim de linha adjacente mais curta.

Na falta reversa, os modelos de relés com característica quadrilateral operaram, o que é indesejável e pouco fiel ao comportamento dos relés reais. Isto se deve ao uso das impedâncias aparentes na determinação da atuação dos dispositivos.

As faltas simuladas são ilustradas nas figuras seguintes.

Tabela 31: Tempos de atuação dos relés de distância para faltas fase-fase ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista

Ponto em curto (% da LT Angra – Cachoeira Paulista)								
Relé	-1%	10	30	50	70	90	SE C.Pauli.	110%
<b>Unidades de FASE</b>								
<b>MHO</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	0.0	0.0	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>QUAD1</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	0.0	0.0	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>QUAD2</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	0.0	0.0	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>Unidades de TERRA</b>								
<b>MHO</b>								
Z1	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	A,B 1.0	A,B 1.0	A,B 1.0	A,B 1.0	A,B 1.0	A,B 1.0	9999
<b>QUAD1</b>								
Z1	9999	A 0.0	A 0.0	A 0.0	A 0.0	9999	9999	9999
Z2	B 0,5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	9999
Z3	B 1,0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0
<b>QUAD2</b>								
Z1	9999	A 0.0	A 0.0	A 0.0	A 0.0	9999	9999	9999
Z2	B 0,5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	A 0.5	9999
Z3	B 1,0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0	A 1.0

