



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO MURILO ALBUQUERQUE LOURENÇO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO DE
ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ATPDraw COM ESTUDO
DE CASO DE UM ALIMENTADOR DA REDE AQUIRAZ

FORTALEZA

2018

JOÃO MURILO ALBUQUERQUE LOURENÇO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO DE ALIMENTADORES DE
DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ATPDraw COM ESTUDO DE CASO DE UM
ALIMENTADOR DA REDE AQUIRAZ

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientador: Prof. M.Sc. Lucas Silveira Melo.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L934m Lourenço, João Murilo Albuquerque.
Modelagem e simulação de relés de proteção de alimentadores de distribuição utilizando o ATPDraw com estudo de caso de um alimentador da rede Aquiraz / João Murilo Albuquerque Lourenço. – 2018.
115 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientação: Prof. Me. Lucas Silveira Melo.

1. Modelagem. 2. ATPDraw. 3. Relés. 4. Proteção. I. Título.

CDD 621.3

JOÃO MURILO ALBUQUERQUE LOURENÇO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO DE ALIMENTADORES DE
DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ATPDraw COM ESTUDO DE CASO DE UM
ALIMENTADOR DA REDE AQUIRAZ

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica do Centro
de Tecnologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. MSc. Lucas Silveira Melo. (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Lucas Martins Belmino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Enásio e Eliene.

À minha irmã, Mirela.

À minha namorada, Letícia.

Aos meus amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar-me em todas as conquistas alcançadas.

Aos meus pais, Enásio e Eliene, por me apoiarem nas minhas escolhas e decisões e no caminho que escolhi seguir.

À minha irmã, Mirela, por ser sempre tão forte e me ajudar a manter a força necessária para alcançar os objetivos.

À minha namorada e mulher, Letícia, por tudo que já fez por mim, por todos os anos ao meu lado, por me ajudar em tantos momentos difíceis e me ajudar em noites de estudo e entrevistas de emprego.

À minha amiga Adrielly, por me fazer companhia ao longo dos 5 anos de curso, todos os projetos e dificuldades que passamos e superamos.

Ao meu orientador Raimundo Furtado pelo empenho dedicado na elaboração deste trabalho e pelos valorosos aconselhamentos profissionais.

Ao meu coorientador Lucas Melo pelo aprendizado adquirido durante aulas práticas e pelo entusiasmo dado ao tema deste trabalho.

Aos Eng. Raquel Gondim e Edgney Holanda e todos os meus companheiros de trabalho na Enel Distribuição Ceará por todos os conhecimentos técnicos e desenvolvimento profissional proporcionado.

A todos os meus amigos que fizeram parte da minha vida durante a graduação e de alguma forma foram parte dela.

Aos professores do curso, que foram fundamentais e me iniciaram no mundo maravilhoso que é a Engenharia Elétrica.

RESUMO

Nos últimos anos, com o advento do conceito de redes elétricas inteligentes (REI) tem-se investido na evolução topológica da rede com sistemas de recomposição automática. Neste sentido, o ATPdraw tem sido muito utilizado para modelagem e simulação do sistema de distribuição de média tensão (SDMT) visando a análise do desempenho de relés, sistemas de proteção e a compreensão dos fenômenos transitórios. Este trabalho tem por objetivo apresentar a modelagem e os resultados das simulações do sistema de proteção de um alimentador radial com recurso pertencente à concessionária Enel Distribuição Ceará no ATPDraw. No decorrer desse trabalho foram realizadas a modelagem de um alimentador de distribuição em 13,8 kV, suprido por uma subestação distribuidora de energia, a modelagem dos relés e funções de proteção associados aos religadores do alimentador e a modelagem dos transformadores de corrente (TCs). Concluída a modelagem e os ajustes nas funções de proteção, foram realizadas simulações de faltas no ATP, considerando vários cenários de curto-circuitos, para avaliação da coordenação das funções de proteção, bem como o desempenho dos relés em condições de saturação dos TCs. Os resultados das simulações no ATP foram convertidos em arquivos no formato COMTRADE (Common Format for Transient Data Exchange) o mesmo das oscilografias geradas pelos relés. Para teste e validação do sistema de proteção modelado, o arquivo COMTRADE foi implantado em uma mala de teste de relés e integrados a relés de proteção de sobrecorrente, modelo SEL 751, utilizados nos alimentadores da rede de distribuição de Aquiraz. A partir dos resultados dos testes realizados na plataforma de teste do laboratório de redes elétricas inteligentes da Universidade Federal do Ceará, concluiu-se que a modelagem e simulação em ATP contribui para a análise e compreensão da dinâmica de um sistema de proteção em uma rede real e para a proposição de soluções com finalidade de melhorar a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: Modelagem. ATPdraw. Relés de proteção. Sistema de Distribuição de Energia. Estudo de Proteção.

ABSTRACT

In recent years, with the advent of the concept of intelligent electric networks (REI), the network has been optimized with automatic recombination systems. In this context, ATPdraw has been widely used for modeling and simulation of the medium voltage distribution system (SDMT) for the analysis of relay performance, protection systems and the understanding of transient phenomena. This work aims to present the modeling and simulation results of the protection system of a backup radial feeder belonging to the Enel Distribuição Ceará distribution company with ATPDraw. In this work was presented the modeling of a distribution feeder in 13.8 kV, supplied by a power distribution substation, the modeling of the relays and protection functions associated with feeder reclosers and the modeling of current transformers (CTs). After completing the modeling and the adjustments in the protection functions, fault simulations were performed in the ATP, considering several scenarios of short circuits, to evaluate the coordination of the protection functions, as well as the performance of the relays in conditions of saturation of the CTs. The results of the simulations in ATP were converted into files in the format COMTRADE (Common Format for Transient Data Exchange), the same of the oscillographs generated by the relays. To test and validate the modeling protection system, the COMTRADE file was implemented in a relay test case and integrated with overcurrent protection relays, model SEL 751, used in the feeders of the Aquiraz distribution network. From the results of the tests carried out in the test platform of the laboratory of intelligent electric grids of the Federal University of Ceará it was concluded that the modeling and simulation in ATP contributes to analysis and understanding of the dynamics of a protection system in a real network and for the proposition of solutions with the purpose of improving the reliability of the system.

Keywords: Modeling. ATPdraw. Protection relays. Power distribution system. Protection study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de estrutura para rede aérea nua	22
Figura 2.2 - Exemplo de espaçador utilizado na rede compacta	23
Figura 2.3 - Decomposição de sistema desequilibrado em componentes simétricas	25
Figura 2.4 - Zonas de proteção de um sistema elétrico	27
Figura 2.5 - Curva de tempo definido.....	28
Figura 2.6 - Curva de tempo inverso	29
Figura 2.7 - Curvas de tempo inverso - variação com o tipo.....	30
Figura 2.8 - Influência do dial de tempo (TMS) nas curvas de tempo inverso	31
Figura 2.9 - Atuação de um religador	32
Figura 2.10 - Utilização da função de sobrecorrente de sequência negativa.....	32
Figura 2.11 - Transformador de corrente - exemplo de representação	33
Figura 2.12 - Curva de excitação típica de um TC 600:5 multiratio classe C100.....	35
Figura 2.13 - Curva de excitação e ponto de saturação de acordo com a IEC	36
Figura 2.14 - Circuito equivalente de um TC	37
Figura 3.1 - Componentes do ATP vistos na interface do ATPdraw.....	40
Figura 3.2 - Tela de criação do arquivo SUP.....	41
Figura 3.3 - Fluxograma da aquisição dos valores RMS.....	43
Figura 3.4 - Fluxograma simplificado de aquisição das componentes de sequência	45
Figura 3.5 - Bloco de aquisição de sinais para o relé de proteção.....	45
Figura 3.6 - Algoritmo de funcionamento das funções de sobrecorrente.....	47
Figura 3.7 - Fluxograma da modelagem da lógica de religamento	50
Figura 3.8 - Fluxograma da modelagem da lógica de religamento (Continuação)	51
Figura 3.9 - Exemplo de atuação da função de religamento	52
Figura 3.10 - Blocos de aquisição de sinais e do relé digital agregados	53
Figura 3.11 - Exemplo de tela de parametrização dos relés digitais utilizados.....	53
Figura 3.12 - Modelagem utilizada para o disjuntor no ATPdraw.....	54
Figura 4.1 - Rede de Distribuição de Aquiraz com condição normal de operação	55
Figura 4.2 - Coordenação entre os relés 21I7 e RS1	61
Figura 4.3 - Coordenação entre os relés 21S7 e RS3	61
Figura 4.4 - Modelagem da rede aquiraz na situação normal.....	62
Figura 4.5 - Dados de entrada da fonte utilizada.....	63
Figura 4.6 - Modelo de linha pi-equivalente utilizado	63

Figura 4.7 - Exemplo da modelagem dos curtos trifásico e bifásico no ATPdraw	65
Figura 4.8 - Curtos fase-terra e fase-terra mínimo	66
Figura 4.9 - Correntes e sinal de abertura do disjuntor no relé RS1 para um curto trifásico em T2	67
Figura 4.10 - Correntes no disjuntor do relé 21I7 para um curto trifásico em T2.....	67
Figura 4.11 - Curto trifásico que se extingue antes do fim do ciclo de religamento	68
Figura 4.12 - Correntes de fase para um curto circuito monofásico no final de T2	68
Figura 4.13 - Correntes nas fases com sistema de religamento e sinal de trip do religador.....	69
Figura 4.14 - Componente de sequência negativa da corrente após um curto monofásico em T2	70
Figura 4.15 - Correntes das fases em RS3 e sinal de trip do relé	71
Figura 4.16 - Correntes nas fases para uma falta monofásica em T3	72
Figura 4.17 - Coordenação entre os relés RS1 e RL1	73
Figura 4.18 - Corrente de falta em RL1	74
Figura 4.19 - Modelagem do TC no ATP	74
Figura 4.20 - Curva de excitação simulada do TC utilizado	75
Figura 4.21 - Corrente no indutor não linear com tensão abaixo do joelho	76
Figura 4.22 - Corrente no indutor não linear em um ponto acima da saturação	76
Figura 4.23 - Trecho utilizado para estudo da saturação de TCs.....	78
Figura 4.24 - Corrente primária vista do lado secundário para $R_b = 0,01\Omega$	79
Figura 4.25 - Corrente primária vista do lado secundário para $R_b = 1\Omega$	79
Figura 4.26 - Corrente primária vista do lado secundário para $R_b = 15\Omega$	80
Figura 4.27 - Curva de atuação do relé parametrizado.....	81
Figura 4.28 - Atuação para $R_B = 0,05\Omega$	81
Figura 4.29 - Atuação para $R_B = 15\Omega$	81
Figura 4.30 - Curva de tempo de atuação do relé em função do burden do TC	82
Figura 5.1 - Definição das variáveis no software The Output Processor	85
Figura 5.2 - Diagrama de ligação dos testes de bancada revisar	85
Figura 5.3 - Configuração e geração de sinais no software Transient da mala de testes.....	86
Figura 5.4 - Parametrização geral do grupo de ajuste do Relé SEL 751	87
Figura 5.5 - Parametrização da função instantânea de fase.....	88
Figura 5.6 - Parametrização da função instantânea de neutro	88
Figura 5.7 - Parametrização da função instantânea residual	89
Figura 5.8 - Parametrização da função temporizada residual.....	89

Figura 5.9 - Curto circuito trifásico ao final de T2.....	90
Figura 5.10 - Atuação do relé no ATP para curto trifásico	90
Figura 5.11 - Corrente gerada e atuação do relé SEL 751 para curto-trifásico	91
Figura 5.12 - Atuação da função de neutro para o curto fase-terra através de uma impedância	92
Figura 5.13 - Corrente gerada e atuação do relé SEL 751 para curto-trifásico	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes da curva de tempo inverso - padrão IEC	30
Tabela 3.1 - Definições dos dados de entrada das funções de sobrecorrente	46
Tabela 3.2 - Definições dos dados de entrada das funções de sobrecorrente de sequência negativa	48
Tabela 3.3 - Definições dos dados de entrada da função de religamento (79)	49
Tabela 4.1 - Carregamento por trecho do alimentador 01I7	56
Tabela 4.2 - Impedâncias dos condutores utilizados na rede Aquiraz	56
Tabela 4.3 - Impedância equivalente nas barras de 15 kV das subestações em pu	57
Tabela 4.4 - Curto-circuito nos trechos dos alimentadores	57
Tabela 4.5 - Ajustes de proteção para os relés do alimentador na situação normal de operação	61
Tabela 4.6 - Impedâncias de carga dos trechos.....	65
Tabela 4.7 - Ajustes de proteção de RL1	73
Tabela 4.8 - Parametrização do relé de sobrecorrente	80
Tabela 4.9 - Tempo de atuação de dispositivo de proteção com o efeito de saturação de TCs	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATP	Alternative Transients Program
EMTP	Electro-Magnetic Transients Program
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
COMTRADE	Common Format for Transient Data Exchange
SDMT	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão
PRODIST	Procedimentos de Redes de Distribuição
IEC	International Electric Committee
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
RMS	Root Mean Square

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1.	Objetivos do trabalho	19
1.2.	Estrutura do trabalho	20
2.	CARACTERÍSTICAS GERAIS E PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ..	21
2.1.	Introdução	21
2.2.	Rede de distribuição	21
2.2.1.	<i>Rede de Distribuição Aérea</i>	21
2.3.	Curto-circuito no sistema elétrico	23
2.3.1	<i>Curto-circuito simétrico ou trifásico</i>	24
2.3.2.	<i>Curto-circuito assimétrico ou desequilibrado</i>	24
2.3.3.	<i>Tipos de curto-circuito assimétricos</i>	25
2.3.3.1.	Curto-circuito bifásico	25
2.3.3.2.	Curto-circuito fase-terra	26
2.4.	Proteção de sistemas elétricos	26
2.4.1.	<i>Objetivos básicos e filosofia de proteção</i>	26
2.4.2.	<i>Zonas e níveis de proteção</i>	27
2.4.3.	<i>Relés de sobrecorrente</i>	28
2.4.3.1.	Curvas características	28
2.4.3.2.	Religadores	31
2.5.	Transformadores de corrente	33
2.5.1.	<i>Características e especificação</i>	33
2.5.2.	<i>Saturação do TC</i>	34
2.5.2.1.	Característica de excitação	34
2.5.2.2.	Tipos de saturação	36
2.5.3.	<i>Circuito equivalente</i>	37
2.6	Considerações finais	38
3.	MODELAGEM COMPUTACIONAL	39
3.1.	Introdução	39
3.2.	Utilização do ATP	39
3.3.	O ATP e ATPdraw	39
3.4.	A linguagem MODELS	40
3.5.	Modelagem de funções de proteção	41

3.5.1.	<i>Aquisição de sinais</i>	41
3.5.1.1.	Aquisição do valor RMS	42
3.5.1.2.	Aquisição do valor de sequência negativa.....	44
3.5.2.	<i>Modelagem das funções de proteção</i>	46
3.5.2.1.	Sobrecorrente de fase e neutro (50/51,50/51N).....	46
3.5.2.2.	Sobrecorrente de sequência negativa (46(I2) e 46(I2/I1)).....	48
3.5.2.3.	Função de religamento (79).....	49
3.6.	Modelagem do disjuntor	53
3.7.	Considerações finais	54
4.	DEFINIÇÃO DOS AJUSTES DE PROTEÇÃO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ALIMENTADOR 01I7 DO SISTEMA AQUIRAZ E SIMULAÇÃO DO EFEITO DE SATURAÇÃO NA ATUAÇÃO DE RELÉS. ..	55
4.1	Introdução	55
4.2	Características gerais do sistema	55
4.3	Corrente por trecho, condutores e impedâncias	56
4.4.	Nível de curto-circuito	57
4.5.	Ajuste das proteções	57
4.5.1.	<i>Proteção de sobrecorrente</i>	58
4.5.1.1.	Critério de sensibilidade	58
4.5.1.2.	Definição dos TCs utilizados.....	58
4.6.	Ajustes e simulação no ATPdraw das situações de operação da Rede Aquiraz..	60
4.6.1.	<i>Situação normal de operação</i>	60
4.6.1.1.	Ajustes de proteção	60
4.6.2.	<i>Modelagem do alimentador no ATPdraw</i>	62
4.6.2.1.	Modelagem das subestações, das impedâncias reduzidas das barras e das linhas utilizadas.....	62
4.6.2.2.	Modelagem das cargas dos trechos	64
4.6.3.	<i>Simulações de funcionamento dos relés para condições de falta na situação normal de operação</i>	66
4.6.3.1.	RS1 X 21I7 - Coordenação e atuação da proteção	66
4.6.3.2.	RS3 X 21S7 - Coordenação e atuação da proteção	71
4.6.4.	<i>Análise em situação de contingência</i>	72
4.6.4.1.	Ajustes de proteção	72
4.6.4.2.	RS1 X RL1 - Coordenação e atuação da proteção	73

4.7.	Modelagem e simulação do transformador de corrente no ATP.....	74
4.7.1.	<i>Modelagem do circuito equivalente e do efeito de saturação</i>	74
4.7.2.	<i>Efeito da saturação na atuação de dispositivos de proteção</i>	77
4.8	Considerações finais	83
5.	VALIDAÇÃO DE RESULTADOS COM MALETA DE TESTES E RELÉ SEL 751	84
5.1.	Introdução	84
5.2.	Ferramenta de pós processamento e geração de arquivos COMTRADE	84
5.3.	Diagrama elétrico dos testes e geração de sinais	85
5.4.	Ajustes no Relé SEL 751	86
5.4.1.	<i>Ajustes das funções de fase</i>	88
5.4.2.	<i>Ajustes das funções de neutro</i>	88
5.5.	Testes de atuação do relé para as correntes geradas na maleta de testes e comparação de resultados com o ATP	89
5.6	Considerações finais	93
6.	CONCLUSÃO	94
	BIBLIOGRAFIA	95
	APÊNDICE A – DADOS PARA LEVANTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE	97
	APÊNDICE B – AJUSTES DOS RELÉS MODELADOS NO ATP	99
	APÊNDICE C – CÁLCULO DOS VALORES DE CURTO-CIRCUITO EM CADA TRECHO UTILIZANDO O PROTECAD	107
	APÊNDICE D – GERAÇÃO DE ARQUIVOS COMTRADE COM SIMULAÇÕES DO ATP E TESTES DE BANCADA A PARTIR DOS ARQUIVOS GERADOS	109

1 INTRODUÇÃO

Em um Sistema Elétrico de Potência, as faltas e falhas podem fazer com que ocorram interrupções com frequência. Com isso, os sistemas de proteção tornam-se cada dia mais complexos. Faltas em uma rede de distribuição podem ocorrer por diversos fatores, entre os quais estão: operacionais, elétricos, mecânicos, naturais e de manutenção.

A avaliação das interrupções de energia elétrica e análise de confiabilidade dos sistemas de proteção têm sido realizadas pelas empresas do setor elétrico com o objetivo de nortear o planejamento operacional e estratégico da empresa para garantir melhoria da qualidade do fornecimento de energia elétrica (CONCEIÇÃO, 2012) (SPIRONELLO; LOPES; BARBOSA, 2015).

A análise das ocorrências de faltas permite a identificação das causas que originaram o problema e a implementação de ações para melhoria dos procedimentos operacionais, elaboração de especificações técnicas e aplicação de novas tecnologias que proporcionem menor tempo de atuação das proteções, mais segurança à pessoas e ao sistema elétrico. Neste sentido, estudos e desenvolvimento de sistemas inteligentes para mitigar o tempo de restabelecimento do fornecimento de energia e proporcionar maior confiabilidade ao sistema elétrico vêm ocorrendo tanto no âmbito acadêmico quanto empresarial. (RODRIGUES, 2015; VIEIRA, 2015).

Em VIEIRA (2015) a autora apresentou um estudo das proteções para o projeto da Rede Inteligente de Aquiraz, realizando os ajustes dos dispositivos de proteção para situações de funcionamento normal e de contingência.

Em RODRIGUES (2015), o autor apresentou teste e validação das funções de proteção baseadas na norma IEC 61850 para o mesmo alimentador, realizando testes e ensaios de funções lógicas na Rede Aquiraz. O ATP para as simulações é sua utilização ser expandida mundialmente, sendo utilizado por empresas concessionárias e por ter uma interface gráfica gratuita que possibilita uma simulação da rede tanto em estado permanente quanto em estados transitórios. Além disso, proporciona uma simulação dinâmica que possibilita o estudo da rede em uma situação muito próxima de uma situação real.

Nas últimas décadas, a modelagem e simulação de redes elétricas e esquemas de proteção, utilizando ATP e PSCAD, para análise do comportamento do sistema elétrico têm sido realizadas por muitos pesquisadores, em função das suas inúmeras vantagens, entre as quais estão:

- Proporciona um método de diminuição de falhas e atuações indevidas do

sistema, já que uma previsão de como o sistema funcionaria em determinada situação é fornecida e, portanto, podem ser feitos estudos para evitar esses tipos de problemas;

- Do ponto de vista financeiro, traz uma solução fácil e barata de analisar situações específicas no sistema, que não seriam possíveis ou seriam de alto custo caso fossem implementadas com equipamentos reais.

Em CONCEIÇÃO (2012) é apresentado um estudo utilizando o ATP para simulação da proteção de alimentadores de distribuição, com a utilização de fusíveis, seccionadores e religadores, por meio do estudo de coordenação e simulação da atuação dos dispositivos.

Em IZAGUIRRE (2016) é apresentado a modelagem e simulação de um relé de proteção direcional para linhas de transmissão, onde é apresentado uma modelagem no ATP e um exemplo de validação dos resultados obtidos em simulação.

Em MIGUEL (2011) é apresentada uma introdução à simulação de relés de proteção no ATP, com o exemplo de modelagem de diversas funções de proteção e estudos relacionados. A especificação correta dos relés de proteção e dos transformadores de corrente (TC), aplicados a cada elemento da rede elétrica, é de fundamental importância para garantir a confiabilidade do sistema de proteção. A modelagem de TC e relés em ATP proporciona a análise do comportamento do sistema de proteção, quando submetido a diversas condições de faltas que podem levar o TC a sua saturação. O presente trabalho propõe simular relés de proteção de alimentadores utilizando ATP, com a aplicação em um alimentador da Rede Aquiraz, tomando como base os ajustes e estudos realizados em VIEIRA (2015) e RODRIGUES (2015).

1.1. Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo principal modelar e simular relés digitais para alimentadores de distribuição, utilizando a linguagem Models do ATP. Como objetivos específicos, podem ser apresentados.

- Modelar das funções de sobrecorrente de fase e neutro (50/51 e 50/51N);
- Modelar das funções de sobrecorrente de sequência negativa (46) e da função de religamento (79);
- Estudar a saturação de transformadores de corrente e sua influência na atuação de dispositivos de proteção;

- Modelar e simular um alimentador de distribuição da Rede Inteligente de Aquiraz;
- Utilizar ATP e ferramentas de pós processamento para criação de sinais COMTRADE e geração desses sinais em malas de teste;
- Validar as atuações das funções de sobrecorrente através de parametrização do relé SEL 751 e sua atuação mediante sinais gerados pela mala.

1.2. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, com a seguinte estrutura:

No Capítulo 1 é dada uma introdução ao tema de proteção, além dos objetivos e justificativa do trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados aspectos gerais do sistema de distribuição, assim como conceitos de proteção de sistemas elétricos e de transformadores de corrente.

No Capítulo 3 é abordada a modelagem computacional dos relés de proteção no ATP e linguagem Models.

No Capítulo 4 é feita a simulação de um alimentador da rede de distribuição e apresentados os resultados de simulação dos relés e a atuação no sistema e o estudo e modelagem no ATP da saturação em transformadores de corrente e sua influência em dispositivos de proteção.

No Capítulo 5 é abordada a validação dos resultados através da utilização da mala de testes e do relé SEL 751.

No Capítulo 6 são feitas as conclusões e propostas de trabalhos futuros em relação a temas relacionados ao presente trabalho.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS E PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

2.1. Introdução

Neste capítulo serão abordados os conceitos que serão utilizados nos capítulos posteriores. Serão abordados aspectos gerais das redes de distribuição, um resumo sobre curto-circuito e seus tipos, conceitos sobre Proteção de Sistemas Elétricos e Relés, além das definições e conceitos acerca de transformadores de instrumentos, com ênfase nos transformadores de corrente.

2.2. Rede de distribuição

Uma rede de distribuição de energia elétrica em média tensão (SDMT) é composta por alimentadores que suprem as cargas em áreas urbanas e rurais. Logo, a primeira classificação dos alimentadores é entre alimentadores urbanos e alimentadores rurais. A rede de distribuição primária em média tensão opera nos níveis de tensão de 13,8 kV ou 34,5 kV no Brasil, conforme estabelecido pelos Procedimentos de Redes de Distribuição (PRODIST) (Aneel, 2018). As redes de distribuição são predominantemente aéreas, com topologias radiais caracterizadas por apresentar poucos recursos operacionais e baixa confiabilidade. Nos últimos anos as empresas de energia estão investindo na mudança das topologias dos SDMT para radial com recurso e na automação do sistema de distribuição. A topologia radial com recurso permite a transferência de cargas em alimentadores de distribuição supridos por uma mesma subestação ou por subestações distintas, proporcionando maior confiabilidade ao SDMT suprido. A rede primária atende consumidores de média tensão assim como os transformadores de distribuição, de onde saem os alimentadores de distribuição em tensão secundária. A rede de distribuição primária pode ser dividida em aérea ou subterrânea (“Redes de Energia Elétrica | ABRADEE”, 2018).

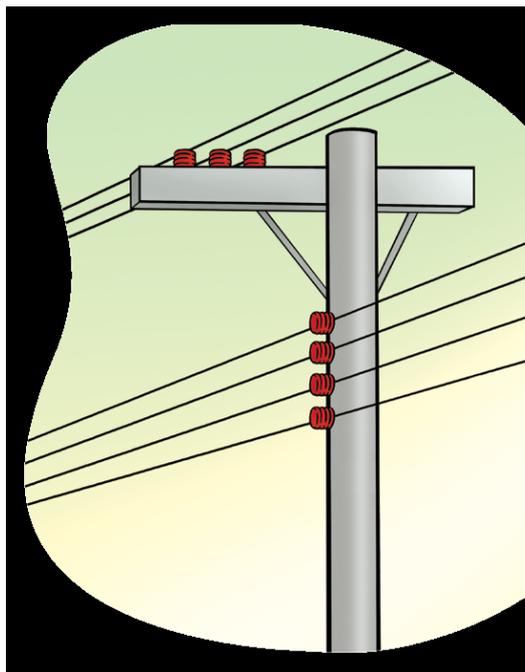
2.2.1. Rede de Distribuição Aérea

A rede de distribuição aérea é a mais utilizada, em geral, em função do seu custo podendo ser classificada de acordo com os condutores que a compõem nos seguintes tipos: rede aérea convencional com condutores nus, também conhecida como rede aérea nua, rede aérea compacta (Spacer) e rede aérea isolada (“Redes de Energia Elétrica | ABRADEE”, 2018).

2.2.1.1. Rede aérea convencional

As redes elétricas convencionais são compostas por condutores nus, suportados por isoladores fixados em cruzetas montadas em postes, conforme mostrado na Figura 2.1. Esse tipo de rede é muito utilizada em função do seu baixo custo.

Figura 2.1 - Exemplo de estrutura para rede aérea nua.



Fonte: Redes de Energia Elétrica | ABRADDEE, 2018.

Os condutores dessa rede não possuem isolamento ou cobertura e pode ser construída com vários tipos de condutores como liga de alumínio (CAL), condutores de alumínio sem alma de aço (AA), alumínio com alma de aço (ACSR ou CAA), cobre, aço-cobre ou aço-alumínio. Os condutores de alumínio com alma de aço são utilizados nos sistemas de distribuição por apresentar maior suportabilidade a esforços mecânicos do que os cabos AA. Essa rede, apesar do baixo custo, tem um baixo nível de confiabilidade, especialmente em áreas com maior densidade populacional (VELASCO, 2003).

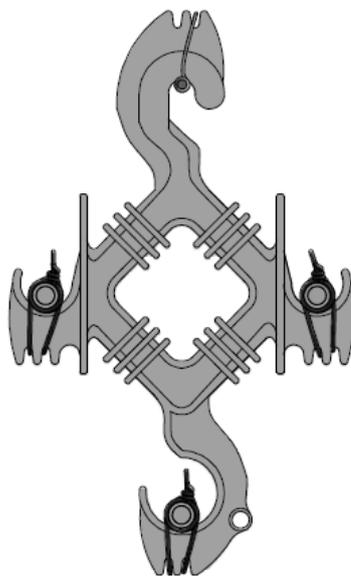
2.2.1.2. Rede aérea compacta ou Spacer

A rede aérea compacta apresenta, na maioria dos casos, maior confiabilidade que a rede aérea convencional, além de promover a preservação da arborização (RIBEIRO, 2008).

Basicamente, a rede aérea compacta é um conjunto formado por cabo de aço

(mensageiro) e cabos cobertos, fixados em estruturas compostas por braços metálicos, espaçadores ou separadores de fase (RIBEIRO, 2008). Na Figura 2.2, pode ser visto um exemplo de espaçador utilizado na rede compacta.

Figura 2.2 - Exemplo de espaçador utilizado na rede compacta.



Fonte: (Enel Distribuição Ceará, 2018)

Esse padrão de rede é geralmente utilizado em áreas onde é necessário alto grau de confiabilidade, áreas densamente arborizadas, áreas onde sejam necessário circuitos duplos com pouco espaço, alimentadores expressos, entre outras. Não é indicada para áreas com alto grau de corrosão, como regiões litorâneas (Enel Distribuição Ceará, 2018).

2.2.1.3. Rede aérea isolada

A rede isolada de média tensão é indicada apenas em áreas onde é exigido nível de confiabilidade muito grande, devido ao seu alto custo financeiro. É a rede aérea menos suscetível a problemas, já que usa condutores isolados, sendo possível a utilização desses condutores multiplexados (em contato um com o outro em espiral).

2.3. Curto-circuito no sistema elétrico

O curto-circuito é a ligação de baixa impedância entre pontos de diferentes níveis de tensão. Sua ocorrência acarreta alto nível de corrente e oscilação de tensão, ocasionando

danos físicos aos circuitos envolvidos e, em alguns casos, perda de sincronismo pelo sistema elétrico (MAEZONO, 2015).

Os curtos circuitos acontecem porque o sistema está exposto às condições mais diversas e imprevisíveis. As falhas podem ocorrer devido a problemas de isolamento, problemas mecânicos, problemas de natureza térmica, problemas de manutenção ou problemas de outra natureza (atos de vandalismo, queimadas, entre outros) (KINDERMANN, 2010).

Os curtos-circuitos são classificados em:

- Curto-circuito trifásico ou simétrico
- Curto-circuito desequilibrados ou assimétricos.

2.3.1 Curto-circuito simétrico ou trifásico

É caracterizado pelo contato entre os três condutores de fase do sistema. Em termos de circuitos de sequência, os três ficam com sua tensão em zero (MARDEGAN, 2012). É um curto-circuito simétrico, portanto não há diferença entre um curto trifásico e um curto trifásico à terra. A corrente de falta pode ser definida por.

$$I_{cc_{3f}} = \frac{V}{|Z_1|} \quad (2.1)$$

Em que: V – Tensão do sistema (pu);

Z_1 – Impedância de sequência positiva vista do ponto do curto;

$I_{cc_{3f}}$ – Corrente de curto-circuito trifásico

Os curtos-circuitos desequilibrados são calculados pelo método das componentes simétricas.

2.3.2. Curto-circuito assimétrico ou desequilibrado

O estudo de curto-circuito pode ser feito através da utilização da metodologia proposta por Fortescue. Seu estudo “Método de componentes simétricas aplicado a circuitos polifásicos” estabeleceu um sistema de “n” fasores desequilibrados pode ser decomposto em “n” sistemas de fasores equilibrados (KINDERMANN, 2010). Um sistema trifásico desequilibrado (como em uma situação de curto-circuito) pode, portanto, ser decomposto em 3 sistemas balanceados denominados componentes de sequência positiva, negativa e zero.

