

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Letícia Cristina Fenalte

**PROCEDIMENTOS PARA COMISSONAMENTO DE RELÉS DE  
SOBRECORRENTE**

Santa Maria, RS  
2018

**Leticia Cristina Fenalte**

**PROCEDIMENTOS PARA COMISSONAMENTO DE RELÉS DE  
SOBRECORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Aécio de Lima Oliveira

Santa Maria, RS  
2018

**Leticia Cristina Fenalte**

**PROCEDIMENTOS PARA COMISSONAMENTO DE RELÉS DE  
SOBRECORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 14 de dezembro de 2018:**

---

**Aécio de Lima Oliveira, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Carlos Andres Lázaro Menco , Dr. (Sonnensol)**

---

**Samuel Hunsche, Eng. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2018

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde e força para realizar esta etapa de minha vida.*

*Aos meus pais, Nilda e Roger, por sempre me incentivarem a estudar e terem me dado a oportunidade de cursar uma graduação em uma universidade federal.*

*A minha namorada, Alessandra, pelo amor, companheirismo e ajuda de sempre. Por me ensinar a manter a calma em situações de dificuldades e pela vida que estamos construindo juntas.*

*Aos meus sogros e cunhada, Arceli, Elisandra e Vitória, por sempre entenderem as situações as quais eu não poderia estar presente e sempre me acolherem.*

*Ao meu orientador, Prof. Aécio, por todo o tempo dedicado ao meu trabalho e todo o conhecimento que me foi passado.*

*Aos meus colegas de graduação, especialmente à Jéssica, Michele, Vander, Talita, Gabrielle e Marcelo Back, pela parceria de sempre, pela oportunidade de fazer bons amigos e por terem me proporcionado ótimos momentos nessa jornada. Sempre me lembrarei de vocês com carinho.*

*Aos meus colegas do Programa de Educação Tutorial (PET) – Engenharia Elétrica, por terem me dado a oportunidade de aprender a trabalhar em grupo e crescer pessoal e profissionalmente.*

*Aos meus amigos do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), Samuel, Carlos, Prof. Matias e ao Prof. Adriano, por toda a ajuda disponibilizada nessa jornada.*

*A todos aqueles que, de uma maneira ou outra, contribuíram para a realização desta etapa. Pois, só o esforço individual não garante o sucesso, as grandes conquistas são resultado do trabalho de grandes equipes. Ninguém na história alcançou algo significativo por si mesmo.*

*"O que não dá prazer não dá proveito. Em  
resumo, senhor, estude apenas o que lhe  
agradar."*

*(William Shakespeare)*

## RESUMO

### PROCEDIMENTOS PARA COMISSIONAMENTO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE

AUTORA: Letícia Cristina Fenalte  
ORIENTADOR: Aécio de Lima Oliveira

Durante a operação do sistema elétrico de potência (SEP), frequentemente, surgem falhas na proteção que podem resultar em desligamentos no fornecimento de energia elétrica, causando uma redução na qualidade do serviço. Não é comum, mas acontece porque a proteção do SEP não foi dimensionada corretamente e, geralmente, são erros oriundos de ajustes de relés que não foram corretamente comissionados. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para o dimensionamento do sistema de proteção de sobrecorrente em um SEP e para o comissionamento de relés digitais a partir dos dados obtidos de simulação de faltas. Assim, foi elaborado um roteiro para validação e comparação dos resultados obtidos por meio da análise dos tempos de resposta do sistema de proteção no *software DIGSILENT Power Factory* e de relés digitais comerciais utilizando um testador universal de relés. Os resultados obtidos em um sistema radial mostram que os erros dos tempos de operação do relé são menores que 5% para a maioria das faltas analisadas.

**Palavras-chave:** Proteção de Sistemas Elétricos. Relé de Sobrecorrente. Comissionamento de Relés. Coordenação. Simulação de Faltas.

## ABSTRACT

### PROCEDURES FOR COMMISSIONING OVERCURRENT RELAYS

AUTHOR: Letícia Cristina Fenalte

ADVISOR: Aécio de Lima Oliveira

During the operation of the electrical power system (SEP), there are often protection failures that can result in shutdowns in the power supply, causing a reduction in quality of service. This is not common, but it happens because the protection of the SEP has not been correctly scaled and are usually errors resulting from relay settings that were not correctly commissioned. In this sense, the objective of this work is to present a methodology for the design of the overcurrent protection system in a SEP and for the commissioning of digital relays from the data obtained from fault simulation. Thus, a guide was developed for validation and comparison of the results obtained through the analysis of the response times of the protection system in the software DIgSILENT Power Factory and commercial digital relays using a universal relay tester. The results obtained in a radial system show that the errors of the relay operation times are smaller than 5% for most faults analyzed..

**Keywords:** Power Systems Protection. Overcurrent Relay. Relay Commissioning. Coordination. Fault Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Procedimentos gerais para simulação de relés de proteção .....	19
Figura 1.2 – Causas de falhas nos testes de relés digitais .....	20
Figura 1.3 – Diagrama de proteção rápida em barramento .....	21
Figura 2.1 – Sistema radial típico .....	24
Figura 2.2 – Esquema de proteção de sobrecorrente .....	25
Figura 2.3 – Curvas características de tempo inverso .....	28
Figura 2.4 – Diagrama trifilar e ligações elétricas dos TCs e relés .....	29
Figura 2.5 – Circulação da corrente e conexões para uma falta monofásica na fase C ....	30
Figura 2.6 – Circulação da corrente e conexões para uma falta bifásica nas fases B e C ..	30
Figura 2.7 – Circulação da corrente e conexões para uma falta trifásica .....	31
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia proposta .....	32
Figura 3.2 – Mala de testes CE 6006 .....	34
Figura 3.3 – Relé Pextron URP 6000-5 .....	35
Figura 3.4 – Fluxograma da Análise Teórica .....	35
Figura 3.5 – Fluxograma da Simulação .....	36
Figura 3.6 – Simulação Instantânea de curto-circuito .....	37
Figura 3.7 – Simulação RMS de curto-circuito .....	37
Figura 3.8 – Fluxograma da Implementação Prática .....	38
Figura 3.9 – Conexões para injeção de correntes .....	39
Figura 3.10 – Área de trabalho .....	40
Figura 4.1 – Sistema-teste .....	41
Figura 4.2 – Curvas não-coordenadas dos relés 51-1 e 51-2 .....	47
Figura 4.3 – Curvas não-coordenadas dos relés 51-1 e 51-2 - Tempo de Operação .....	48
Figura 4.4 – Curvas coordenadas dos relés 51-1 e 51-2 .....	49
Figura 4.5 – Curvas coordenadas dos relés 51-1 e 51-2 - Tempo de Operação .....	50
Figura 4.6 – Conexões lógicas do relé Siemens 7SJ600 .....	51
Figura 4.7 – Falta monofásica 3 e lógica <i>Starting</i> não sensibilizada .....	52
Figura 4.8 – Relé 3 - função Measure .....	52
Figura 4.9 – Acessar modelo do relé .....	53
Figura 4.10 – Ativar bloco RMS Calculation .....	53
Figura 4.11 – Falta monofásica 3 e lógica <i>Starting</i> operando .....	54
Figura 4.12 – Simulação da falta 3 e coordenação incorreta dos relés de proteção .....	54
Figura 4.13 – Análise de Imáx do relé 50-4 .....	55
Figura 4.14 – Simulação da falta 3 e coordenação correta do relés de proteção .....	55
Figura 4.15 – Alteração de dados do COMTRADE .....	56
Figura 4.16 – Curva característica de sobrecorrente dos relés 51 de fase .....	58
Figura 4.17 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-1 para faltas trifásicas ....	60
Figura 4.18 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-2 para faltas trifásicas ....	60
Figura 4.19 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-3 para faltas trifásicas ....	61
Figura 4.20 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-4 para faltas trifásicas ....	61
Figura 4.21 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-5 para faltas trifásicas ....	62
Figura 4.22 – Curva característica de sobrecorrente dos relés 51 de neutro .....	62
Figura 4.23 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51N-1 para faltas monofásicas	63
Figura 4.24 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51N-3 para faltas monofásicas	63
Figura 4.25 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51N-5 para faltas monofásicas	64