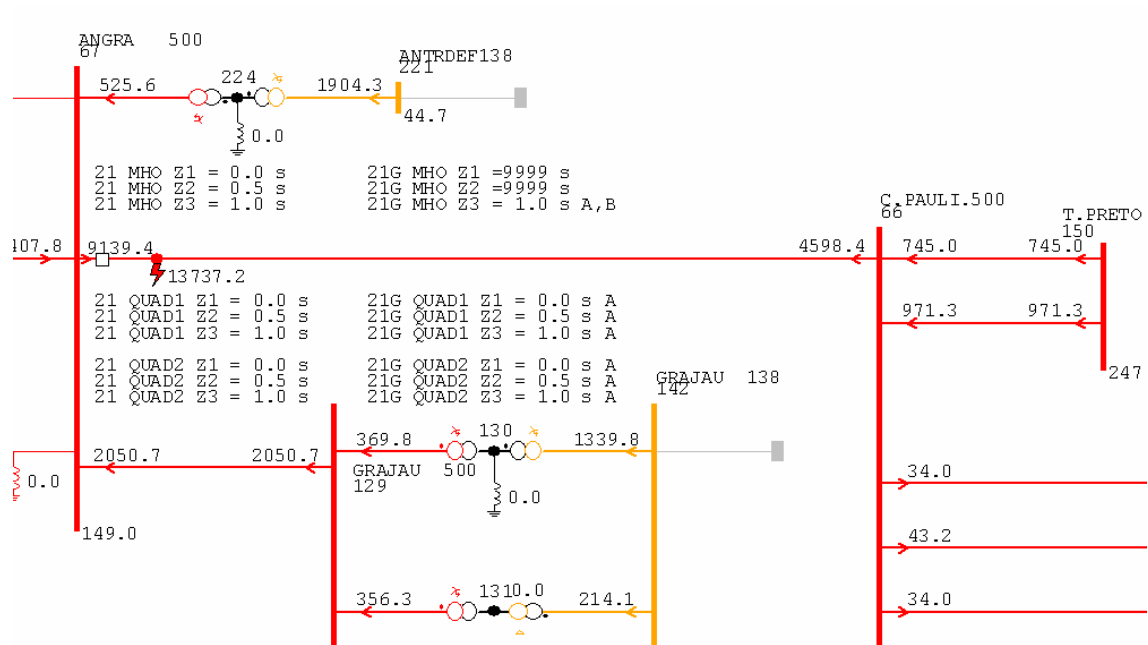


Figura 53 – Falta A-B a 10% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

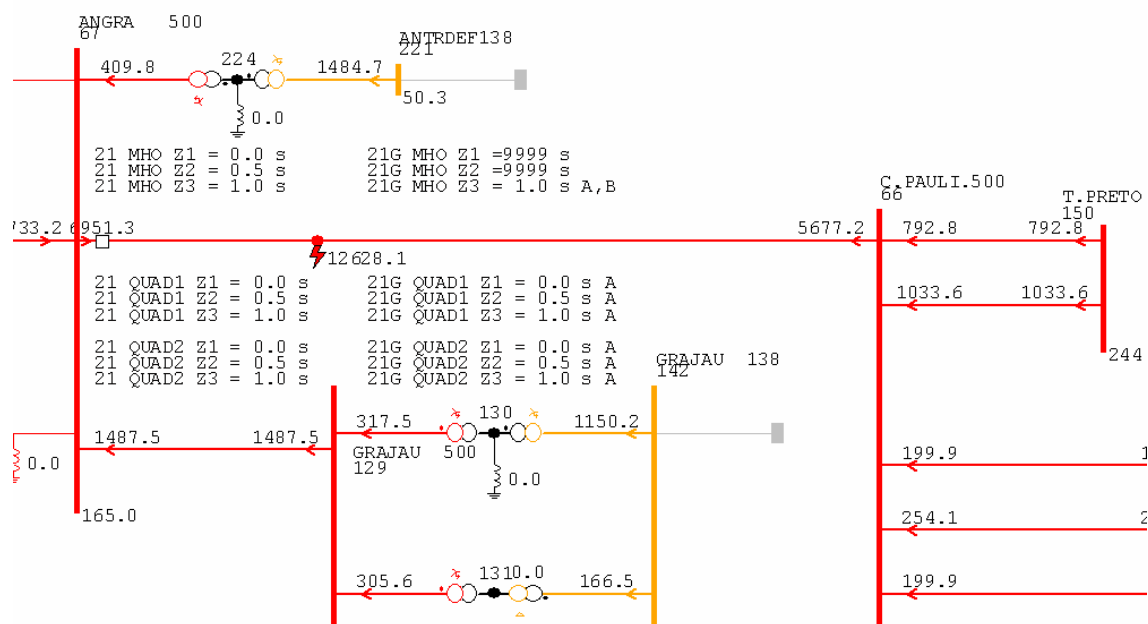


Figura 54 – Falta A-B a 30% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

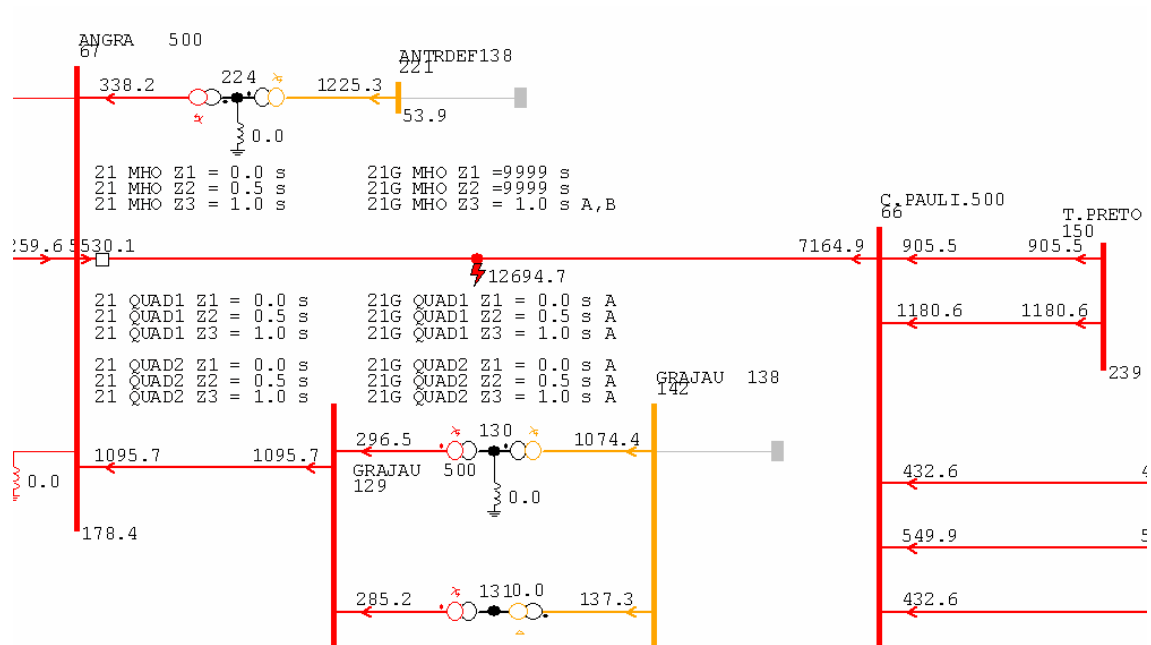


Figura 55 – Falta A-B a 50% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

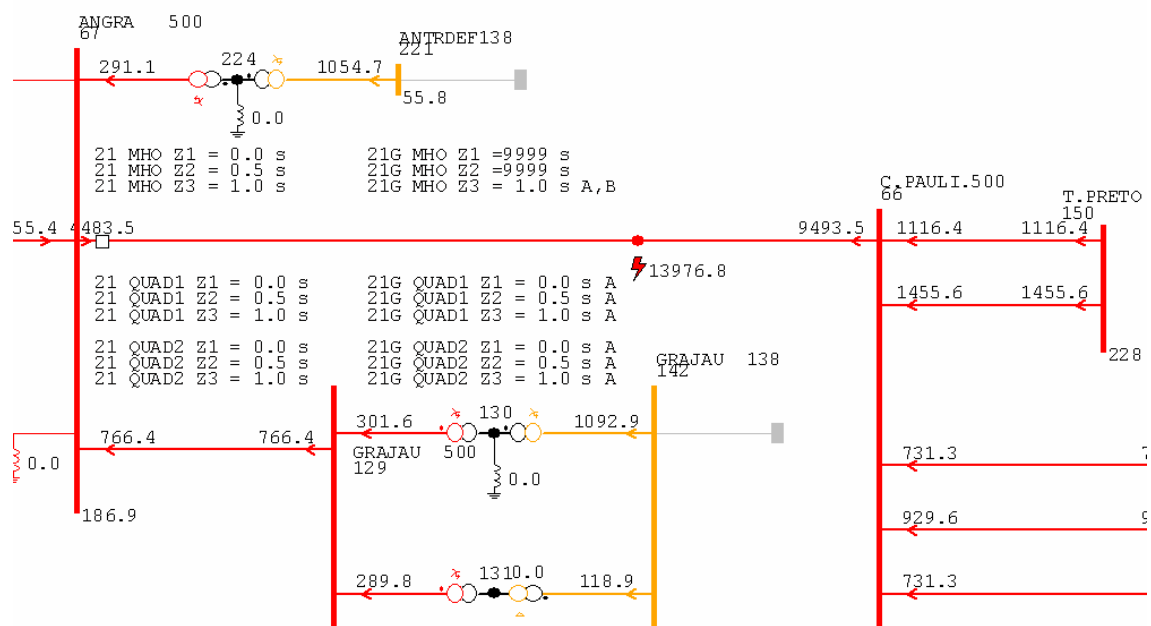


Figura 56 – Falta A-B a 70% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

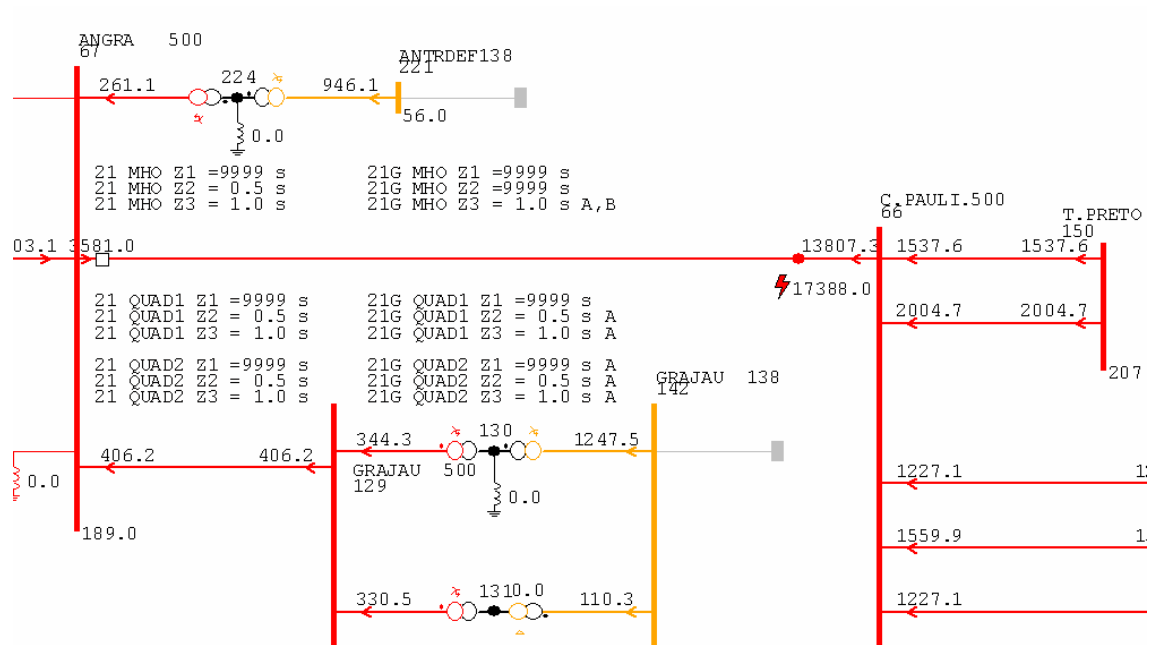


Figura 57 – Falta A-B a 90% da LT Angra – C. Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

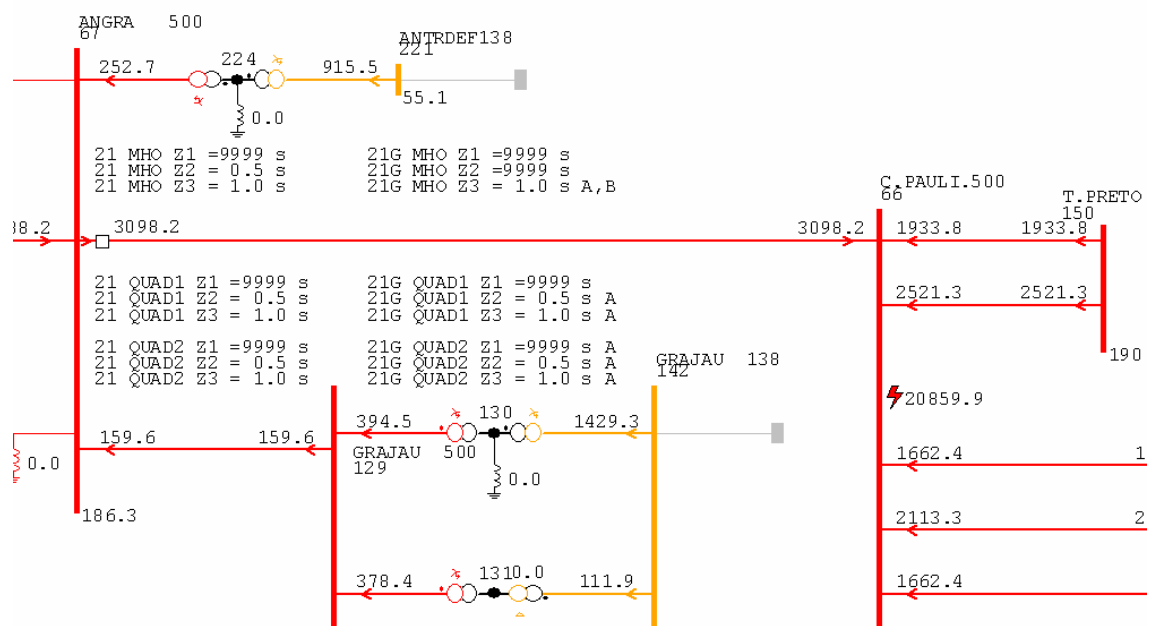


Figura 58 – Falta A-B na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A



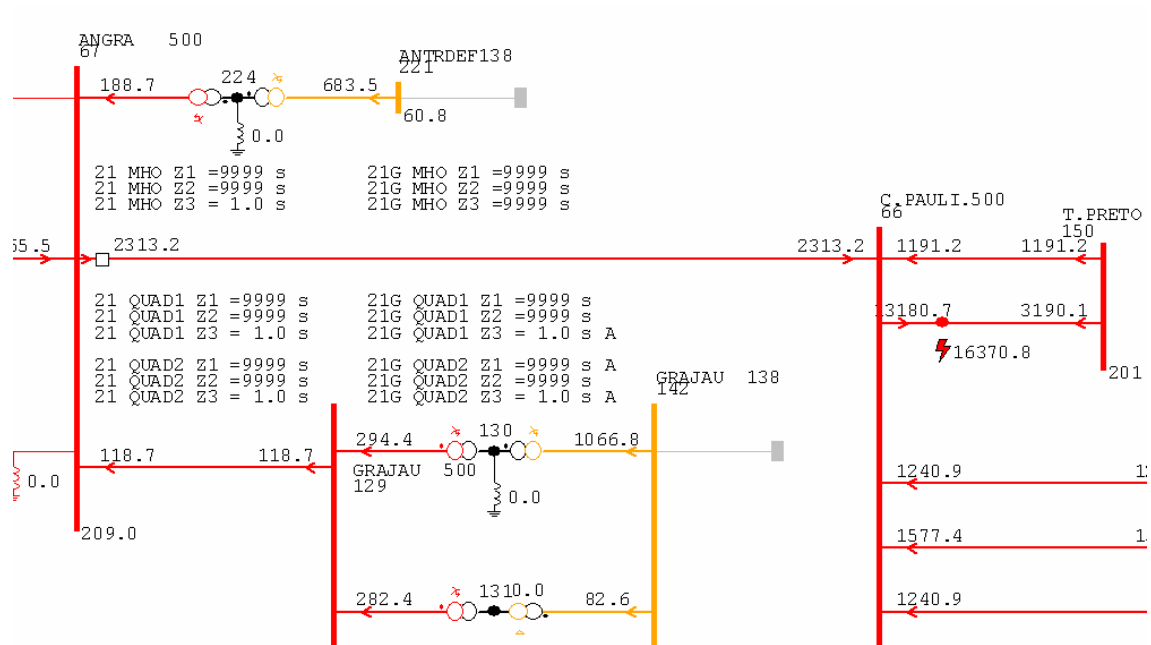


Figura 59 – Falta A-B, a 10% da LT C.Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