Componentes de sequência positiva: conjunto de 3 fasores balanceados, ou seja, de mesmo módulo, defasados de 120° com sequência de fase igual ao do sistema original

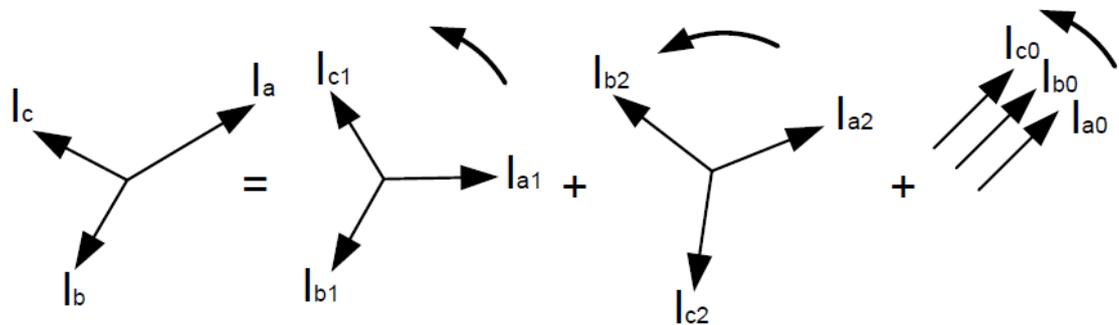
(KINDERMANN, 2010). É representada, por convenção, pelo índice 1.

Componentes de sequência negativa: conjunto de 3 fasores, girando numa sequência de fase contrária à do sistema original. Representado, por convenção, pelo índice 2.

Componentes de sequência zero: conjunto de 3 fasores iguais, em fase, girando no mesmo sentido do sistema original. Representado pelo índice 0. As componentes são representadas na Figura 2.3.

Esse estudo de componente simétrica permite a modelagem do curto-circuito através das componentes simétricas das impedâncias do sistema elétrico em estudo, para todos os tipos de curto, apresentados a seguir:

Figura 2.3 - Decomposição de sistema desequilibrado em componentes simétricas.



Fonte: (ELETROBRÁS, 1982)

2.3.3. Tipos de curto-circuito assimétricos

2.3.3.1. Curto-circuito bifásico

Contato simultâneo entre duas fases do sistema ou duas fases e a terra. Para o contato apenas entre duas fases, a corrente pode ser encontrada por: (MARDEGAN, 2012)

$$I_{CC_{2f}} = \sqrt{3} \cdot \frac{I_{CC_{3f}}}{2} \quad (2.2)$$

Para o contato simultâneo entre duas fases e a terra, a corrente de curto-circuito é definida por:

$$I_{CC_{2f-T}} = \frac{V}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (2.3)$$

Em que: Z_2 – Impedância de sequência negativa do sistema;

Z_0 – Impedância de sequência zero do sistema.

2.3.3.2. Curto-circuito fase-terra

Tipo de curto-circuito mais comum no sistema elétrico (KINDERMANN, 2010), ocorre quando do contato simultâneo entre uma das fases do sistema e a terra. Esses curtos podem ser fase-terra ou fase-terra mínimo, que ocorre quando há uma impedância entre a fase e a terra, seja ela de aterramento ou uma impedância devido ao tipo de solo do local. O curto fase-terra pode ser calculado por:

$$I_{cc_{1f}} = \frac{3V}{|2 \times Z_1 + Z_0 + 3 \times R_C|} \quad (2.4)$$

Em que R_c = resistência de contato ou de aterramento.

2.4. Proteção de sistemas elétricos

2.4.1. Objetivos básicos e filosofia de proteção

O objetivo fundamental de um sistema de proteção é isolar uma área com problema do sistema de potência para que o resto do sistema sofra um impacto minimizado e na medida do possível, continue intacto (SANDERS, 2015).

Segundo (NPAG, 2011) sistemas de proteção devem atender aos seguintes aspectos: proteção de materiais e equipamentos contra danos causados por curto-circuitos e sobrecargas; melhoria da confiabilidade dos circuitos de distribuição; racionalização dos custos dos esquemas.

Os cinco objetivos básicos do sistema de proteção são: confiabilidade, seletividade, velocidade de operação, simplicidade e economia (SANDERS, 2015).

Confiabilidade é a garantia de que o sistema vai funcionar corretamente. Em outros termos, é dividido em duas ideias: a habilidade do sistema de atuar corretamente quando requerido e a habilidade de evitar atuações desnecessárias. (SANDERS, 2015)

Seletividade é a característica do sistema de proteção em selecionar os equipamentos que irão operar para uma determinada falta. É importante que a menor parte possível do sistema seja retirada de operação, diminuindo assim os inconvenientes causados pelo desligamento do sistema. (RODRIGUES, 2015)

Velocidade é a habilidade do sistema de proteção de isolar a área com problema o mais rápido possível. A análise de velocidade deve ser feita com cuidado, pois como regra geral,

quanto mais rápido um sistema atua, a possibilidade de atuação indevida aumenta, influenciando negativamente na confiabilidade do sistema.

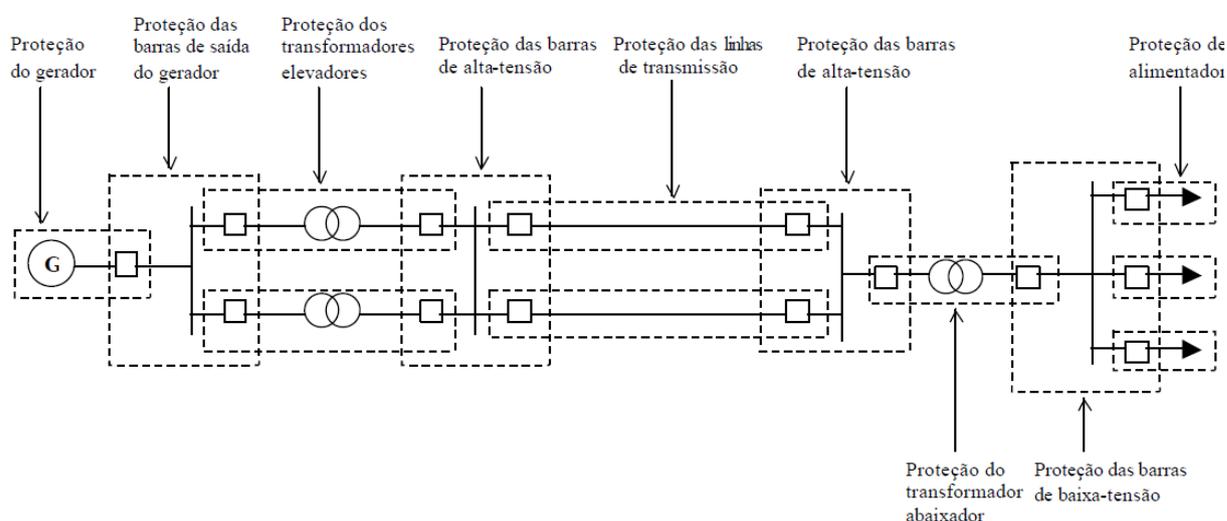
Simplicidade é a utilização do mínimo de equipamentos de proteção e circuito associados para atingir os objetivos de proteção (SANDERS, 2015). Ou seja, para a adição de outros relés ou outras tecnologias deve ser feito um estudo apurado, pois a adição implica em mais pontos de defeito para o sistema.

Por fim, economia significa atingir a máxima proteção com um mínimo custo global. Talvez o principal fator na escolha da tecnologia de proteção utilizada ou até o tipo de rede, que influencia no sistema de proteção utilizado.

2.4.2. Zonas e níveis de proteção

As zonas de proteção determinam a área de atuação de cada uma das proteções utilizadas no sistema. Segundo (ALMEIDA, 2000), um sistema de proteção pode ser dividido em 3 níveis: proteção principal, de retaguarda e auxiliar. O conceito de zonas de proteção é mostrado na Figura 2.4:

Figura 2.4 - Zonas de proteção de um sistema elétrico.



Fonte: ALMEIDA, 2000.

A proteção principal deve ser a primeira a atuar para uma falta dentro da sua zona de proteção. A proteção de retaguarda deve atuar apenas para o caso em que a proteção principal falhar. As proteções auxiliares existem como funções auxiliares das funções de proteção principal e de retaguarda, como sinalização, alarme, intertravamento, etc.

2.4.3. Relés de sobrecorrente

As funções de proteção caracterizam o tipo de proteção utilizada em um determinado sistema. As funções de proteção e sua codificação são padronizadas pela ANSI. Para um alimentador, as proteções mais comuns são funções de sobrecorrente e a função de religamento.

Essas funções podem ser resumidas nas funções:

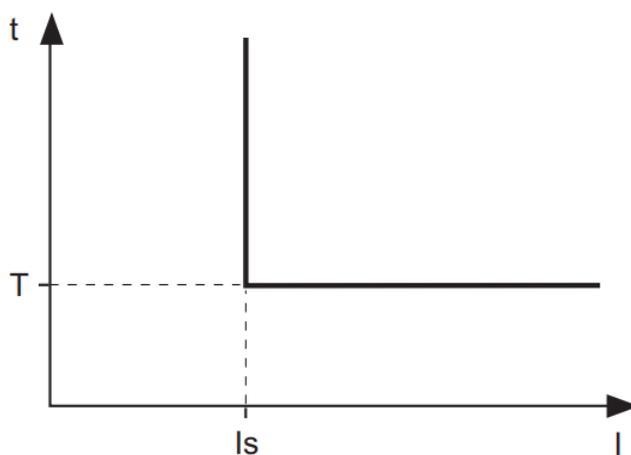
- 50/51P - Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51N – Sobrecorrente de neutro instantânea e temporizada;
- 46 – Sobrecorrente de sequência negativa;
- 50BF – Falha de disjuntor;
- 79 – Religamento automático.

2.4.3.1. Curvas características

O relé pode ser definido como um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor (ALMEIDA, 2000). O sinal enviado pelo relé para o disjuntor é comumente chamado de sinal de “trip”. As curvas características de um relé de sobrecorrente são de tempo definido e de tempo dependente.

a) Curva de tempo definido: é uma curva em que à medida que se define um tempo de atuação e um valor mínimo para a corrente. O relé irá atuar para qualquer valor maior que essa corrente mínima no tempo de atuação definido, conforme mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Curva de tempo definido.

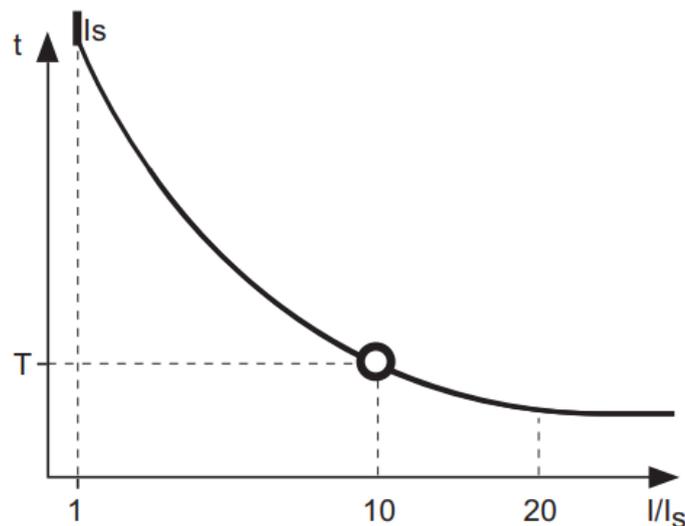


Pode ser observado que para qualquer valor acima de I_s (valor mínimo definido para essa curva) o relé irá atuar com tempo T . Valores abaixo de I_s implica em não atuação do relé de sobrecorrente.

Esse tipo de curva está associado à unidade de sobrecorrente instantânea de um relé temporizado (50/50N), em que o ajuste é de um tempo definido e de uma corrente que é a corrente de ajuste instantâneo do relé. Com isso, essa unidade atua em geral para tempos pequenos e para correntes de curto elevadas, 3m que o ajuste de tempo inverso não deve mais ser utilizado.

b) Curva de tempo dependente ou de tempo inverso: nesse tipo de curva, o tempo atuação é inversamente proporcional ao valor da corrente. Ou seja, o relé atua em tempos decrescentes para valores maiores que a corrente mínima de atuação (chamada corrente de pick-up). Um exemplo de curva de tempo inverso é mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Curva de tempo inverso.



Fonte: SCHNEIDER, 2008.

As curvas de tempo inverso são normalmente definidas em 3 tipos: Curva Normalmente Inversa, Curva Muito Inversa e Curva Extremamente Inversa. As curvas IEC possuem ainda mais duas divisões e o equacionamento para o tempo de atuação do relé que obedece esse tipo de curva e as constantes são apresentados:

$$t_d = TMS \cdot \frac{\beta}{\left(\frac{I}{I_{pick-up}}\right)^\alpha - 1} \quad (2.5)$$

Em que: α e β - constantes dependentes da curva, conforme Tabela 1.

TMS - dial de tempo;

$I_{pick-up}$ - corrente mínima de atuação do relé;

I – corrente do sistema

t_d - tempo de atuação do relé

Os valores das constantes para cada tipo de curva IEC são apresentados na Tabela

2.1.

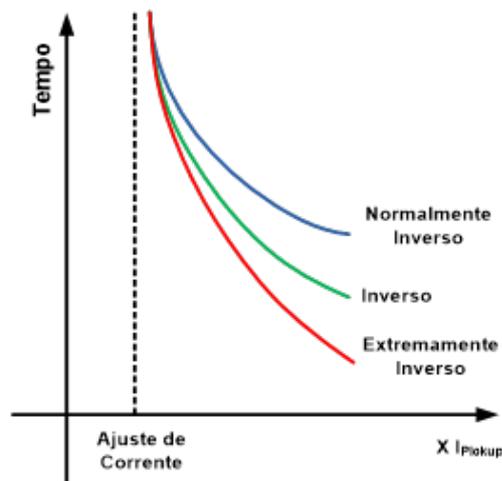
Tabela 2.1 - Coeficientes da curva de tempo inverso - padrão IEC.

Tipo de curva	β	α
Normalmente inversa (NI)	0,14	0,02
Muito inversa (MI)	13,5	1
Extremamente inversa (EI)	80	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, os coeficientes definem inclinações diferentes nas curvas, como pode ser visto na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Curvas de tempo inverso - variação com o tipo.



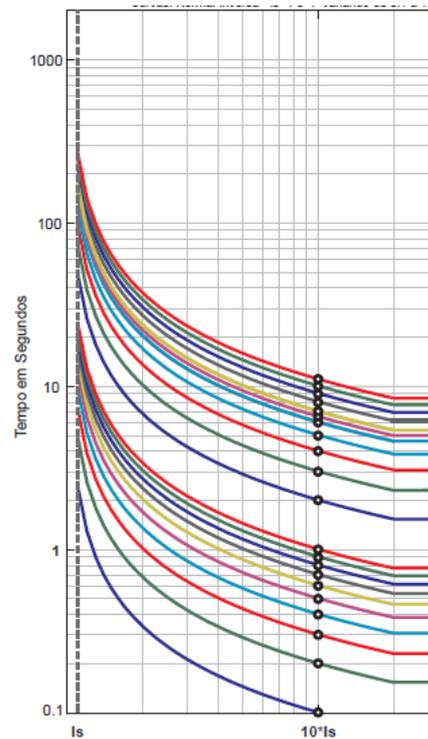
Fonte: RODRIGUES, 2015.

O valor de TMS é definido pelo operador e serve para deslocar a curva, fazendo que o relé, para um determinado valor de corrente, atue em um tempo maior ou menor, dependendo do ajuste do operador. Essa influência pode ser vista na Figura 2.8. Pode ser observado que para um valor de corrente determinado, com o aumento do dial de tempo, o tempo de atuação aumenta. Assim, é um ajuste que pode ser utilizado para coordenar curvas

que são de difícil coordenação assim como para evitar atuações indevidas.

As curvas de tempo inverso estão associadas à função temporizada (51) dos relés de sobrecorrente. A integração de funções instantâneas e temporizadas formam o elemento de sobrecorrente dos relés. A junção de elementos de sobrecorrente com a função de religamento é a base de funcionamento dos religadores.

Figura 2.8 - Influência do dial de tempo (TMS) nas curvas de tempo inverso.



Fonte: SCHNEIDER, 2008

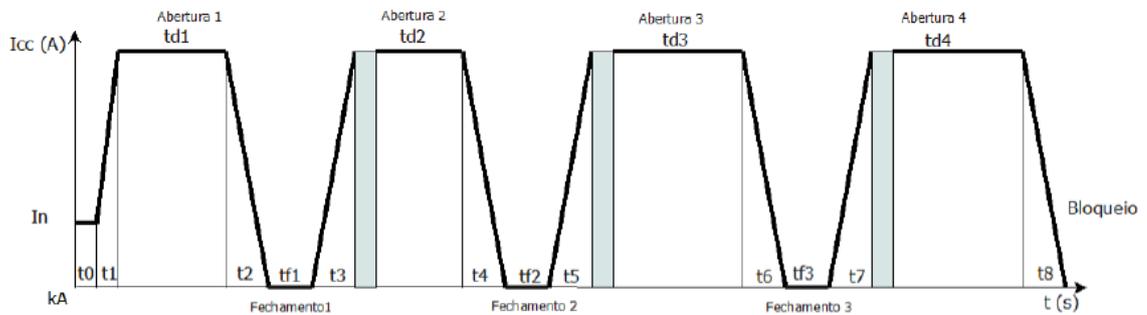
2.4.3.2. Religadores

A definição de religadores, segundo a norma nacional americana ANSI C37.60, é: “um dispositivo autocontrolado automático que interrompe e religa um circuito de corrente alternada com uma sequência pré-determinada de abertura e fechamento seguido por uma reinicialização, permanecendo fechado ou bloqueado”. Um religador pode, portanto, interromper automaticamente uma corrente elétrica alternada com capacidade de abertura e fechamento do circuito.

É composto por TCs, câmaras de extinção, unidade de controle, relés de sobrecorrente e religamento em uma só unidade. A unidade de religamento é composta pela parametrização das atuações das unidades instantâneas e temporizadas de um relé. Um exemplo de atuação de um relé para uma atuação de 2 disparos instantâneos (rápidos) e 2 disparos

temporizados (retardados) é apresentado na Figura 2.9. Segundo (ALMEIDA, 2000), um religador é geralmente projetado para realizar no máximo 3 religamentos seguidos por 4 disparos, em que o último é associado a uma função de bloqueio.

Figura 2.9 - Atuação de um religador.



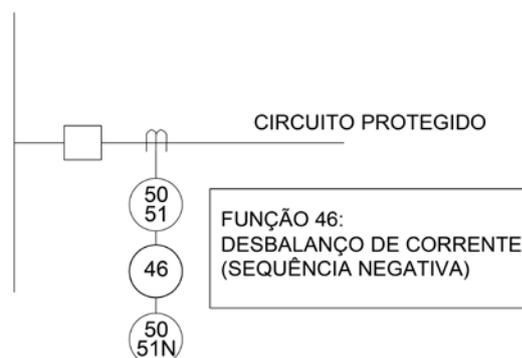
Fonte: CONCEIÇÃO, 2012.

2.4.3.3. Função de sequência negativa (46)

Um desbalanço em um sistema elétrico trifásico fará com que apareçam componentes de sequência negativa. Esse desbalanço pode ser causado por: uma fase aberta, duas fases abertas, carga desequilibrada e ocorrências de curto-circuito desequilibrado (que não sejam trifásicos) (MUSTAFA, 2010). Essa função tem um funcionamento com curvas semelhantes às curvas de funções de sobrecorrente de fase e neutro. Os critérios utilizados são através do valor da componente de sequência negativa propriamente dita ($3I_2$) ou através do valor percentual da corrente em relação à corrente I_1 (I_2/I_1) que é utilizada para detectar desbalanços de fase no sistema.

Um desbalanço de corrente é um fator de problema muito grave em máquinas rotativas, já que isso induz correntes de frequência dupla no rotor o que causa aquecimento (MUSTAFA, 2010), logo a função 46 é muito importante para aplicação nesse tipo de motores. Um exemplo de aplicação é apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Utilização da função de sobrecorrente de sequência negativa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

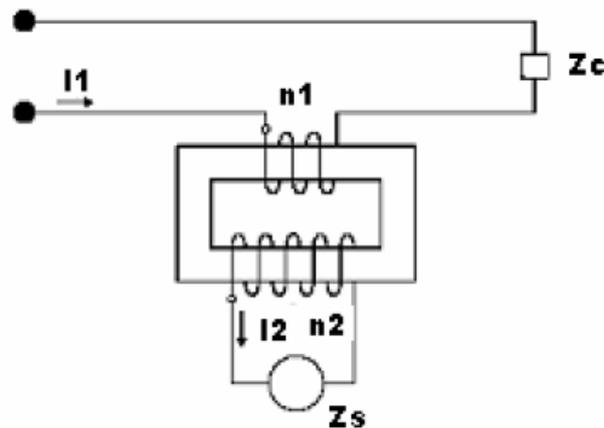
Para linhas, a função é mais utilizada em casos de dificuldade em detecção de curto-circuito, como em linhas longas, em que o curto-circuito se confunde com a corrente de carga. Nesses casos, pode ser utilizada para detecção de curto-circuito na rede. As impedâncias de sequência negativa são mais homogêneas que as impedâncias de sequência zero, facilitando seu uso em relação a uso de funções de neutro. (DORNELLES, 2007)

2.5. Transformadores de corrente

2.5.1. Características e especificação

É um equipamento monofásico que possui dois enrolamentos isolados eletricamente que são usados para reduzir as correntes do sistema a valores convenientes. Uma representação esquemática de um TC pode ser vista na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Transformador de corrente - exemplo de representação.



Fonte: MUSTAFA, 2010.

Com os TCs, para sua correta especificação, existem algumas terminologias a serem definidas:

- Exatidão – Expressa o erro máximo que o TC admite. Por exemplo, um TC que tem exatidão 10B200 admite um erro máximo de 10% para 20 vezes a corrente nominal com máximo de 200V no secundário. A classe de exatidão é sempre dada na maior relação. (MARDEGAN, 2012)
- Fator de sobrecorrente (FS) – valor que define a corrente máxima primária em relação a corrente nominal que o TC pode admitir garantindo a exatidão.

- Fator térmico nominal – sobrecarga que o TC suporta permanentemente. Segundo a NBR 6856, os fatores térmicos nominais são: 1, 1.2, 1.3, 1.5 e 2.
- Com relação a forma de montagem, o TC pode ter várias nomenclaturas, como por exemplo:
 - TC tipo barra - É aquele cujo enrolamento primário é constituído por uma barra fixada através do núcleo transformador.
 - TC tipo janela - É aquele que não possui um primário fixo no transformador e é constituído de uma abertura através do núcleo, por onde passa o condutor que forma o circuito primário.
 - TC tipo bucha - É aquele cujas características são semelhantes ao TC do tipo barra, porém sua instalação é feita na bucha dos equipamentos (transformadores, disjuntores, etc.), que funcionam como enrolamento primário.
 - TC tipo enrolado - É aquele cujo enrolamento primário é constituído de uma ou mais espiras envolvendo o núcleo transformador.

2.5.2. Saturação do TC

A corrente no secundário de um TC é, idealmente, uma réplica da corrente que flui no enrolamento primário, dividida pela relação de espiras do TC. No entanto, quando ocorre saturação, a corrente no secundário do TC sofre deformação e deixa de ser proporcional a corrente primária. A saturação do TC ocorre devido a um processo físico de um transformador. O núcleo magnético de um TC é feito de um número fixo de dipolos magnéticos arranjados de forma aleatória. Ao ocorrer um aumento na corrente primária ou um aumento na impedância de carga, os dipolos começam a se alinhar. Quando todos os domínios estão orientados o TC é dito saturado (HARGRAVE et al., 2017).

2.5.2.1. Característica de excitação

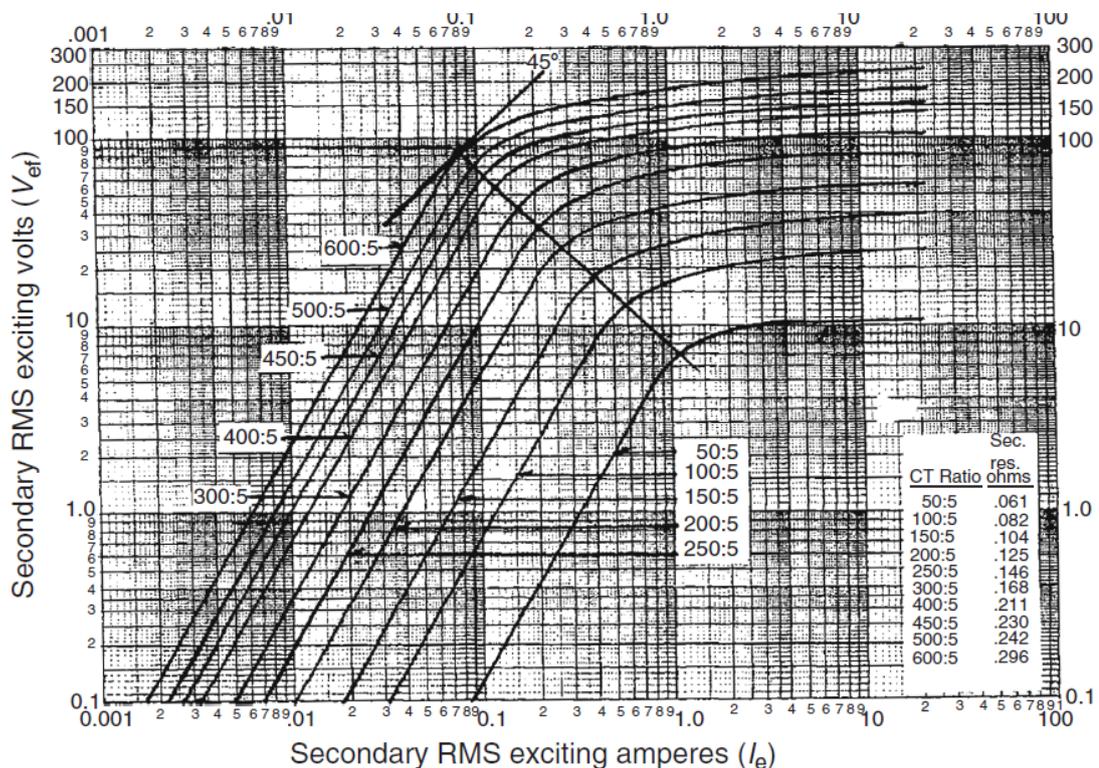
A característica de excitação de um TC é dada pela curva de excitação, dada pela curva entre a tensão secundária eficaz de excitação (V_{ef}) e a corrente de excitação do núcleo (I_e). Essa curva é análoga a curva BxH característica de um núcleo de TC que é sujeito à histerese. Essa analogia é possível pois a tensão é proporcional à densidade de fluxo B (lei de

Faraday) e a corrente é proporcional ao campo magnético H (Lei de Ampère). Na Figura 2.12 segue um exemplo de curva típica de excitação de um TC.

O ponto de joelho da curva, definido pela IEEE, como o valor da tensão no ponto em que uma linha inclinada 45° atinge a curva de forma tangencial (HARGRAVE et al., 2017), como indicado na Figura 2.12. Nesse ponto, o TC começa a demonstrar características não lineares, que resulta do início da saturação do TC. Mas a saturação não é definida por esse ponto, por razões práticas. A saturação se refere ao ponto em que o erro do TC ultrapassa o valor de 10%, o que é aproximadamente 50% da tensão de saturação, como indicado pelas normas IEC, na Figura 2.13.

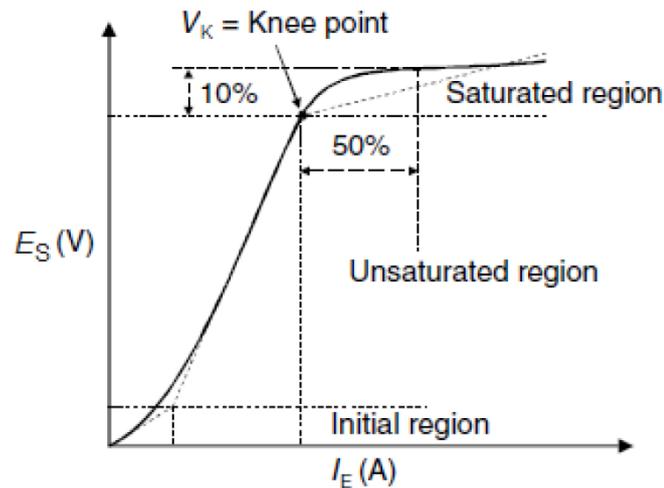
Segundo a IEEE Std. 100, este valor não é o mesmo da tensão no ponto de joelho sobre a curva onde a reta tangente faz um ângulo de 45° com a abscissa – considerado como ponto de máxima permeabilidade para TC com núcleo sem entreferro – porque se considera que no ponto de máxima permeabilidade ainda não se está na região de saturação do núcleo (RODRIGUES, 2016).

Figura 2.12 - Curva de excitação típica de um TC 600:5 multiratio classe C100.



Fonte: SANDERS, 2015.

Figura 2.13 - Curva de excitação e ponto de saturação de acordo com a IEC.



Fonte: RODRIGUES, 2016.

A norma IEEE C57.13 identifica os TCs de proteção pela tensão obtida no secundário para uma corrente de 20 vezes a nominal do enrolamento sem exceder 10% de erro (MIGUEL, 2011).

O IEEE define as impedâncias de carga (ou burden) em 1,2,4 ou 8 Ω . Para correntes de 5A no secundário, os TCs padronizados são C100, C200, C400 e C800. Por exemplo, um transformador de corrente C100 significa que o erro não vai ultrapassar 10% para nenhuma corrente de até 100A no secundário, desde que o burden não ultrapasse 1 Ω .

Segundo a ABNT 6856, segue os seguintes critérios.

- Erro: valor percentual da diferença entre corrente secundária e primária, referido a corrente primária;

- Quanto a impedância, subdivide-se em duas partes:

Classe A: Alta impedância interna, ou seja, reatância de dispersão com valor não negligenciável em relação a impedância total do secundário;

Classe B: Baixa impedância interna.

Quanto a tensão, segue a mesma lógica da IEEE. De tal forma que, por exemplo, um TC definido como 10B200, tem 10% de erro admissível, com baixa impedância interna e suporta 100 A de corrente no secundário desde que o burden não seja maior que 2 Ω .

2.5.2.2. Tipos de saturação

Existem dois tipos de saturação, definidas por saturação simétrica (ou CA) e

saturação assimétrica.

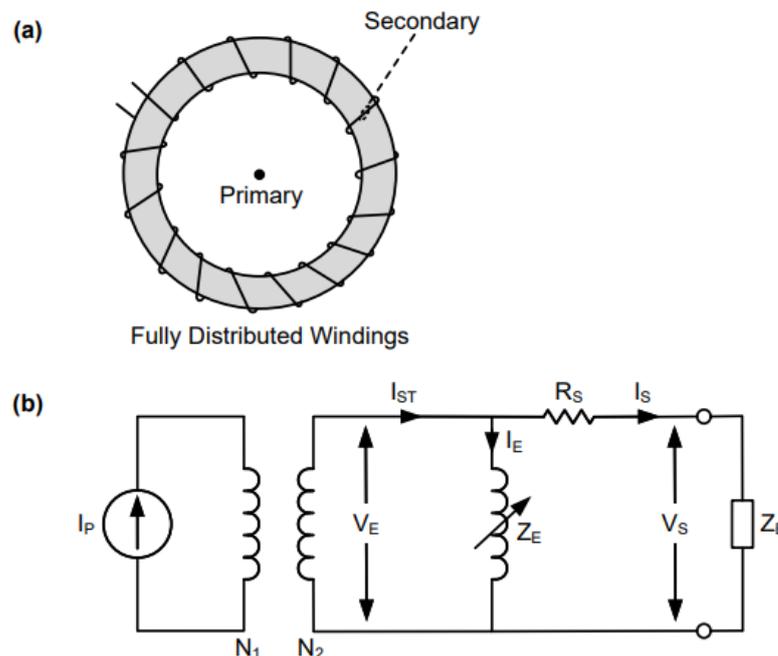
A saturação simétrica acontece quando a corrente primária, simétrica, é muito grande, e para um determinado burden, com essa corrente, o TC entra em saturação. Já a saturação assimétrica acontece quando níveis altos de offset DC são inseridos, ou seja, ao aparecer uma componente CC, mesmo com valores não muito extremos de corrente no primário, o TC entra em saturação, que pode ocorrer quando da ocorrência de curto-circuito, especialmente nos seus momentos iniciais.