Figura 4.26 – Curva característica de sobrecorrente dos relés 50 .....	64
Figura 4.27 – Curva característica de sobrecorrente do relé 50-2 para faltas trifásicas ....	65
Figura 4.28 – Curva característica de sobrecorrente do relé 50-4 para faltas trifásicas ....	65
Figura 4.29 – Injeção de 11 A de corrente no relé 51-1 .....	67
Figura 4.30 – Injeção de 21 A de corrente no relé 51-2 .....	68
Figura 4.31 – Deslocamento da curva de sobrecorrente .....	73
Figura 4.32 – Simulação da falta 1 no <i>Power Factory</i> .....	73
Figura 4.33 – Forma de onda da falta 1 no <i>software</i> da mala de testes .....	74
Figura 4.34 – Análise do tempo de pré-falta .....	74
Figura 4.35 – Erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas trifásicas	77
Figura 4.36 – Simulação da falta trifásica 5 e sinalização dos picos de corrente .....	78
Figura 4.37 – Erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas monofásicas .....	79
Figura 4.38 – Simulação da falta monofásica 5 e sinalização do pico de corrente .....	80
Figura B.1 – Procedimentos gerais para simulação da proteção de sobrecorrente no <i>Power Factory</i> .....	91
Figura B.2 – Sistema-teste construído no <i>Power Factory</i> .....	92
Figura B.3 – Biblioteca e Transformador não sujeito a alterações .....	92
Figura B.4 – Transformador copiado para a biblioteca do usuário e sujeito a alterações ..	93
Figura B.5 – Criando um novo projeto .....	93
Figura B.6 – <i>Grid</i> , ferramentas de simulação, janela de comando e janela de componentes	94
Figura B.7 – Barras do sistema .....	94
Figura B.8 – Parametrização Transformador 2 .....	95
Figura B.9 – Parametrização do Transformador 2 .....	95
Figura B.10 – Inserindo a LT .....	96
Figura B.11 – Parametrização da LT de 13,8 kV .....	96
Figura B.12 – Parametrização da LT 13,8 kV .....	96
Figura B.13 – Resumo da parametrização da LT de 13,8 kV .....	97
Figura B.14 – Parametrização do sistema S .....	97
Figura B.15 – Parametrização do sistema S .....	97
Figura B.16 – Parametrização do Motor .....	98
Figura B.17 – Inserir TCs e Relés .....	98
Figura B.18 – Parametrização TC1 .....	99
Figura B.19 – Parametrização TC1 .....	99
Figura B.20 – Modelo do Relé .....	100
Figura B.21 – Bloco do relé - Selecionar "Ip" .....	100
Figura B.22 – Parametrização do relé 51-1 .....	101
Figura B.23 – Parametrização do relé 51N-1 .....	101
Figura B.24 – Parametrização do relé 50-2 .....	102
Figura B.25 – Criando a curva do relé de proteção principal .....	102
Figura B.26 – Criando a curva do relé de proteção retaguarda .....	103
Figura B.27 – Curvas dos relés 51-1 e 51-2 .....	103
Figura B.28 – Curto-circuito no modo estático .....	104
Figura B.29 – Determinar padrão e tipo do curto-circuito .....	104
Figura B.30 – Tempos de operação dos relés 51-1 e 51-2 .....	105
Figura B.31 – "Insert New Graphic" .....	105
Figura B.32 – "Virtual Instrument Panel" .....	106
Figura B.33 – "Append New" .....	106