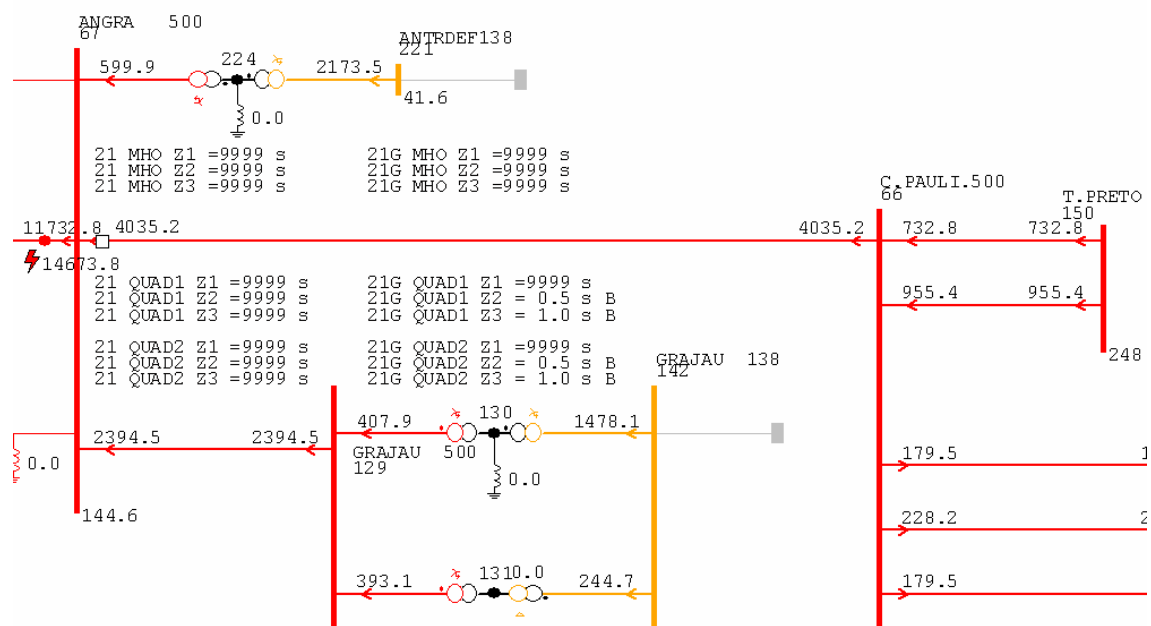


Figura 60 – Falta A-B, a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

### 4.3.3 Faltas monofásicas com resistência de $40\Omega$

A Tabela 32 resume os tempos de atuação obtidos para as unidades de distância ao aplicar faltas monofásicas na fase A com resistência de falta de  $40\Omega$  ao longo da linha Angra – C. Paulista. Na Tabela, “-1%” significa falta aplicada a 1% da LT Angra-S.José (falta reversa) e “110%”, falta em 10% da LT C.Paulista.-T.Preto (falta externa à linha Angra – C. Paulista).

Nas faltas do tipo fase-terra, é desejável que as unidades de FASE não operem. Na análise das faltas monofásicas sólidas, verificou-se que algumas unidades de fase eram sensibilizadas. Na simulação com impedância de falta, nenhuma proteção de fase foi sensibilizada.

As unidades de TERRA passaram a ter tempos de atuação maiores em comparação com as faltas sólidas. O relé com característica Mho operaria apenas para faltas até pouco mais de 70% da linha, e mesmo assim somente a unidade de terceira zona (Z3). As unidades dos relés quadrilaterais cobrem até 30% (Z1), 70% (Z2) e 90% (Z3)

Nenhum relé operou na falta reversa, nem mesmo as unidades de fase dos relés quadrilaterais.

Nas figuras seguintes pode-se observar os resultados obtidos das simulações das faltas simuladas.

Tabela 32: Tempos de atuação dos relés de distância para faltas para faltas monofásicas com resistência de 40Ω ao longo da LT Angra – Cachoeira Paulista

Ponto em curto (% da LT Angra – Cachoeira Paulista)								
Relé	-1%	10	30	50	70	90	SE C.Pauli.	110%
<b>Unidades de FASE</b>								
<b>MHO</b>								
Z1	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
<b>QUAD1</b>								
Z1	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
<b>QUAD2</b>								
Z1	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
<b>Unidades de TERRA</b>								
<b>MHO</b>								
Z1	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
Z3	9999	A,C 1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9999	9999
<b>QUAD1</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	9999	9999	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9999	9999
<b>QUAD2</b>								
Z1	9999	0.0	0.0	9999	9999	9999	9999	9999
Z2	9999	0.5	0.5	0.5	0.5	9999	9999	9999
Z3	9999	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9999	9999

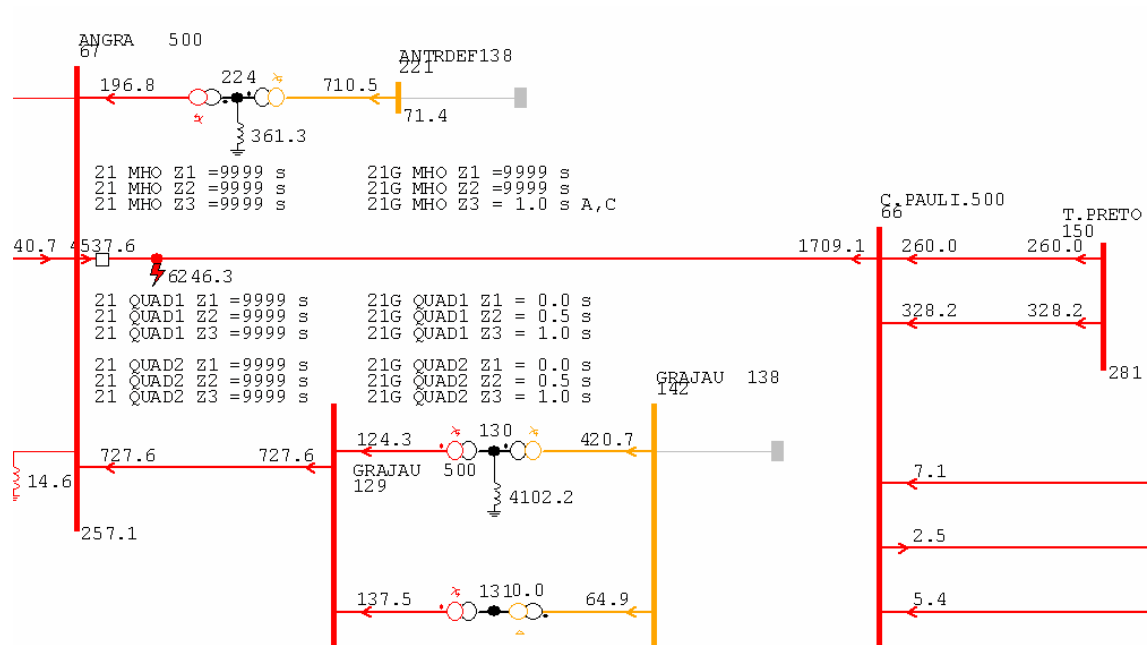


Figura 61 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 10% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

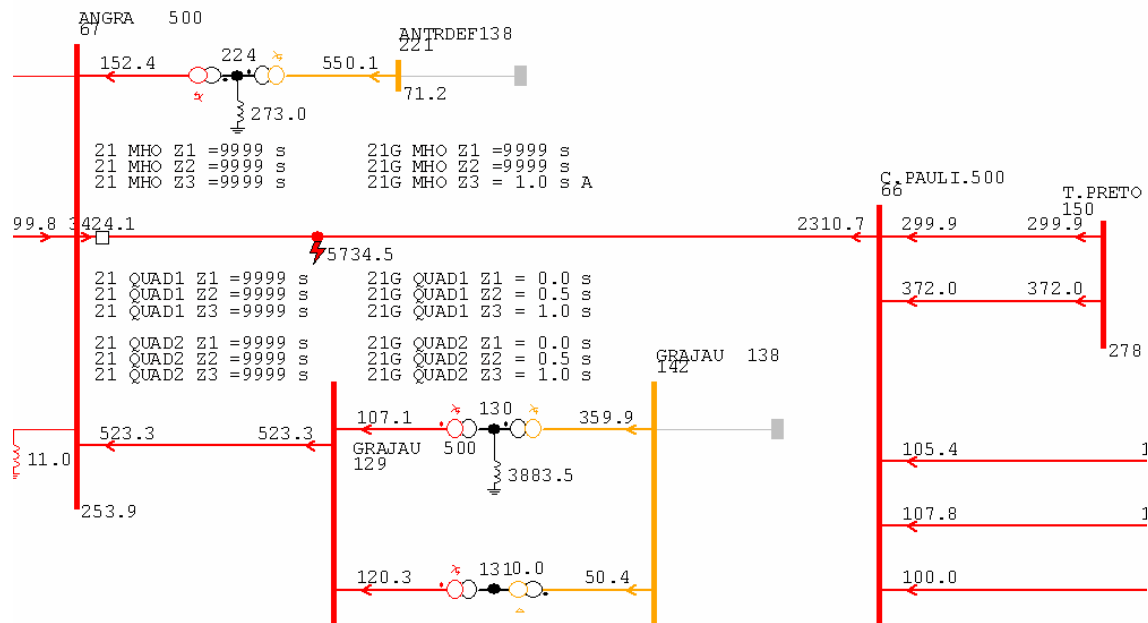


Figura 62 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 30% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