Com o efeito da saturação, o valor RMS da corrente pode diminuir, o que pode acarretar uma atuação indevida de um dispositivo de proteção (aumento no tempo de atuação) ou até a falha no dispositivo. Esses estudos são apresentados no capítulo 4.

2.5.3. Circuito equivalente

O circuito equivalente simplificado de um TC é mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Circuito equivalente de um TC.



Fonte: HARGRAVE et al., 2017.

O circuito é referido ao secundário, onde a corrente primária é demonstrada através da fonte de corrente. Foi desconsiderado as impedâncias do primário. N_1 e N_2 são definidos como o número de espiras do primário e do secundário e a relação de transformação é definida por N_2/N_1 . A reatância do enrolamento secundário é desprezada, de tal forma que temos a

resistência dos enrolamentos em série com a impedância de carga (ou burden).

Segundo (SANDERS, 2015), burdens estão sempre próximos do valor unitário do fator de potência, o que significa que a reatância indutiva de burden é geralmente desprezível. Nesse trabalho será indicada por um valor de $0,01\Omega$ para todos os casos, exceto onde estiver indicado um valor diferente.

Por fim, o enrolamento de magnetização, que descreve a característica não linear do núcleo de transformadores de corrente. Pode ser pensada como um valor de impedância variável, que varia de valor muito altos (condições normais) a valores baixos (condição de saturação) (HARGRAVE et al., 2017).

2.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou conceitos de rede de distribuição, curto-circuito e proteção de sistemas elétricos, que serão abordados nas modelagens e simulações feitas no ATP. Além disso, apresentou definições e conceitos acerca de transformadores de corrente e sua saturação. Os temas e conceitos abordados serão utilizado nas modelagens e simulações estudadas nos capítulos posteriores.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1. Introdução

Este capítulo aborda a modelagem e a simulação dos relés digitais de proteção de alimentadores, onde é apresentada a utilização da linguagem Models do ATP com a modelagem em duas etapas: aquisição de sinais e lógica da função de proteção.

3.2. Utilização do ATP

Os sistemas de distribuição precisam de dispositivos de proteção bem ajustados para detectar e eliminar rapidamente falhas no sistema. Além do estudo em regime permanente, é necessário entender e estudar os efeitos dos transitórios eletromagnéticos, como: energização de transformadores, bancos de capacitores e reatores. Para isso, é necessário usar a ferramentas que permitam o estudo de transitórios eletromagnéticos. Esse tipo de ferramenta deve utilizar modelos mais elaborados para a representação dos componentes elétricos (IZAGUIRRE, 2016).

Neste trabalho foi utilizado para o estudo dos transitórios eletromagnéticos, a ferramenta EMTP (*Electro-Magnetic Transients Program*)/ATP (*Alternative Transients Program*) em conjunto com sua interface gráfica ATPdraw para a modelagem da rede de distribuição e dos transformadores de corrente. Para a modelagem do comportamento dos dispositivos de proteção foi utilizada a linguagem MODELS, presente no ATP, e que permite a implementação de blocos com comportamento genérico, conferindo maior flexibilidade à simulação.

3.3. O ATP e ATPdraw

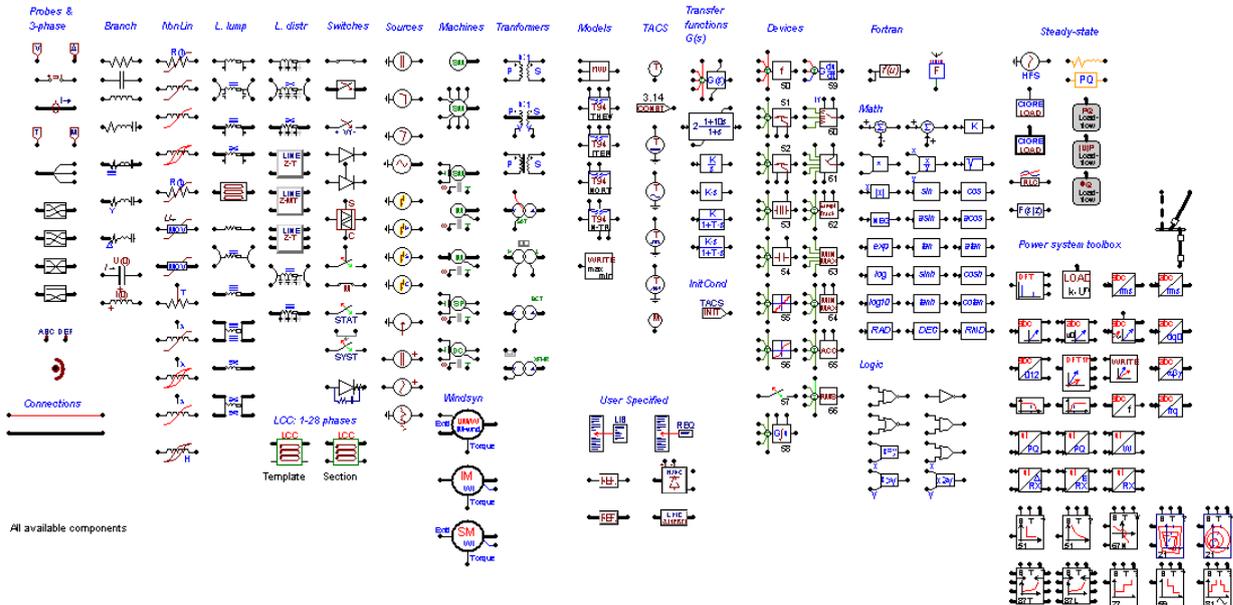
O ATP (Alternative Transients Program) é um dos programas mais usados na simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, desde sistemas mais complexos até sistemas de controle. (IZAGUIRRE, 2016)

O ATP utiliza integração trapezoidal para resolver as equações diferenciais que caracterizam o sistema elétrico no domínio do tempo (MIGUEL, 2011). Esse tipo de abordagem permite ao ATP obter os resultados das equações diferenciais que modelam os componentes da rede elétrica e simular o funcionamento transitório do sistema.

O ATPdraw é uma interface para a plataforma Microsoft Windows para a utilização

do ATP em que o usuário pode construir o circuito elétrico e selecionar os componentes a partir de menus. Na Figura 3.1, é apresentada a interface gráfica com todos os componentes disponíveis no programa.

Figura 3.1 - Componentes do ATP vistos na interface do ATPdraw.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4. A linguagem MODELS

Além dos componentes previamente definidos no ATP, novos componentes podem ser criados utilizando a linguagem de simulação MODELS (MIGUEL, 2011). O ATPdraw apenas possibilita um uso simplificado da linguagem MODELS, onde o usuário escreve diretamente na interface do ATPdraw e este fica responsável por escrever o arquivo ATP.

O componente no ATPdraw é formado por dois tipos de arquivos, um arquivo .SUP e um arquivo .MOD. O arquivo .SUP contém a interface de entrada de dados, as entradas e saída e definição de ícones, como mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Tela de criação do arquivo SUP.

Data								Nodes
Name	Default	Units	Min	Max	Param	Page	Digits	
	0		0	0	0	0	0	
	0		0	0	0	0	0	

Standard data

High precision

Output enable

Nonlinear

Multi-phase enable

Type:

Num. data:

Num. nodes:

Icon type: Bitmap Vector

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o arquivo .MOD contém a programação propriamente dita do componente, composta por uma caixa de texto que permite ao usuário definir as relações dos componentes com os dados de entrada do usuário e entradas e saídas do circuito. Depois de criado, o bloco pode ser inserido no circuito para efetiva utilização.

3.5. Modelagem de funções de proteção

A modelagem dos relés de proteção foi feita em duas etapas. A primeira etapa consiste na modelagem da aquisição de sinais para os relés e a segunda consiste na lógica do relé propriamente dita. As funções de proteção e a lógica de aquisição de sinais serão descritas nos itens a seguir.

3.5.1. Aquisição de sinais

Para as funções modeladas, são necessários dois tipos de sinais. Para as funções de sobrecorrente, é necessário apenas o valor RMS (*Root Mean Square*), e para a função de sequência negativa (46) é necessária a aquisição dos valores das componentes de sequência. As duas funções foram determinadas no mesmo arquivo Model, mas serão descritas a seguir de formas separadas.

3.5.1.1. Aquisição do valor RMS

Para a aquisição do valor RMS, foi utilizado um algoritmo baseado na própria definição de valor RMS de um sinal. Como é necessário o valor da componente de neutro ou residual para as funções de sobrecorrente de neutro, é necessário, portanto o valor eficaz da soma vetorial das correntes de fase, já que no modelo utilizado não há a medição direta da corrente de neutro.

Como dito anteriormente, foi utilizada a definição de valor eficaz para a modelagem, em que o valor eficaz pode ser calculado pela Equação 3.1 (NAHVI; EDMINISTER, 2014):

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (3.1)$$

Onde: T – período do sinal;

x(t) - sinal de corrente ou tensão;

Xrms - valor eficaz ou RMS do sinal.

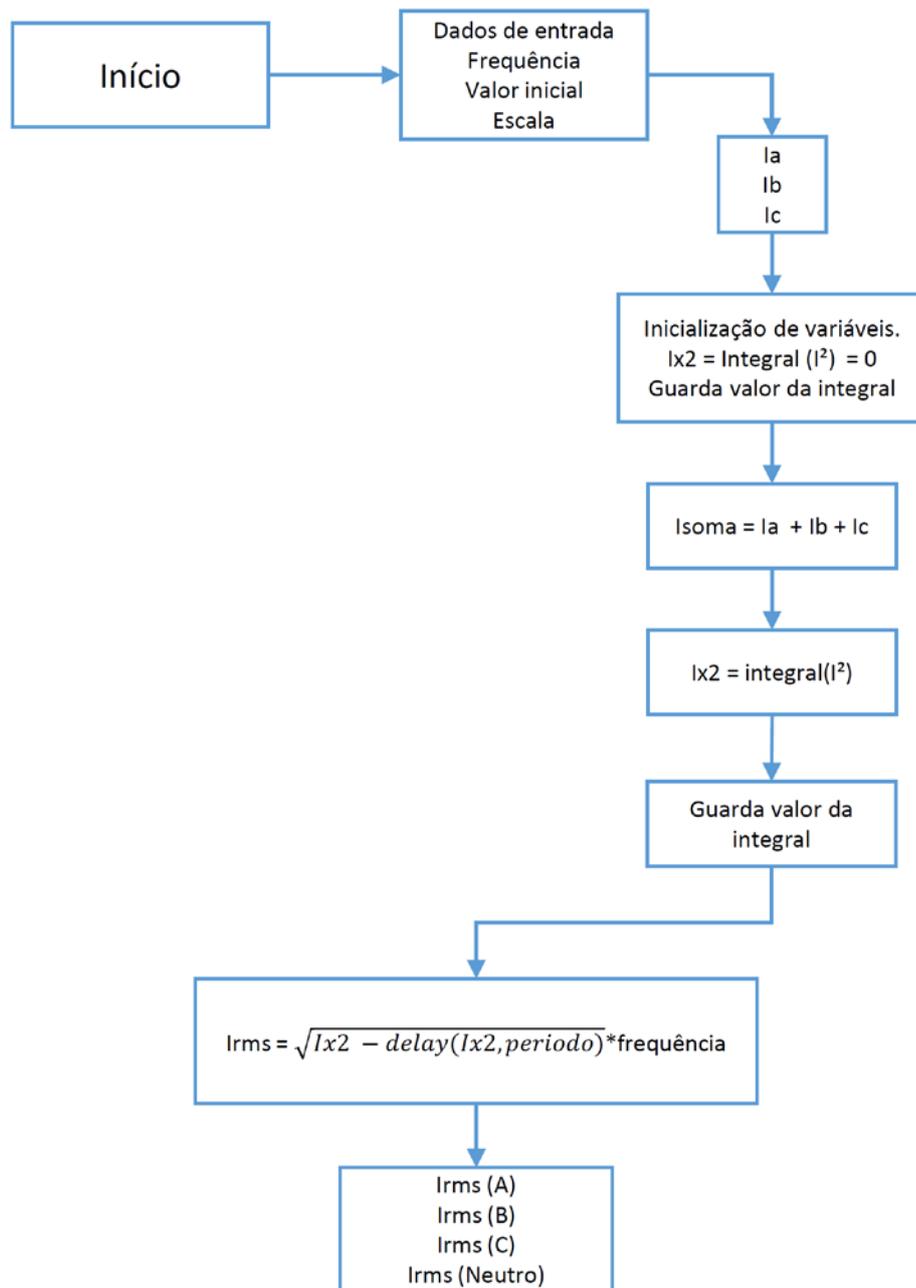
Observar que a integral é em um período, logo a nível de código, é necessário fazer com que os tempos inicial e final sejam sempre defasados de 1 período, sabendo que:

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

Em que f é a frequência do sistema.

O algoritmo de cálculo do valor RMS é apresentado no fluxograma apresentado na Figura 3.3. A amostragem tem ótimos resultados para sinais com menos variações ou harmônicas, pois calcula a cada período da onda. Para ondas com altas frequências, há uma oscilação no valor medido pelo bloco, sendo um problema para simulações que envolvam transitórios muito pequenos.

Figura 3.3 - Fluxograma da aquisição dos valores RMS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, são inseridos os dados pelo usuário de frequência para o cálculo do período. É admitido os valores das correntes. Em seguida é inicializada a integral como zero, já que como o valor da integral é tomado de período em período, esse valor deve ser guardado a cada período.

As correntes são somadas para o cálculo da corrente eficaz que atravessa o neutro (ou corrente residual, como é referida em alguns relés digitais). Em seguida os valores são

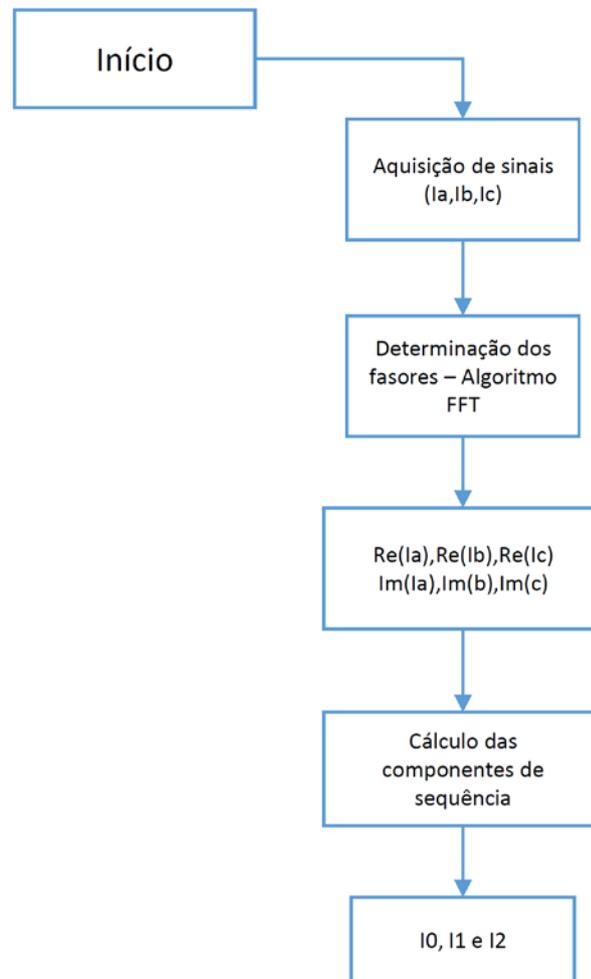
elevados ao quadrado e integrados no tempo. É usado portanto a definição do valor RMS, em que os valores das integrais defasados de 1 período são subtraídos para o cálculo. Em seguida, os valores são enviados para os blocos dos relés digitais.

3.5.1.2. Aquisição do valor de sequência negativa

Para a aquisição do valor de sequência negativa, foi utilizado o código de um bloco do próprio ATPdraw como base. Esse bloco contém dois tipos de algoritmos para determinação dos fasores. Foi utilizado o algoritmo baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT – *fast Fourier Transform*) em detrimento da transformada discreta devido à sua simplicidade de se utilizar menos pontos por ciclo e pela sua velocidade, retornando um resultado satisfatório em pouco tempo (LYONS, 2011). Esse tipo de cálculo é necessário para a determinação do fasor (componentes reais e imaginárias) para o cálculo das transformadas das componentes de sequência.

Foram feitas alterações no código adaptando-o para o que era necessário, já que o valor que é retornado não é o valor RMS da componente de sequência. Na Figura 3.4 é demonstrado um fluxograma com o algoritmo simplificado.

Figura 3.4 - Fluxograma simplificado de aquisição das componentes de seqüência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi definido um bloco gráfico denominado “Sinal Aquis”, cujas entradas são as correntes do sistema e a saída tem dois terminais, no primeiro terminal são gerados os valores RMS de cada fase e o valor RMS da soma vetorial das correntes de entrada, no segundo terminal são gerados os valores das componentes de seqüência das correntes de entrada. O bloco gráfico é demonstrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Bloco de aquisição de sinais para o relé de proteção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.2. Modelagem das funções de proteção

Para a análise de um alimentador, é necessária a modelagem das funções de proteção características dessa porção do sistema e, portanto, foram modeladas as funções de: sobrecorrente de fase e neutro (50/51,50/51N), sobrecorrente de sequência negativa instantânea (46) e religamento (79).

3.5.2.1. Sobrecorrente de fase e neutro (50/51,50/51N)

A modelagem das funções de proteção foram realizadas conforme equacionamento exposto no capítulo 2. Para as funções de sobrecorrente foi utilizado como base um modelo presente na biblioteca ATPdraw e com modificações para que a parametrização fosse o mais próximo possível de um relé comercial.

As curvas de tempo inverso utilizadas para o presente trabalho foram as curvas IEC, conforme item 2.3.3 do capítulo 2. Os dados de entrada são apresentados na Tabela 3.1.

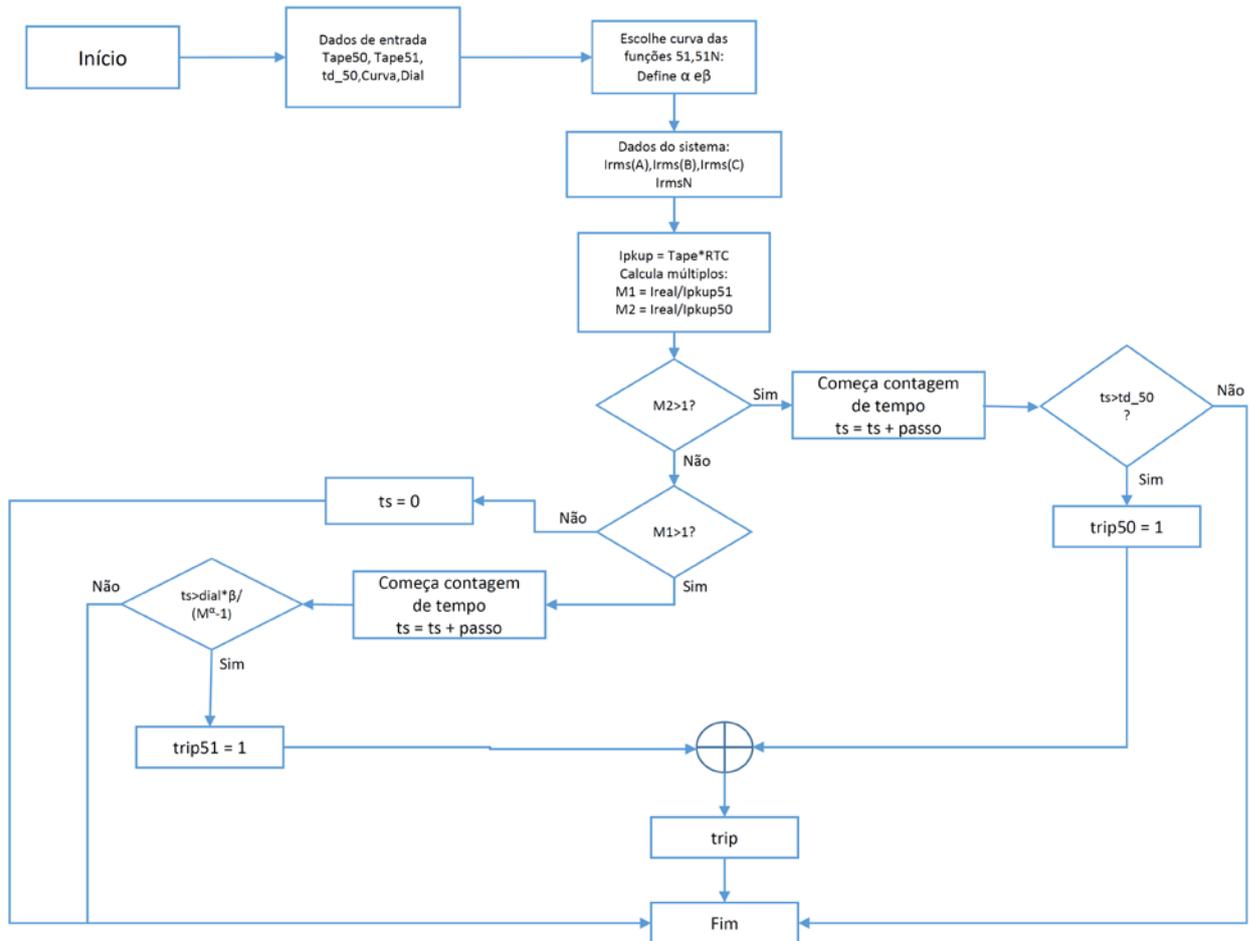
Tabela 3.1 - Definições dos dados de entrada das funções de sobrecorrente.

Função	Dado de entrada	Nome no ATPdraw	Função
50	Tape instantâneo de fase	Tape50	Corrente de ajuste instantâneo de fase (A)
	Tempo definido	td_50	Tempo de atuação da função instantânea de fase (s)
51	Tipo de curva de tempo inverso de fase	curva	1 - IEC Normalmente Inversa (NI) 2 - IEC Muito Inversa (MI) 3 - IEC Extremamente Inversa(EI)
	Dial de tempo de fase	dial	Dial da função temporizada de fase (s)
	Tape temporizado de fase	Tape51	Corrente de ajuste temporizado de fase
50N	Tape instantâneo de Neutro	Tape50N	Corrente de ajuste instantâneo de neutro (A)
	Tempo definido de neutro	td_50N	Tempo de atuação da função instantânea de neutro (s)
51N	Tipo de curva de tempo inverso de neutro	curva_51N	1 - IEC Normalmente Inversa (NI) 2 - IEC Muito Inversa (MI) 3 - IEC Extremamente Inversa(EI)
	Dial de tempo de neutro	dial_51N	Dial da função temporizada de neutro (s)
	Tape temporizado de neutro	Tape51N	Corrente de ajuste temporizado de neutro
-	Relação de Transformação do TC	RTC	Relação de transformação do transformador de corrente.

Há um outro dado de entrada chamado “Tr” (uma variável de controle) que deve ser mantido sempre com valor unitário.

Os dados acima são os dados de entrada do usuário para o relé e que devem ser calculados para o ajuste das proteções. O algoritmo utilizado para a modelagem está mostrado na Figura 3.6:

Figura 3.6 - Algoritmo de funcionamento das funções de sobrecorrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi escolhido, para as curvas de tempo inverso, a utilização do padrão IEC de curva de tempo inverso, conforme demonstrado no Capítulo 2. A partir da escolha do usuário no item “curva” são definidos os valores de β e α , tanto para a função temporizada de fase quanto para a função temporizada de neutro. O valor da corrente RMS é multiplicado por RTC para o cálculo da corrente real. Com isso e com os valores das correntes de pick-up são calculados os múltiplos (com relação às correntes de pick-up instantânea e temporizada).

Após a entrada de dados utiliza-se a lógica de funcionamento das funções de

proteção, como explicado anteriormente. Se a corrente real for maior que a corrente de pick-up da função instantânea, inicia-se a contagem de tempo e quando o tempo é maior que o valor de tempo definido escolhido para a atuação da função instantânea, a flag de trip é modificada, atuando a proteção instantânea.

Se a corrente não for maior que pick-up da função instantânea, observa-se se a corrente é maior que o pick-up da temporizada. Se maior, inicia-se a contagem de tempo e quando o tempo for maior que o tempo calculado a partir da definição da curva, como demonstrado na Figura 3.6, a flag de trip é modificada, indicando a atuação da função temporizada.

3.5.2.2. Sobrecorrente de sequência negativa (46(I2) e 46(I2/I1))

Foi definida a função de sobrecorrente de sequência negativa apenas instantânea, já que a atuação temporizada em geral não é utilizada. As funções de sequência negativa são definidas em dois grupos, como foi previamente definido no Capítulo 2. Assim, foram calculados os valores da corrente I2 (corrente de sequência negativa) e o valor da relação I2/I1 (relação entre corrente de sequência negativa e corrente de sequência positiva).

Na Tabela 3.2 são demonstrados os valores de entrada para a definição dessa função:

Tabela 3.2 - Definições dos dados de entrada das funções de sobrecorrente de sequência negativa.

Função	Dado de entrada	Nome no ATPdraw	Função
46 (I2/I1)	Tape da função 46 (I2/I1)	Tape46I2I1	Corrente de ajuste da função 46 (I2/I1)
	Tempo de atuação da função	td_46_I2I1	Tempo de atuação da função 46 (I2/I1)
46 (I2)	Tape da função 46 (I2)	Tape46I2	Corrente de ajuste da função 46 (I2)
	Tempo de atuação da função	td_46I2	Tempo de atuação da função 46 (I2)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O funcionamento da função de sequência negativa é semelhante ao funcionamento da função de sobrecorrente, sendo a diferença nas variáveis de entrada. Nesse trabalho foi utilizado apenas a função de sobrecorrente de sequência negativa instantânea. O algoritmo de funcionamento segue a mesma lógica apresentada na Figura 3.6 para a função de sobrecorrente instantânea de fase, mas as correntes de entrada são respectivamente I2 e I2/I1.

3.5.2.3. Função de religamento (79)

A função de religamento é a mais importante em um sistema de distribuição. Essa rotina tem como função receber a flag de trip vinda das funções de proteção de sobrecorrente (fase, neutro e sequência negativa) e abrir ou gerar um retardo na abertura após a mudança de flag, em seguida realizar uma contagem de tempo, chamada tempo morto para em seguida realizar o religamento.

Os dados de entrada para a função de religamento são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Definições dos dados de entrada da função de religamento (79).

Função	Dado de entrada	Nome no ATPdraw	Função
79	Função 79	func79	Habilita (1) ou desabilita (0) a função de religamento
	Tempos de religador aberto	topen1,topen2, tope n3	Tempos mortos do religador (tempo que passa desligado a cada atuação)
	Delay de atuação	Td	Tempo entre a atuação do trip e a atuação do religador (opcional)
	Disparos da função 79	disp79	Número de disparos da função de religamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

A lógica de religamento é descrita no fluxograma da Figura 3.7.

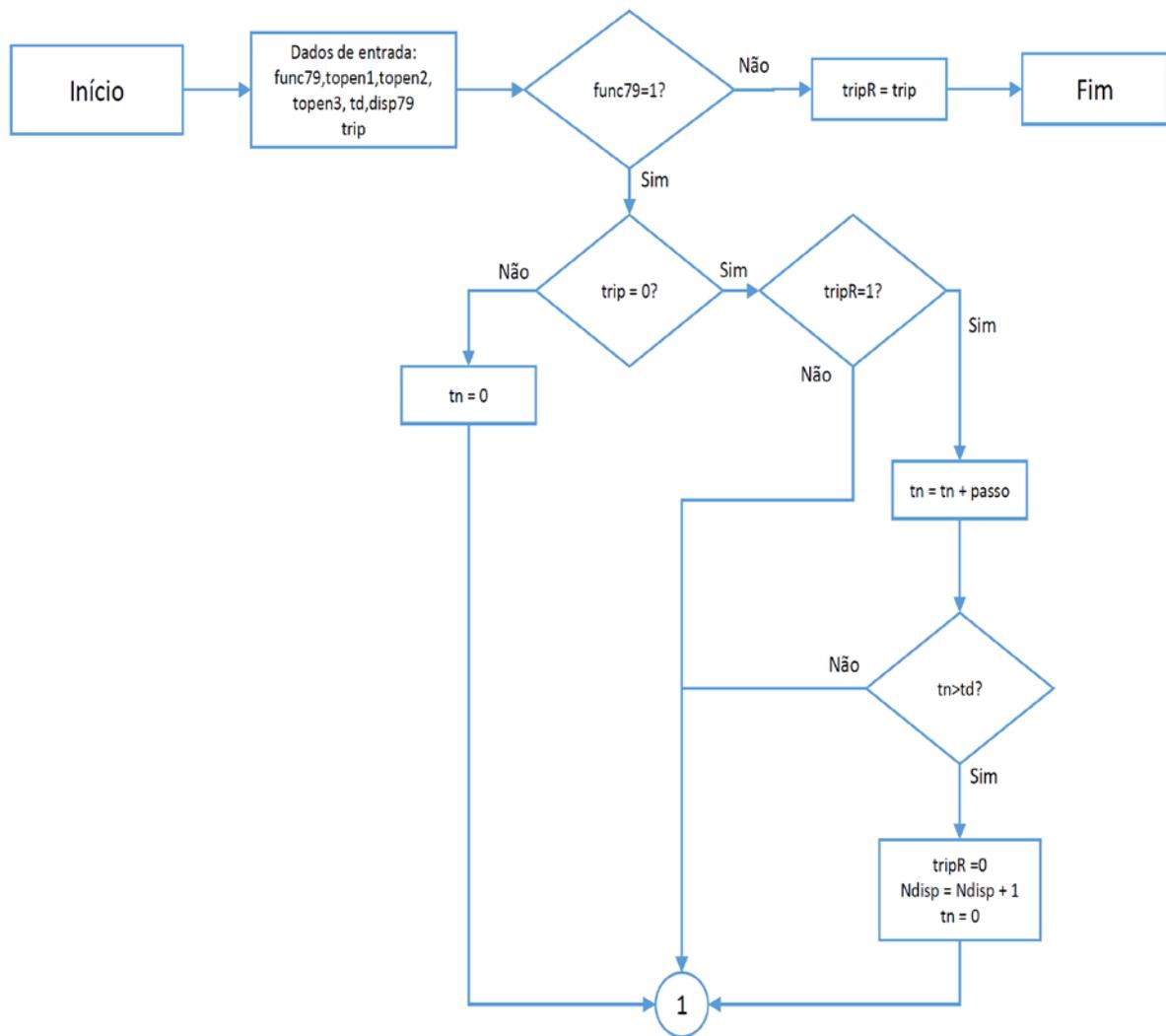
Antes de iniciar a lógica do religamento propriamente dito, as saídas de sinal de “trip” de cada função são combinadas em uma porta “OR” e depois por uma porta “NOT”, para que o sinal de trip seja “ativo baixo”, ou seja, quando houver uma falha, esse sinal deve atuar indo para zero, já que o modelo de disjuntor utilizado, que será apresentado posteriormente, muda seu estado para aberto quando recebe um zero na sua entrada.

A lógica funciona da seguinte maneira:

- São adquiridos os dados de entrada, como definidos da Tabela 3.3 e o valor da variável de trip, vinda das demais funções de proteção;
- O Teste 1 é se a função 79 está ou não habilitada, caso não esteja, o trip do religador é o mesmo da variável de trip e o código é finalizado.
- O Teste 2 ocorre na variável de trip: caso a variável esteja em zero, o que indica uma atuação de uma das funções de proteção. Caso não esteja, significa que não houve atuação, portanto, zera-se a contagem do delay do religador e o valor de tripR, se sim, deve ser executado o teste 3.

- O teste 3 é dado para saber o estado do religador, se o religador se encontra aberto, então deve ser iniciada a contagem de tempo de retardo aplicado na lógica (caso esse exista). Caso esteja fechado, deve ser passado para o próximo passo do algoritmo (indicado pelo número 1 na Figura 3.7 e na Figura 3.8).

Figura 3.7 - Fluxograma da modelagem da lógica de religamento.