Figura B.34 – Gráficos criados .....	106
Figura B.35 – Acessar o componente do sistema .....	107
Figura B.36 – Selecionar as opções "Define" e "Variable Set (Sim)" .....	107
Figura B.37 – Selecionar as variáveis de estudo .....	108
Figura B.38 – Adição das variáveis de estudo aos gráficos .....	109
Figura B.39 – Mostrar a Subestação .....	110
Figura B.40 – Subestação da Barra 1 .....	110
Figura B.41 – Definir o CC .....	110
Figura B.42 – Definir o tipo de CC .....	111
Figura B.43 – Calculate Initial Conditions .....	111
Figura B.44 – Selecionar Simulação Instantânea .....	111
Figura B.45 – Tempo de pré-falta .....	112
Figura B.46 – "Start Simulation" .....	112
Figura B.47 – Tempo de simulação do CC .....	112
Figura B.48 – CC no secundário do TC1 .....	113
Figura B.49 – CC isolado após a atuação do Relé 51-1 .....	113
Figura B.50 – <i>Trip</i> do Relé 51-1 .....	113
Figura B.51 – Selecionar opção Logic Phase/Earth .....	114
Figura B.52 – Selecionar opção "Out of Service" .....	114
Figura B.53 – Simulação da falta trifásica 1 e atuações da proteção principal e retaguarda .....	115
Figura B.54 – Relés fora de serviço .....	115
Figura B.55 – Selecionar opção "Export" .....	116
Figura B.56 – Exportar o COMTRADE .....	117
Figura B.57 – CC isolado pela atuação do relé 51- 1 e <i>trip</i> do relé 51-1 .....	118
Figura C.1 – Procedimentos gerais para realização dos ensaios práticos .....	119
Figura C.2 – Selecionar a opção "Master" .....	120
Figura C.3 – Área de trabalho .....	121
Figura C.4 – Selecionar a opção "Config Hrd" .....	121
Figura C.5 – Conexão de três canais independentes .....	122
Figura C.6 – Conexão de seis canais independentes .....	122
Figura C.7 – Ligação dos bornes de corrente com os terminais do relé .....	123
Figura C.8 – Selecionar a opção "Direc Canais" .....	123
Figura C.9 – Direcionamento dos canais .....	124
Figura C.10 – Entradas binárias .....	124
Figura C.11 – Selecionar "NO01" .....	125
Figura C.12 – Selecionar "Comtrade" .....	125
Figura C.13 – Carregar COMTRADE do relé 1 no Nó 1 .....	125
Figura C.14 – Selecionar as variáveis de corrente .....	126
Figura C.15 – Selecionar o ganho .....	126
Figura C.16 – COMTRADE importado .....	127
Figura C.17 – Visualização das correntes carregadas .....	127
Figura C.18 – Selecionar "N de repetições" e Iniciar o ensaio .....	128
Figura C.19 – Aviso de sobrecarga .....	128
Figura C.20 – LEDs dos canais de tensão e corrente .....	128
Figura C.21 – Finalizando o ensaio .....	129
Figura C.22 – Ensaio finalizado .....	129
Figura C.23 – Selecionar "Apresentar relatório" .....	130
Figura C.24 – Exportar relatório .....	130

Figura C.25 – COMTRADE carregado no NO01 .....	131
Figura C.26 – COMTRADE carregado no NO02 .....	131
Figura C.27 – Forma de onda das correntes no Nó 1 – falta 1 .....	132
Figura C.28 – Forma de onda das correntes no Nó 2 - falta 1 .....	132
Figura C.29 – Tempos de respostas nas entradas binárias .....	132
Figura C.30 – Selecionar a opção "Sobrecorr" .....	133
Figura C.31 – Configurações gerais .....	134
Figura C.32 – Ajustes de sobrecorrente .....	134
Figura C.33 – Conexão para 40 A por fase .....	135
Figura C.34 – Direcionamento de Canais para 40 A .....	136
Figura C.35 – Configurações dos testes .....	136
Figura C.36 – Interface dos testes de tempo .....	137
Figura C.37 – Ajuste da sequência de corrente .....	137
Figura C.38 – Tipo de falta .....	138
Figura C.39 – Iniciar o teste de tempo .....	138
Figura C.40 – Teste finalizado .....	139
Figura C.41 – Gráfico de Teste Sobrecorrente - Falta A-B-C .....	141
Figura C.42 – Correntes injetadas no teste .....	141
Figura C.43 – Selecionar a opção "Manual" .....	142
Figura C.44 – Configurações dos Testes Manuais .....	143
Figura C.45 – Resultado do ensaio manual de 21A com o relé 51-2 .....	143
Figura C.46 – Carregando o arquivo default .....	144
Figura C.47 – Selecionar "URP600x 72a250 default" .....	145
Figura C.48 – Habilitar função 51 .....	146
Figura C.49 – Saída do relé .....	147
Figura C.50 – Tela "geral" .....	148
Figura C.51 – Parametrização do relé 51-1 .....	149
Figura C.52 – Verificar comunicação com o PC e carregar a programação no relé .....	150

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características de tempo inverso.....	29
Tabela 4.1 – Valores das correntes de curto-circuito e erros relativos percentuais das comparações.....	42
Tabela 4.2 – Ajustes dos relés do sistema-teste na etapa teórica.....	43
Tabela 4.3 – Tempos de operação para faltas trifásicas.....	43
Tabela 4.4 – Tempos de operação para faltas monofásicas.....	44
Tabela 4.5 – Ajustes dos relés do sistema-teste na etapa de simulação.....	45
Tabela 4.6 – Tempo de operação para faltas trifásicas.....	45
Tabela 4.7 – Tempos de operação para faltas monofásicas.....	46
Tabela 4.8 – Tabela de tempos do ensaio automático com o relé 51-1.....	59
Tabela 4.9 – Tempos do ensaio manual com relé 51-1.....	66
Tabela 4.10 – Tempos do ensaio manual com relé 51-2.....	67
Tabela 4.11 – Ajustes Pextron para falta trifásica 1.....	69
Tabela 4.12 – Ajustes Pextron para falta trifásica 2.....	69
Tabela 4.13 – Ajustes Pextron para falta trifásica 3.....	69
Tabela 4.14 – Ajustes Pextron para falta trifásica 4.....	70
Tabela 4.15 – Ajustes Pextron para falta trifásica 5.....	70
Tabela 4.16 – Ajustes Pextron para falta monofásica 1.....	70
Tabela 4.17 – Ajustes Pextron para falta monofásica 3.....	71
Tabela 4.18 – Ajustes Pextron para falta monofásica 5.....	71
Tabela 4.19 – Tempo de operação para faltas trifásicas.....	71
Tabela 4.20 – Tempo de operação para faltas monofásicas.....	72
Tabela 4.21 – Limites de ajuste dos relés Pextron.....	75
Tabela 4.22 – Tempos de operação da proteção para faltas trifásicas.....	76
Tabela 4.23 – Tabela de erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas trifásicas.....	76
Tabela 4.24 – Erros relativos percentuais obtidos nos relés 50.....	77
Tabela 4.25 – Erros relativos percentuais no relé 51-5 para faltas trifásicas.....	77
Tabela 4.26 – Tempos de operação da proteção para faltas monofásicas.....	78
Tabela 4.27 – Tabela de erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas monofásicas.....	79
Tabela 4.28 – Erros percentuais obtidos no relé 51-1 para faltas monofásicas.....	80
Tabela 4.29 – Erros relativos percentuais obtidos nos relés 51N.....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro A.1 – Parâmetros utilizados para coordenação 51-1 com 51N-1 .....	88
Quadro A.2 – Parâmetros utilizados para coordenação 51-1 com 51-2 .....	89
Quadro C.1 – Canais de corrente .....	131
Quadro C.2 – Valores dos tempos de respostas recebidos pelas entradas binárias .....	132
Quadro C.3 – Canais de corrente .....	139
Quadro C.4 – Habilitação da Entrada binária da mala de testes .....	140
Quadro C.5 – Tolerâncias .....	140
Quadro C.6 – Ajustes do relé 51-1 .....	140
Quadro C.7 – Parâmetros utilizados no ajuste do relé 51-1 .....	148