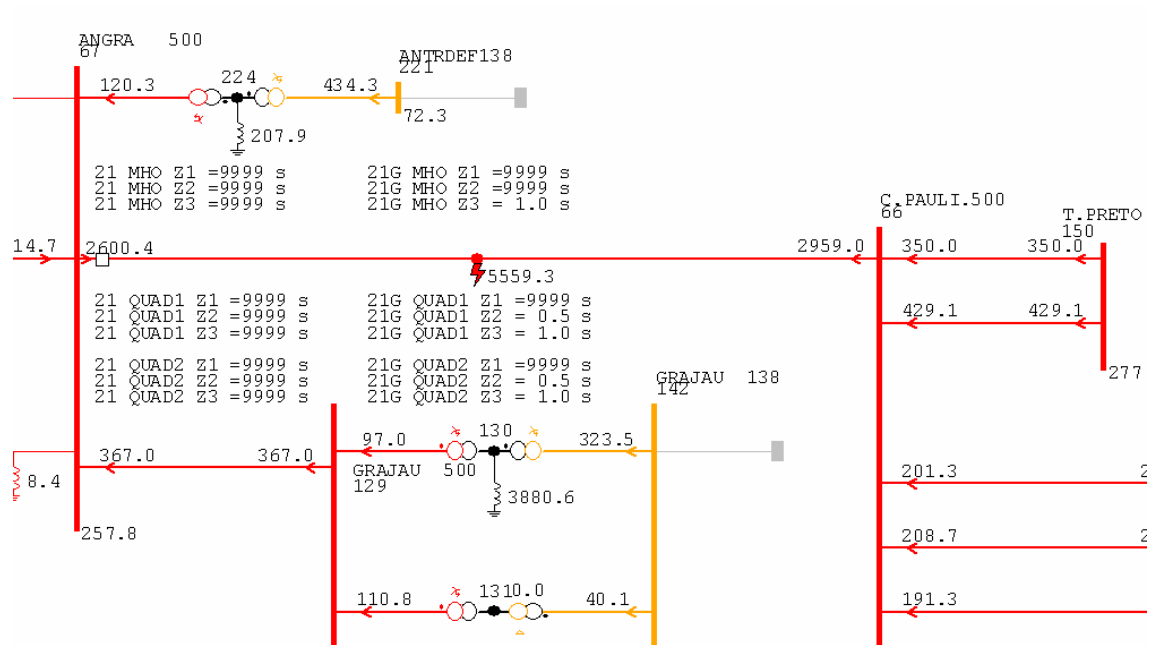


Figura 63 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 50% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

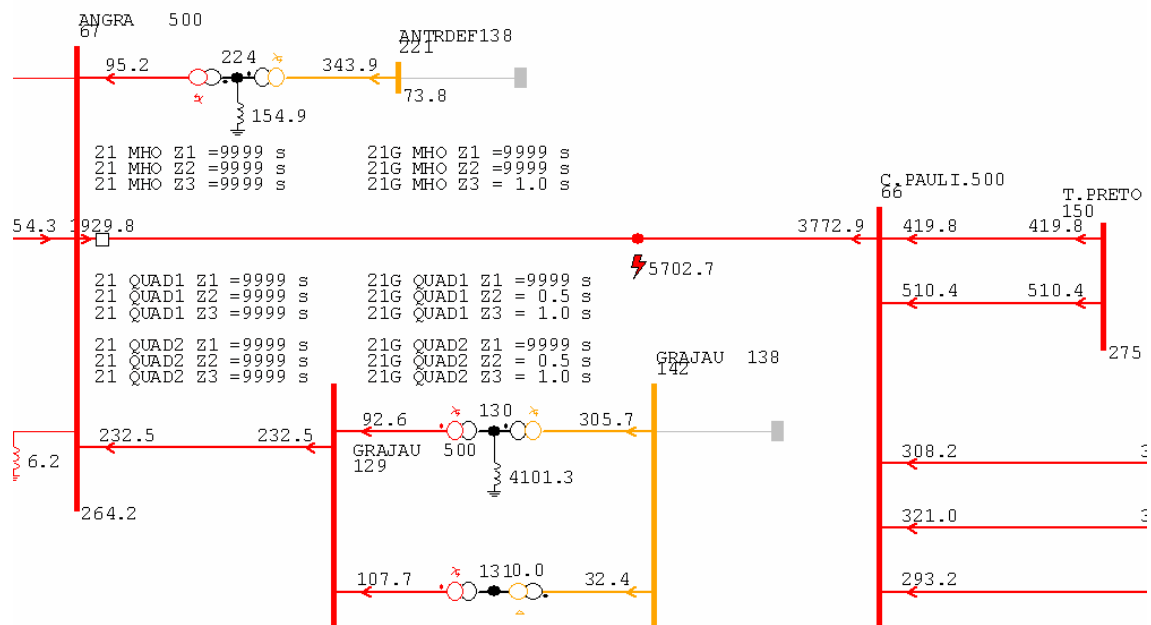


Figura 64 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 70% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

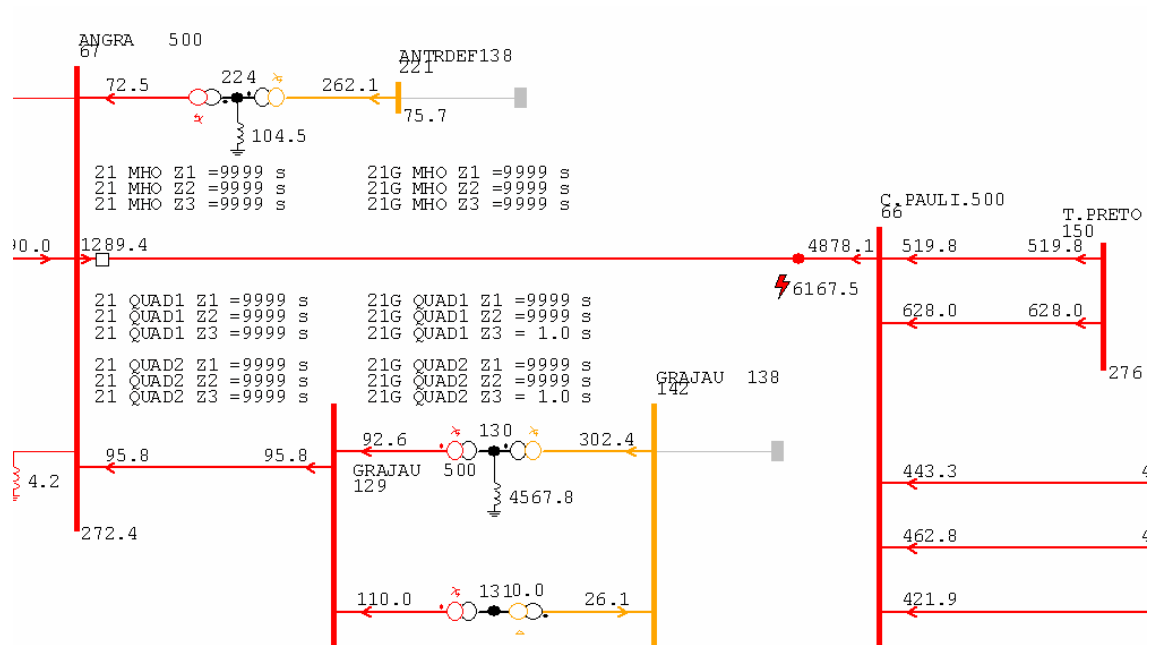


Figura 65 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 90% da LT Angra – C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

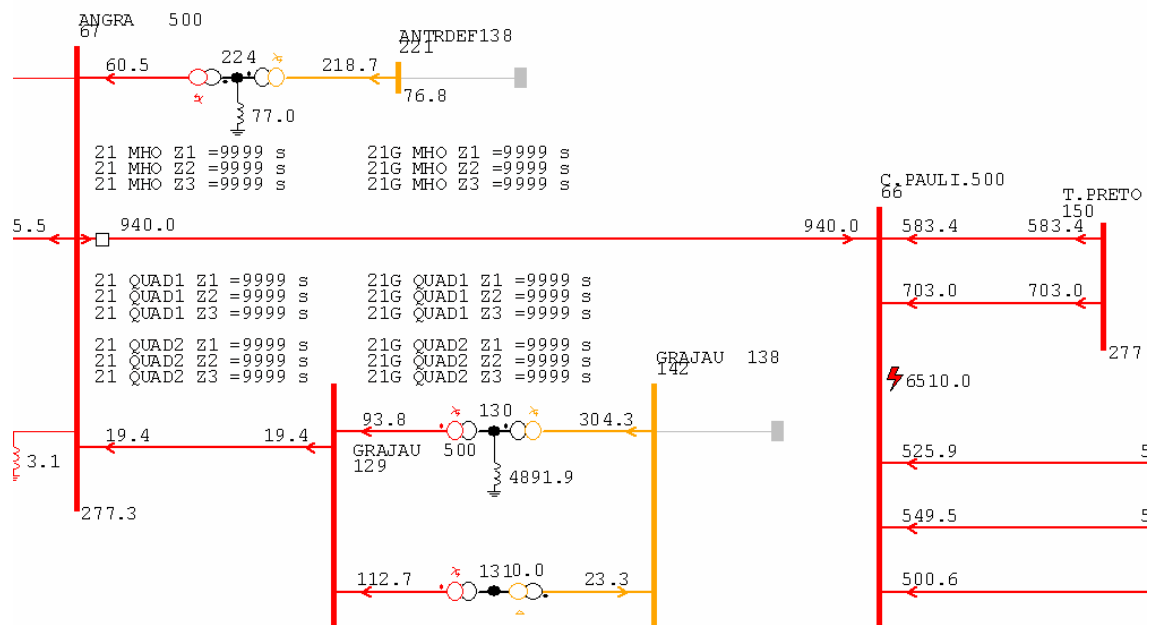


Figura 66 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, na SE C.Paulista: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