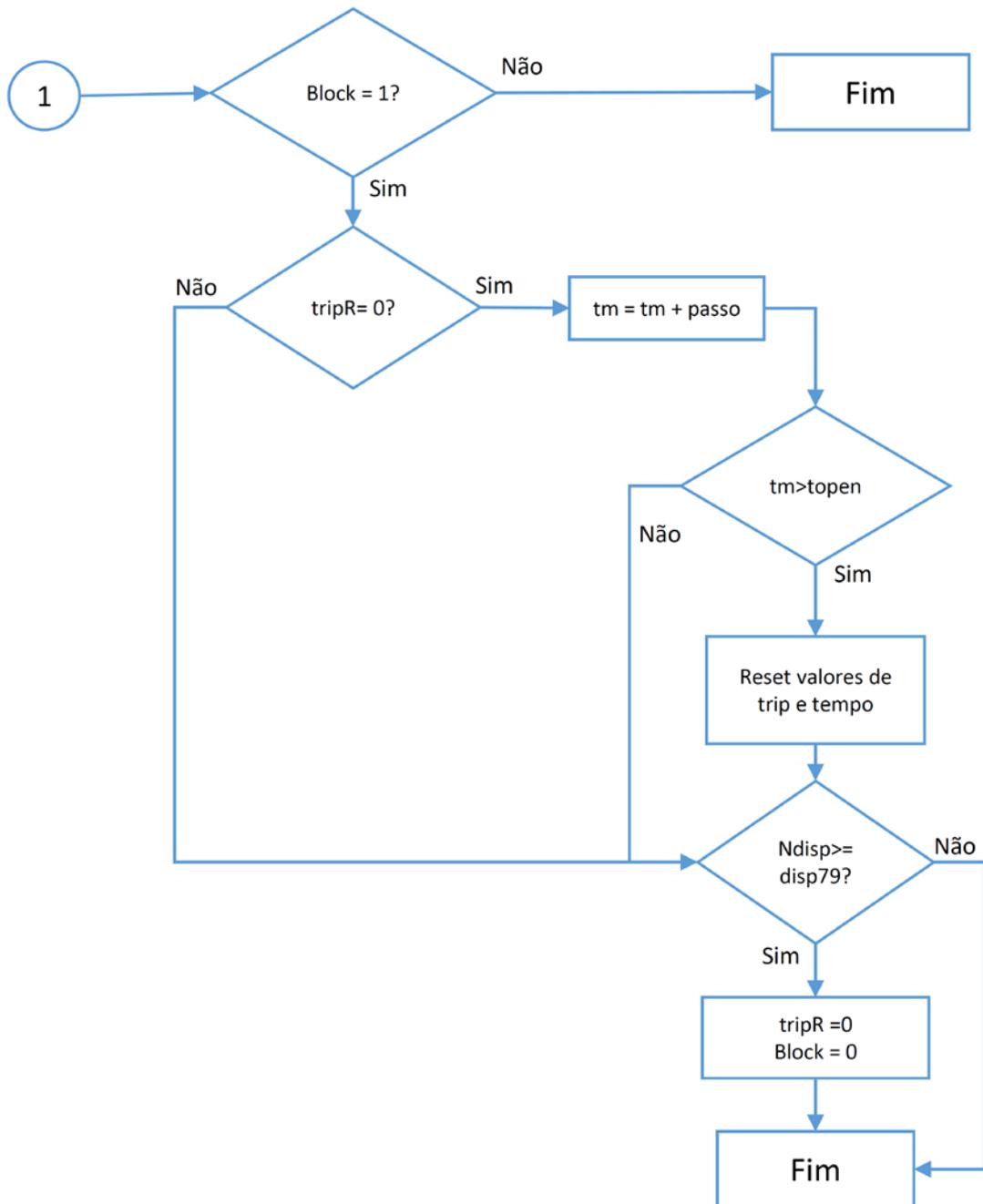


Fonte: Elaborado pelo autor.

- O teste 4 consiste na verificação do tempo decorrido ser superior ao intervalo definido. Então há alteração na flag de trip do religador (fecha o disjuntor) e incrementa o número de disparos do religador.
- O teste 5 define se o religador está ou não bloqueado. De acordo com a

lógica utilizada, o religador bloqueado é a variável $Block = 0$. Caso isso aconteça, o código termina, já que a função de religamento não deve ser mais utilizada e o religador deve permanecer aberto (Estado de lockout).

Figura 3.8 - Fluxograma da modelagem da lógica de religamento (Continuação).



Fonte: Elaborado pelo autor.

- O Teste 6 define se o religador está aberto. Se sim, inicia contagem de tempo para o fechamento. Decorrido o tempo definido pelo usuário, são

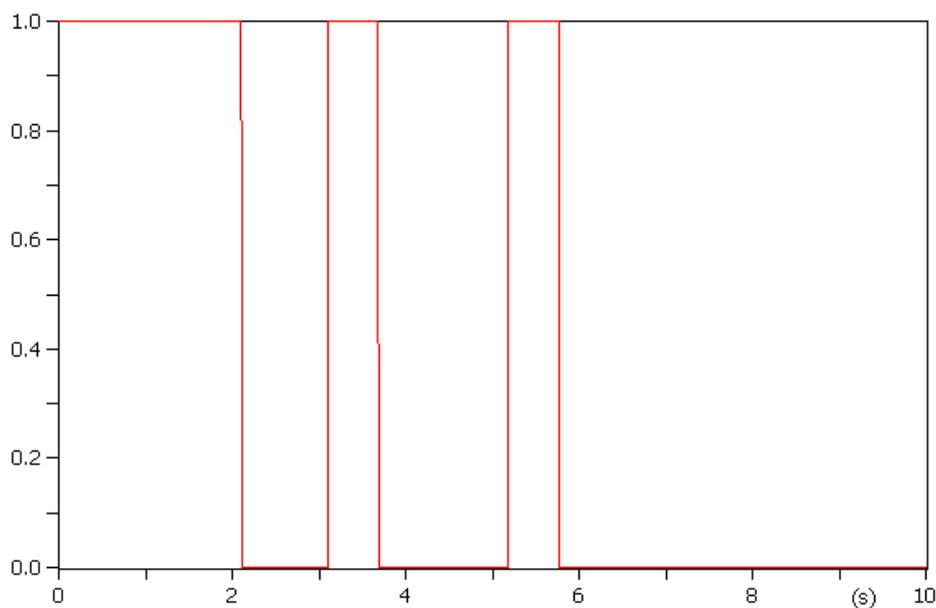
reiniciados os valores de trip e tempo de todas as funções de proteção, de forma a deixar o sistema pronto para observar uma nova falha.

- Por fim, o último teste observa se já houve o número de disparos definido pelo operador. Caso a afirmação seja verdadeira, é bloqueado o religador e aberto os contatos.

Deve ser observado que foi utilizado um padrão de 1 atuação instantânea e as demais temporizadas, conforme Figura 3.9. A lógica para esse funcionamento é inserida dentro da própria função de sobrecorrente, ao ocorrer a primeira atuação da função instantânea, essa função é automaticamente bloqueada, através da utilização de uma flag.

Na Figura 3.9 é apresentado um exemplo de atuação da função de religamento, com 1 disparo instantâneo e 2 disparos temporizados, onde é representado o sinal de trip.

Figura 3.9 - Exemplo de atuação da função de religamento.

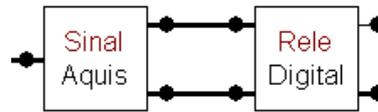


Fonte: Elaborado pelo autor.

Definidas todas as funções de proteção utilizados no trabalho o bloco de aquisição e processamento de sinais assim como o bloco de relé de proteção são definidos, conforme mostrado na Figura 3.10 com exemplo de janela de parametrização na Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.11.

Figura 3.10 - Blocos de aquisição de sinais e do relé digital agregados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.11 - Exemplo de tela de parametrização dos relés digitais utilizados.

MODEL: Rele51

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Tape51		450
Tape50		2300
dial		0.18
curva		2
td50		0.06
Tr		1
tinit		0.1
RTC		1

NODE	PHASE	NAME
irms	A..D	X0028
iseq	ABC	X0030
tripR	1	XX0029
Zone	ABC	X0012

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: RS1 Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

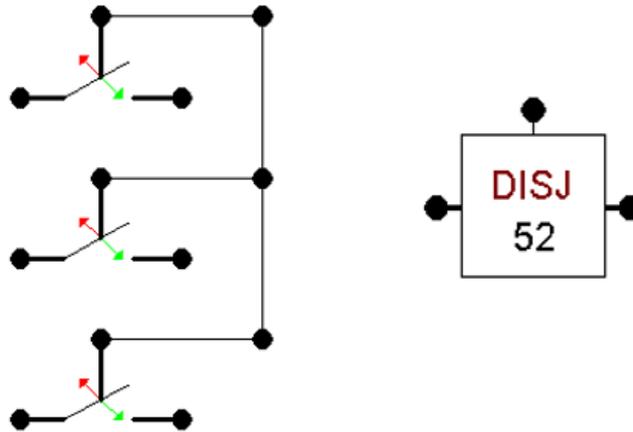
3.6. Modelagem do disjuntor

Para a modelagem do disjuntor, foi utilizada uma chave comandada por um sinal advindo de um Model. A chave é aberta com um sinal de zero e fechada com um valor 1. De tal forma que os sinais de trip são sinais “ativos baixo” para abrir o disjuntor em situação de falta.

Foi utilizada a simplificação do disjuntor como chave comandada, sem a modelagem de arco (não é escopo deste trabalho o estudo da abertura do disjuntor e sim a atuação das proteções relacionadas ao sistema).

A chave utilizada é definida como TACS switch (Type 13), que é apresentada na Figura 3.12, arranjadas na forma de uma chave trifásica com um sinal de trip. Na mesma figura é apresentado o bloco utilizado como disjuntor, em que uma das entradas é uma entrada de sinal de *trip*.

Figura 3.12 - Modelagem utilizada para o disjuntor no ATPdraw.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os demais componentes utilizados no ATPdraw terão sua modelagem apresentada nos Capítulos em que forem utilizados. Esses componentes já se encontram na biblioteca do ATP e foram utilizados para a modelagem da rede e para o estudo de saturação do transformador de corrente.

3.7. Considerações finais

Este capítulo apresentou a modelagem dos relés em ATP que serão utilizados nas simulações nos capítulos posteriores. Apresentou os algoritmos e lógicas de funcionamento das funções de proteção que serão fundamentais para a sua utilização a seguir. Além disso, foi apresentado o modelo utilizado do disjuntor no ATP para as simulações.

4 DEFINIÇÃO DOS AJUSTES DE PROTEÇÃO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ALIMENTADOR 01I7 DO SISTEMA AQUIRAZ E SIMULAÇÃO DO EFEITO DE SATURAÇÃO NA ATUAÇÃO DE RELÉS.

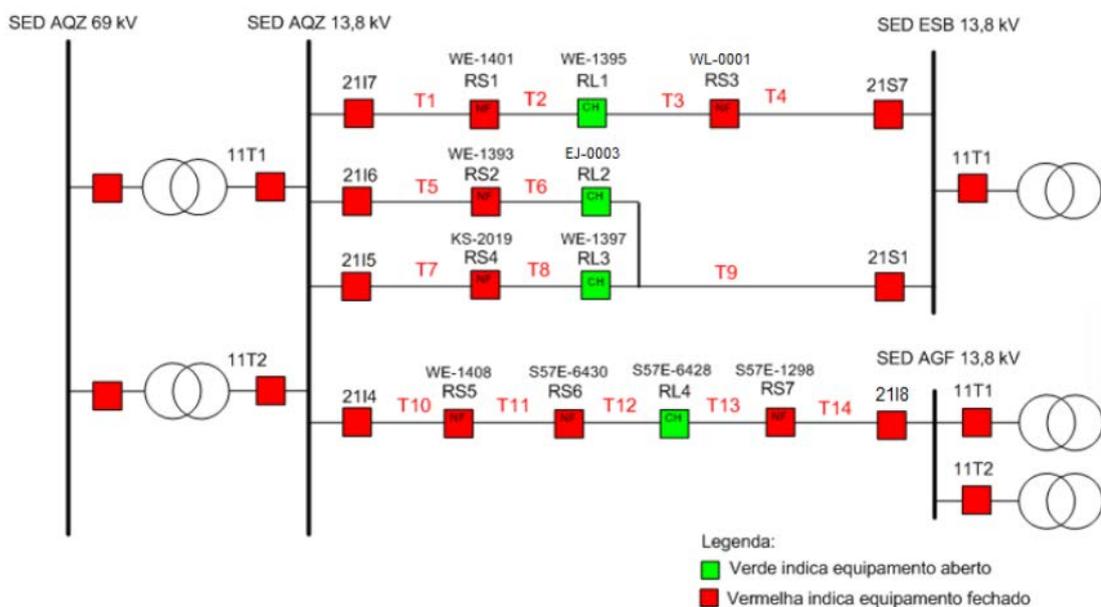
4.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados os ajustes e estudo de proteção para o alimentador da rede Aquiraz, sua modelagem e simulação no ATP, com algumas situações de falta no sistema. Além disso, são apresentados os resultados da simulação da atuação de transformadores de corrente e a influência da saturação de TCs em dispositivos de proteção.

4.2 Características gerais do sistema

A rede de distribuição de energia elétrica em média tensão da cidade de Aquiraz foi modernizada para uma rede de distribuição inteligente, dentro da área de concessão da Enel Distribuição Ceará. A rede modernizada de Aquiraz possui 3 subestações no sistema de média tensão (69-13,8kV): subestações Aquiraz, Eusébio e Água Fria. Da subestação Aquiraz partem 4 alimentadores em tensão primária de distribuição (13,8kV). Existem encontros com 2 alimentadores da subestação Eusébio e com um alimentador da subestação Água Fria, como pode ser visto na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Rede de Distribuição de Aquiraz com condição normal de operação.



Neste trabalho, para análise da atuação das proteções, será utilizado o alimentador AQZ01I7 e ESB01S7 da rede Aquiraz, alimentadores que abrangem os trechos T1 a T4 e interligam as subestações Aquiraz e Eusébio, com um comprimento de 8,9 km e que possuem os religadores utilizados indicados no diagrama da Figura 4.1.

4.3 Corrente por trecho, condutores e impedâncias

O carregamento de cada trecho do alimentador AQZ01I7 e ESB01S7 foi obtido em (VIEIRA, 2015), em que tendo como fonte primária o Sistema de Ajuda à Condução (SAC) da Enel Distribuição Ceará, parte integrante do CCS (Centro de Controle do Sistema). As correntes estimadas para cada trecho podem ser observadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Carregamento por trecho do alimentador 01I7.

Trecho	Corrente Estimada (A)
T1	23
T2	57
T3	75
T4	105

Fonte: (VIEIRA, 2015).

Na rede Aquiraz, são utilizados 4 tipos de condutores. As informações de impedâncias estão na Tabela 4.2

Tabela 4.2 - Impedâncias dos condutores utilizados na rede Aquiraz

Conductor	Sequencia Positiva		Sequência Zero		Capacidade de Corrente (A)
	R (Ω /km)	X (Ω /km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	
CAA 1/0 AWG	0,6955	0,498	0,8733	2,0219	242
CAA 266,8 MCM	0,2391	0,38	0,416	1,56	475
Cobre 95mm ²	0,2231	0,404	0,3991	1,9282	438
Spacer 240 mm ²	0,125	0,2409	0,302	2,158	625

Fonte: Enel Distribuição Ceará.

No alimentador AQZ01I7, são utilizados apenas os condutores CAA 266,8 MCM (T1, T2, T3 e o primeiro trecho de T4) e Spacer 240 mm² (Apenas T4).

As impedâncias equivalentes das barras das subestações AQZ, ESB e AGF estão na Tabela 4.3

Tabela 4.3 - Impedância equivalente nas barras de 15 kV das subestações em pu.

Subestação	Sequência Positiva		Sequência Zero (pu)	
	R (pu)	X (pu)	R (pu)	X (pu)
Aquiraz	0,0138	0,4439	0	0,3453
Eusébio	0,0389	0,5105	0	0,3606
Água Fria	0,0094	0,6965	0	0,6335

Fonte: VIEIRA, 2015.

4.4. Nível de curto-circuito

Foi utilizado para o estudo de curto-circuito do alimentador o software ProteCAD, que deve ser alimentado com as informações dos condutores, indicadas no item 4.2 e da subestação em questão. As informações dos condutores podem ser atualizadas, mas os condutores do alimentador AQZ01I7 e ESB01S7 já estão na base de dados do programa.

São inseridos os valores de base para o cálculo, e como os valores de impedância das barras da subestação são dados na base 100 MVA e tensão 13,8kV, são esses os valores utilizados. Para cada trecho são informados condutor e distância e são geradas as informações de curto-circuito da rede estudada. A resistência de aterramento utilizada foi de 100Ω. No Apêndice C são dados os passos para obtenção dos valores de curto-circuito no ProteCAD sintetizados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Curto-circuito nos trechos dos alimentadores.

Alimentador	Trecho	Corrente de curto-circuito			
		Trifásico (A)	Bifásico (A)	Monofásico (A)	Fase-Terra mínimo (A)
AQZ01I7	T1	2719,9	2355,5	1678,6	78,4
	T2	2210,5	1914,3	1327,5	78,1
ESB01S7	T3	4000	3464,2	2715,2	79
	T4	5989,8	5187,3	4762,1	79,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5. Ajuste das proteções

Os relés das subestações, que no alimentador estudado são os relés dos religadores 21I7 e 21S7, não terão seus ajustes modificados, já que se encontram ajustados para o limite do condutor ou do próprio relé. Serão ajustados apenas os relés dos religadores RS1, RL1 e RS3.

4.5.1. Proteção de sobrecorrente

4.5.1.1. Critério de sensibilidade

Pelos critérios da concessionária, de acordo com (RODRIGUES, 2015), para assegurar a sensibilidade, o múltiplo dos equipamentos de proteção deve ser maior que 2,4 para fase e 4,0 para o neutro.

4.5.1.2. Definição dos TCs utilizados.

Os relés associados aos relés da SEL 751 têm relação de transformação de 600/3, com RTC de 200 (VIEIRA, 2015). O valor da corrente primária é maior que a máxima corrente de carga do sistema. Além disso, para o dimensionamento dessa relação, será utilizado o critério com relação à corrente de curto circuito, em que:

$$\frac{I_{cc_{m\acute{a}x}}}{20} \leq I_{prim} \quad (4.1)$$

Essa condição é válida para qualquer situação no alimentador utilizado, portanto a relação de transformação pode ser utilizada.

4.5.1.3. Ajuste TAPE de fase - temporizado

Seguindo os padrões de ajuste de proteção utilizados pela Enel Distribuição Ceará, segundo (VIEIRA, 2015) é usado o seguinte critério para ajuste da proteção de sobrecorrente temporizada de fase:

$$\frac{I_{carga_{m\acute{a}x}}}{RTC} < Tape_{51} \leq FS \cdot \frac{I_{nom_{cond}}}{RTC} \quad (4.2)$$

Em que:

FS - fator de sobrecarga permitido para o sistema;

$I_{nom(cond)}$ - corrente nominal do condutor;

$I_{carga_{m\acute{a}x}}$ - corrente nominal primária;

RTC - Relação de transformação do TC.

4.5.1.4. Ajuste do TAPE de neutro - temporizado

Usando um valor de desequilíbrio mínimo de 24A, o tape de neutro pode ser definido por:

$$\frac{FD \cdot Inom (prim)}{RTC} < Tape_{51N} \leq \frac{24}{RTC} \quad (4.3)$$

Em que:

FD - fator de desequilíbrio;

$Inom(prim)$ - corrente nominal primária

RTC - Relação de transformação do TC.

Foi escolhido utilizar um fator de desequilíbrio igual a 0,1 para que o tape de neutro desses relés se torne sempre menor que o tape de neutro dos relés das subestações.

4.5.1.5. Ajuste do TAPE de fase - instantâneo

Para os ajustes instantâneos de fase, foi utilizado o seguinte critério para as subestações:

$$Tape_{50} \leq \frac{Icc3f}{RTC} \text{ ou } Tape_{fase} \leq 5 \cdot \frac{Ipk_{51}}{RTC} \quad (4.4)$$

Para os religadores de linha, o ajuste adotado está de acordo com (KINDERMANN, 2012):

$$Tape_{50} \leq Icc2f \quad (4.5)$$

Onde: Ipk_{51} - corrente de pick-up de fase;

$Icc3F$ - corrente de curto-circuito trifásico;

RTC - relação de transformação do TC.

$Icc2F$ - corrente de curto-circuito bifásico

4.5.1.6. Ajuste do TAPE de neutro - instantâneo

Para o ajuste instantâneo, de acordo com (VIEIRA, 2015):

$$Tape_{50N} \leq 10 \cdot \frac{Ipk_{51N}}{RTC} \quad (4.6)$$

4.5.1.7. Ajuste do dial de fase e de neutro

Será utilizado para ajuste do dial, a equação a seguir (KINDERMANN, 2012):

$$dt = (t_{rele} - t_{coord}) \cdot \frac{M^\alpha - 1}{k} \quad (4.7)$$

Em que:

dt - dial de tempo;

trelé - tempo de atuação do relé a montante do trecho;

tcoord - tempo de coordenação entre curva do relé a montante e curva do relé que se está ajustando;

M – múltiplo da corrente de pick-up;

α e β – valores de acordo com a curva, que pode ser visto no capítulo 2.

A margem de coordenação definida pela Enel Distribuição Ceará é de 0,3s. O tempo de atuação do relé da Enel pode ser obtido através da aplicação da mesma equação, mas com utilização dos valores obtidos da curva do relé, e aplicando a equação sem a utilização da margem de coordenação.

4.6. Ajustes e simulação no ATPdraw das situações de operação da Rede Aquiraz.

4.6.1. Situação normal de operação

A situação normal de operação tem a seguinte configuração: Os trechos T1 e T2 são alimentados unicamente pela subestação Aquiraz e os trechos T3 e T4 apenas pela subestação Eusébio, onde o religador RL1 é utilizado apenas como uma chave aberta.

4.6.1.1. Ajustes de proteção

Com base nos critérios apresentados anteriormente e como demonstrado em (VIEIRA, 2015), os ajustes de proteção para a situação normal de operação são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Ajustes de proteção para os relés do alimentador na situação normal de operação.

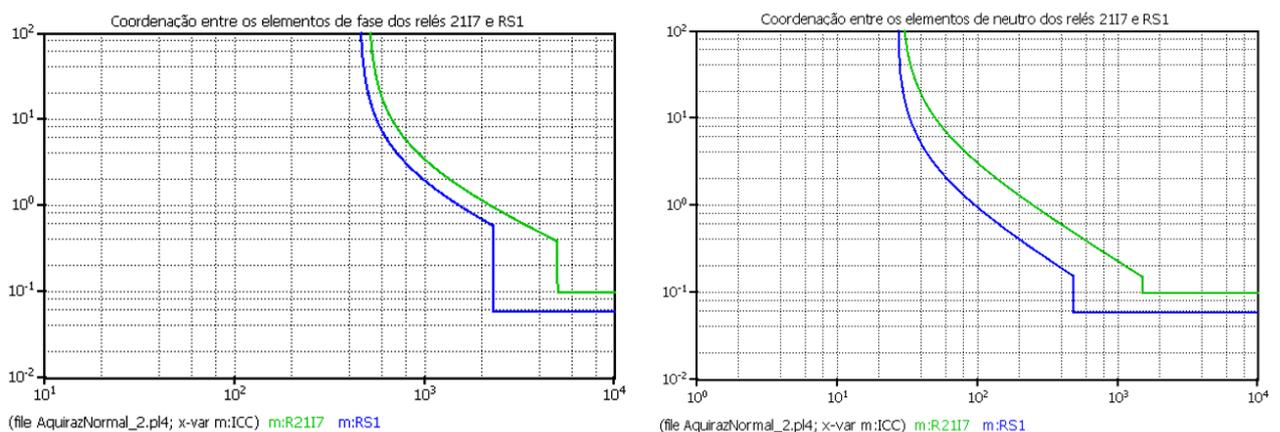
Elemento	RTC	Proteção	Tape 51/51N	Corrente de pickup	Dial	Tipo de curva	Tape 50/50N	Instantâneo
21I7	100	Fase	5	500	0,26	MI	50	5000
		Neutro	0,26	26	0,64	MI	15	1500
RS1	200	Fase	2,25	450	0,18	MI	11,5	2300
		Neutro	0,12	24	0,22	MI	2,4	480
21S7	120	Fase	4,17	500	0,125	MI	51,67	6200
		Neutro	0,2	24	0,425	MI	12,5	1500
RS3	200	Fase	2,25	450	0,09	MI	25	5000
		Neutro	0,12	24	0,22	MI	1,65	330

Fonte: Adaptada de Vieira, 2015

Foi criado, no próprio ATPdraw, um código que recebe os ajustes de proteção dados ao modelo do relé apresentado no capítulo 3 e plota as curvas de tempo inverso do relé. Foi utilizado o próprio bloco do relé e adicionado um código para levantamento das curvas. Se utiliza os próprios valores inseridos na parametrização desses relés. O código para a geração dos sinais é apresentado no Apêndice E. Assim, é possível estudar a coordenação entre os relés. São apresentados nas Figura 4.2 e Fonte: Elaborado pelo autor.

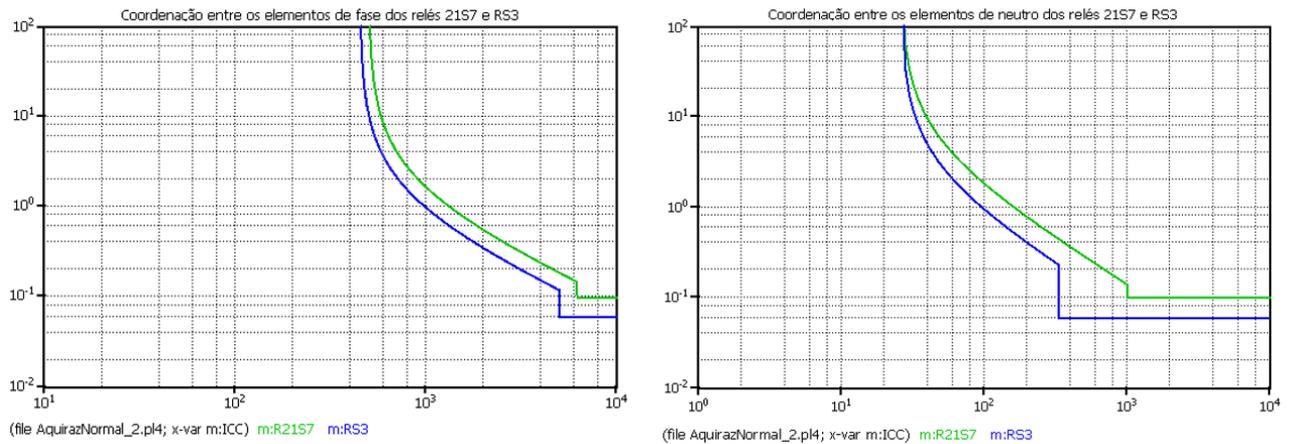
Figura 4.3 as curvas de tempo inverso dos relés ajustados de acordo com a Tabela 4.5.

Figura 4.2 - Coordenação entre os relés 21I7 e RS1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.3 - Coordenação entre os relés 21S7 e RS3.

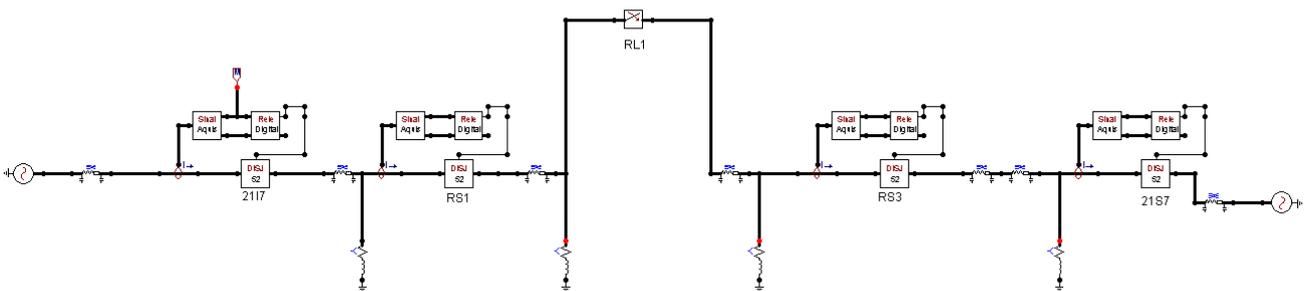


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.2. Modelagem do alimentador no ATPdraw.

Foi modelado no ATPdraw, o alimentador utilizado para estudo das proteções, com a utilização dos elementos previamente citados, como os relés indicados no Capítulo 3 e a utilização de elementos da biblioteca do próprio ATP. A rede utilizada, na situação normal de operação é apresentada na Figura 4.4, da forma como foi modelada no ATPdraw.

Figura 4.4 - Modelagem da rede aquiraz na situação normal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.2.1. Modelagem das subestações, das impedâncias reduzidas das barras e das linhas utilizadas

Dentro do estudo do alimentador, não foi utilizado o modelo da subestação, onde a subestação foi considerada como um ponto em que a tensão é constante e foi definida a partir de um modelo de fonte trifásica do ATPdraw, em que os dados de entrada da fonte foram

definidos como apresentado na Figura 4.5.

Para a modelagem da impedância reduzida das barras, foi definida a barra a partir do uso de um modelo de linha do ATPdraw, o modelo pi equivalente trifásico, sem a utilização das capacitâncias em derivação, já que esse é um modelo que permite definir a linha a partir de suas impedâncias de sequência positiva e zero. Assim, foi utilizado esse modelo para a definição tanto das impedâncias reduzidas das barras de 13,8kV quanto de todas as linhas utilizadas na modelagem no ATPdraw, por simplicidade de funcionamento. O modelo e os dados de um exemplo utilizado no trabalho são apresentados na Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.66.

Figura 4.5 - Dados de entrada da fonte utilizada.

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	13800
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	10

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	X0014

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage

Num phases: Single 3-phase 3*1-phase

Angle units: Degrees Seconds

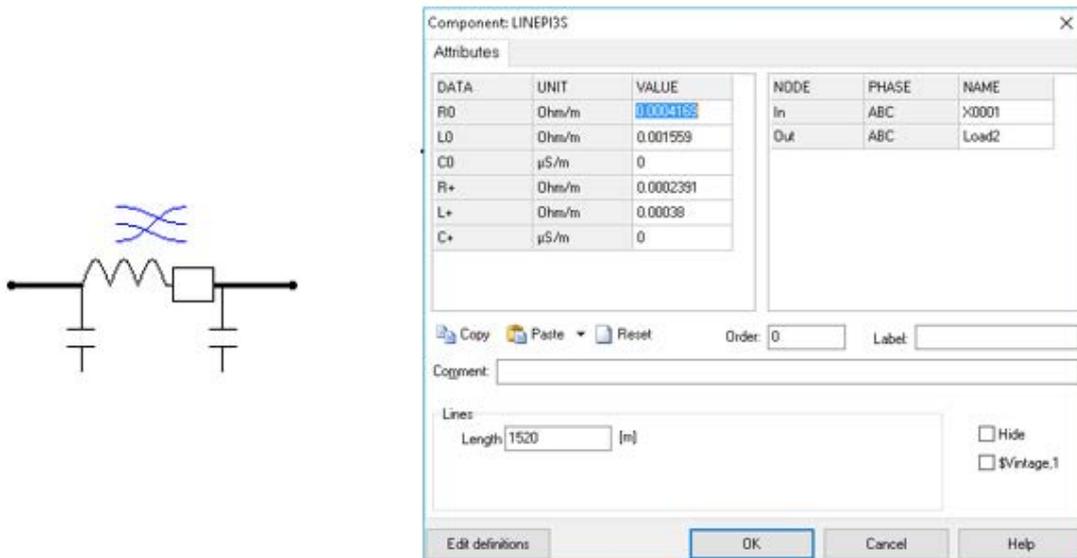
Amplitude: Peak L-G RMS L-G RMS L-L

Grounding: Grounded Ungrounded Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.6 - Modelo de linha pi-equivalente utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de cada uma das linhas utilizadas são apresentados na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3, apenas com uma correção, já que os dados de entrada de linha no ATPdraw são dados em ohm/m, valor que deve ser corrigido com a divisão por um fator de 1000. Além disso, para que os valores possam ser colocados em Ohm, é necessário inicialmente modificar o padrão do ATP em “Settings”, colocando o valor de Xopt igual a frequência da rede utilizada.