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANSI</i>	American National Standards Institute
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission
<i>VDE</i>	Verband Deutscher Elektrotechniker
<i>SEP</i>	Sistemas Elétricos de Potência
<i>TC</i>	Transformador de Corrente
<i>TP</i>	Transformador de Potencial
<i>RTC</i>	Relação de Transformação
<i>IHM</i>	Interface Homem-Máquina
<i>IEEE</i>	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
<i>AC</i>	Corrente Alternada
<i>DT</i>	Dial de Tempo
<i>PC</i>	Personal Computer
<i>USB</i>	Universal Serial Bus
<i>LT</i>	Linha de Transmissão
<i>RMS</i>	Root Mean Square
<i>CC</i>	Curto-Circuito

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $Y$  Conexão Estrela.
- $Y - g$  Conexão Estrela Aterrado.
- $\Delta$  Conexão Delta (Triângulo).
- $\Delta - Y$  Conexão Delta-Estrela.
- $\Delta - Y - g$  Conexão Delta-Estrela Aterrado.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	OBJETIVO GERAL .....	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	23
<b>2</b>	<b>PROCEDIMENTOS PARA ESTUDO DE AJUSTE E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE</b> .....	<b>24</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	24
2.2	PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ...	24
2.3	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE .....	25
<b>2.3.1</b>	<b>Dimensionamento dos TCs</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Ajuste da corrente de atuação para função 51 temporizada de fase</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Ajuste da corrente de atuação para função 51 temporizada de neutro</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Ajuste da corrente de atuação para a função 50 instantânea de fase</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Escolha das curvas dos relés temporizados</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Diagramas de ligações elétricas entre os TCs e os relés</b> .....	<b>29</b>
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA</b> .....	<b>32</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	32
<b>3.1.1</b>	<b>Roteiro geral da metodologia proposta</b> .....	<b>32</b>
3.2	<i>SOFTWARE</i> E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	33
<b>3.2.1</b>	<b><i>DigSILENT Power Factory</i></b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Testador Universal Hexafásico e Analisador de Energia Microprocessado com protocolo IEC 61850 (mala de testes de relés hexafásica) – CE 6006</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Relé Pextron URP 6000-5</b> .....	<b>34</b>
3.3	ETAPA 1: ANÁLISE TEÓRICA .....	35
3.4	ETAPA 2: NÍVEL DE SIMULAÇÃO .....	36
3.5	ETAPA 3: IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA .....	38
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>41</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	41
4.2	CÁLCULOS E SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITOS .....	41
4.3	ETAPA1 - ESTUDO TEÓRICO DA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE .....	42
4.4	ETAPA 2 - SIMULAÇÃO NO <i>SOFTWARE POWER FACTORY</i> .....	44
<b>4.4.1</b>	<b>Simulações Estáticas</b> .....	<b>46</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Simulações Dinâmicas</b> .....	<b>50</b>
4.4.2.1	<i>Ativação do bloco “RMS Calculation”</i> .....	51
4.4.2.2	<i>Atuação indevida do relé 50-4</i> .....	54
4.4.2.3	<i>Documentos COMTRADE</i> .....	55
4.5	ETAPA 3 - ENSAIOS PRÁTICOS .....	57
<b>4.5.1</b>	<b>Ensaio de Sobrecorrente Automáticos e Manuais</b> .....	<b>57</b>
4.5.1.1	<i>Ensaio de Sobrecorrente Automáticos</i> .....	57
4.5.1.2	<i>Ensaio de Sobrecorrente Manuais</i> .....	66

<b>4.5.2</b>	<b>Ensaio de sobrecorrente utilizando arquivos COMTRADE .....</b>	<b>68</b>
4.5.2.1	<i>Ajustes e tempos de operação dos relés Pextron .....</i>	68
4.5.2.2	<i>Configuração da Mala de testes .....</i>	72
4.5.2.3	<i>Parametrização dos relés Pextron .....</i>	74
4.6	COMPARAÇÕES DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO PARA FALTAS TRIFÁSICAS	75
4.7	COMPARAÇÕES DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO PARA FALTAS MONOFÁSICAS .....	78
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	81
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>82</b>
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	82
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE A – ROTEIRO PARA CÁLCULOS DE AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS DO SISTEMA-TESTE.....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE B – ROTEIRO DE SIMULAÇÃO NO SOFTWARE POWER FACTORY.....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE C – ROTEIRO DE COMISSONAMENTO DE RELÉS DIGITAIS DE SOBRECORRENTE.....</b>	<b>119</b>
	<b>ANEXO A – DADOS NOMINAIS DO SISTEMA-TESTE .....</b>	<b>151</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um recurso essencial na vida das pessoas, sendo transportada através de sistemas de geração, transmissão e distribuição. Para que se tenha uma qualidade de entrega da energia elétrica aos consumidores, de maneira eficiente e com a menor quantidade de falhas possíveis, é necessário que o planejamento, a operação e proteção do sistema elétrico de potência (SEP) sejam previamente simulados e ensaiados com o objetivo de analisar o comportamento dos equipamentos em condições normais e no caso de perturbações como curto-circuito, por exemplo (GARCIA, 2003).

Em vista disso, a proteção de sistemas elétricos deve garantir confiabilidade, disponibilidade, qualidade de energia e segurança (MAMEDE, 2011). O significado desses fatores na proteção de sistemas elétricos são esclarecidos abaixo:

- confiabilidade é a probabilidade de equipamentos ou sistemas realizarem suas funções requeridas por um dado período de tempo sem falhar;
- disponibilidade é a probabilidade de um sistema não estar com falha ou em reparo quando for requisitado para uso;
- qualidade de energia é a condição de compatibilidade entre sistema supridor e carga atendendo critérios de conformidade legislativa;
- segurança é a habilidade do sistema de responder a distúrbios que possam ocorrer. Em geral, os sistemas elétricos são planejados para continuar operando após ser submetido a uma contingência;

Usualmente, são empregados *softwares* de simulação de transitórios eletromagnéticos (EMTP, do inglês Electromagnetic Transients Program) na análise de fluxo de carga e proteção de SEP. Neste trabalho, faz-se o uso do *software PowerFactory DigSILENT* para o estudo da proteção de sobrecorrente no SEP, utilizando as funções de simulação de faltas e obtenção dos tempos de resposta dos relés.