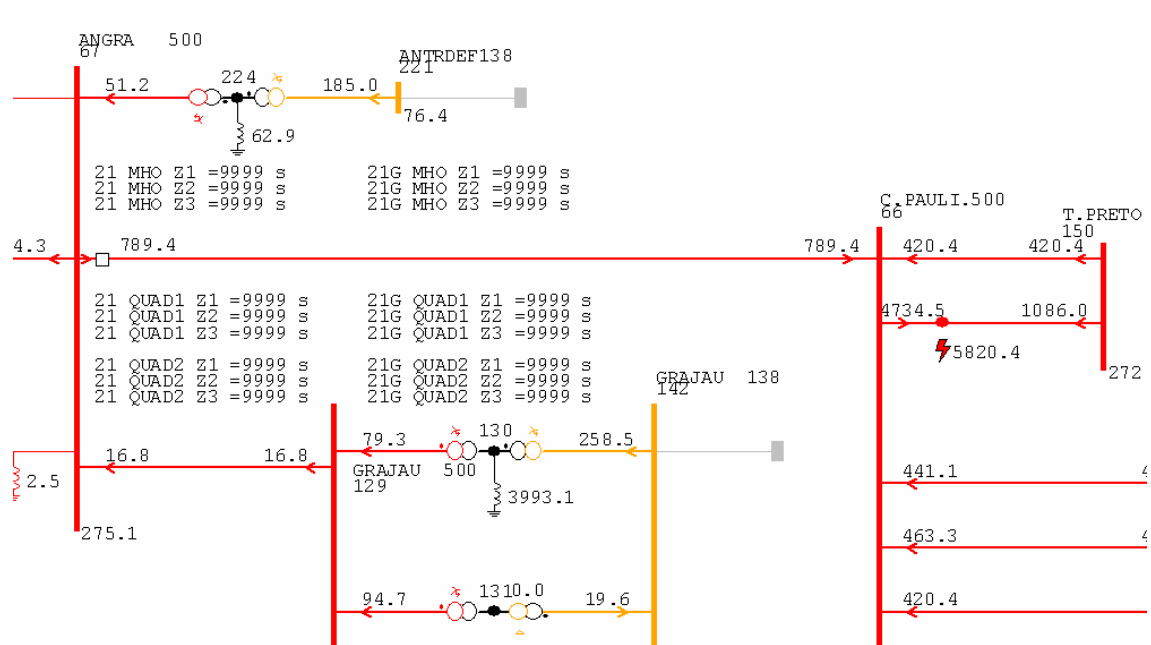


Figura 67 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 10% da LT C.Paulista – T. Preto: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

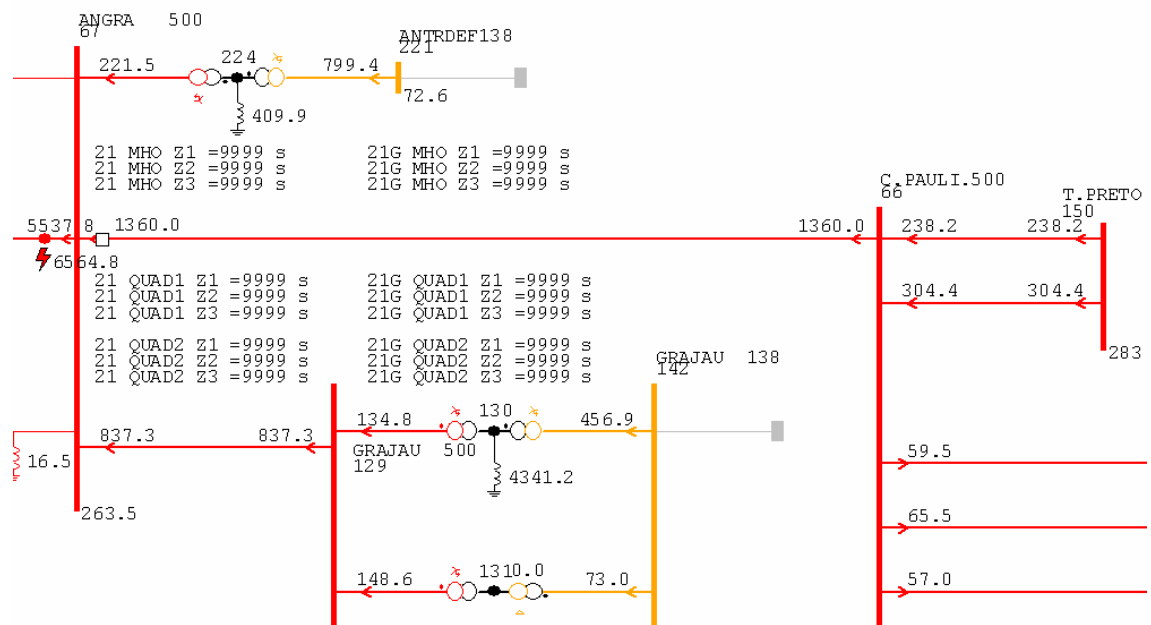


Figura 68 – Falta A-T, com 40 Ω de resistência de falta, a 1% da LT Angra – S. José: Tempo de atuação das proteções de distância. Contribuições em ampères, referentes à fase A

#### **4.3.4 Conclusões sobre a implementação dos relés de Distância**

Os modelos de relés de Distância (21) tiveram comportamento dentro das expectativas em quase todas as simulações. A exceção foi a atuação das unidades de fase com característica Quadrilateral durante a falta monofásica reversa.

Os modelos com característica Mho tiveram comportamento mais realista. Podem facilitar o ajuste de parâmetros em relés, apontar erros e indicar, com um bom grau de acerto, como será a atuação do relé real frente a defeitos de diversos tipos. As simulações que podem ser efetuadas com a utilização dos modelos básicos disponíveis para a representação de relés quadrilaterais também podem auxiliar no ajuste de parâmetros e verificação de erros, mas são pouco confiáveis para determinar o comportamento de um dispositivo real frente às possíveis ocorrências.



# CAPÍTULO 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

Nesta dissertação foram mostrados aspectos da implementação de modelos genéricos de relés de proteção em um programa de cálculo de curto-circuitos e os resultados de simulações efetuadas com o objetivo de validá-la.

Modelos detalhados e específicos de cada tipo de relé são de difícil construção, tendo em vista que seus fabricantes, por razões comerciais, protegem determinadas informações. Entretanto, muitos dos princípios operacionais básicos destes dispositivos podem ser encontrados na literatura, o que permite elaborar modelos genéricos que representam suas características básicas.

Os modelos implementados permitem simular o comportamento dos seguintes tipos de relés:

- Sobrecorrente Instantâneo: de Fase (código ANSI 50) e de Neutro (50N)
- Sobrecorrente Temporizado: de Fase (51) e de Neutro (51N)
- Sobrecorrente Direcional: de Fase (67) e de Neutro (67N)
- Distância (21)
- Sobretensão: de Fase (59) e de Neutro (59G)

Os modelos de relés de sobrecorrente instantâneos (50 e 50N) são bastante simples. O de neutro pode ser sensibilizado por outras grandezas além da corrente residual 3I<sub>0</sub>.

Os relés de sobrecorrente temporizados (51 e 51N) foram implementados com as características de corrente *versus* tempo especificadas pela norma IEC [1]. Outras

podem ser incluídas no código programa com mínimo esforço.

Estes relés possuem princípios operacionais relativamente simples e uma grande quantidade destes dispositivos segue características normalizadas. Isto torna seus modelos genéricos estáticos bastante representativos do comportamento dos equipamentos reais.

Os modelos de relés de sobrecorrente direcionais (67 e 67N) admitem a presença tanto de uma unidade instantânea quanto de uma temporizada. A temporizada pode adotar as curvas da norma IEC. Futuramente, outras podem ser incluídas. A detecção de direção de falta foi implementada com polarização cruzada (90 graus) para a unidade de fase e com polarização por grandezas de seqüência zero para a unidade de neutro. Outras formas de detecção podem ser adicionadas ao modelo.

O ponto mais sensível na representação das unidades de sobrecorrente direcionais é o método empregado na detecção da direção de falta. Uma grande parcela destes dispositivos parece empregar métodos conhecidos, como a polarização cruzada tipo 90 graus. Entretanto, determinados relés podem ou empregar métodos mais complexos ou não apresentar informações operacionais claras em sua documentação. Sendo assim, os modelos genéricos se mostram fiéis a uma parcela considerável dos equipamentos reais.

Os modelos de relés de distância (21) permitem especificar algumas de suas características. A característica MHO foi implementada utilizando a comparação do ângulo de fase do fasor  $Zr.I - V$  com o ângulo do fasor da tensão de polarização. É possível especificar a tensão de polarização utilizada e outros tipos de polarização podem ser incluídos futuramente no código do programa, com pouco esforço. Esta forma de cálculo da característica MHO é bastante próxima da empregada por boa parte dos dispositivos digitais reais que a disponibilizam [4,11].