4.6.2.2. Modelagem das cargas dos trechos

Para a modelagem das cargas nos trechos, foi utilizado um modelo de carga a partir de uma impedância RLC trifásica, com simplificações. Apenas a corrente em cada trecho é conhecida, as cargas são supostas equilibradas e com um fator de potência de 0,95. Para o estudo, essa configuração da carga é razoável, considerando que há correção automática para baixo fator de potência em toda extensão da rede elétrica de distribuição.

Os valores das impedâncias utilizadas para cada trecho são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Impedâncias de carga dos trechos.

Alimentador	Trecho	Impedância	
		R (Ω)	X (Ω)
AQZ01I7	T1	329,09	108,1
	T2	132,79	43,64
ESB01S7	T3	100	33,5
	T4	72	23,67

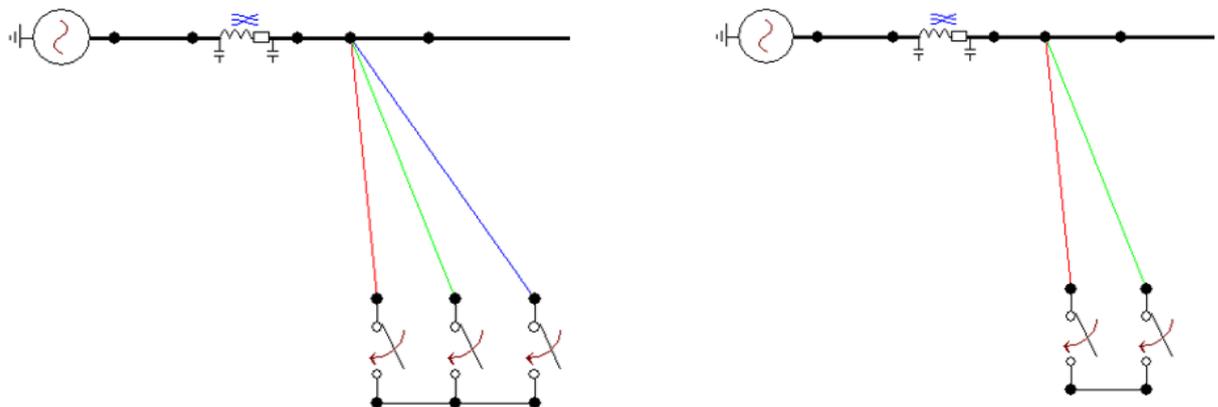
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.2.3. Modelagem do curto-circuito

Como o ATP é um programa que simula uma situação real do sistema, o curto deve ser aplicado pondo em contato direto as fases ou uma fase e a terra. A seguir são apresentados os modelos dos curtos utilizados.

Para o curto-circuito trifásico, as 3 fases do circuito são unidas através de chaves que fecham no mesmo instante de tempo, instante definido para ocorrer o curto-circuito. Para o curto bifásico, duas das fases são unidas. Os exemplos apresentados na Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram um curto após barra de 15kV da subestação.

Figura 4.7 - Exemplo da modelagem dos curtos trifásico e bifásico no ATPdraw.

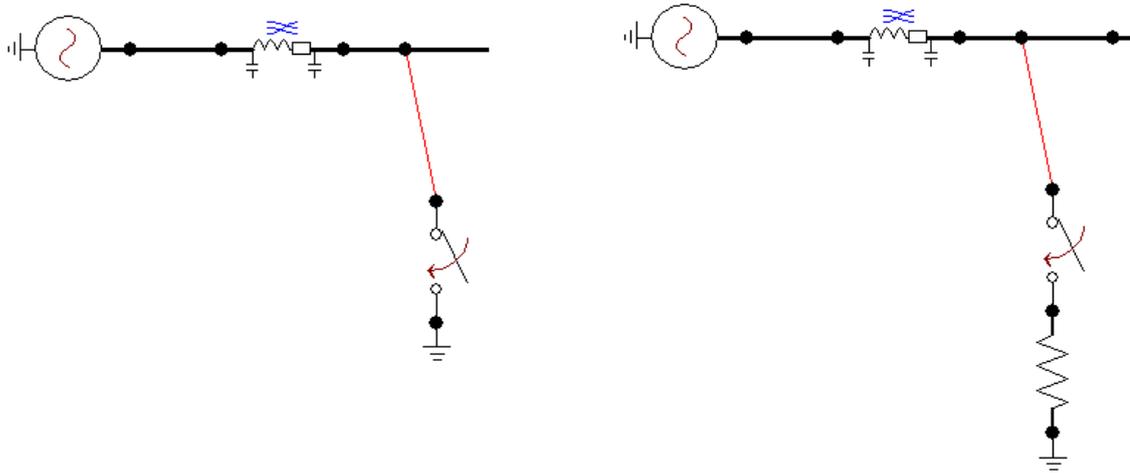


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que no ATP, as fases são definidas por cores diferentes, de forma que o curto-circuito é aplicado de fato pelas chaves, estando antes dela as fases todas devidamente separadas. Para a modelagem do curto-circuito monofásico e monofásico mínimo é necessária a introdução do elemento terra, através do aterramento de um dos nós da chave e no curto fase-

terra mínimo, a inserção de uma resistência representando as resistências de aterramento do circuito, como mostrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Curtos fase-terra e fase-terra mínimo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.3. Simulações de funcionamento dos relés para condições de falta na situação normal de operação

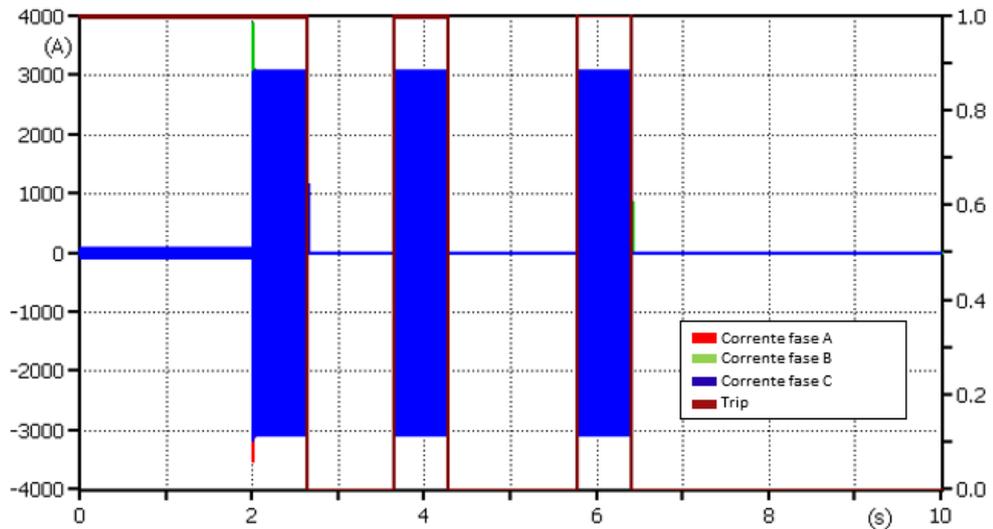
4.6.3.1. RS1 X 21I7 - Coordenação e atuação da proteção

A situação analisada para estudo da coordenação é para curto-circuito no final do trecho 2, antes do religador RL1 que divide os dois alimentadores. Foram simuladas as situações para faltas monofásicas e trifásicas. Para uma falta trifásica ao final de T2, as correntes vistas pelo relé são apresentadas, assim como a atuação do trip devido a essas correntes.

As correntes que passam pelo religador RS1 são apresentadas na Figura 4.9 com a função de religamento ajustada para 2 religamentos com tempos mortos de 1s e 1,5s, com atuação temporizada, pois a corrente de curto-circuito neste ponto não atingiu o pick-up instantâneo do relé. A atuação temporizada em 0,634s, foi muito próximo do tempo de atuação esperado pelo curto calculado anteriormente, 0,622s. Deve ser observado que o valor máximo simétrico da corrente é de 3116 A, logo o valor RMS da corrente de curto-circuito é de 2188 A, bem próximo ao valor esperado apresentado na Tabela 4.4. A diferença entre os dois valores de corrente pode ser explicada pela modelagem aproximada das impedâncias de carga, como demonstrado anteriormente. Para a verificação da coordenação, deve ser observado o comportamento da corrente que passa no trecho T1, apresentado na Fonte: Elaborado pelo autor.

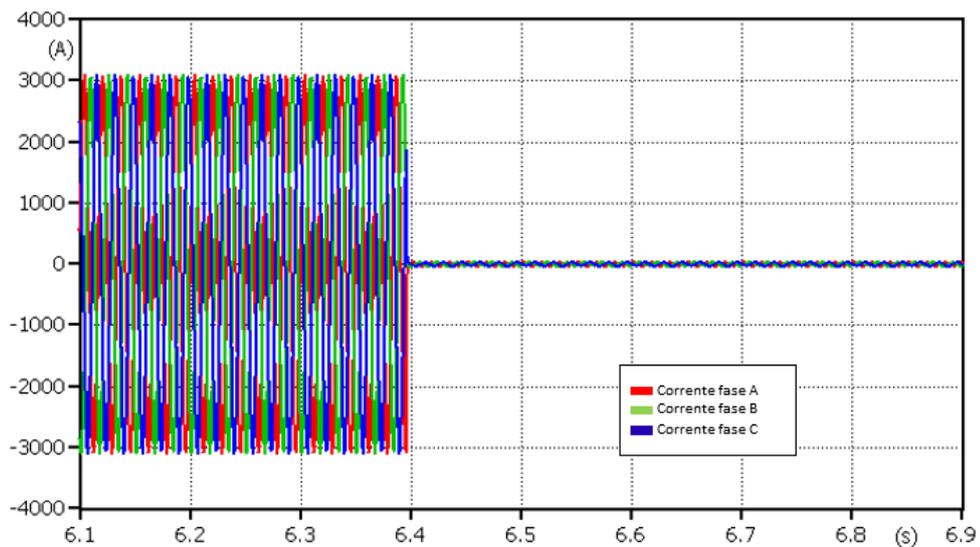
Figura 4.10. Pode ser observado que a corrente volta ao seu estado natural ao haver a retirada do trecho 2 do sistema, ou seja, existe coordenação entre esses relés para um curto trifásico no final do trecho T2.

Figura 4.9 - Correntes e sinal de abertura do disjuntor no relé RS1 para um curto trifásico em T2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.10 - Correntes no disjuntor do relé 21I7 para um curto trifásico em T2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma situação em que o curto-circuito é inserido aos 2s mas sai em 6s, por exemplo, algum contato acidental, o sistema se recompõe, com a corrente retornando à sua

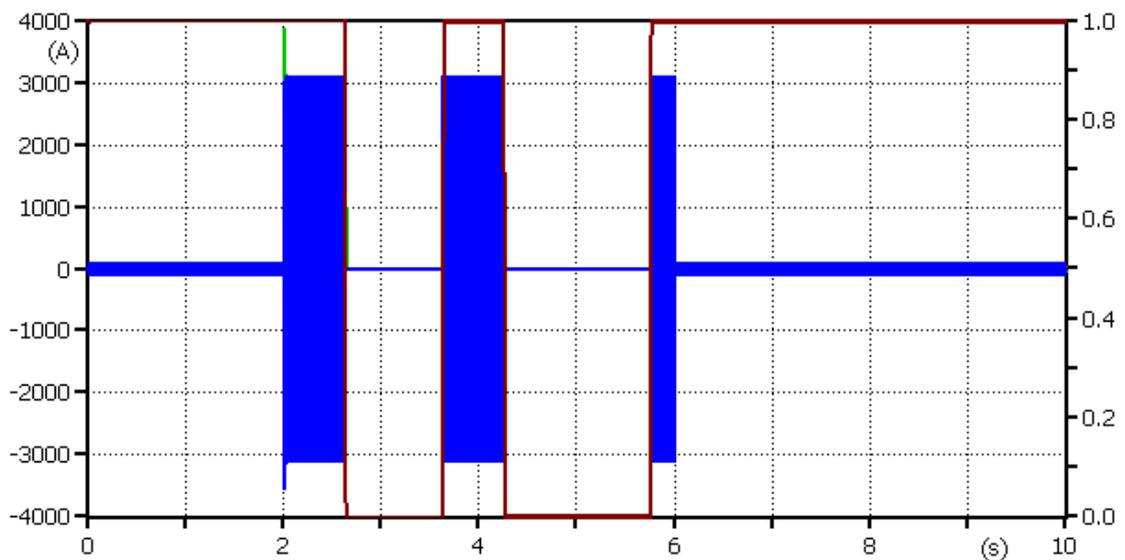
condição inicial como pode ser visto na Figura 4.11.

A situação seguinte simula um curto-circuito, fase-terra na fase A, também ao final do trecho T2. A corrente de curto fase terra neste ponto é apresentada na Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.12. A atuação do religador, com o mesmo ajuste demonstrado anteriormente, com um tempo de 1s e outro de 1,5s é mostrada na Fonte: Elaborado pelo autor.

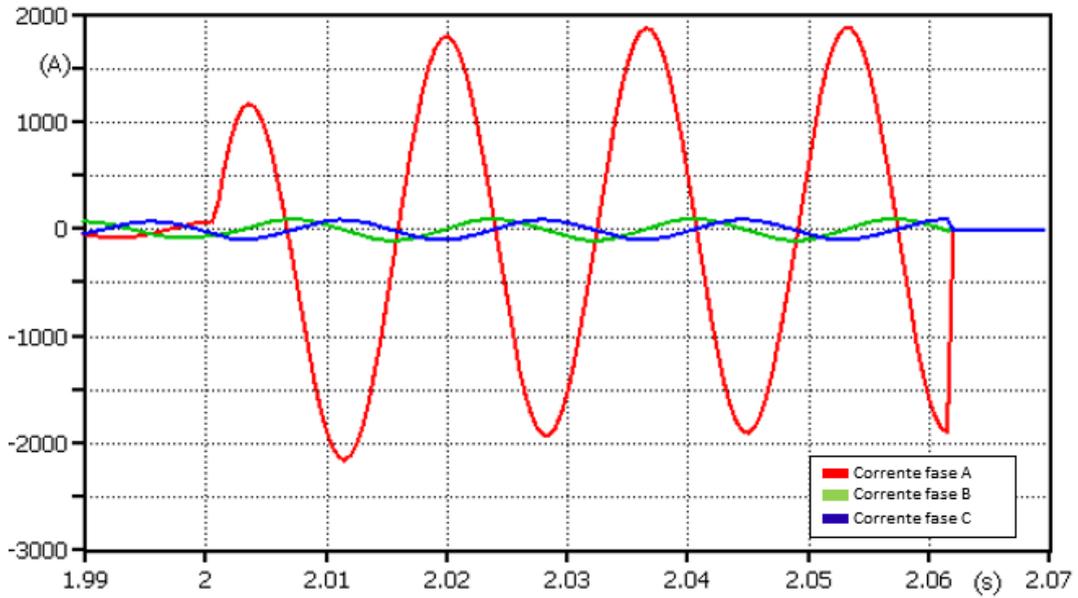
Figura 4.13. Para esse nível de curto, a função temporizada tem um valor praticamente igual à função instantânea, de tal modo que há a atuação de uma função instantânea (em 0,06s) e 2 temporizadas, com tempo de atuação para o nível de curto monofásico nesse ponto é 0,061s.

Figura 4.11 - Curto trifásico que se extingue antes do fim do ciclo de religamento.



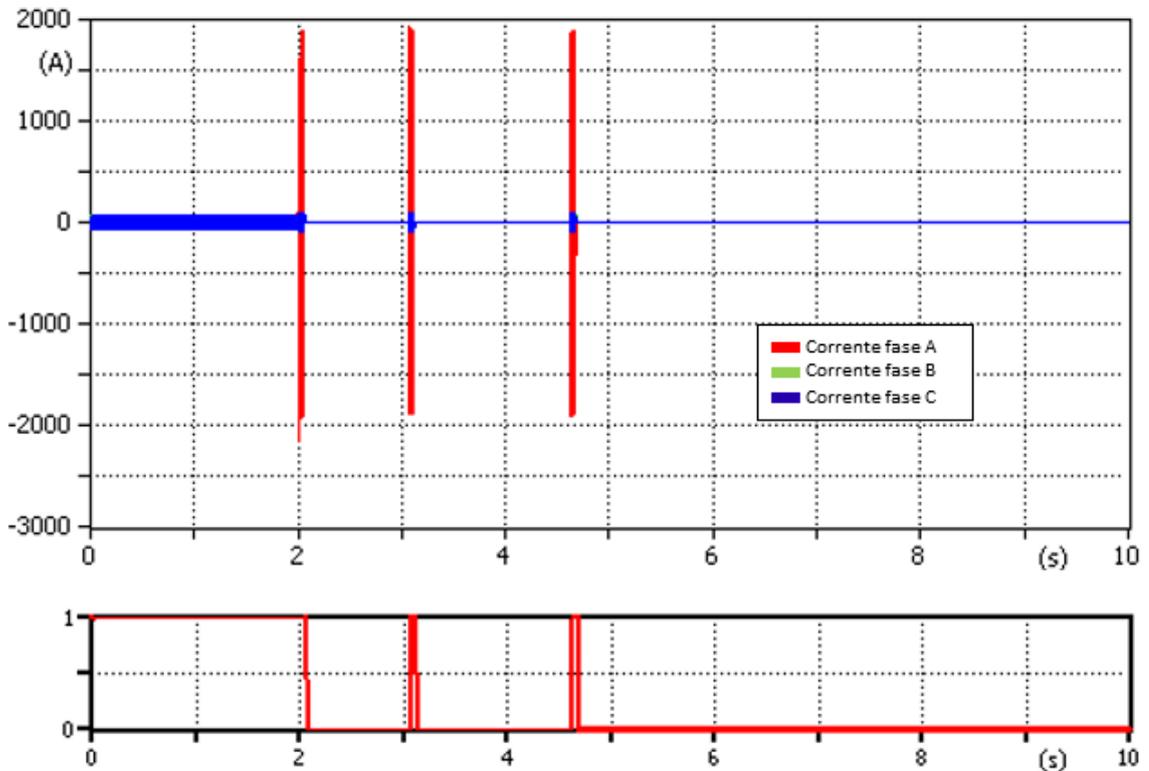
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.12 - Correntes de fase para um curto circuito monofásico no final de T2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.13 - Correntes nas fases com sistema de religamento e sinal de trip do religador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve ser observado que essa atuação é da função de neutro e que os valores de pick-up dessa função são baixos, em relação aos ajustes de fase, para proteção contra

desbalanceamento do sistema. Há ainda a proteção contra desbalanceamento da função de sobrecorrente de sequência negativa (46). Uma das parametrizações utilizadas para a unidade de sobrecorrente de sequência negativa instantânea é definida conforme mostrado nas Equações 4.8 e 4.9:

$$I_{46(I2)} = I_{max} \quad (4.8)$$

$$I_{46\left(\frac{I2}{I1}\right)} = 0,3 \cdot I_{max} \quad (4.9)$$

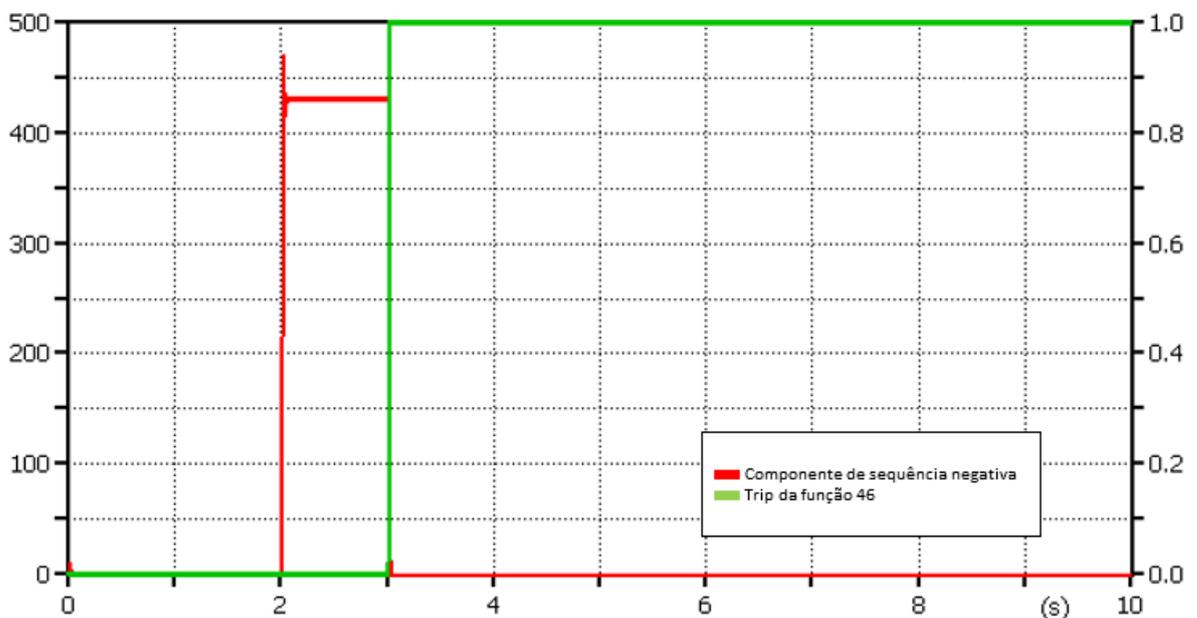
A parametrização para o relé RS1, que está sendo analisado, é dada pelas Equações 4.8 e 4.9:

$$I_{46(I2)} = 80 \text{ A}$$

$$I_{46\left(\frac{I2}{I1}\right)} = 24 \text{ A}$$

O tempo de atuação é de 1s para a atuação da função de sobrecorrente de sequência negativa I2 e 2s para a função I2/I1. Para a simulação dessa função de proteção será desabilitada a função de sobrecorrente de neutro, já que a simulação será feita com a aplicação do mesmo curto monofásico aplicado anteriormente. Na Figura 4.14 é apresentado o valor da componente de sequência negativa e a atuação da função. Pode ser observado que a função I2 atua após 1s, já que a corrente de sequência negativa é muito maior que a corrente de carga, logo a proteção deve atuar nessa situação. Essa proteção pode ser utilizada em situações em que o pick-up de neutro precise ter um valor elevado e a atuação da sequência negativa pode ser ajustada para atuar antes da função de neutro.

Figura 4.14 - Componente de sequência negativa da corrente após um curto monofásico em T2.

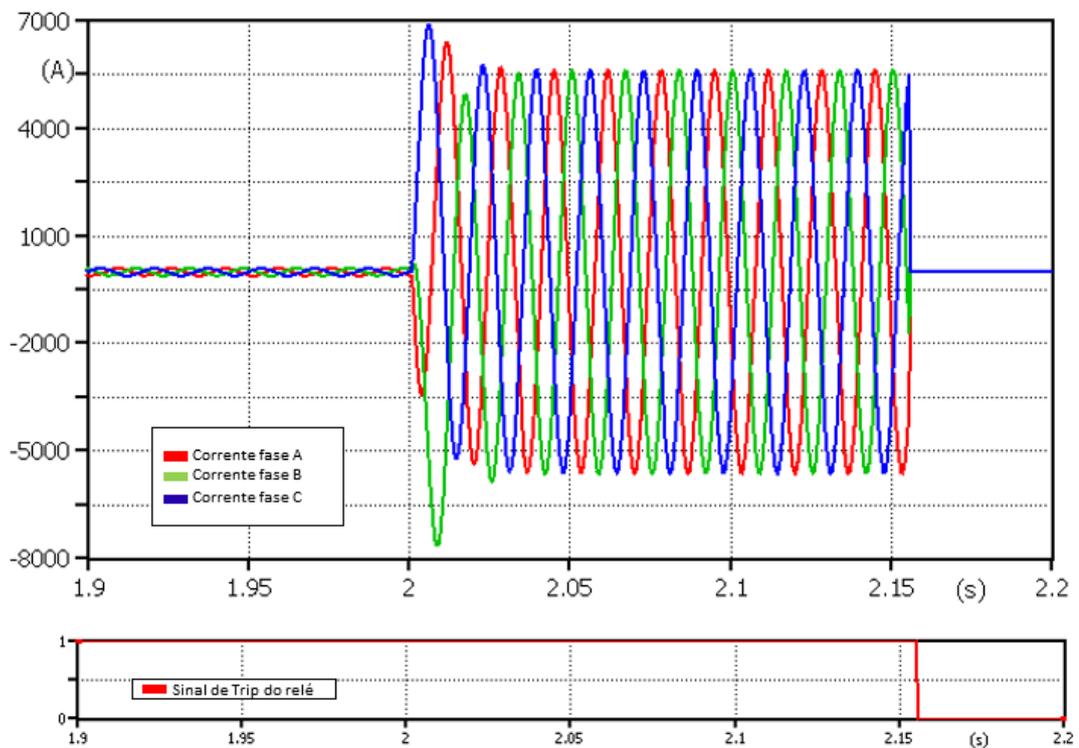


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.3.2. RS3 X 21S7 - Coordenação e atuação da proteção

A partir deste ponto, a coordenação com religamento será suprimida dos estudos e simulações, já que tem um funcionamento semelhante ao mostrado na seção anterior. Esta análise será resumida às funções de sobrecorrente e sua atuação com a análise da coordenação para um curto-circuito em T3, ao final do alimentador. As correntes de curto-circuito e o sinal de trip de atuação do relé RS3 é mostrado na Figura 4.15.

Figura 4.15 - Correntes das fases em RS3 e sinal de trip do relé.



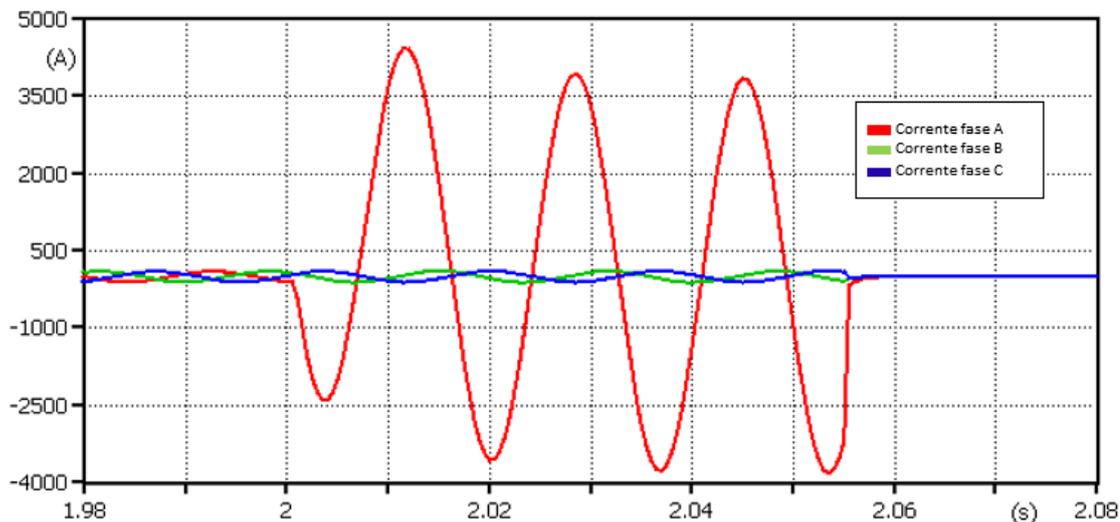
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se a atuação do relé após um tempo de 0,155s, o que é muito próximo do valor esperado de 0,154s com o curto circuito de 4000A calculado através do ProteCAD. Foi observado também que não há atuação do relé 21S7 e após a atuação do relé RS3, o trecho T3 é isolado e o trecho T4 é normalizado.

Para uma falta monofásica, as correntes nas fases são apresentadas na Figura 4.16, onde pode ser observado que a atuação da função de neutro instantânea (50N), com uma atuação em 0,06s, conforme ajustado. Assim como as situações anteriores, o relé mais a jusante não atua, já que foi escolhida uma coordenação entre as funções instantâneas, com uma margem de

coordenação. Assim, o trecho T3 é novamente isolado e as cargas em T4 são normalmente supridas pela subestação de Eusébio.

Figura 4.16 - Correntes nas fases para uma falta monofásica em T3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.4. Análise em situação de contingência

Será analisada uma situação de contingência, com o caso de um curto-circuito em T4 (entre RS3 e 21S7). Com essa situação, há a necessidade de uma mudança nos ajustes de proteção do relé RL1, já que este se encontra sempre aberto na condição normal, pois os relés RS3 e 21S7 devem ser abertos para isolar o trecho em falta. Não há a necessidade da mudança nos ajustes dos relés a jusante, pois foi escolhido um pick-up um pouco mais alto (próximo da capacidade de condução do condutor) para que os ajustes em curtos nos trechos possam ser feitos apenas com o ajuste de um dos religadores.

4.6.4.1. Ajustes de proteção

Os ajustes de proteção e os estudos de coordenação entre os relés RS1 e 21I7 já foram apresentados anteriormente, logo sendo necessário apenas o estudo de coordenação entre os religadores RL1 e RS1 e garantir a coordenação entre as funções de proteção entre esses dois relés. Os ajustes de proteção do religador RL1 são apresentados na Tabela 4.7 (RODRIGUES, 2016).

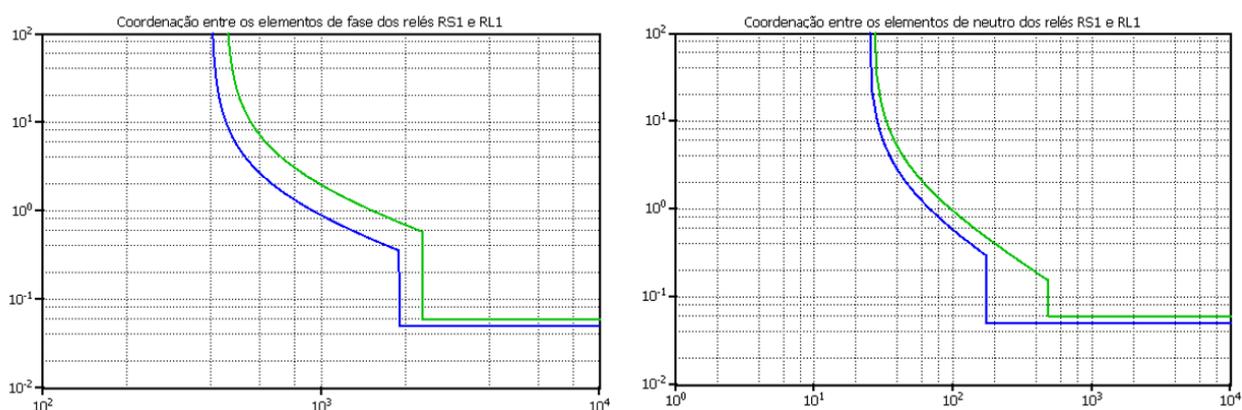
Tabela 4.7 - Ajustes de proteção de RL1

Elemento	RTC	Proteção	Tape 51/51N	Corrente de pickup	Dial	Tipo de curva	Tape 50/50N	Instantâneo
RL1	200	Fase	2	400	0,1	MI	9,5	1900
		Neutro	0,11	22	0,15	MI	0,85	170

Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando o ATP, assim como demonstrado na seção 4.5.1, foram levantadas as curvas de coordenação entre os relés RL1 e RS1, e como demonstrado anteriormente, RS1 e 21I7 já estão coordenados, não há necessidade de mostrar essa coordenação novamente. Os ajustes feitos no modelo do relé no ATPdraw encontram-se no Apêndice B.

Figura 4.17 - Coordenação entre os relés RS1 e RL1.

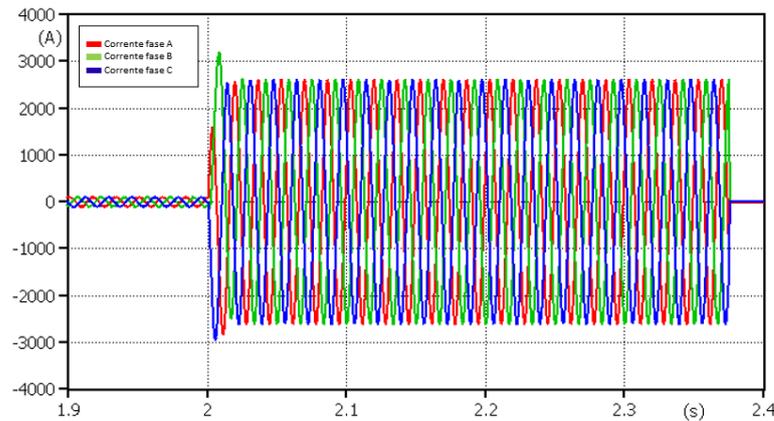


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.4.2. RS1 X RL1 - Coordenação e atuação da proteção

Para a análise de atuação, será utilizado o critério demonstrado anteriormente para o curto trifásico, mas para o curto-circuito monofásico, será utilizado um curto-circuito fase-terra mínimo utilizando uma resistência de aterramento de 100Ω. A simulação das correntes que passam em RL1 numa situação de curto no final do trecho T3. Pode ser observado que o nível de curto-circuito agora é menor que o nível na situação normal, devido à inserção do trecho T3 em série com os trechos T1 e T2. A atuação do dispositivo acontece em 0,375s, com a nova parametrização do religador RL1. O trecho T4 foi totalmente isolado anteriormente, e agora o religador RL1 é responsável pela proteção do trecho T3 e atua corretamente. Para o curto monofásico, há uma situação semelhante às anteriores.