Além disso, a realização de ensaios práticos com relés comerciais para testar eventos reais do sistema é de indispensável importância no planejamento da proteção de sistemas elétricos. Nesse sentido, é possível exportar arquivos de dados de simulação no formato padrão COMTRADE (TURNER, 2012).

Os arquivos em COMTRADE devem conter os dados de correntes de curto-circuito do sistema analisado no *software*. Dessa maneira, os dados podem ser utilizados em testadores de relés compatíveis com esse formato de arquivo.

Nesse contexto, a aplicação de relés digitais multifuncionais para proteger componentes do SEP é uma prática de utilidade comum (MOZINA, 2005). Esses relés podem fornecer não

apenas uma função de proteção, mas uma gama de funções, tais como: sobrecorrente, sobrecorrente direcional, diferencial, distância, etc. Por outro lado, o avanço tecnológico aumenta a complexidade da lógica de proteção, sendo necessário que o engenheiro desenvolva um roteiro para realizar o comissionamento correto da função que se pretende testar (ZIMMERMAN, 2008).

Com base nisso, o presente trabalho tem por objetivo aplicar a teoria da proteção de sobrecorrente em um sistema-teste, desenvolvendo uma rotina de testes que realiza etapas de cálculos teóricos, simulações e ensaios práticos com o uso de relés comerciais e um testador universal de relés. Os resultados para validação da teoria aplicada a prática, são oriundos das comparações dos tempos de resposta dos relés nas três etapas. Deste modo, o trabalho pretende contribuir para os estudos de coordenação e comissionamento de relés de sobrecorrente.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Com o avanço da tecnologia digital, os relés de proteção possuem inúmeras vantagens se comparados aos eletromecânicos, como maior confiabilidade, economia e o fato de um único equipamento possuir diversas funções de proteção (WELTON; KNAPEK, 2017). Contudo, tem-se uma maior complexidade no comissionamento de relés digitais. Dessa forma, é necessário que o técnico ou engenheiro de proteção crie um plano de testes que possa auxiliar na coordenação dos relés do sistema. Esse plano tem por objetivo evitar falhas na realização dos testes que podem comprometer a operação do sistema ocasionando quedas de energia em trechos não defeituosos (ZIMMERMAN, 2008).

Além disso, é interessante ressaltar a importância de realizar implementações práticas do que é estudado em sala de aula nas disciplinas da graduação. Nesse sentido, aperfeiçoando o aprendizado do aluno e tornando a disciplina de proteção de sistemas elétricos de potência mais acessível e completa, dando a oportunidade de realização de ensaios práticos com relés digitais, aplicando a teoria vista em sala de aula em situações que se aproximam da realidade.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma rotina de testes para o comissionamento de relés digitais a partir dos dados obtidos de simulação de faltas em um sistema elétrico de potência.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- elaborar um roteiro para validação e comparação dos resultados obtidos no estudo de coordenação e seletividade da proteção de sobrecorrente por meio da análise dos tempos de resposta oriundos da simulação e do comissionamento;
- reduzir os erros de ajuste da proteção de sobrecorrente;
- melhorar o processo de ensino-aprendizagem dos alunos de graduação na disciplina de proteção de sistemas elétricos de potência;
- auxiliar no treinamento de técnicos e engenheiros que atuam na área de proteção de empresas do setor elétrico;

## 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

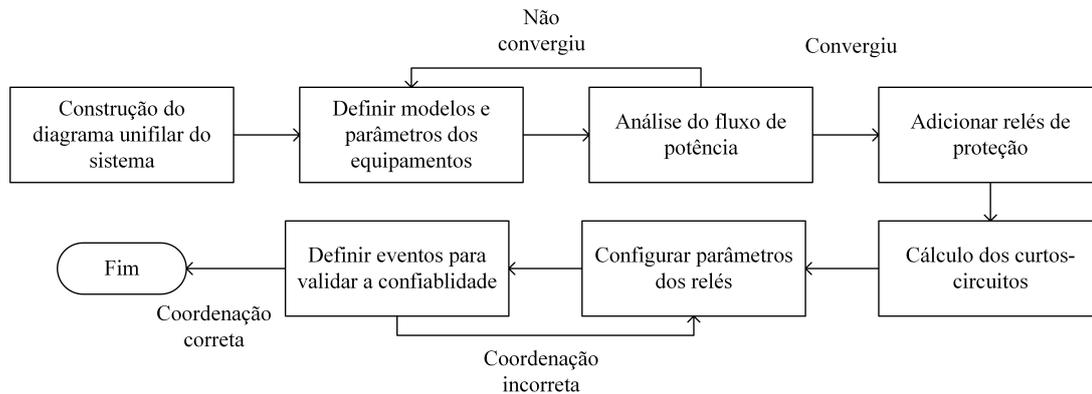
A proteção de sistemas elétricos é uma tarefa que exige o conhecimento teórico e o prático do engenheiro e técnico (ZIMMERMAN, 2008). Aliman e Musirin (2013) afirmam que não basta calcular os ajustes dos relés e posicioná-los no sistema, é necessário realizar testes de simulação e comissionamento para que a proteção esteja bem coordenada de modo a evitar o mau funcionamento e o tempo de inatividade desnecessário em outras partes do sistema.

A proteção rigorosa das usinas eólicas é um aspecto imensamente importante que deve ser contemplada cuidadosamente durante seus projetos para proporcionar uma proteção adequada aos componentes de potência em caso de ocorrência de falha (REZAEI et al., 2014).

Para empregar uma proteção de sobrecorrente próspera e adequada para usinas eólicas, os relés devem ser definidos com precisão e bem coordenados para varrer as falhas no sistema no mais curto tempo possível. Utilizando a ferramenta *Simulink* do *MATLAB*, Rezaei et al. (2014) desenvolveram uma modelagem de parque eólico e ajuste e coordenação dos relés de proteção de sobrecorrente.

Nesse sentido, Liu et al. (2017) propuseram um procedimento geral para realizar a análise da proteção de relés utilizando um *software* de simulação denominado *DIGSILENT Power Factory*, Figura 1.1.