As características Quadrilateral 1 e Quadrilateral 2 foram implementadas considerando o cálculo de impedâncias aparentes, obtidas pela divisão de um fasor de tensão por um fasor de corrente ( $V/I$ ). Esta forma de cálculo não é empregada pelos relés digitais reais [8,12,16,17]. A maneira mais utilizada para construir as

características quadrilaterais parece ser também pela comparação de ângulos de fase [13] de fasores do tipo Z.I - V e Z.I. Entretanto, por questão de simplicidade, nesta primeira implementação foi adotada a metodologia que utiliza a impedância aparente. Esta não é muito fiel aos dispositivos reais: facilita o ajuste dos parâmetros, mas não é confiável para determinar com segurança se o equipamento real atuará ou não frente a uma ocorrência.

Normalmente, os fabricantes disponibilizam, nos manuais dos equipamentos, a característica estática aproximada destes, no plano R-X, mas não a metodologia utilizada para determinar a atuação do relé. Existem lógicas muito complexas. Portanto, o cálculo baseado na comparação de fases pode ser fiel aos equipamentos reais, mas é necessário ter cautela com os resultados obtidos. Há de se considerar a atuação de outros elementos como lógicas para detecção de faltas que podem bloquear a atuação do relé ou de algumas de suas unidades (BC, CA, A, B, etc), a utilização de teleproteção etc.

Os modelos de relés de sobretensão (59 e 59G) são simples, com poucos parâmetros, e seu comportamento parece ser bastante próximo dos dispositivos reais.

Nas simulações se verificou que, com exceção da atuação incorreta dos modelos de relés de distância com característica quadrilateral durante uma falta reversa, todos os modelos de relés tiveram comportamento adequado e dentro das expectativas.

A estrutura de dados implementada para os modelos é expansível. Novos parâmetros podem ser acrescentados aos existentes à medida em que isso se fizer necessário e novos modelos podem também ser incluídos.

Segundo [11], os modelos genéricos de relés são facilmente ajustáveis, dão informações significativas sobre a operação de cada tipo de relé, auxiliam no ajuste dos parâmetros dos dispositivos reais e permitem perceber possíveis erros grosseiros nos ajustes. Por outro lado, é importante destacar que não são adequados para avaliar situações marginais, especialmente no caso das proteções de distância, que empregam algoritmos mais complexos.

O conjunto de modelos implementados no programa ANAFAS permite ajustar e avaliar o desempenho dos elementos de proteção, alguns com maior, outros com menor nível de fidelidade aos dispositivos reais. Através da automatização dos cálculos pode-se, portanto, reduzir, de maneira considerável, tanto o esforço requerido por este tipo de atividade, quanto a probabilidade de ocorrência de erros nos ajustes advindos de distração e devido a outros motivos.

## **5.2 Trabalhos Futuros**

Alguns desenvolvimentos adicionais, na linha do trabalho descrito na presente dissertação, podem ser citados:

- Implementação, em uma aplicação gráfica, de recursos que auxiliem a coordenação dos relés. Possibilidade de plotar as características de relés de sobrecorrente em gráficos de corrente *versus* tempo e as dos relés de distância em gráficos do tipo R-X.
- Expandir gradativamente a quantidade de modelos de relés disponibilizados, buscando representar os dispositivos reais.
- Implementar zonas reversas nos relés de distância.
- Permitir representação de esquemas de teleproteção
- Implementar representação de TCs e TPs, de maneira a aumentar a robustez da base de dados..

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEC 60255-3 Ed. 2.0

[2] IEEE/ANSI Standard No. C37.112, “Standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays”, 1996.

[3] SCHWEITZER, E.O., ALIAGA, A., “Digital Programmable Time-Parameter Relay Offers Versatility and Accuracy”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 152-157, January/February 1980.

[4] MARTILLA, R.J., “Directional Characteristics of Distance Relay Mho Elements: Part I – A New Method of Analysis”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 1, pp. 96-102, January 1981

[5] MARTILLA, R.J., “Directional Characteristics of Distance Relay Mho Elements: Part II – Results”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 1, pp. 103-113, January 1981

[6] PENG, Z., LI, M. S., WU, C. Y., CHENG, T. C., NING, T. S., “A Dynamic State Space Model of a MHO Distance Relay”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3558-3564, December 1985.

[7] CAUTHEN, R. H., MCCANNON, W. P., “The CAPE System: Computer-Aided Protection Engineering”, *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 30-34, 1988.

[8] ROBERTS, J., GUZMAN, A., SCHWEITZER III, E. O., 1993, *Z = V / I Does Not Make a Distance Relay*, Schweitzer Engineering Laboratories Inc.

- [9] SCHWEITZER III, E. O., ROBERTS, J., 1993, *Distance Relay Element Design*, Schweitzer Engineering Laboratories Inc.
- [10] MCCLAINL, J., CHAN, S. M., CHOE, D., “Relay Database Design”, *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 16-20, 1995.
- [11] McLAREN, P.G., MUSTAPHI, K., BENMOUYAL, G., et al., “Software Models for Relays”, *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 238-245, April 2001.
- [12] ROBERTS, J., GUZMAN, A., 2003, *Directional Element Design and Evaluation*, Schweitzer Engineering Laboratories Inc.
- [13] MORAES, R.M., JARDIM, J.L., VIAN, A., et al., "SIMPROT – Ambiente de Simulação da Operação de Sistemas de Proteção e Ocorrências do Sistema Interligado Nacional", VII STPC, Junho 2005.
- [14] NAKAGOMI, R. M., SENGER, E.C., MANASSERO JUNIOR, G., et al, "Desenvolvimento e Implementação de Dispositivos de Proteção no ATP", VIII STPC, 28 de Junho a 1 de Julho 2005.
- [15] IEEE/ANSI Standard No. C37.2, “IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations”, 1996.
- [16] PAITHANKAR, Y. G., *Transmission Network Protection*, 1 ed. New York, Marcel Dekker, 1998.
- [17] ZIEGLER, G., *Numerical Distance Protection: Principles and Application*, 1 ed. Berlin, Siemens AG, 1999.

[18] MASON, C. R., *Art & Science of Protective Relaying*, 1 ed. New York, Wiley, 1998.

[19] S. P. ROMÉRO, P. A. MACHADO, "ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas", IV STPC, Maio 1993.

[20] F. R. M. ALVES, S. P. ROMÉRO, C. F. P. ARAÚJO, et al., "Porte de um Programa de Cálculo de Curto-Circuito para um Ambiente Integrado de Banco de Dados e Interface Gráfica", VIII STPC, Junho 2005.

# APÊNDICE A

## Exemplos de Saídas do Programa

Abaixo encontram-se dois exemplos de saídas de resultados calculadas pelo programa, para uma falta A-T a 10% da LT Angra-C. Paulista e para uma falta B-C a 90% da mesma linha de transmissão.

```
1) Falta 1F 10% 67-66:1 _____

R E S U L T A D O S   D O S   R E L É S   D E   P R O T E Ç Ã O

Barra      67 - ANGRA      500

Zonas de Proteção:

-----
      67(ANGRA      500 ) -      66(C.PAULI.500 ) -      1 :

Identificação relé      Modelo      Tempo(s)
-----
Instantâneo      Fase      50      .066

RTC =      400 Pickup =      10.98 Tempo = .066

      Iprim      Isec      Tempo
      -----
A 10065.25 25.16313 .066
B 847.0578 2.117645 9999
C 847.0587 2.117647 9999

Identificação relé      Modelo      Tempo(s)
-----
Temporizado      Fase      51      .507

RTC =      400 Multp. =      0.21 Tape =      1.5 Curva: IEC_Norm

      Iprim      Isec      Multiplos      Tempo
      -----
A 10065.25 25.16313 16.77542 .507
B 847.0578 2.117645 1.411763 4.25
C 847.0587 2.117647 1.411765 4.25
```



```

Identificação relé  Modelo                Tempo (s)
-----
Instantâneo      Neutro 50N                .033

```

RTC = 400 Pickup = 7.91 Tempo = .033

```

Iprim  Isec  Tempo
-----
N 11759.37 29.39841 .033

```

```

Identificação relé  Modelo                Tempo (s)
-----
Temporizado       Neutro 51N                .411

```

RTC = 400 Multp. = 0.18 Tape = 1.5 Curva: IEC\_Norm

```

Iprim  Isec  Multiplos  Tempo
-----
N 11759.37 29.39841 19.59894 .411

```

```

Identificação relé  Modelo                Tempo (s)
-----
Direcional         Fase 67                0.0

```

RTC = 400 Pickup = 10.98 Tempo =  
 Multp. = 0.21 Tape = 1.5 Curva: IEC\_Norm  
 TipoDir = 90 graus Angl = 30

```

Iprim  Isec  Multiplos  Tempo Vang  Iang  Vang-Iang Dir
-----
A 10065.25 25.16313 16.77542 0.0 -90 -86.89 -3.109 ADIANTE
B 847.0578 2.117645 1.411763 9999 130.2 -87 217.2 REVERSA
C 847.0587 2.117647 1.411765 9999 48.787 -87 135.78 REVERSA

```

```

Identificação relé  Modelo                Tempo (s)
-----
Direcional         Neutro 67N                0.0