Figura 4.18 - Corrente de falta em RL1.



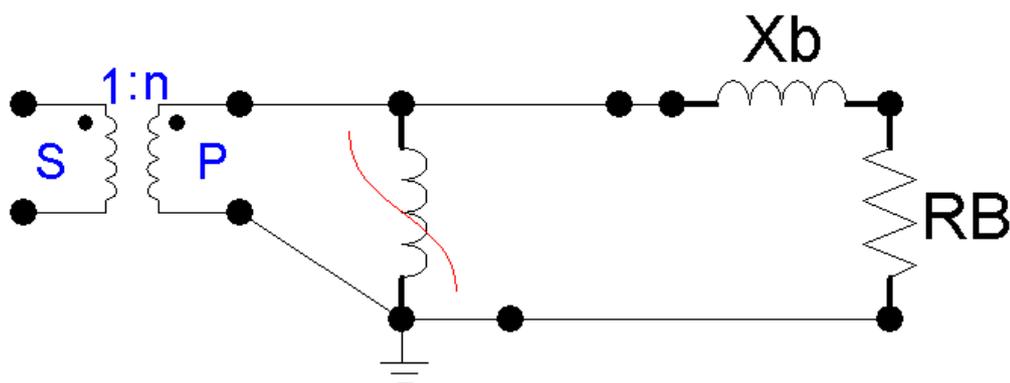
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7. Modelagem e simulação do transformador de corrente no ATP

4.7.1. Modelagem do circuito equivalente e do efeito de saturação

A modelagem do TC no ATPdraw foi feita por fase, de acordo com o circuito equivalente apresentado na Figura 2.14. A impedância dos enrolamentos é combinada com a impedância de burden, já que a ordem de grandeza do burden é muito maior que a impedância dos enrolamentos. O modelo utilizado é apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Modelagem do TC no ATP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi utilizado para a simulação do ramo de magnetização um bloco do tipo indutor linear Type 93, que tem como característica de entrada a curva da corrente de magnetização pelo fluxo concatenado. Essa curva pode ser obtida através da curva $I_e \times V_{ef}$, obtida dos fabricantes de TC's.

Para a simulação, foi utilizado um TC com relação máxima 1000:5, ajustado para 1000:5, cuja curva de saturação é característica de um TC C200, apresentada Apêndice A. Para a simulação no ATP, o indutor não linear exige um valor de fluxo para ser inserido nas características. Segundo (MIGUEL, 2011), o fluxo pode ser calculado a partir da Equação 4.10.

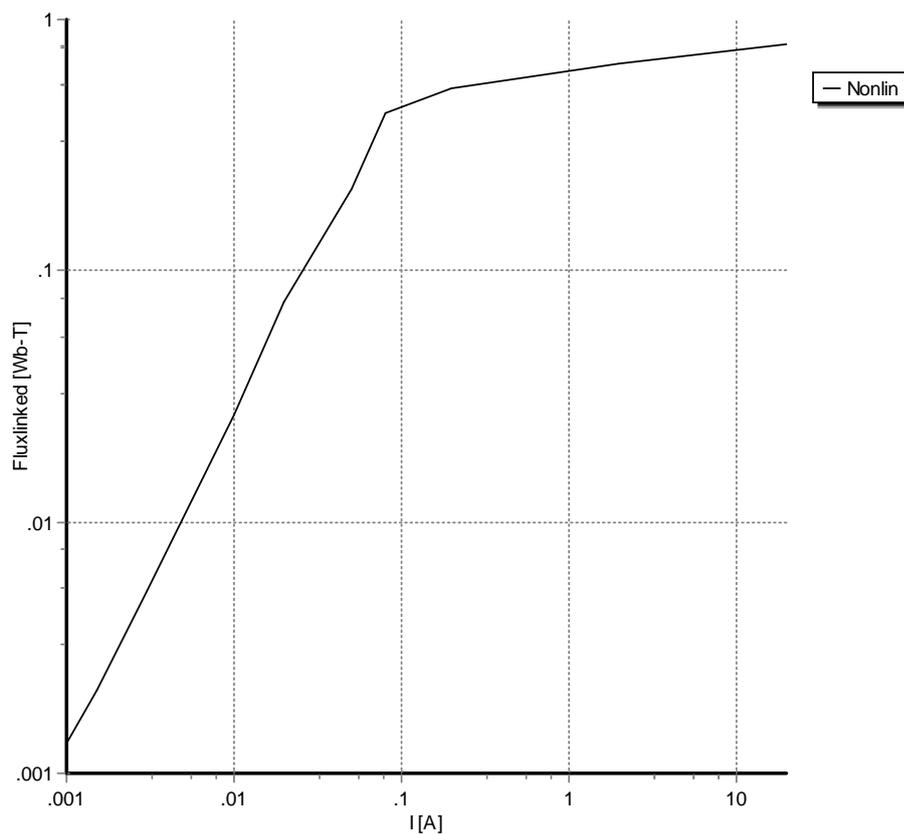
$$\Lambda = \frac{V_{ef}}{2\pi f} \quad (4.10)$$

Em que: V_{ef} – Tensão eficaz no ramo de magnetização;

f – frequência da rede de 60 Hz.

Com esses dados, é possível inicializar o componente do ATPdraw e obter sua curva de excitação de fluxo em função da corrente de excitação, conforme apresentado na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Curva de excitação simulada do TC utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

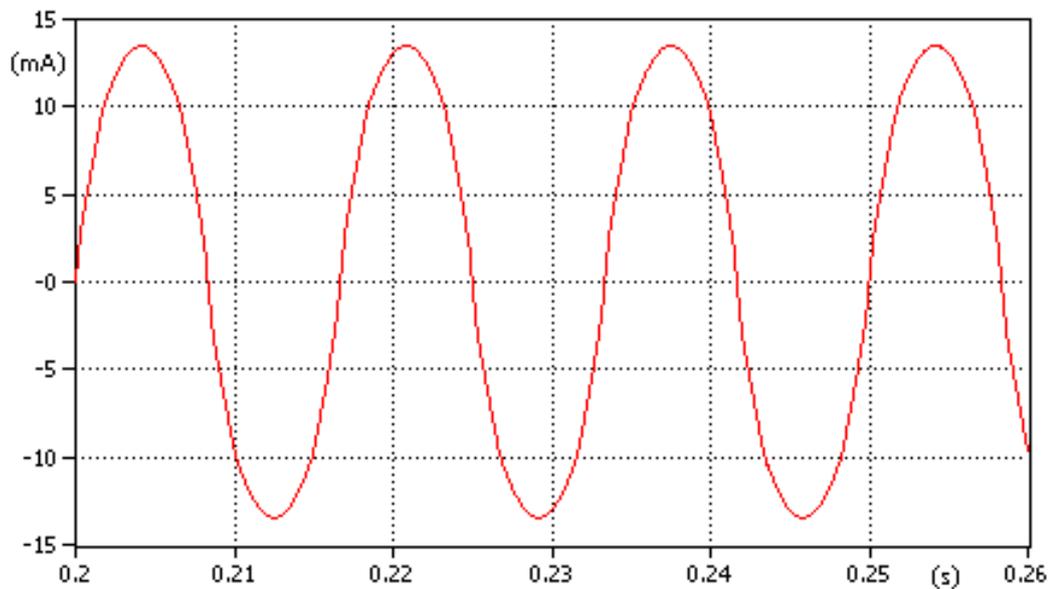
A partir dessa parametrização, é possível obter a característica de corrente do indutor não linear, com tensões abaixo e acima da saturação e como essa característica do indutor influencia nos valores de corrente do TC.

Para uma tensão abaixo do ponto de joelho, a forma de onda da corrente não apresenta distorção não causando, portanto, influência no circuito secundário do TC, conforme demonstrado na Figura 4.21.

Para tensões acima do ponto de saturação da curva, é possível observar como a saturação influencia na forma de onda de corrente, havendo grande distorção e um aumento significativo no valor da corrente que passa através do indutor, isso pode causar grande variação na corrente secundária do TC, conforme mostrado na Fonte: Elaborado pelo autor.

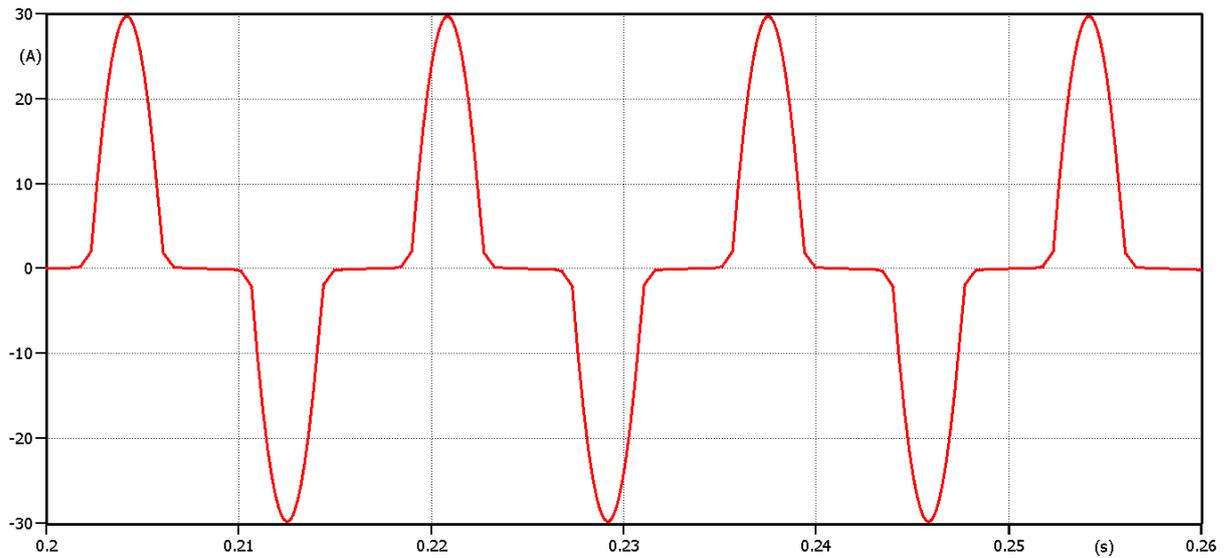
Figura 4.22.

Figura 4.21 - Corrente no indutor não linear com tensão abaixo do joelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.22 - Corrente no indutor não linear em um ponto acima da saturação.



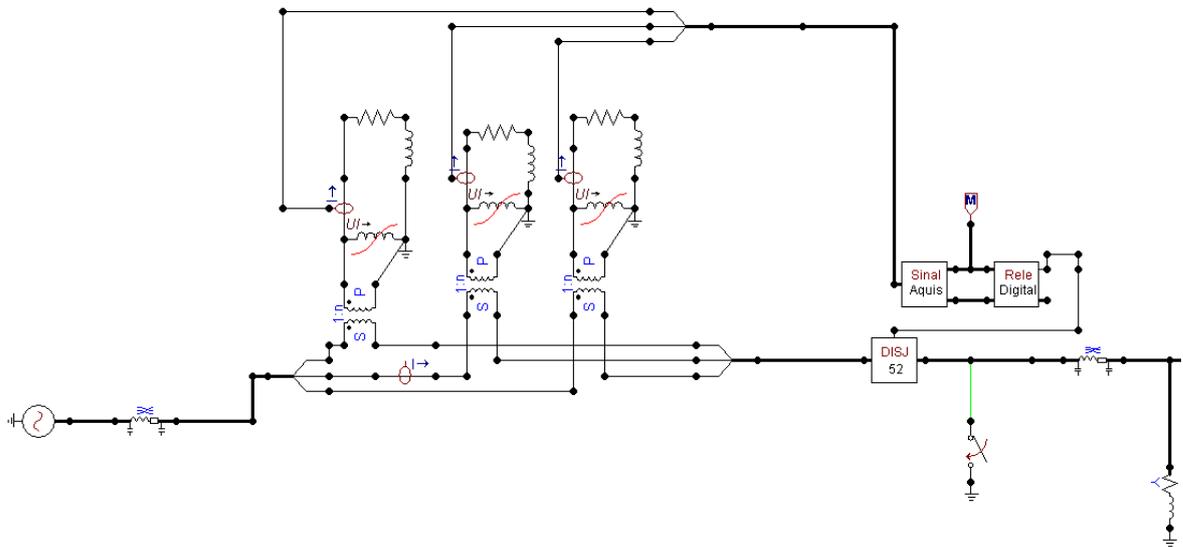
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser observado nas imagens que com o efeito da saturação, além da deformação da forma de onda da corrente, também existe aumento na intensidade dessa corrente, o que causa problemas na leitura da corrente primária, como visto a seguir.

4.7.2. Efeito da saturação na atuação de dispositivos de proteção

Para o estudo da saturação e o efeito dos dispositivos de proteção, foi utilizado um dos trechos do alimentador da rede Aquiraz modelado e estudado anteriormente para a avaliação do efeito da saturação na atuação dos dispositivos de proteção que foram modelados anteriormente. O trecho foi modelado no software ATP conforme mostrado na Figura 4.23.

Figura 4.23 - Trecho utilizado para estudo da saturação de TCs.



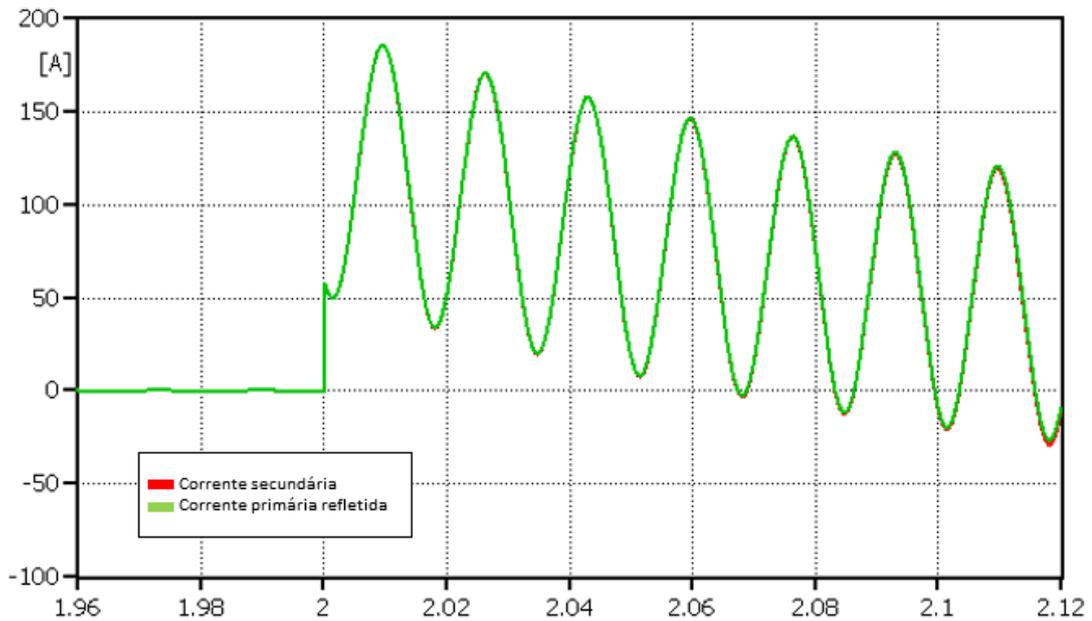
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores das impedâncias da barra, da linha e da carga utilizada, são apresentados respectivamente na Tabela 4.3, Tabela 4.2 e Tabela 4.6. Como pode ser visto na Figura 4.23, é inserido um curto-circuito fase-terra na fase B após 2 segundos (indicada pela cor verde) imediatamente a jusante do disjuntor de proteção do trecho. A forma utilizada de estudo de saturação para o trecho é através da variação da impedância de burden do circuito secundário do TC da fase B (fase que será utilizada para o presente estudo). Serão analisados os efeitos de saturação leve, moderada e pesada, através de 3 impedâncias de burden. O valor da reatância indutiva de burden (X_b) será mantido em 0,01 para todas as posteriores simulações.

Para uma situação de não-saturação, será utilizado um valor de R_B muito baixo, igual a $0,05\Omega$. A corrente secundária do TC e a corrente primária refletida para o secundário são mostradas na Figura 4.24. Pode ser observado nessa situação que a corrente secundária tem a mesma forma da corrente primária, o que implica dizer que a saturação não causou uma distorção estando, portanto, em um ponto abaixo do joelho da curva e por consequência, abaixo do ponto de saturação.

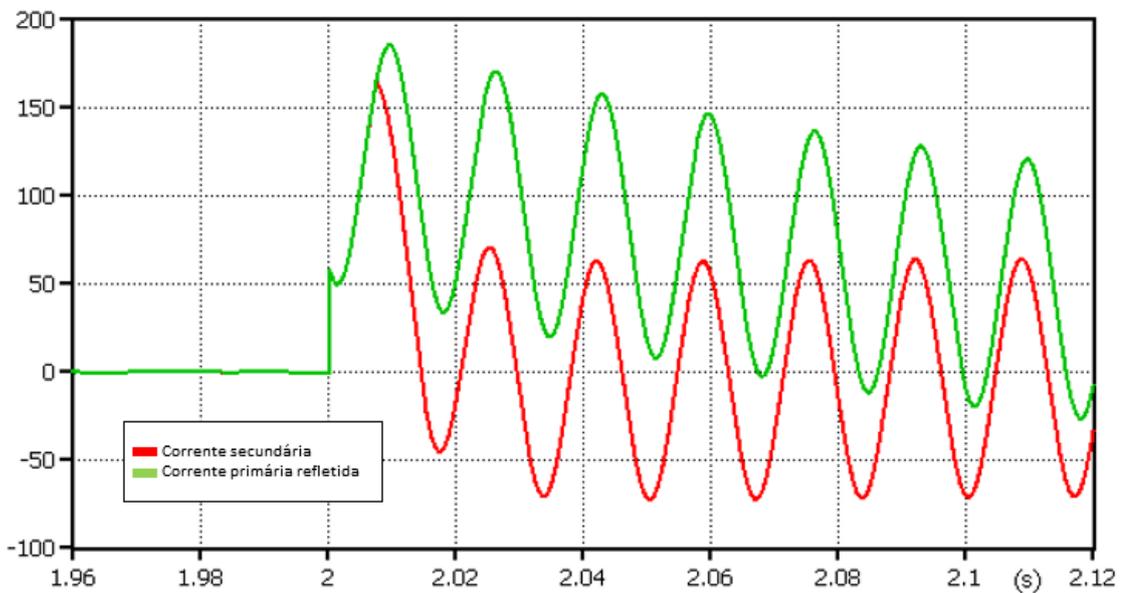
Para um ponto um pouco acima do joelho, mas uma saturação moderada, é escolhido um $R_B = 1\Omega$. Nessa situação é possível observar que há uma distorção na forma de onda que se assemelha à inserção de um nível DC na corrente medida, conforme pode ser observado na Figura 4.25.

Figura 4.24 - Corrente primária vista do lado secundário para $R_b = 0,01\Omega$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.25 - Corrente primária vista do lado secundário para $R_b = 1\Omega$.

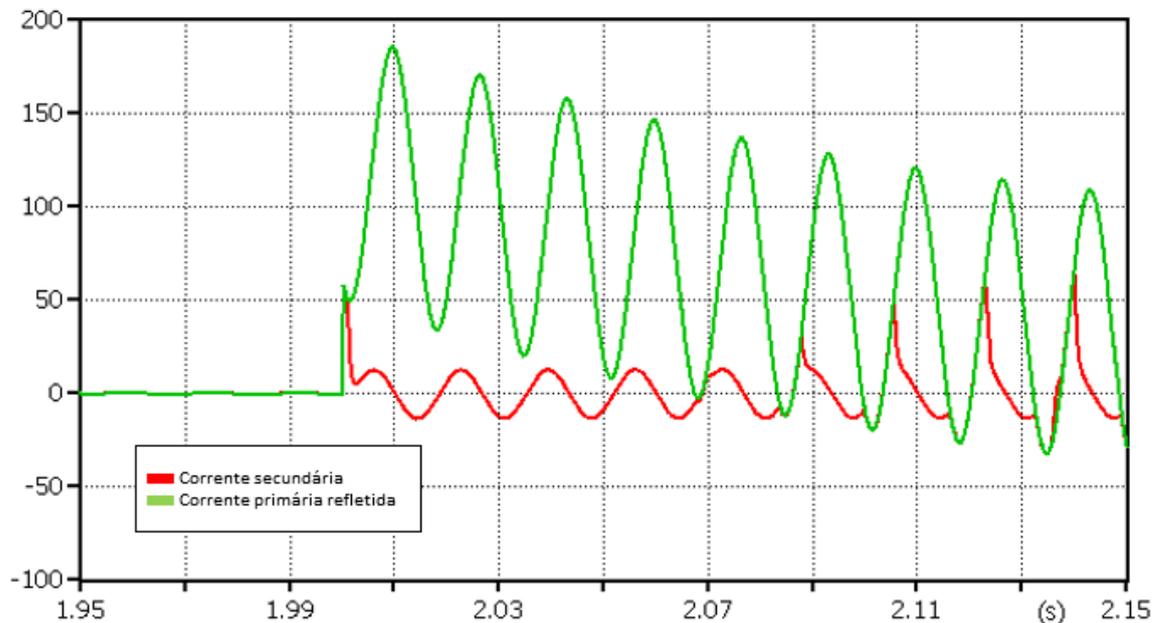


Fonte: Elaborado pelo autor.

E para a situação de saturação pesada, para isso será utilizado um valor de R_B muito alto, o que implicaria em um valor muito grande da tensão gerada nos terminais do TC. Essa situação pode ser observada na Figura 4.26. Observa-se que há uma distorção muito grande na forma de onda, especialmente após 0,1s. Também o valor RMS da corrente secundária cai de forma brusca e esse é um dos principais problemas causados pela saturação do núcleo de um

transformador de corrente.

Figura 4.26 - Corrente primária vista do lado secundário para $R_b = 15\Omega$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para analisar esse efeito, foi utilizado o relé, cuja modelagem foi explicada no capítulo 3, para o estudo de como a saturação influi no tempo de atuação de um dispositivo de proteção. Para o relé utilizado, foi habilitada apenas a função de neutro temporizada e o estudo será feito a partir do tempo de atuação dessa proteção para cada situação de burden. Para melhor visualização, o pick-up da função de neutro foi alterado. As características da função estão na Tabela 4.8.

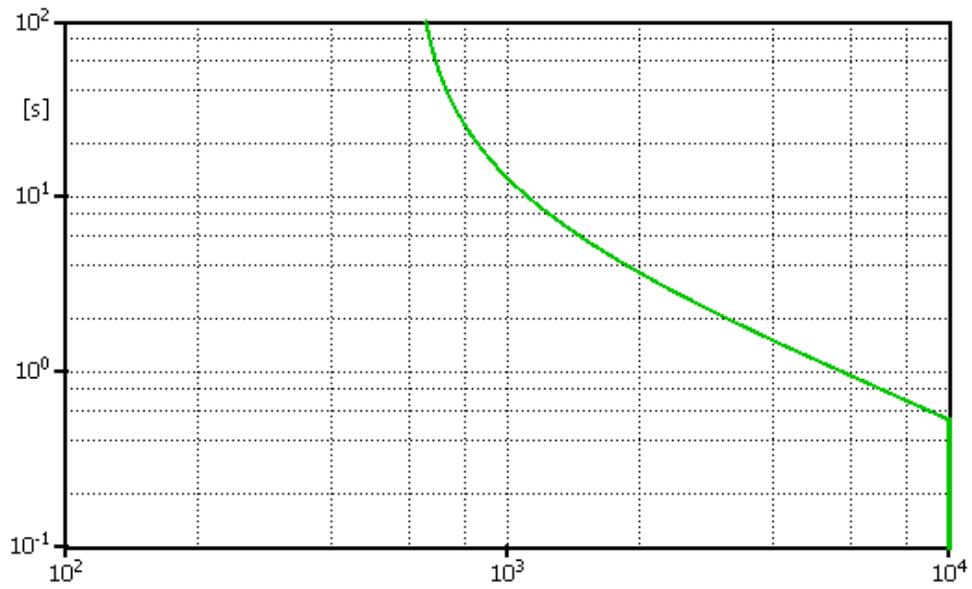
Tabela 4.8 - Parametrização do relé de sobrecorrente.

Tape (A)	RTC	Dial	Curva
3	200	0,64	MI

Fonte: Elaborado pelo autor.

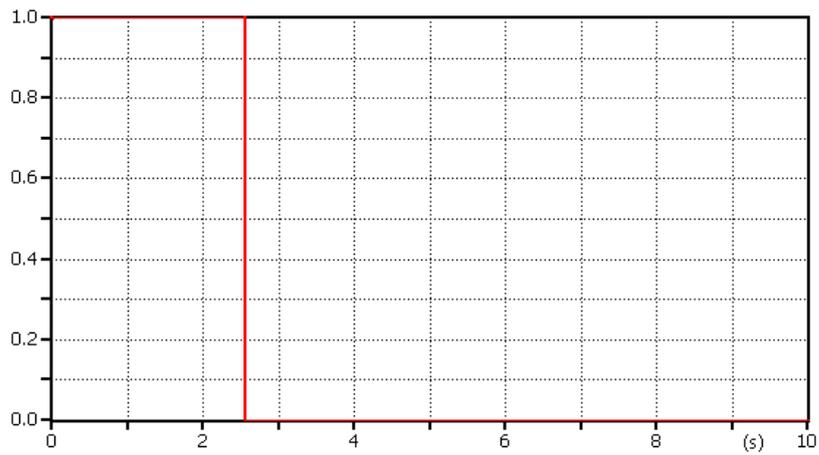
A curva de tempo inverso, levantada no ATPdraw, é mostrada na Figura 4.27. Com isso, com o mesmo circuito utilizado é possível visualizar a atuação do relé para as diversas situações de saturação do transformador de corrente. Com a mudança do valor de burden, o relé pode ler um valor de corrente menor, e por consequência, atuar num tempo maior, como pode ser visto na Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30. A atuação é definida como a mudança da flag de 1 para 0, o que atua o disjuntor.

Figura 4.27 - Curva de atuação do relé parametrizado.



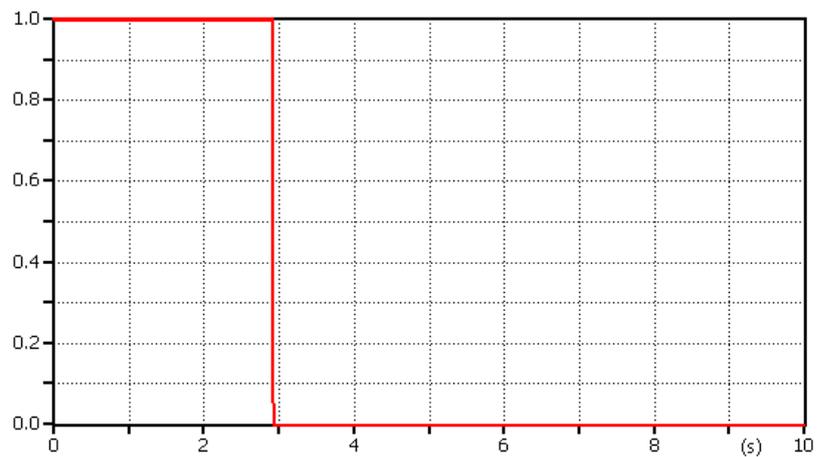
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.28 - Atuação para $R_B = 0,05\Omega$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.29 - Atuação para $R_B = 15\Omega$.



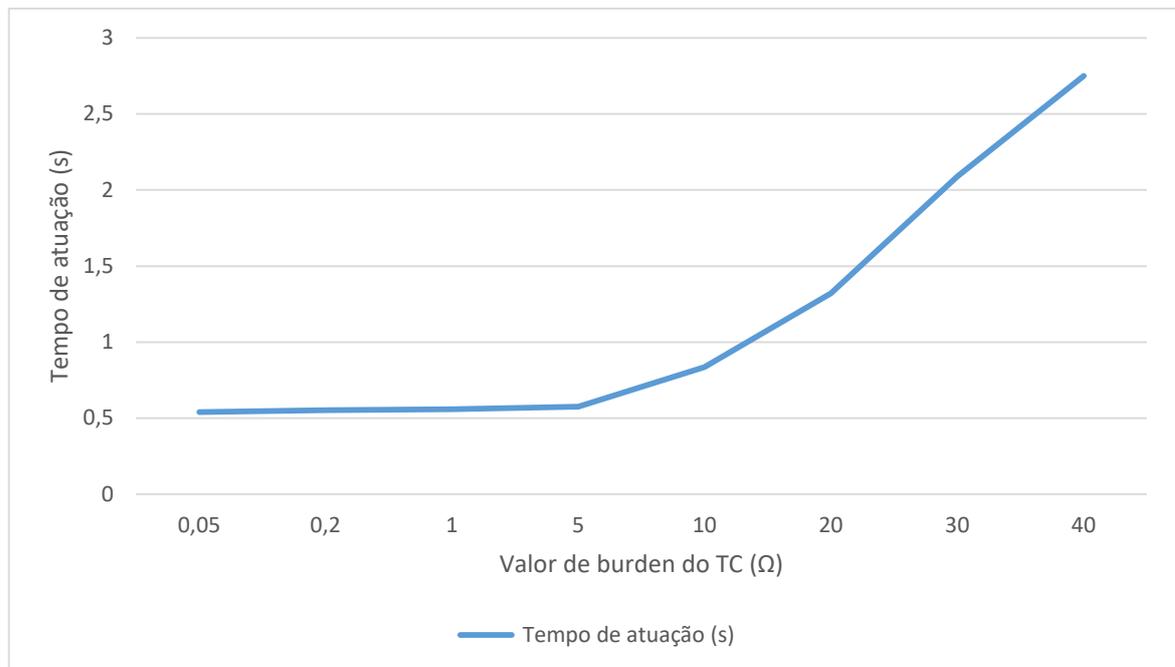
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.9 - Tempo de atuação de dispositivo de proteção com o efeito de saturação de TCs.

Valor de burden (Ω)	Corrente eficaz secundário (A)	Tempo de atuação (s)
0,05	51,38	0,54
0,2	50,1	0,552
1	49,4	0,56
5	48,1	0,575
10	33,85	0,837
20	22,7	1,32
30	15,4	2,09
40	12,5	2,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.30 - Curva de tempo de atuação do relé em função do burden do TC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser observado que é muito importante lidar bem com a saturação do TC, tendo em vista que por exemplo, numa situação de uma carga de 20Ω , o tempo de atuação se torna muito grande para um curto-circuito fase terra máximo, podendo danificar os equipamentos ao longo da rede de distribuição, como por exemplo cabos, isoladores e demais componentes.

4.8 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os ajustes de proteção para o sistema em estudo, a modelagem e as simulações para o alimentador. Além disso, foi apresentado um estudo sobre os efeitos da saturação de TCs fazer uma conexão com a aplicação dos temas em outros capítulos.

5 VALIDAÇÃO DE RESULTADOS COM MALETA DE TESTES E RELÉ SEL 751

5.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada a validação dos dados das simulações feitas no ATP. Para isso foi utilizada uma maleta de testes COMPROVE C-6006 e um relé SEL 751. Serão apresentados os softwares utilizados e a utilização do tipo de arquivo COMTRADE para a troca de dados entre simulador e maleta de testes.