Figura 1.1 – Procedimentos gerais para simulação de relés de proteção



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2017)

Inicialmente, realiza-se a construção do diagrama unifilar do sistema analisado. Após isso, é necessário definir os modelos e parâmetros de cada componente do sistema elétrico. Antes de adicionar os relés de proteção ao sistema, deve-se analisar o fluxo de carga. Feito isso, considerando a função do relé, os usuários podem adicionar diretamente equipamentos como Transformador de Corrente (TC) ou Transformador de Potencial (TP) nas posições correspondentes na rede e parametrizar a proteção. Nas simulações de proteção, os curtos-circuitos tem base em padrões como VDE (Verband Deutscher Elektrotechnical), IEC (International Electrotechnical Commission), ANSI (American National Standards Institute) e outros. Finalmente, a simulação dinâmica permite definir eventos em diferentes posições na rede para obter ações correspondentes dos relés em falha, que pode testar a coordenação e a confiabilidade do relé de proteção (LIU et al., 2017).

Registros durante os eventos do sistema real são de interesse, uma vez que estes fornecem a capacidade de testar a proteção para falhas ou distúrbios, tais como condições difíceis de criar usando testes manuais (TURNER, 2012). É possível extrair os dados do *software* de simulação e convertê-lo para um formato comum apropriado de padrão IEEE chamado COMTRADE. Os dados de COMTRADE, permitem analisar a forma de onda de curto-circuito, não só descobrir o máximo e mínimo da corrente, mas também descobrir a hora de início e a duração das falhas de curto-circuito (YANG et al., 2015).

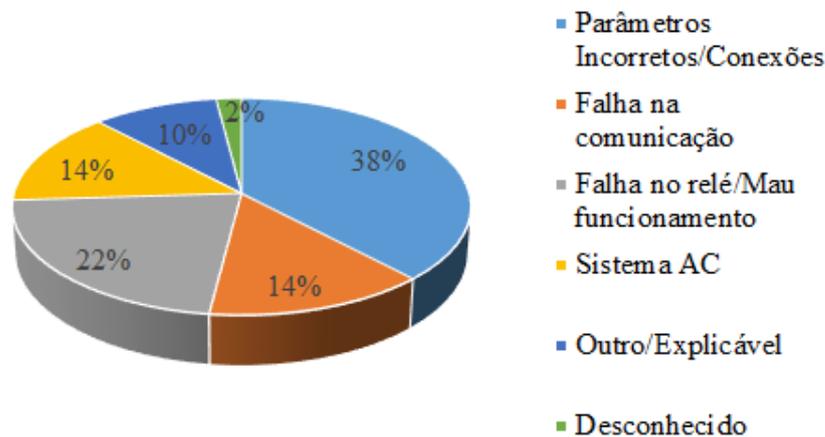
Com o avanço da tecnologia digital, os relés numéricos e digitais se tornaram muito usuais nas indústrias que atuam na área da proteção de sistemas elétricos de potência. As vantagens de relés digitais fornecem confiabilidade insuperável e capacidades estendidas a um custo muito econômico (WELTON; KNAPEK, 2017).

Mozina (2005) ressalta que os procedimentos de testes com relés eletromecânicos são bem definidos, diferente do comissionamento de relés digitais, visto que uma única plataforma de *hardware* pode possuir uma gama de funções, o que torna o comissionamento mais complexo e pode comprometer a operação do sistema de proteção.

Welton e Knappek (2017) apresentam estatísticas de alguns eventos que podem causar er-

ros durante o teste e manutenção das atividades, resultando em não-operações dos relés digitais quando posicionados no sistema, Figura 1.2.

Figura 1.2 – Causas de falhas nos testes de relés digitais



Fonte: (WELTON; KNAPEK, 2017)

Como pode-se observar na Figura 1.2, a maior causa de falhas é em virtude de erros nos parâmetros inseridos ou problemas nas conexões de correntes e tensões. Os erros em parâmetros ocorrem porque eventualmente a proteção não é corretamente planejada antes de ser testada com os dados reais do sistema. O planejamento pode ser feito tanto a partir de cálculos com equações de ajustes dos relés como via *softwares* que realizam testes automáticos para parametrização dos ajustes dos relés (*pick up*). Já os erros de conexões acontecem até mesmo pelo fato de algum cabo de ligação entre o equipamento de testes e o relé estar com defeito. Alguns testadores de relés possuem aviso de sobrecarga quando isso ocorre, porém deve-se também realizar testes de continuidade utilizando multímetros.

Para minimizar esses erros em testes, foram listados procedimentos de ensaio que devem ser seguidos, conforme (WELTON; KNAPEK, 2017).

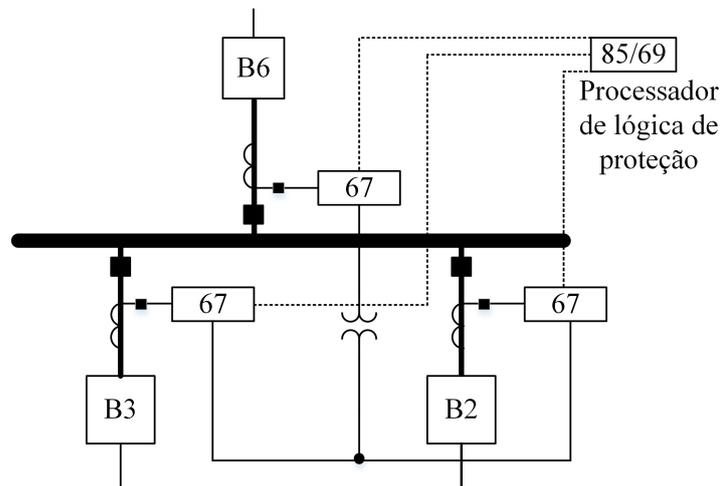
- assegurar que as configurações coincidam com as relativas à aplicação;
- testar o dispositivo com a lógica associada habilitada;
- testar o elemento sem alterar as configurações, como *pick up*, abandono ou atrasos de tempo;
- utilizar o *software* de relé para configurar o TC e o TP;

Zimmerman (2008) afirma que segurança e certeza no comissionamento de sistemas de proteção é, talvez, a parte mais difícil de implementar nas novas tecnologias. No entanto, existem muitas ferramentas e abordagens que podemos utilizar para melhorar e simplificar este processo. A partir disso, ele enumerou ferramentas e métodos que auxiliam o operador no comissionamento.

- teste de contato de entrada e saída;
- teste de elemento funcional;
- teste de simulação de estado;
- medição e dados de relatório de eventos;
- testes de ponta a ponta usando conjuntos de teste sincronizados por satélite;
- dados *de Synchrophasor*;
- diagramas de lógica;
- comissionamento no campo;
- simulações em laboratório;
- o uso de relatórios de eventos do sistema para validar o desempenho do relé como parte da estratégia de comissionamento;

Um exemplo de aplicação do comissionamento apresentado por Zimmerman (2008) é para proteção rápida de barramento em um barramento de distribuição usando um processador de lógica de proteção (85/69).