```

RTC = 400 Pickup = 7.91 Tempo =  
 Multp. = 0.18 Tape = 1.5 Curva: IEC\_Norm  
 TipoDir = V0,I0 Angl = -90

```

Iprim  Isec  Multiplos  Tempo Vang  Iang  Vang-Iang Dir
-----
N 11759.37 29.39841 19.59894 0.0 -178.3 -86.91 -91.44 ADIANTE

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)

-----  
Distância Z1 MHO      21                                      9999

RTP = 4347.8    RTC =      400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
AB	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	59.5028	-73.06	115.001	30	-103.1	9999
BC	0.00004	180	115.001	-90	115.001	90	115.001	-90	180	9999
CA	23.0455	93.118	76.6277	130.2	60.6112	-106.6	115.001	150	103.38	9999

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)

-----  
Distância Z2 MHO      21                                      9999

RTP = 4347.8    RTC =      400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
AB	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	75.1171	-49.51	75.0759	48.787	-98.3	10000
BC	0.00004	180	115.001	-90	115.001	90	115.001	-90	180	10000
CA	23.0455	93.118	76.6277	130.2	75.6807	-130.1	76.6277	130.2	99.672	10000

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)

-----  
Distância Z3 MHO      21                                      1

RTP = 4347.8    RTC =      400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
AB	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	221.054	-15.27	75.0759	48.787	-64.06	1
BC	0.00004	180	115.001	-90	115	90	115.001	-90	180	10000
CA	23.0455	93.118	76.6277	130.2	220.676	-165.1	76.6277	130.2	64.704	1

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)

-----  
Distância Z1 MHO      21G                                      0.0

RTP = 4347.8    RTC =      400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
A	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	145.237	-3.211	19.3654	-3.188	-.0228	0.0
B	0.00004	180	115.001	-90	136.677	20.913	64.9631	-117.6	138.55	9999
C	23.0455	93.118	76.6277	130.2	143.822	-27.41	64.8685	117.68	-145.1	9999

Identificação relé Modelo Tempo(s)

-----  
 Distância Z2 MHO 21G 0.5

RTP = 4347.8 RTC = 400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
A	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	222.698	-3.21	19.3654	-3.188	-.0218	0.5
B	0.00004	180	115.001	-90	179.231	14.429	64.9631	-117.6	132.06	10000
C	23.0455	93.118	76.6277	130.2	187.287	-22.06	64.8685	117.68	-139.7	10000

Identificação relé Modelo Tempo(s)

-----  
 Distância Z3 MHO 21G 1

RTP = 4347.8 RTC = 400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
A	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	627.983	-3.209	19.3654	-3.188	-.0207	1
B	0.00004	180	115.001	-90	414.394	3.1923	64.9631	-117.6	120.82	10000
C	23.0455	93.118	76.6277	130.2	423.839	-12.53	64.8685	117.68	-130.2	10000

Identificação relé Modelo Tempo(s)

-----  
 Distância Z1 QUAD1 21 0.0

RTP = 4347.8 RTC = 400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =

X = 2.8933 R = 0.1768 Rf = 2.5 AngInf = -15 AngSup = 115

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Z'mod	Z'ang	X	RD	RE	D1	D2	Trip
AB	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	3.25772	135.67	X	X		X		9999
BC	0.00004	180	115.001	-90	2870966	90	X	X	X	X		9999
CA	23.0455	93.118	76.6277	130.2	3.32506	37.086	X	X	X	X	X	0.0

Identificação relé Modelo Tempo(s)

-----  
 Distância Z2 QUAD1 21 0.5

RTP = 4347.8 RTC = 400 Caract. = Quadr. 1 Tempo = 0.5

X = 4.2548 R = 0.2601 Rf = 3 AngInf = -15 AngSup = 115

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Z'mod	Z'ang	X	RD	RE	D1	D2	Trip
AB	23.0455	-86.88	75.0759	48.787	3.25772	135.67	X	X	X	X		10000
BC	0.00004	180	115.001	-90	2870966	90	X	X	X	X		10000
CA	23.0455	93.118	76.6277	130.2	3.32506	37.086	X	X	X	X	X	0.5

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD1    21                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =      1
X = 11.3787 R =    0.6959 Rf =      3.5 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 23.0455 -86.88 75.0759 48.787 3.25772 135.67 X X X X 10000
BC 0.00004  180 115.001  -90 2870966   90 X X X X 10000
CA 23.0455 93.118 76.6277 130.2 3.32506 37.086 X X X X X 1

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z1 QUAD1    21G                          0.0

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =
X =  2.8933 R =    0.1768 Rf =      3 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A 25.1631 -86.89 19.3654 -3.188 .341031 86.52 X X X X X 0.0
B 2.11764  -87 64.9631 -117.6 1.92274  -26 X X X X 9999
C 2.11765  -87 64.8685 117.68 1.91995 -150.7 X X X 9999

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z2 QUAD1    21G                          0.5

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    0.5
X =  4.2548 R =    0.2601 Rf =      7 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A 25.1631 -86.89 19.3654 -3.188 .341031 86.52 X X X X X 0.5
B 2.11764  -87 64.9631 -117.6 1.92274  -26 X X X X 10000
C 2.11765  -87 64.8685 117.68 1.91995 -150.7 X X X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD1    21G                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =      1
X = 11.3787 R =    0.6959 Rf =      9 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A 25.1631 -86.89 19.3654 -3.188 .341031 86.52 X X X X X 1
B 2.11764  -87 64.9631 -117.6 1.92274  -26 X X X X 10000
C 2.11765  -87 64.8685 117.68 1.91995 -150.7 X X X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z1 QUAD2    21                          0.0

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =
X =  2.8933 R =  0.1768 Rf =      2.5 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 23.0455 -86.88 75.0759 48.787 3.25772 135.67 X  X      X 9999
BC 0.00004  180 115.001  -90 2870966   90  X  X  X  X 9999
CA 23.0455 93.118 76.6277 130.2 3.32506 37.086 X  X  X  X  X 0.0

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z2 QUAD2    21                          0.5

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    0.5
X =  4.2548 R =  0.2601 Rf =      3 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 23.0455 -86.88 75.0759 48.787 3.25772 135.67 X  X  X      X 10000
BC 0.00004  180 115.001  -90 2870966   90  X  X  X  X 10000
CA 23.0455 93.118 76.6277 130.2 3.32506 37.086 X  X  X  X  X 0.5

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD2    21                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    1
X = 11.3787 R =  0.6959 Rf =      3.5 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 23.0455 -86.88 75.0759 48.787 3.25772 135.67 X  X  X      X 10000
BC 0.00004  180 115.001  -90 2870966   90  X  X  X  X 10000
CA 23.0455 93.118 76.6277 130.2 3.32506 37.086 X  X  X  X  X 1

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z1 QUAD2    21G                          0.0

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =
X =  2.8933 R =  0.1768 Rf =      3 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A 25.1631 -86.89 19.3654 -3.188 .341031 86.52 X  X  X  X  X 0.0
B 2.11764  -87 64.9631 -117.6 1.92274  -26 X  X  X  X  9999
C 2.11765  -87 64.8685 117.68 1.91995 -150.7 X  X  X  9999

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z2 QUAD2    21G                          0.5

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    0.5
X =  4.2548 R =  0.2601 Rf =          7 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A 25.1631 -86.89 19.3654 -3.188 .341031  86.52 X  X  X  X  X  0.5
B 2.11764  -87 64.9631 -117.6 1.92274   -26 X  X  X  X  10000
C 2.11765  -87 64.8685 117.68 1.91995 -150.7 X  X  X      10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD2    21G                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    1
X = 11.3787 R =  0.6959 Rf =          9 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A 25.1631 -86.89 19.3654 -3.188 .341031  86.52 X  X  X  X  X  1
B 2.11764  -87 64.9631 -117.6 1.92274   -26 X  X  X  X  10000
C 2.11765  -87 64.8685 117.68 1.91995 -150.7 X  X  X      10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Sobretensão          59                          1

RTP = 4347.8 Tipo:    FASE Vmax =    64.8 Tempo =    1

```

```

  Vprim   Vsec   Tempo
-----
A 84197.03 19.36543 9999
B 282446.4 64.96307  1
C 282035.4 64.86854  1

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Sobretensão          59G                          1

RTP = 4347.8 Tipo:    NEUTRO Vmax =    12.48 Tempo =    1

```

```

  Vprim   Vsec   Tempo
-----
N 177999.2 40.94007  1

```



```

Identificação relé      Modelo                Tempo (s)
-----
Temporizado   Fase   51                      .808

RTC =    400 Multp. =    0.21 Tape =    1.5 Curva: IEC_Norm

  Iprim   Isec   Multiplos  Tempo
  -----
A                      9999
B 3580.952 8.95238 5.968254 .808
C 3580.952 8.95238 5.968254 .808

Identificação relé      Modelo                Tempo (s)
-----
Instantâneo   Neutro 50N                      9999

RTC =    400 Pickup =    7.91 Tempo = .033

  Iprim   Isec   Tempo
  -----
N                      9999

Identificação relé      Modelo                Tempo (s)
-----
Temporizado   Neutro 51N                      9999

RTC =    400 Multp. =    0.18 Tape =    1.5 Curva: IEC_Norm

  Iprim   Isec   Multiplos  Tempo
  -----
N                      9999

Identificação relé      Modelo                Tempo (s)
-----
Direcional    Fase   67                      .808
RTC =    400 Pickup =    10.98 Tempo =
          Multp. =    0.21 Tape =    1.5 Curva: IEC_Norm
          TipoDir = 90 graus Angl =    30

  Iprim   Isec   Multiplos  Tempo Vang   Iang   Vang-Iang Dir
  -----
A                      9999 -91.02          -91.02 ADIANTE
B 3580.952 8.95238 5.968254 .808 164.51 -177.5    342.05 ADIANTE
C 3580.952 8.95238 5.968254 .808 15.349 2.4563 12.893 ADIANTE