5.2. Ferramenta de pós processamento e geração de arquivos COMTRADE

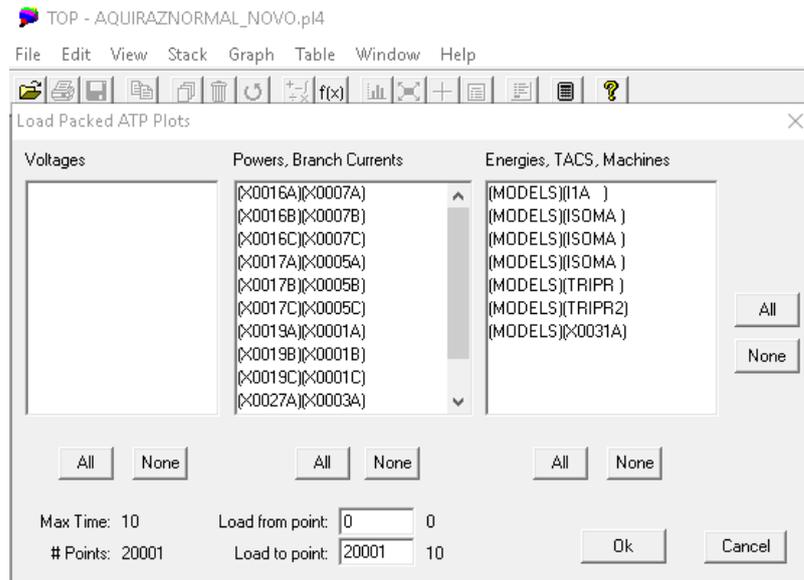
A rápida evolução e implementação de dispositivos digitais para gravação de dados de faltas e transitórios criou uma necessidade de um formato padrão para a troca de dados entre os dispositivos. A norma C37.111 do IEEE define um tipo padrão para esse intercâmbio de informação de testes do sistema elétrico. Esse tipo de dados é denominado COMTRADE (Common Format for Transient Data Exchange). Uma gravação de dados no formato COMTRADE carrega quatro tipos de arquivos associados: título (.HDR), configuração (.CFG), dados (.DAT) e informação (.INF).

O arquivo HDR é opcional, apenas para leitura do usuário. O arquivo de configuração é o arquivo que deve ser lido pelo programa computacional. Esse arquivo serve para que o programa consiga ler e interpretar o arquivo de dados (.DAT). A norma IEEE C37.111 define cada tipo de informação que esses arquivos devem conter.

Para a geração desse tipo de arquivo, é utilizado uma ferramenta de pós processamento gráfico chamada The Output Processor. É um software gratuito para estudantes, capaz de ler uma variedade de dados e transformá-los em gráficos e documentos (“TOP, The Output Processor”, [s.d.]). É utilizado porque é capaz de ler arquivos ATP (.PL4) e exportar para diversos tipos. Os arquivos ATP são gerados automaticamente após a compilação do circuito modelado no ATPdraw. São escolhidas nele as variáveis para serem simuladas e posteriormente exportadas para arquivos COMTRADE, como pode ser visto na Figura 5.1. Definidas as variáveis para plotagem, esse software pode ser utilizado para análise dos resultados, assim como o PlotXY utilizado nos demais itens deste trabalho. Além da visualização dos arquivos de plotagem, esse software permite a exportação do arquivo de plot para outros formatos.

Escolhidas as variáveis para a exportação, é escolhido o formato COMTRADE e são gerados três arquivos (arquivo .HDR, .DAT e .CFG) que são utilizados para a inserção das variáveis na maleta de testes utilizada.

Figura 5.1 - Definição das variáveis no software The Output Processor.

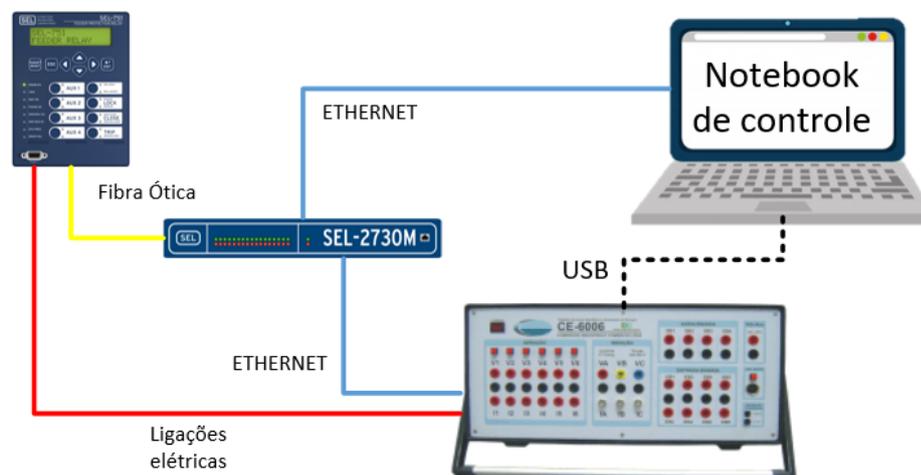


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3. Diagrama elétrico dos testes e geração de sinais

Para os testes de bancada foi utilizado um notebook com o software da COMPROVE chamado Transient, o software para ajustes do relé, o relé SEL 751 com os ajustes a partir do software Ascelerator e a maleta C-6006 da COMPROVE, conforme demonstrado no diagrama da Figura 5.2

Figura 5.2 - Diagrama de ligação dos testes de bancada.



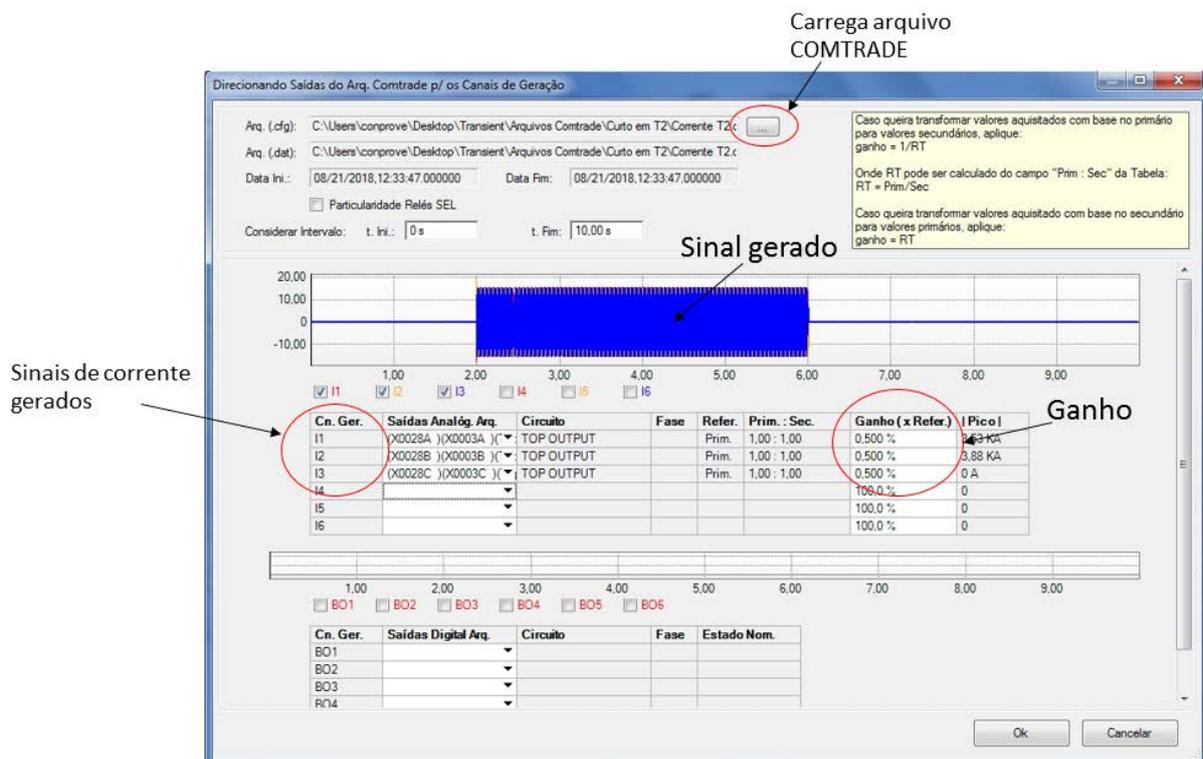
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a leitura e geração dos sinais em formato COMTRADE para a mala de testes, foi utilizado o software chamado Transient. A oscilografia é carregada no software através do arquivo com extensão .CFG. No software, os sinais simulados são mostrados após se definir qual saída da mala deseja-se gerar o sinal simulado. Deve ser inserido um ganho, já que a mala tem uma capacidade máxima de 25A na saída. Esse ganho deve se relacionar com a relação do TC que foi parametrizada no relé da seguinte forma:

$$Ganho = \frac{1}{RTC} * 100 (\%) \quad (5.1)$$

A tela do software é apresentada na Figura 5.3. Utilizado ganho de 0,5%.

Figura 5.3 - Configuração e geração de sinais no software Transient da mala de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. Ajustes no Relé SEL 751

O relé utilizado para estudo foi o relé da SEL 751, devido sua versatilidade. É um relé da fabricante Schweitzer Engineering Laboratories, INC. Possui, além das funções básicas de sobrecorrente de fase e neutro e residual, sobrecorrente de neutro sensível, sequência negativa, sobre e subfrequência, sobre e subtensão e função de religamento sendo, portanto, um modelo comercial bastante completo. O relé permite a parametrização de até 3 grupos de ajustes

diferentes.

Para os ajustes utilizados no relé foi utilizado um RTC de 200, para que o ganho apresentado no item 5.3 faça com que a corrente máxima seja menor que 25 A. Os ajustes principais são apresentados na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Parametrização geral do grupo de ajuste do Relé SEL 751.

The image shows a software interface for configuring a SEL 751 relay. The title is 'Main'. It contains several input fields and dropdown menus for configuration settings.

Parameter	Value	Range
RID Relay Identifier (16 characters)	SEL-751	
TID Terminal Identifier (16 characters)	FEEDER RELAY	
Configuration Settings		
CTR Phase (IA,IB,IC) CT Ratio	200	Range = 1 to 5000
CTRN Neutral (IN) CT Ratio	200	Range = 1 to 5000
PTR PT Ratio	180,00	Range = 1,00 to 10000,00
PTRS Synch. Voltage (VS) PT Ratio	180,00	Range = 1,00 to 10000,00
DELTA_Y Transformer Connection	DELTA	Select: WYE, DELTA
SINGLEV Single Voltage Input	N	Select: Y, N
VNOM Line Voltage, Nominal Line-to-Line (volts)	120,00	Range = 100,00 to 250,00, OFF

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na parametrização dos elementos de sobrecorrente, o relé que vai ser utilizado os grupos de ajustes é o relé RS1 da rede de Aquiraz que foi tratada anteriormente, na situação normal de operação. Serão feitas as parametrizações das funções de sobrecorrente de fase e de sobrecorrente residual (a sobrecorrente de neutro no relé exige uma entrada de neutro, mas nas simulações essa corrente é simulada através das correntes de fase, com a sua soma, e portanto a função equivalente do relé SEL 751 é a função de sobrecorrente residual.

Para as funções instantâneas de fase e de neutro (50/50N/50NS) esse relé permite que os TAPE sejam ajustados de 0,10 a 20,00 com passos de 0,01. Para as funções temporizadas de fase e de neutro (51/51N) os TAPE podem ser ajustados entre 0,10 e 3,20 também com passos de 0,01 (VIEIRA, 2015). O dial de tempo de fase e neutro pode ser ajustado de 0,05 a 1,50 com passos de 0,01.

5.4.1. Ajustes das funções de fase

Utilizando os ajustes das funções de fase do relé RS1 do alimentador de Aquiraz, apresentados na Tabela 4.5. A curva é muito inversa, que segundo o Manual de Uso do Relé SEL 751 é definida pela curva C2. Assim, as parametrizações são apresentadas nas Figura 5.5 e Figura 5.6.

Figura 5.5 - Parametrização da função instantânea de fase.

Maximum Phase Overcurrent

Element 1

50P1P Maximum Phase Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
 Range = 0,10 to 20,00, OFF

50P1D Maximum Phase Overcurrent Trip Delay (seconds)
 Range = 0,00 to 400,00

50P1TC Maximum Phase Overcurrent Torque Control (SELogic)
 ...

Element 2

50P2P Maximum Phase Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
 Range = 0,10 to 20,00, OFF

50P2D Maximum Phase Overcurrent Trip Delay (seconds)
 Range = 0,00 to 400,00

50P2TC Maximum Phase Overcurrent Torque Control (SELogic)
 ...

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.6 - Parametrização da função instantânea de neutro

Maximum Phase TOC

Element 1

51P1P Time Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
 Range = 0,10 to 3,20, OFF

51P1C TOC Curve Selection
 Select: U1, U2, U3, U4, U5, C1, C2, C3, C4, C5

51P1TD TOC Time Dial
 Range = 0,05 to 1,50

51P1RS EM Reset Delay
 Select: Y, N

51P1CT Constant Time Adder (seconds)
 Range = 0,00 to 1,00

51P1MR Minimum Response Time (seconds)
 Range = 0,00 to 1,00

51P1TC Maximum Phase Time Overcurrent Torque Control (SELogic)
 ...

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2. Ajustes das funções de neutro

Como dito anteriormente, para o ajuste ser correto e haver atuação do relé para as correntes inseridas (que são as correntes de falta simuladas) é necessário a utilização da função residual do relé SEL 751. As parametrizações das funções de sobrecorrente estão demonstradas a seguir:

Figura 5.7 - Parametrização da função instantânea residual

Residual Overcurrent

Element 1

50G1P Residual Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
 Range = 0,10 to 20,00, OFF

50G1D Residual Overcurrent Trip Delay (seconds)
 Range = 0,00 to 400,00

50G1TC Residual Overcurrent Torque Control (SELogic)
 

Element 2

50G2P Residual Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
 Range = 0,10 to 20,00, OFF

50G2D Residual Overcurrent Trip Delay (seconds)
 Range = 0,00 to 400,00

50G2TC Residual Overcurrent Torque Control (SELogic)
 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.8 - Parametrização da função temporizada residual

Residual TOC

Element 1

51G1P Time Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
 Range = 0,10 to 3,20, OFF

51G1C TOC Curve Selection
 Select: U1, U2, U3, U4, U5, C1, C2, C3, C4, C5

51G1TD TOC Time Dial
 Range = 0,05 to 1,50

51G1RS EM Reset Delay
 Select: Y, N

51G1CT Constant Time Adder (seconds)
 Range = 0,00 to 1,00

51G1MR Minimum Response Time (seconds)
 Range = 0,00 to 1,00

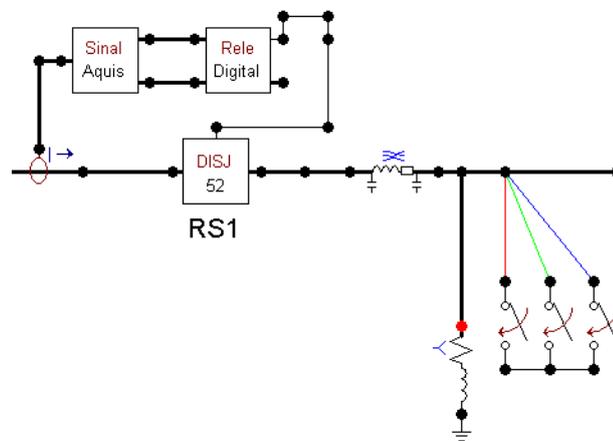
51G1TC Ground Time Overcurrent Torque Control (SELogic)
 

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5. Testes de atuação do relé para as correntes geradas na maleta de testes e comparação de resultados com o ATP

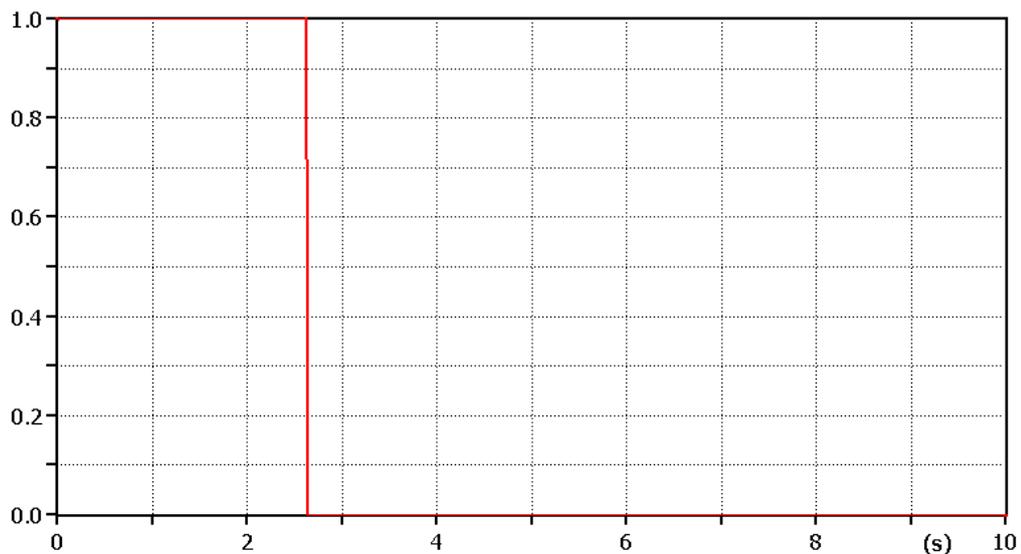
Após as configurações da maleta e as parametrizações do relé, foram iniciados os testes de atuação. A primeira situação simulada é para um curto-circuito trifásico no final do trecho T2 do sistema Aquiraz em 2 (tempo utilizado para todas as simulações feitas). O curto circuito simulado é mostrado na Figura 5.9. A atuação do relé no ATPdraw pode ser vista na Figura 5.10.

Figura 5.9 - Curto circuito trifásico ao final de T2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.10 - Atuação do relé no ATP para curto trifásico

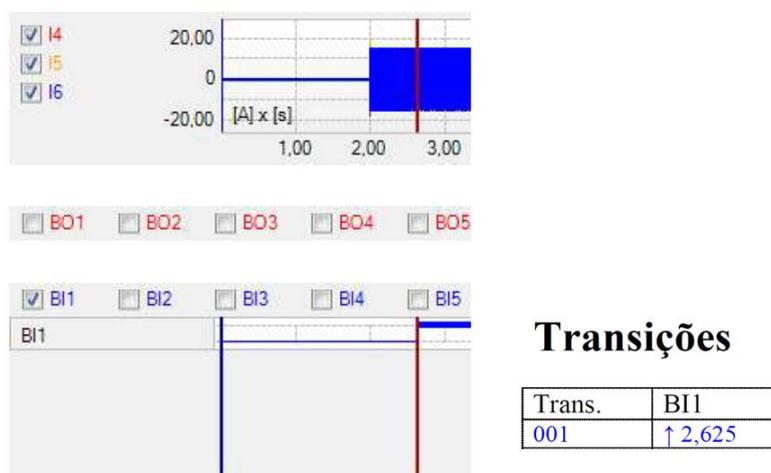


Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de atuação do relé para esse curto-circuito no ATP foi de 0,628s. Esse mesmo curto foi simulado na maleta da COMPROVE. Apenas inserido através de um ganho de

0,5%, conforme foi mencionado anteriormente, para que a corrente de saída não fosse maior que a corrente máxima que a maleta de testes pode gerar. Esse valor foi utilizado para todas as situações de utilização da maleta. Com o sinal gerado, é possível ver, através da leitura de um do sinal de Trip que é devolvido pelo relé a atuação. Ao se fazer os testes, o software retorna um relatório. O sinal de trip ocorre em 0,625s, valor dado no relatório como uma transição do sinal lido em BI1 (leitura do sinal de trip do relé) ocorre em 2,625 e o curto foi inserido em 2s. As oscilografias e atuação podem ser vistas na Figura 5.11.

Figura 5.11 - Corrente gerada e atuação do relé SEL 751 para curto-trifásico

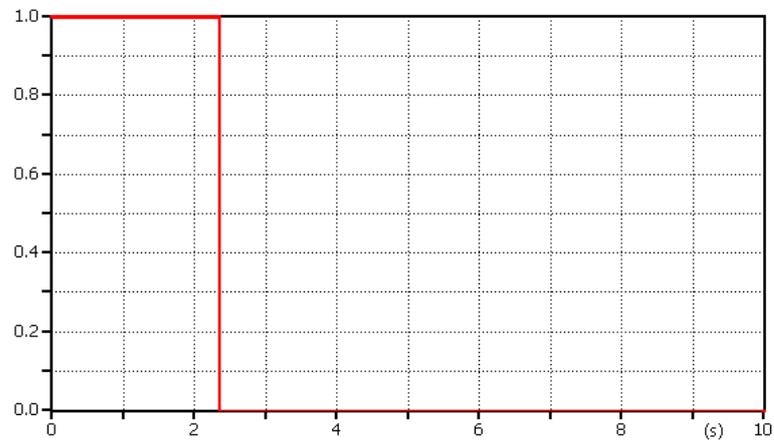


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, pode ser observado que o tempo de atuação do relé no ATP é praticamente o mesmo de atuação do relé SEL 751 para a mesma corrente simulada, onde o erro é de apenas 0,48%. Ou seja, a simulação do elemento de fase do relé do ATP foi validada pela atuação do relé SEL 751.

Para a simulação do elemento de neutro, foi inserido um curto-circuito monofásico através de uma impedância. Essa impedância foi utilizada uma resistência de 30 Ω para a simulação. Assim, pode ser visto o tempo de atuação da função temporizada de neutro para esse curto na Figura 5.12 e o relé atuou em cerca de 0,351s. Da mesma forma, foi inserido esses sinais na mala de testes e observado o sinal de trip vindo do relé. A transição do sinal de trip ocorre em 2,358s logo, o tempo de atuação é de 0,358s já que o curto foi inserido em 2s, logo o tempo de atuação de 0,358s. O erro da função de neutro é de 1,9%, erro maior que o anterior que pode ser explicado pela aquisição de sinais, já que precisa da soma e pode haver um pequeno erro na aproximação do valor RMS da corrente de neutro, mas ainda assim um resultado bem aproximado do valor real de tempo de atuação.

Figura 5.12 - Atuação da função de neutro no ATP para o curto fase-terra através de uma impedância



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.13 - Corrente gerada e atuação do relé SEL 751 para curto-trifásico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser visto que as funções simuladas se aproximam bastante dos tempos de atuação reais dos relés de sobrecorrente comerciais. Logo, a utilização do ATP para esse tipo de simulação pode ser muito útil para simulação de sistemas de distribuição. Além disso, o ATP pode ser utilizado para geração de sinais para testes de bancada, ou seja, pode ser muito útil para simular condições reais que o relé pode vir a passar e servir como estratégia para comissionamento de relés, geração de oscilografias e simulação de situações de falta mais complicadas.

5.6 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a validação das simulações feitas das funções de sobrecorrente de fase e neutro através da utilização do ATP e ferramenta de pós processamento para a exportação dos sinais para um formato COMTRADE que pôde ser testado pela maleta de testes utilizada e por fim a utilização do relé SEL 751 para os ajustes e a observação da sua atuação diante das mesmas situações de falta simuladas anteriormente no ATP.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs a modelar e simular relés de alimentadores de distribuição com a utilização do ATP para os mais variados tipos de estudos num sistema de distribuição. Foi feita uma modelagem a partir da linguagem Models, dividida em duas partes, uma na aquisição dos sinais e outra na lógica do relé propriamente dito, com as funções de sobrecorrente, sequência negativa e religamento.

Através da utilização do ATP e dos modelos de relés, foi feito um estudo de saturação de TC's. Foi feita a modelagem do TC através do seu circuito equivalente e feito um estudo dos efeitos da saturação em atuação de dispositivos de proteção. Foi observado que há um aumento considerável do tempo de atuação de relés à medida em que a saturação do núcleo se intensifica.

Foi estudada a rede de Aquiraz através do estudo de proteção e de simulações de situações de falta para testes de seletividade e coordenação dos ajustes calculados. Foi observado que para todas as situações a seletividade estava garantida, inclusive situações de falta na condição normal de operação e em uma situação de contingência, com a mudança do grupo de ajustes de um dos religadores. As simulações foram validadas através da utilização de uma ferramenta de pós processamento capaz de ler arquivos advindos do ATP para geração de sinais em uma maleta de testes e utilização de um relé comercial para atuação das proteções e comparação com os resultados dos relés modelados.

Logo foi observado que o ATP pode ser uma ótima ferramenta para simulação de relés de proteção e estudos aprofundados da rede com uma ferramenta acessível e de ampla utilização nacional e internacionalmente.

Como sugestão de trabalhos futuros podem ser listados:

- Simulação de uma rede inteligente completa, com mais funções modeladas e utilização de estruturas mais complexas da rede (recursos, fechamento de anéis);
- Inserção para estudo de influências da geração distribuída;
- Modelagem de mais funções de proteção e ampliação do estudo para linhas de transmissão, subestações e atendimento de clientes;
- Utilização do ATP para geração de oscilografias e estudo de atuação de relés de proteção para faltas complexas e posterior validação em relés comerciais;
- Estudo de proteção completo de subestações;
- Utilização do ATP como ferramenta didática com utilização das oscilografias para aulas práticas e testes de bancada.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6856: Transformador de Corrente. Rio de Janeiro, 1992.

ALMEIDA, M. A. D. Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000.

CONCEIÇÃO, E. N. DA. Modelagem e Simulação da Proteção de Alimentadores de Distribuição Utilizando Softwares Tipo EMTP. [s.l.] Universidade de Brasília, 2012.

DORNELLES, M. T. Aplicação do relé de sequência negativa na proteção de subestações. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

ELETROBRÁS. Proteção de sistemas aéreos de distribuição Rio de Janeiro Campus, , 1982.

HARGRAVE, A. et al. Beyond the Knee Point : A Practical Guide to CT Saturation. 44th Annual Western Protective Relay Conference, p. 1–23, 2017.

IZAGUIRRE, J. P. Modelagem de um relé de proteção direcional de linhas de transmissão no ATP. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2016.

KINDERMANN, G. Curto-circuito. 5. ed. Florianópolis: LabPlan, 2010.

KINDERMANN, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 3rd. ed. SC: Edição do autor, 2012.

LYONS, R. G. Understanding Digital Signal Processing. 3rd. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

MAEZONO, P. K. Proteção de Sistemas de Distribuição, São Paulo, 2015.

MARDEGAN, C. S. Guia prático de curto-circuito e seletividade em sistemas industriais, 2012.

MIGUEL, P. M. Introdução à simulação de relés de proteção usando a linguagem Models do ATP. 1st. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2011.

MUSTAFA, T. A. Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. [s.l.] Universidade de Blumenau, 2010.

NAHVI, M.; EDMINISTER, J. A. Circuitos elétricos. 5. ed. [s.l.] Bookman, 2014.

Norma Nacional Americana ANSI C37.60 - IEEE Standard Requirements for Overhead, Pad Mounted, Dry Vault, and Submersible Automatic Circuit Re-closers and Fault Interrupters for AC Systems, 1981.

Norma Nacional Americana ANSI C37.111 - IEEE/IEC Measuring relays and protection equipment, 2013.

NPAG. Protective Relays, Measurement and Control, 2011.

Redes de Energia Elétrica | ABRADÉE. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

RIBEIRO, A. L. Benefícios da Rede de Distribuição Aérea Compacta 15kV. [s.l.] Universidade São Francisco, 2008.

RODRIGUES, M. S. DE L. Teste e Validação das Funções de Proteção baseadas na Norma IEC 61850 Propostas Para Implantação no Projeto Piloto da Rede de Distribuição Inteligente de Aquiraz. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2015.

RODRIGUES, R. O. Estudo de identificação e análise de superação de transformadores de corrente. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2016.

SANDERS, M. P. Protective Relaying: Principles and Applications [Book Reviews]. 3rd. ed. [s.l: s.n.]. v. 13

SCHNEIDER. Parametrizando a função de sobrecorrente de fase nos relés SEPAM, 2008.

SPIRONELLO, F. T.; LOPES, H. DA S.; BARBOSA, L. A. Análise de confiabilidade em sistemas de proteção baseados no padrão IEC 61850. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

TOP, The Output Processor. Disponível em: <<http://www.pqsoft.com/top/>>. Acesso em: 31 out. 2018.

Valor eficaz – Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Valor_eficaz>. Acesso em: 31 out. 2018.

VELASCO, G. DEL N. Arborização viária X Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Avaliação dos custos, estudo das podas e levantamento de problemas fitotécnicos. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2003.

VIEIRA, R. B. Estudo Das Proteções Para Implantação Do Projeto Piloto De Redes Inteligentes Da Companhia Energética Do Ceará Em Aquiraz. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2015.

APÊNDICE A – DADOS PARA LEVANTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Para o levantamento da curva característica de um TC foram utilizados dados de uma curva característica para um TC do tipo C200 da GE:

Tabela A1 - Dados para levantamento da curva característica

Ie (A)	Vrms (V)
0,001	0,5
0,0015	0,8
0,003	2
0,01	10
0,02	28,2
0,05	80
0,08	160
0,2	200
2	250
20	300

Fonte: GE Digital

APÊNDICE B – AJUSTES DOS RELÉS MODELADOS NO ATP

- **Situação Normal de Operação**

Figura B1 - Relé 21I7 - Ajustes de fase e RTC.

MODEL: Rele51

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Tape51		500
Tape50		5000
dial		0.26
curva		2
td50		0.1
Tr		1
tinit		0.1
RTC		1

NODE	PHASE	NAME
irms	A..D	I1
iseq	ABC	×0026
tripR	1	××0025
Zone	ABC	×0011

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: R21I7 Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B2 - Relé 21I7 - Ajustes de religamento e neutro.

MODEL: Rele51

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
func79		1
disp79		3
td		0
topen1		1
topen2		1.5
topen3		2
Tape50N		1000
td_50N		0.1

NODE	PHASE	NAME
irms	A..D	I1
iseq	ABC	×0026
tripR	1	××0025
Zone	ABC	×0011

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: R21I7 Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B3 - Relé 21I7 - Ajustes de neutro e sequência negativa.

MODEL: Rele51

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
td_50N		0.1
Tape51N		100
dial_51N		0.64
curva_51N		2
td_46i2		60
Tape46i2		80
td_46_l2i1		70
Tape46_l2i1		24

NODE	PHASE	NAME
irms	A..D	I1
iseq	ABC	X0026
tripR	1	XX0025
Zone	ABC	X0011

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: R2117 Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B4 - Relé RS1 - Ajustes de fase e RTC.