Figura 1.3 – Diagrama de proteção rápida em barramento



Fonte: Zimmerman (2008)

No esquema da Figura 1.3, tem-se a maior parte da lógica de proteção sendo desenvolvida nas configurações do Processador de Lógica de Proteção com funções ANSI 85/69 (Relé receptor de sinal de teleproteção/Dispositivo de controle permissivo). Além disso, identificam-se relés de função ANSI 67 (Direcional de Sobrecorrente) conectados a TCs no circuito. Assim, para implementar o comissionamento com sucesso deste esquema, deve-se verificar o desempenho do seguinte:

- elementos de sobrecorrente direcional (67);
- desempenho do caminho das comunicações;
- conexões de TC e TP e polaridades das entradas para os dispositivos 67;
- rapidez do *trip* e configurações de lógica de bloqueio nos relés e processador de lógica de proteção;

A aplicação de relés digitais multifuncionais para proteger transformadores de potência tornou-se uma prática comum. Estes equipamentos fornecem mais do que apenas a proteção diferencial, mas várias outras funções em um único dispositivo. Contudo, devido a flexibilidade e funcionalidade adicionada, isso resultou em relés complicados que são difíceis definir e comissionar (MOZINA, 2005). Porém, essa complexidade é superada diante de todas as vantagens que um relé digital oferece.

Mozina (2005) fornece práticas e soluções para realizar o comissionamento dos relés digitais. É necessário que o engenheiro verifique a configuração adequada, lógica e operação para uma nova ou já existente instalação, isso normalmente requer a realização de 4 passos:

- I. Injeção de corrente e tensão no relé para verificar ajuste e temporização do relé.
- II. Verificação de entradas e saídas adequadas do relé.
- III. Verificação da lógica correta do relé.
- IV. Verificação de disparos e alvos.

Para a proteção de sobrecorrente, o item I tem o propósito de construir a curva de tempo do relé para validar o seu tempo de operação, com base nos ajustes parametrizados e na faixa de exatidão do relé comercial utilizado, além de verificar as conexões de *hardware*. Em II e III, verificam-se os canais de entrada, que podem ser correntes ou tensões, e os canais de saída que são os sinais enviados para abertura do disjuntor (*trip*). No item IV, testa-se a coordenação do sistema de proteção para averiguar disparos indevidos.

Nesse sentido, uma técnica comum de comissionamento de relés de proteção diferencial é realizar testes automatizados utilizando *software* para garantir que o relé está corretamente ajustado para aplicação específica. Turner (2011) realizou três ensaios para proteção diferencial de transformador.

- I. Teste de limite.
- II. Teste de sensibilidade diferencial à terra.
- III. Contenção de harmônica durante *Inrush* do transformador.

O primeiro ensaio determina se a proteção diferencial do transformador cumpre a exatidão indicada para o funcionamento. O segundo define a cobertura de resistência à falha do diferencial à proteção de terra em função da impedância de origem. O terceiro estabelece se a proteção diferencial do transformador funciona mesmo contendo harmônicas durante uma variedade de condições rigorosas que podem ocorrer durante a energização (TURNER, 2011).

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é composto de cinco capítulos, dois apêndices e um anexo. No segundo capítulo, é realizada uma breve apresentação sobre a filosofia de proteção e os procedimentos que devem ser realizados para os ajustes teóricos dos relés de sobrecorrente.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia proposta para o desenvolvimento do roteiro de comissionamento de relés digitais de sobrecorrente. Além de apontar o *software* e os equipamentos utilizados neste trabalho.

O quarto capítulo exhibe os resultados procedentes das três etapas apresentadas na metodologia e faz comparações dos tempos de respostas obtidos nessas etapas, apresentando valores de erros relativos entre as comparações para validar o roteiro desenvolvido.

O quinto capítulo denota as conclusões deste trabalho, considerações acerca dos objetivos estabelecidos e perspectivas para trabalhos futuros.

Nos apêndices A e B, tem-se a apresentação dos roteiros de simulação e comissionamento desenvolvidos no trabalho. Por fim, no Anexo A são apresentados os dados nominais do sistema-teste utilizado para as simulações de falta.

## 2 PROCEDIMENTOS PARA ESTUDO DE AJUSTE E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

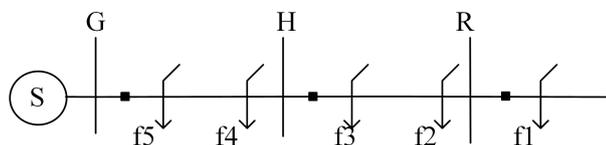
O presente capítulo tem por objetivo apresentar a filosofia de proteção em sistemas elétricos considerada neste trabalho e os procedimentos que devem ser realizados para os ajustes das correntes de atuação (*pick up*) dos relés e coordenação do sistema, além de exibir esquemáticos das ligações elétricas entre os TCs e os relés de sobrecorrente.

### 2.2 PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

De um modo geral, a proteção de sistemas elétricos de potência é realizada por relés que têm como função principal a identificação de condições anormais de operação e o envio do *trip* para o disjuntor. Os disjuntores, constituem a parte mecânica responsável pela desconexão dos trechos defeituosos, a fim de proteger os equipamentos e manter o sistema operando em normalidade (MAMEDE, 2011). As tecnologias de funcionamento dos relés evoluíram, hoje raramente é empregado o uso do relé eletromecânico. Porém, os princípios da filosofia de proteção, independem da construção do relé, e devem garantir seletividade e confiabilidade ao sistema. Nesse sentido, é necessário que se faça o estudo de ajustes e coordenação para que não ocorram falhas na proteção ou desligamentos de áreas não defeituosas (KINDERMANN, 2005).

Em um sistema radial, a proteção de sobrecorrente pode ser realizada por elementos não direcionais, visto que o fluxo de carga é unidirecional. Na Figura 2.1 tem-se um sistema radial composto pela geração S, três barras e faltas previamente identificadas.

Figura 2.1 – Sistema radial típico



Fonte: Adaptado de (ELMORE, 2004).

Cada trecho requer apenas um disjuntor no final da fonte. Para eliminar uma falta em f1 e outras à jusante, apenas o disjuntor da barra R precisa abrir. Para faltas em f2 e f3 e na área entre elas, o disjuntor em H deve receber o *trip*. Da mesma forma, para faltas em f4 e f5 e entre elas, o disjuntor G deve isolar a área.