```



```

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)
-----
Direcional      Neutro 67N                      9999
RTC =      400 Pickup =      7.91 Tempo =
           Multp. =      0.18 Tape =      1.5 Curva: IEC_Norm
           TipoDir = V0,I0      Ang1 =      -90
Iprim      Isec      Multiplos      Tempo Vang      Iang      Vang-Iang Dir
-----
N                      9999                      ADIANTE

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)
-----
Distância Z1 MHO      21                      9999

```

RTP = 4347.8 RTC = 400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D.	Ang	Trip
AB	8.95238	2.4563	103.787	15.349	99.6234	-179.1	115.001	30	150.88	9999	
BC	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	3.05421	89.318	115.001	-90	179.32	9999	
CA	8.95238	2.4564	102.84	164.51	99.5871	-.8786	115.001	150	-150.9	9999	

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)
-----
Distância Z2 MHO      21                      0.5

```

RTP = 4347.8 RTC = 400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D.	Ang	Trip
AB	8.95238	2.4563	103.787	15.349	99.9618	173.87	103.787	15.349	158.52	10000	
BC	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	21.3698	-91.1	54.9547	-91.02	-.0717	0.5	
CA	8.95238	2.4564	102.84	164.51	100.368	6.11	102.84	164.51	-158.4	10000	

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)
-----
Distância Z3 MHO      21                      1

```

RTP = 4347.8 RTC = 400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D.	Ang	Trip
AB	8.95238	2.4563	103.787	15.349	123.323	142.8	103.787	15.349	127.45	10000	
BC	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	149.16	-91.05	54.9547	-91.02	-.0275	1	
CA	8.95238	2.4564	102.84	164.51	125.513	36.448	102.84	164.51	-128.1	10000	

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)

-----  
Distância Z1 MHO            21G                                      9999

RTP = 4347.8    RTC =        400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D.	Ang	Trip
A	8.95238	2.4563	103.787	15.349	66.3957	180	66.3957	0	180	9999	
B	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	33.2511	2.6321	43.4706	-140.8	143.44	9999	
C	8.95238	2.4564	102.84	164.51	33.2148	-2.635	42.7143	139.97	-142.6	9999	

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)

-----  
Distância Z2 MHO            21G                                      9999

RTP = 4347.8    RTC =        400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D.	Ang	Trip
A	8.95238	2.4563	103.787	15.349	66.3957	180	66.3957	0	180	10000	
B	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	34.68	-17.94	43.4706	-140.8	122.86	10000	
C	8.95238	2.4564	102.84	164.51	35.0689	17.736	42.7143	139.97	-122.2	10000	

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)

-----  
Distância Z3 MHO            21G                                      1

RTP = 4347.8    RTC =        400

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D.	Ang	Trip
A	8.95238	2.4563	103.787	15.349	66.3957	180	66.3957	0	180	10000	
B	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	81.0766	-66.88	43.4706	-140.8	73.919	1	
C	8.95238	2.4564	102.84	164.51	82.1893	65.13	42.7143	139.97	-74.84	1	

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)

-----  
Distância Z1 QUAD1        21                                      9999

RTP = 4347.8    RTC =        400    Caract. = Quadr. 1    Tempo =

X =    2.8933    R =    0.1768    Rf =            2.5    AngInf =            -15    AngSup =            115

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Z'mod	Z'ang	X	RD	RE	D1	D2	Trip
AB	8.95238	2.4563	103.787	15.349	11.5932	12.893	X		X	X	X	9999
BC	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	3.06928	86.52		X	X	X	X	9999
CA	8.95238	2.4564	102.84	164.51	11.4875	162.05		X			X	9999

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z2 QUAD1    21                          0.5

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    0.5
X =   4.2548 R =   0.2601 Rf =           3 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 8.95238 2.4563 103.787 15.349 11.5932 12.893 X   X X X 10000
BC 17.9048 -177.5 54.9547 -91.02 3.06928 86.52 X X X X X 0.5
CA 8.95238 2.4564 102.84 164.51 11.4875 162.05 X X           X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD1    21                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    1
X =  11.3787 R =   0.6959 Rf =           3.5 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 8.95238 2.4563 103.787 15.349 11.5932 12.893 X   X X X 10000
BC 17.9048 -177.5 54.9547 -91.02 3.06928 86.52 X X X X X 1
CA 8.95238 2.4564 102.84 164.51 11.4875 162.05 X X           X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z1 QUAD1    21G                          9999

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =
X =   2.8933 R =   0.1768 Rf =           3 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A           66.3957      0   .1E13      0 X   X X X 9999
B 8.95238 -177.5 43.4706 -140.8 4.85576 36.741   X X X 9999
C 8.95238 2.4563 42.7143 139.97 4.77128 137.51   X   X 9999

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z2 QUAD1    21G                          0.5

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    0.5
X =   4.2548 R =   0.2601 Rf =           7 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A           66.3957      0   .1E13      0 X   X X X 10000
B 8.95238 -177.5 43.4706 -140.8 4.85576 36.741 X X X X X 0.5
C 8.95238 2.4563 42.7143 139.97 4.77128 137.51 X X X   X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD1    21G                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =      1
X = 11.3787 R =    0.6959 Rf =          9 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A          66.3957      0   .1E13      0 X     X X X 10000
B 8.95238 -177.5 43.4706 -140.8 4.85576 36.741 X X X X X 1
C 8.95238 2.4563 42.7143 139.97 4.77128 137.51 X X X X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z1 QUAD2    21                          9999

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =
X = 2.8933 R =    0.1768 Rf =          2.5 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 8.95238 2.4563 103.787 15.349 11.5932 12.893 X X X X 9999
BC 17.9048 -177.5 54.9547 -91.02 3.06928 86.52 X X X X 9999
CA 8.95238 2.4564 102.84 164.51 11.4875 162.05 X X X 9999

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z2 QUAD2    21                          0.5

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    0.5
X = 4.2548 R =    0.2601 Rf =          3 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 8.95238 2.4563 103.787 15.349 11.5932 12.893 X X X X 10000
BC 17.9048 -177.5 54.9547 -91.02 3.06928 86.52 X X X X X 0.5
CA 8.95238 2.4564 102.84 164.51 11.4875 162.05 X X X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD2    21                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =      1
X = 11.3787 R =    0.6959 Rf =          3.5 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
AB 8.95238 2.4563 103.787 15.349 11.5932 12.893 X X X X 10000
BC 17.9048 -177.5 54.9547 -91.02 3.06928 86.52 X X X X X 1
CA 8.95238 2.4564 102.84 164.51 11.4875 162.05 X X X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z1 QUAD2    21G                          9999

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =
X =  2.8933 R =  0.1768 Rf =          3 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A          66.3957      0   .1E13      0 X      X X X 9999
B 8.95238 -177.5 43.4706 -140.8 4.85576 36.741      X X X 9999
C 8.95238 2.4563 42.7143 139.97 4.77128 137.51      X      X 9999

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z2 QUAD2    21G                          0.5

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    0.5
X =  4.2548 R =  0.2601 Rf =          7 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A          66.3957      0   .1E13      0 X      X X X 10000
B 8.95238 -177.5 43.4706 -140.8 4.85576 36.741 X X X X X 0.5
C 8.95238 2.4563 42.7143 139.97 4.77128 137.51 X X X      X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Distância Z3 QUAD2    21G                          1

RTP = 4347.8 RTC =    400 Caract. = Quadr. 1 Tempo =    1
X = 11.3787 R =  0.6959 Rf =          9 AngInf =    -15 AngSup =    115
  Isec   Ang   Vsec   Ang   Z'mod   Z'ang   X RD RE D1 D2 Trip
-----
A          66.3957      0   .1E13      0 X      X X X 10000
B 8.95238 -177.5 43.4706 -140.8 4.85576 36.741 X X X X X 1
C 8.95238 2.4563 42.7143 139.97 4.77128 137.51 X X X      X 10000

```

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo(s)
-----
Sobretensão          59                          1

RTP = 4347.8 Tipo:    FASE Vmax =    64.8 Tempo =    1

```

```

  Vprim   Vsec   Tempo
-----
A 288675.2 66.3957 1
B 189001.4 43.47058 9999
C 185713.2 42.71429 9999

```

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)

-----  
 Sobretensão              59G                              9999

RTP = 4347.8 Tipo: NEUTRO Vmax = 12.48 Tempo = 1

Vprim      Vsec      Tempo

-----  
 N                              9999

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)

-----  
 Distância Z1 REAT      21                              0.0

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
AB	8.95238	2.4563	103.787	15.349	101.207	-179.1	25.9019	92.456	88.447	0.0
BC	17.9048	-177.5	54.9547	-91.02	4.51954	44.89	51.8038	-87.54	132.43	9999
CA	8.95238	2.4564	102.84	164.51	98.0056	-.9324	25.9019	92.456	-93.39	9999

Identificação relé      Modelo                      Tempo (s)

-----  
 Distância Z1 REAT      21G                              0.0

	Isec	Ang	Vsec	Ang	Oper.	Ang	Pol.	Ang	D. Ang	Trip
A			103.787	15.349	66.3957	180		90	90	0.0
B	8.95238	-177.5	54.9547	-91.02	34.8353	2.624	25.9019	-87.54	90.168	9999
C	8.95238	2.4563	102.84	164.51	31.6371	-2.89	25.9019	92.456	-95.35	9999