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Tape51		450
Tape50		2300
dial		0.18
curva		2
td50		0.06
Tr		1
tinit		0.1
RTC		1

NODE	PHASE	NAME
irms	A..D	X0028
iseq	ABC	X0030
tripR	1	XX0029
Zone	ABC	X0012

Copy Paste Reset Order: 0 Label: RS1

Comment:

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: RS1 Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B5 - Relé RS1 - Ajustes de religamento e neutro.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
func79		1	irms	A..D	X0028
disp79		3	iseq	ABC	X0030
td		0	tripR	1	XX0029
topen1		1	Zone	ABC	X0012
topen2		1.5			
topen3		2			
Tape50N		480			
td_50N		0.06			

Order: Label:

Comment:

Models

Model: Use As:

Hide
 Protect

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B6 - Relé RS1 - Ajustes de neutro e sequência negativa.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
td_50N		0.06	irms	A..D	X0028
Tape51N		24	iseq	ABC	X0030
dial_51N		0.22	tripR	1	XX0029
curva_51N		2	Zone	ABC	X0012
td_46i2		60			
Tape46i2		57			
td_46_1211		70			
Tape46_1211		17.1			

Order: Label:

Comment:

Models

Model: Use As:

Hide
 Protect

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B7 - Relé 21S7 - Ajustes de fase e RTC.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Tape51		500.4	irms	A..D	X0020
Tape50		6200	iseq	ABC	X0023
dial		0.125	tripR	1	XX0021
curva		2	Zone	ABC	X0010
td50		0.1			
Tr		1			
tinit		0.1			
RTC		1			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: R21S7 Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B8 - Relé 21S7 - Ajustes de religamento e neutro.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
func79		0	irms	A..D	X0020
disp79		4	iseq	ABC	X0023
td		0	tripR	1	XX0021
topen1		1	Zone	ABC	X0010
topen2		1.5			
topen3		2			
Tape50N		4500			
td_50N		0.1			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: R21S7 Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B9 - Relé 21S7 - Ajustes de neutro e sequência negativa.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
td_50N		0.1	irms	A..D	X0020
Tape51N		24	iseq	ABC	X0023
dial_51N		0.425	tripR	1	XX0021
curva_51N		2	Zone	ABC	X0010
td_46i2		60			
Tape46i2		180			
td_46_I211		70			
Tape46_I211		54			

Order: Label:

Comment:

Models: Library

Model: Use As:

Hide
 Protect

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B10 - Relé RS3 - Ajustes de fase e RTC.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Tape51		450	irms	A..D	X0031
Tape50		5000	iseq	ABC	X0033
dial		0.09	tripR	1	XX0032
curva		2	Zone	ABC	X0013
td50		0.06			
Tr		1			
tinit		0.1			
RTC		1			

Order: Label:

Comment:

Models: Library

Model: Use As:

Hide
 Protect

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B11 - Relé RS3 - Ajustes de religamento e neutro.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
func79		0	irms	A..D	X0031
disp79		4	iseq	ABC	X0033
td		0	tripR	1	XX0032
topen1		1	Zone	ABC	X0013
topen2		1.5			
topen3		2			
Tape50N		330			
td_50N		0.06			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Mdel: Rele51 Edit Use As: RS3 Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B12 – Relé RS3 - Ajustes de neutro e sequência negativa.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
td_50N		0.06	irms	A..D	X0031
Tape51N		24	iseq	ABC	X0033
dial_51N		0.22	tripR	1	XX0032
curva_51N		2	Zone	ABC	X0013
td_46i2		55			
Tape46i2		75			
td_46_l2i1		65			
Tape46_l2i1		22.5			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Mdel: Rele51 Edit Use As: RS3 Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Situação de Contingência**

Figura B13 - Relé RL1 - Ajustes de fase e RTC.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Tape51		400	irms	A..D	X0031
Tape50		1900	iseq	ABC	X0033
dial		0.1	tripR	1	XX0032
curva		2	Zone	ABC	X0013
td50		0.05			
Tr		1			
tinit		0.1			
RTC		1			

Order: 0 Label: RL1

Comment: _____

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: RS3 Record Hide Protect

Edit definitions **OK** Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B14 - Relé RL1 - Ajustes de religamento e neutro.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
func79		0	irms	A..D	X0031
disp79		4	iseq	ABC	X0033
td		0	tripR	1	XX0032
topen1		1	Zone	ABC	X0013
topen2		1.5			
topen3		2			
Tape50N		170			
td_50N		0.05			

Order: 0 Label: RL1

Comment: _____

Models Library

Model: Rele51 Edit Use As: RS3 Record Hide Protect

Edit definitions **OK** Cancel Help

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B15 - Relé RL1 - Ajustes de neutro e sequência negativa.

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
td_50N		0.05
Tape51N		22
dial_51N		0.15
curva_51N		2
td_46i2		50
Tape46i2		75
td_46_I2I1		60
Tape46_I2I1		22.5

NODE	PHASE	NAME
irms	A..D	X0031
iseq	ABC	X0033
tripR	1	XX0032
Zone	ABC	X0013

Order: Label:

Comment:

Models:

Model:
 Use As:

Hide
 Protect

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – CÁLCULO DOS VALORES DE CURTO-CIRCUITO EM CADA TRECHO UTILIZANDO O PROTECAD

É definido o primeiro alimentador e a impedância reduzida da barra de 15kV da subestação Aquiraz.

Figura C1 - Condições e impedância da barra de 15kV da subestação AQZ.

Configurações do projeto

Geral

Subestação: AQZ Alimentador: 0117 Corrente máxima (A): 400 Data do Estudo: 31/08/2018

Dados de curto-circuito

Potência de base: 100 (MVA) Tensão de base: 13,8 (kV) Resistência de terra: 100 (ohms)

Impedância de sequência positiva: Módulo = 0,4441 (pu) Ângulo = 88,2 (graus)

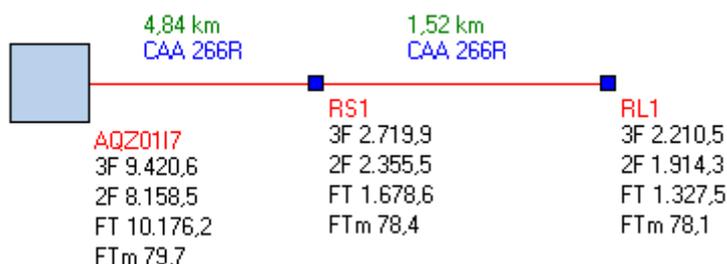
Impedância de sequência zero: Módulo = 0,3453 (pu) Ângulo = 90 (graus)

OK Cancelar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo dos curtos são definidos os condutores e calculado o nível de curto-circuito:

Figura C2 - Valores de curto-circuito nos trechos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida para o trecho que sai da subestação de Eusébio é repetido o procedimento e calculado os curtos em cada um dos pontos:

Figura C3 - Condições e impedância da barra de 15kV da subestação EUS.

Configurações do projeto

Geral

Subestação: EUS Alimentador: 0117 Corrente máxima (A): 400 Data do Estudo: 31/08/2018

Dados de curto-circuito

Potência de base: 100 (MVA) Tensão de base: 13,8 (kV) Resistência de terra: 100 (ohms)

Impedância de sequência positiva

Módulo = 0,5119 (pu) Ângulo = 85,6 (graus)

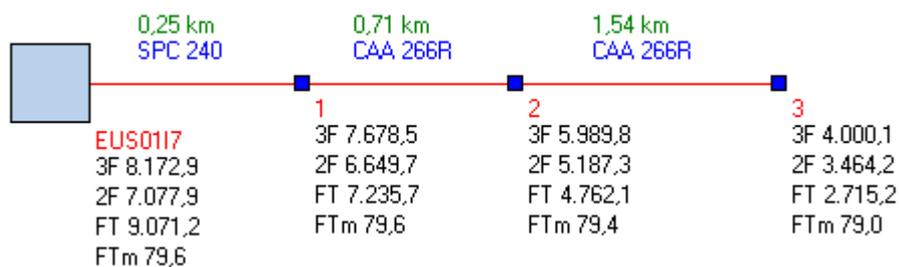
Impedância de sequência zero

Módulo = 0,3606 (pu) Ângulo = 90 (graus)

OK Cancelar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C4 - Valores de curto-circuito nos trechos.



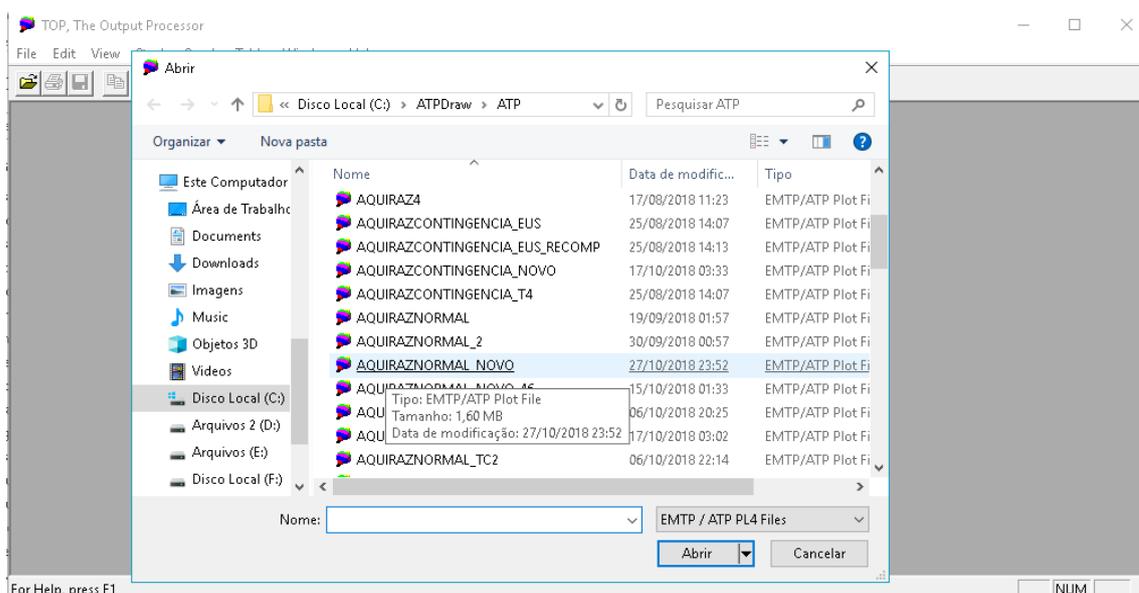
Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D – GERAÇÃO DE ARQUIVOS COMTRADE COM SIMULAÇÕES DO ATP E TESTES DE BANCADA A PARTIR DOS ARQUIVOS GERADOS

A geração dos arquivos no formato COMTRADE é feita a partir de ferramenta de pós-processamento do ATP, como explicado anteriormente. Assim, foi escolhido utilizar a ferramenta TOP (The Output Processor) por sua simplicidade e seu uso ser gratuito.

Inicialmente é necessário carregar o arquivo ATP, como mostrado na Figura D1.

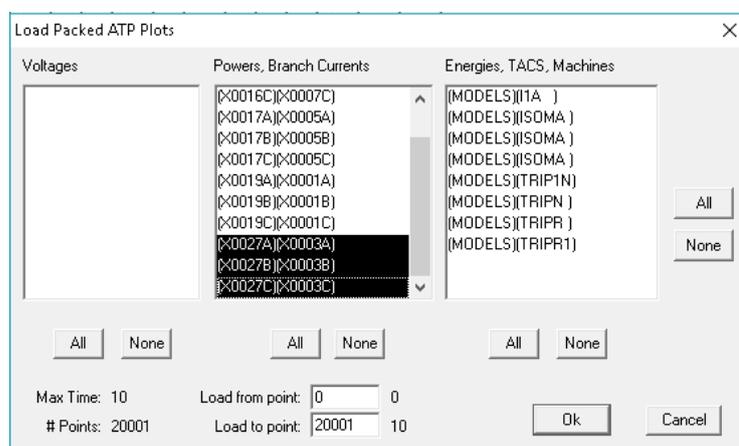
Figura D1 - Tela de carregamento do arquivo ATP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve ser observado que cada vez que se compila um circuito no ATP é gerado o arquivo .PL4 com o nome do arquivo ATP criado. Após inserido devem ser escolhidas as variáveis a ser inseridas no circuito.

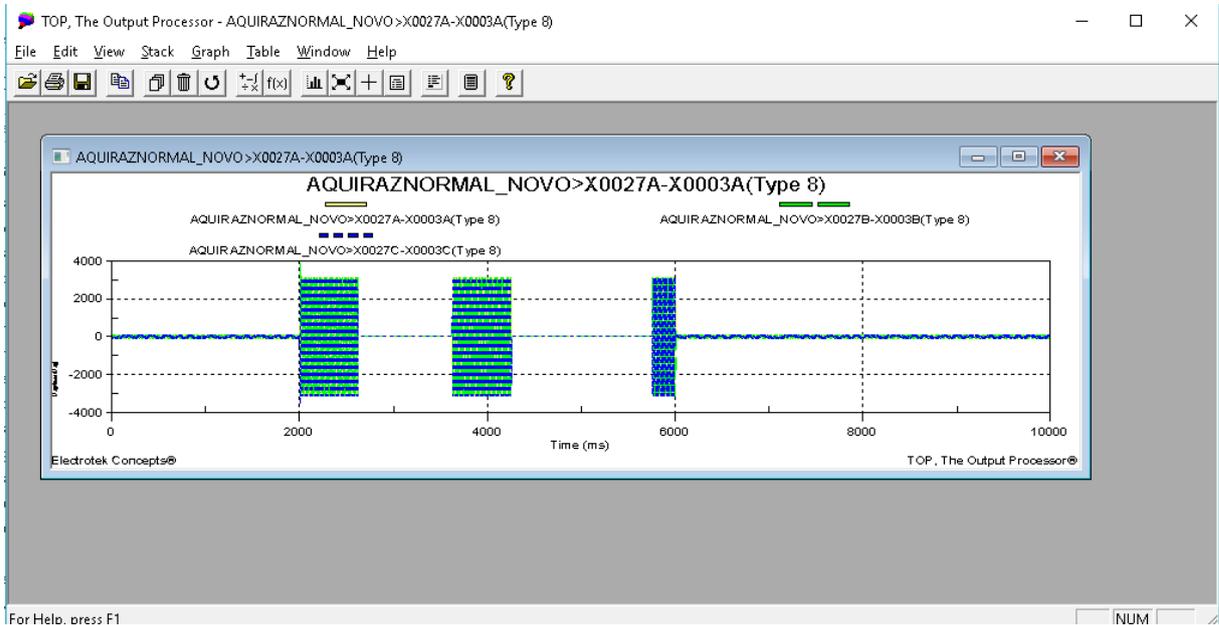
Figura D2 - Tela de escolha das variáveis no TOP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Escolhidas as variáveis, deve ser feito um plot com essas variáveis, indo na aba Graph-> New Graph.

Figura D3 - Criação de um novo gráfico no TOP

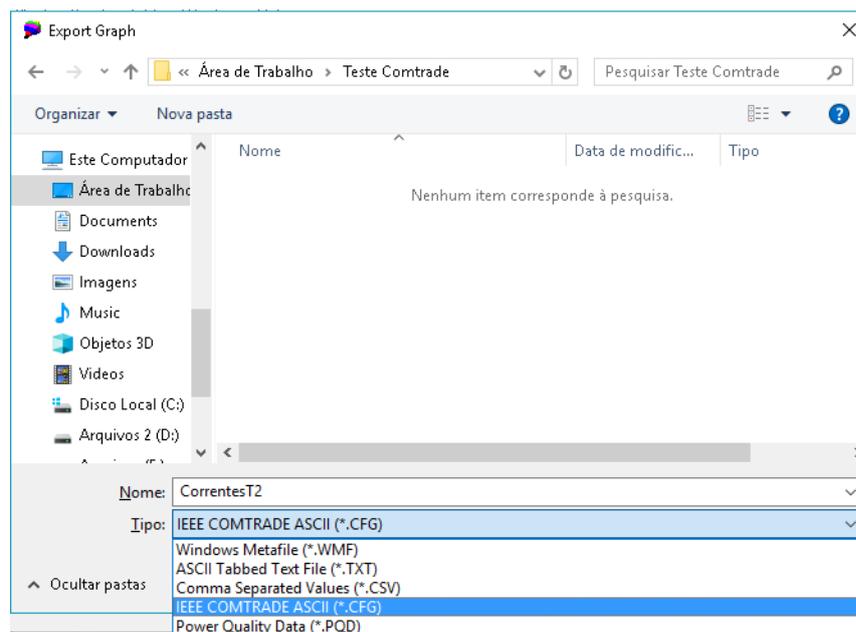


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que é uma ferramenta que permite a simulação do circuito, assim como a ferramenta que foi utilizada anteriormente, o PlotXY.

Em seguida, na aba File -> Export e escolhe o formato IEEE Comtrade:

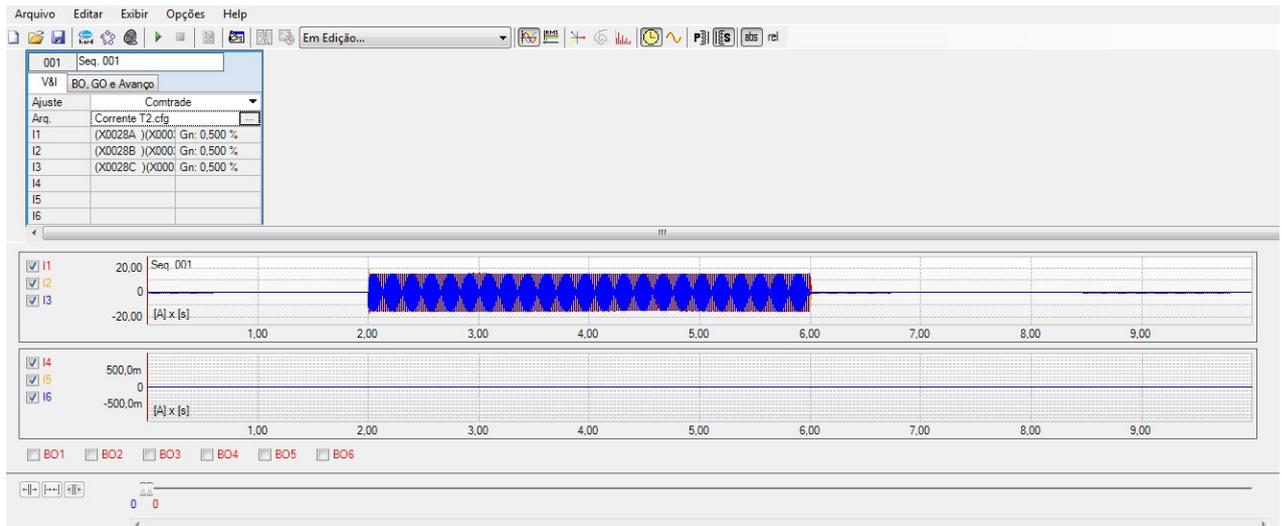
Figura D4 - Exportação para o formato de arquivo COMTRADE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após exportado, são criados 3 arquivos, como dito anteriormente, que fazem parte do formato COMTRADE. Eles devem estar na mesma pasta para a sua utilização no software Transient. No software, carrega-se o arquivo COMTRADE como foi apresentado na Figura 0.3 e abre a tela de testes, apresentada na Figura D5. Após isso, clicar no botão de Run e as correntes serão geradas nas saídas escolhidas e o teste se inicia.

Figura D5 - Tela de testes no software Transient



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE E - CÓDIGOS DOS BLOCOS UTILIZADOS

Bloco de Aquisição de Sinais

```

MODEL RMS
  DATA  freq          -- frequência
         xrms_ini {dflt:-1} -- Valor rms inicial (default = 1)
         scale {dflt:1} -- multiplica saída por esse número
  SampleFreq {dflt:400}
  Algorithm  {dflt:0}
  INPUT  x[1..3]      -- sinal monitorado
  VAR    xrms[1..4]   -- valor rms do sinal
         x2[1..4]    -- interno, x*x
         ix2[1..4]   -- interno, integral of x2
         period      -- 1/freq
         n
         isoma
  SEQre[1..3],SEQim[1..3],re[1..3],
  im[1..3],OMEGA,NSAMPL,alpha,D,i,delta_T[0..7],Mod_Seq[1..3] -- variáveis de
  controle do código
  x1,x3,x5,x7,xre,xim
  OUTPUT xrms[1..4] -- saída do código, valor rms das fases e do neutro
  (vetor de 4 posições com esses valores)
  Mod_Seq[1..3] -- Módulo das componentes de sequência
  TIMESTEP min:recip(SampleFreq)
  DELAY CELLS(x2[1..4]): 1/timestep +1 --atraso de tempo dos valores de uma
  iteração anterior
  DELAY CELLS(ix2[1..4]): 1/freq/timestep +1
  HISTORY X[1..3] {DFLT:0} -- grava os valores de X a cada iteração
  INIT
    period      := recip(freq)
    histdef(ix2[1..4]) := 0 -- define os valores iguais a zero
    integral(x2[1..4]) := 0
    isoma:=0
    IF xrms_ini <0 THEN xrms[1..4]:=0 ELSE xrms[1..4]:=xrms_ini ENDIF --
  define os valores iniciais da componente RMS
  FOR i:= 0 TO 7 DO -- iteração para amostragem dos fasores
    delta_T[i] := i/(FREQ*8) --define o intervalo de tempo da amostragem
  ENDFOR
  alpha:=1/sqrt(2)
  OMEGA:=2*PI*FREQ
  NSAMPL:=recip(FREQ*timestep)
  if abs(NSAMPL-trunc(NSAMPL))>1e-9 then
    write('%%WARNING in ABC2SEQ: SAMPLEFREQ/FREQ is not an integer number')
  endif
  re[1..3] :=0
  im[1..3] :=0
  ENDINIT
  EXEC
  isoma:=x[1]+x[2]+x[3] --soma das correntes para admissão da corrente de
  neutro
  FOR n:=1 TO 3 DO
    x2[n] := x[n]*x[n] --valor ao quadrado
    ix2[n] := integral(x2[n]) --integral do valor ao quadrado
    IF t>period THEN
      xrms[n] := sqrt((ix2[n] - delay(ix2[n], period))*freq)*scale --
  cálculo do valor RMS
    ENDIF
  ENDFOR
  x2[4]:=isoma*isoma -- cálculo do valor RMS da corrente do neutro
  ix2[4]:=integral(x2[4])
  if t>period then

```

```

xrms[4]:= sqrt((ix2[4] - delay(ix2[4], period))*freq)*scale
endif
for i:=1 to 3 do
  if Algorithm =0  --Definição do algoritmo da Transformada de Fourier
  utilizado
  then
    x1 := delay(x[i],delta_T[0],1) - delay(x[i],delta_T[4],1)
    x3 := delay(x[i],delta_T[2],1) - delay(x[i],delta_T[6],1)
    x5 := delay(x[i],delta_T[1],1) - delay(x[i],delta_T[5],1)
    x7 := delay(x[i],delta_T[3],1) - delay(x[i],delta_T[7],1)
    xre := x1 + (x5 - x7)*alpha
    xim := x3 + (x5 + x7)*alpha
    re[i] := (xre*cos(OMEGA*T)+xim*sin(OMEGA*T))/4*Scale  --janela
    flutuante para amostragem dos valores de fasores..
    im[i] := (xim*cos(OMEGA*T)-xre*sin(OMEGA*T))/4*Scale
  else  --DFT janela recursiva, variáveis de amostragem dos sinais,
  retorna valor real e imaginário
    x7:=delay(X[i],1/FREQ,2)
    D:=2/NSAMPL*(X[i]-x7)*cos(OMEGA*T)
    re[i]:=re[i]+D*Scale
    D:=2/NSAMPL*(X[i]-x7)*sin(OMEGA*T)
    im[i]:=im[i]-D*Scale
  endif
endifor  -- Cálculo dos valores das componentes de sequência e do módulo
das respectivas componentes.
SEQre[1]:=1/3*(re[1]+re[2]+re[3])  --0 zero
SEQim[1]:=1/3*(im[1]+im[2]+im[3])
SEQre[2]:=1/3*(re[1]-0.5*re[2]-0.5*re[3]-sqrt(3)/2*(im[2]-im[3]))  --1
pos
SEQim[2]:=1/3*(im[1]-0.5*im[2]-0.5*im[3]+sqrt(3)/2*(re[2]-re[3]))
SEQre[3]:=1/3*(re[1]-0.5*re[2]-0.5*re[3]+sqrt(3)/2*(im[2]-im[3]))  --2
neg
SEQim[3]:=1/3*(im[1]-0.5*im[2]-0.5*im[3]-sqrt(3)/2*(re[2]-re[3]))
Mod_seq[1]:=sqrt(Seqre[1]*Seqre[1]+Seqim[1]*Seqim[1])/sqrt(2)
Mod_seq[2]:=sqrt(Seqre[2]*Seqre[2]+Seqim[2]*Seqim[2])/sqrt(2)
Mod_seq[3]:=sqrt(Seqre[3]*Seqre[3]+Seqim[3]*Seqim[3])/sqrt(2)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Bloco das funções de proteção e de geração dos coordenogramas

```

MODEL Rele51
data Tape51 -- tape da função temporizada de fase
Tape50 -- tape da função instantânea de fase
dial -- dial de tempo de fase
curva -- curva temporizada de fase
td50 -- tempo de atuação da função 50
Tr -- variável de controle (Tr = 1)
tinit -- tempo de inicialização (controle)RTC -- Relação de transformação
do TC
func79 -- Habilita função de religamento (0 - Desabilitado, 1 - Habilitado)
disp79 -- Número de disparos da função 79
td --
topen1 -- tempo morto do primeiro religamento
topen2
topen3
Tape50N -- tape da função instantânea de neutro
td_50N --tempo de atuação da função 50N
Tape51N --tape da função temporizada de neutro
dial_51N -- dial de tempo de neutro
curva_51N -- curva de atuação da função temporizada de neutro

```

```

td_46i2 -- tempo de atuação da função 46 (I2)
Tape46i2 -- Tape da função 46 (I2)
td_46_I2I1 --tempo de atuação da função 46 (I2/I1)
Tape46_I2I1 -- Tape da função 46 (I2)
input irms[1..4] -- entrada = corrente rms (vinda do bloco de aquisição de
sinais)
iseq[1..3] -- componentes de sequência
output tripR
      Zone[1..3]
var
trip,Zone[1..3],ts[1..3],M1,M2,j,n,Ipk51,Ipk50,beta,alpha,ireal[1..3],disp
--declaração das variáveis para função 50/51 de fase e controle de
religamento
tripR,Ndisp,Block,Nreli,tm,topen[1..3],tn,signAt -- controle função de
religamento
Ipk51N,Ipk50N,beta_N,alpha_N,ireal_N,tripN,ts_N,M3,M4 -- variáveis para
função 50/51N
trip50N,trip51N,tinit1
Ipk46i2,beta_46,alpha_46,ts_46i2 -- variáveis para função 46
M5,trip46i2,flag
Ipk46_I2I1,ts_46_I2I1, M6,trip46_I2I1
Icc,t1,IccN,t1N -- variáveis de controle para geração dos coordenogramas.
init --Inicialização das variáveis
tinit1:=0.2
trip:=1
trip50N:=1
trip51N:=1
tripR:=1
tripN:=0
Zone[1..3]:=0
ts[1..3]:=0
disp:=0
Ndisp:=0
Block:=1
tm:=0
Nreli:=0
tn:=0
tm:=0
signAt:=0
ts_N:=0
ts_46i2:=0
trip46i2:=0
trip46_I2I1:=0
ts_46_i2I1:=0
flag:=0
Icc:=0
t1:=0
IccN:=0
t1N:=0
endinit
exec
topen[1]:=topen1 --criado um vetor para receber os valores de tempo morto
topen[2]:=topen2
topen[3]:=topen3
if (curva = 1) then -- definição dos valores de beta e alpha para as curvas
de fase
beta := 0.14
alpha := 0.02
elsif (curva = 2) then
beta := 13.5
alpha := 1

```

```

else
beta := 80
alpha := 2
endif
if (curva_51N = 1) then  -- definição dos valores de beta e alpha para as
curvas de neutro
    beta_N := 0.14
    alpha_N := 0.02
elseif (curva_51N = 2) then
    beta_N := 13.5
    alpha_N := 1
else
    beta_N := 80
    alpha_N := 2
endif
for j:=1 to 3 do -- transformação da corrente lida pelo TC na corrente real
ireal[j]:=irms[j]*RTC
endfor
ireal_N:=irms[4]*RTC
Ipk51:=Tape51*RTC --definição dos valores de pickup a partir dos Tapes
escolhidos e da relação de transformação do TC
Ipk50:=Tape50*RTC
Ipk51N:=Tape51N*RTC
Ipk50N:=Tape50N*RTC
Ipk46i2:=Tape46i2*RTC
Ipk46_I2I1:=Tape46_I2I1*RTC
if (t>tinit) then --lógica da função temporizada de fase
for n:=1 to 3 do
M1:=abs(ireal[n]*recip(Ipk51)) -- múltiplos são calculados (Múltiplo para
função instantânea e para a função temporizada)
M2:=abs(ireal[n]*recip(Ipk50))
if M2>1 and flag=0 then -- M2>1 significa que deve atuar a função 50.
-- A flag é porque a função instantânea deve ser desabilitada depois da
primeira atuação (religamento)
    ts[n]:=ts[n]+timestep --variável de tempo é incrementada em 1 passo (em
segundos)
    if ts[n]>td50 then --quando ultrapassa o valor do tempo definido
        Zone[n]:=1 -- a fase que ocorreu o curto tem um trip igual a 1
        flag:=flag+1 -- incrementa a flag para desabilitar a função instantânea
após a primeira atuação
    endif
    elseif M1>1 then -- se não atuou a instantânea, testa a temporizada
        ts[n]:=ts[n]+timestep
        if ts[n]>dial*(beta*recip(M1**alpha-1))then -- o tempo for maior que
o tempo definido pela curva de tempo inverso
            Zone[n]:=1
        endif
    else
        ts[n]:=ts[n]-timestep
        if ts[n]<0 then
            ts[n]:=0
        endif
    endif
endif
endfor
endif --Repete a logica acima para a função de neutro
if (t>tinit1) then
M3:=abs(ireal_N*recip(Ipk51N))
M4:=abs(ireal_N*recip(Ipk50N))
if M4>1 and flag=0 then
ts_N:=ts_N+timestep
if ts_N>td_50N then

```

```

trip50N:=0
flag:=flag+1
endif
elsif M3>1 then
ts_N:=ts_N+timestep
if ts_N > dial_51N*(beta_N*recip(M3**alpha_N-1))then
trip51N:=0
endif
else
ts_N:=ts_N-timestep
if ts_N<0 then
ts_N:=0
endif
endif
tripN:=not and(trip51N,trip50N)
endif

if (t>tinit1) then -- lógica da função instantânea para as funções 46
(mesma lógica)
M5:=abs(iseq[3]*RTC*recip(Ipk46i2))
if M5>1 then
ts_46i2:=ts_46i2+timestep
if ts_46i2 > td_46i2 then
trip46i2:=1
endif
else
ts_46i2:=ts_46i2-timestep
if ts_46i2<0 then
ts_46i2:=0
endif
endif
endif

if (t>tinit1) then
M6:=abs(iseq[3]*recip(iseq[2])*RTC*recip(Ipk46_I2I1))
if M6>1 then
ts_46_I2I1:=ts_46_I2I1+timestep
if ts_46_I2I1 > td_46_I2I1 then
trip46_I2I1:=1
endif
else
ts_46_I2I1:=ts_46_I2I1-timestep
if ts_46_I2I1<0 then
ts_46_I2I1:=0
endif
endif
endif
--Cálculo do trip--
trip:= not OR(Zone[1],Zone[2],Zone[3],tripN,trip46i2,trip46_I2I1) --
variável interna que define o trip a partir dos demais trips de cada função
-- Lógica da função de religamento--
if func79 = 1 then -- só se a função estiver habilitada
if (trip=0) then -- ocorreu o trip?
signAt:=1 -- sinal de controle de atuação
else signAt:=0
tn:=0
endif
if signAt = 1 then -- Artifício utilizado para a compilação do ATP
if tripR=1 then
tn:=tn+timestep

```

```

    if tn>td then -- td seria algum delay inserido após o tempo do trip da
função
    tripR:=0
    Ndisp:=Ndisp+1 --incrementa o numero de disparos da função
    tn:=0
    endif
endif
else
endif
if Block = 1 then -- se não houve bloqueio ainda
if tripR = 0 then -- lógica para o tempo morto
tm:=tm+timestep
    if tm>topen[Nreli+1] then -- testa com os valores de tempo morto
definidos pelo usuário
    tripR:= 1 -- religa e reseta todos os valores de trip e tempo para
esperar uma nova atuação
    Zone[1..3]:=0
    trip50N:=1
    trip51N:=1
    trip46i2:=0
    ts_46i2:=0
    trip46_I2I1:=0
    ts_46_I2I1:=0
    tripN:=0
    ts_N:=0
    ts[1..3]:=0
    Nreli:=Nreli+1 -- incrementa o numero de religamentos
    tm:=0
    endif
endif
if Ndisp=disp79 then -- se o numero de disparos ultrapassou o numero
definido pelo usuário, bloqueia o religador
    tripR:=0
    Block:=0
    flag:=0
    endif
endif
else tripR:=trip
endif
--Lógica para geração dos coordenogramas de fase--
if Icc<10000 then -- definição do eixo de corrente como uma corrente de 0 a
10kA
if Icc>Ipk50 then -- definição da função instantânea
t1:=td50 -- tempo a ser plotado é igual ao tempo definido
elseif Icc>Ipk51 then
t1:= dial*(beta*recip((Icc*recip(Ipk51))**alpha-1)) -- definição da função
temporizada
else t1:=900 -- valor arbitrário grande para que não apareça no gráfico
endif
Icc:=Icc+2 -- incremento de 2 para acelerar o código
else
t1:=td50 -- valor maior que 10000
endif
-- Repete lógica anterior para levantar os coordenogramas de neutro --
if IccN<5000 then
if IccN>Ipk50N then
t1N:=td_50N
elseif IccN>Ipk51N then
t1N:= dial_51N*(beta_N*recip((IccN*recip(Ipk51N))**alpha_N-1))
else t1N:=900
endif
endif

```

```
IccN:=IccN+2  
else  
t1N:=td_50N  
endif  
  
endexec  
endmodel
```