Além disso, os relés são coordenados em pares, seguindo a filosofia de proteção principal e retaguarda. A proteção principal é aquela que em caso de curto-circuito dentro da zona

protegida, deverá atuar primeiro e a proteção retaguarda só deverá atuar quando ocorrer falha da proteção principal (ALMEIDA, 2000). Para uma falta em f1, por exemplo, o relé em R deve operar como proteção principal e o relé em H deve operar como proteção retaguarda.

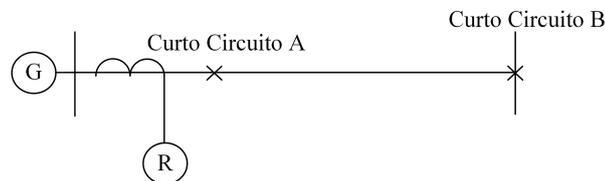
Para que o esquema apresentado funcione adequadamente, os relés devem ser ajustados da maneira mais exata possível a partir das equações previstas para cada função.

### 2.3 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

Quando a corrente de curto-circuito atinge um valor igual ou superior ao *pick up* do relé de sobrecorrente, este atua e envia um sinal para abertura do disjuntor, isolando a seção em falta do sistema de potência. A atuação do relé deve ser coordenada de maneira a evitar disparos indevidos (KINDERMANN, 2005).

As equações utilizadas para os cálculos de ajustes dos relés temporizados (função ANSI 51) e instantâneos (função ANSI 50), bem como os critérios para dimensionamento dos TCs e os estudos de coordenação dos relés serão vistos neste capítulo considerando o esquema de proteção da Figura 2.2. Nesta Figura, também estão indicados os pontos de falta A e B que serão utilizadas nas equações de ajuste, o relé R e o gerador G.

Figura 2.2 – Esquema de proteção de sobrecorrente



Fonte: elaborado pela autora.

Além disso, as faixas de constantes utilizadas nas Equações 2.4, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 são definidas pela literatura e adotadas pelas empresas locais que atuam no ramo de energia elétrica.

#### 2.3.1 Dimensionamento dos TCs

Como os níveis de correntes em um SEP são elevados, é necessário que um TC reproduza as correntes do SEP (circuito primário) em seu circuito secundário, que irá energizar o relé (KINDERMANN, 2005). Pode-se adotar duas convenções para a corrente no circuito secundário do TC. Neste trabalho, é considerada a norma NBR (2015), que emprega 5 A no secundário.

Com isso, é preciso conhecer a relação de transformação do TC (RTC) que irá alimentar o relé para realizar o ajuste do *pick up*. De acordo com Kindermann (2005), a determinação da RTC deve atender os seguintes critérios:

- Critério 1 – A corrente primária ( $I_{primaria}$ ) do TC deve ser maior ou igual que a razão entre a corrente de curto-circuito máximo ( $I_{ccMax}$ ), no ponto em que o TC foi instalado, e o fator de sobrecorrente ( $FS$ ) do TC, conforme a inequação 2.1.

$$I_{primaria} \geq \frac{I_{ccMax}}{FS} \quad (2.1)$$

em que  $FS$  é igual a 20, conforme norma (ANSI, 1993).

- Critério 2 - A corrente primária deve ser maior ou igual a corrente máxima de carga do trecho em que o TC está instalado, conforme a inequação 2.2.

$$I_{primaria} \geq I_{CargaMax} \quad (2.2)$$

Assim, a corrente primária é a corrente de maior valor resultante nos dois critérios. A norma NBR (2015) estabelece as correntes primárias admissíveis no TC. Dessa forma, a RTC é obtida por meio da seguinte Equação:

$$RTC = \frac{I_{primaria}}{I_{secundaria}} \quad (2.3)$$

em que  $I_{secundaria}$  é a corrente secundária do TC (ANSI, 1993).

### 2.3.2 Ajuste da corrente de atuação para função 51 temporizada de fase

De acordo com Kindermann (2005), para garantir segurança e adequada proteção, de modo que o relé seja ajustado para detectar todas as possíveis correntes de curto-circuito no trecho ao qual está inserido, a corrente de ajuste deve atender ao seguinte critério da inequação 2.4.

$$\frac{FF \cdot I_{cargaMax}}{RTC} \leq I_{pickup} \leq \frac{I_{ccMinB}}{F_{Seg} \cdot RTC} \quad (2.4)$$

A corrente de carga máxima ( $I_{cargaMax}$ ) se refere a corrente máxima do trecho que o relé irá proteger. O fator  $FF$  (fator de sobrecarga) é inserido para disponibilizar "folga" para eventuais manobras na rede elétrica, a fim de que o relé não opere. Esse fator pode variar de 1,5 a 2. Já o fator  $F_{Seg}$  (fator de segurança) considera erros envolvidos no cálculo da corrente de falta, RTC, relés e etc. Ele é utilizado para garantir que a menor corrente de curto-circuito seja de 1,5 a 3 vezes maior que o limiar de operação.

Como deve ser utilizada a corrente de curto-circuito mínima no final do trecho protegido (por exemplo, no ponto B da Figura 1), se faz o uso da Equação 2.5 para encontrar a corrente mínima, pois o curto-circuito bifásico é o menos severo.

$$I_{cc2F} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3F} \quad (2.5)$$

Desse modo, escolhe-se a corrente de ajuste o mais próximo da limitação inferior da inequação 2.4, para que o relé possua mais sensibilidade na sua atuação e um maior alcance de proteção.

### 2.3.3 Ajuste da corrente de atuação para função 51 temporizada de neutro

A proteção de neutro é necessária em sistemas que possuem correntes que geram componentes de sequência zero. A corrente que atravessa o relé de neutro é muito pequena pois, em condições normais, as correntes de fase no sistema elétrico estão equilibradas ou apresentam um pequeno grau de desequilíbrio. É essa corrente de desequilíbrio que irá sensibilizar os relés de neutro. A corrente de ajuste dos relés de neutro deve satisfazer a inequação 2.6 (KINDERMANN, 2005).

$$\frac{FD \cdot I_{cargaMax}}{RTC} \leq I_{pickup} \leq \frac{I_{cc1FMinB}}{F_{Seg} \cdot RTC} \quad (2.6)$$

O fator  $FD$  (fator de desequilíbrio) se refere ao percentual de desequilíbrio e deve estar contido numa faixa de 0,05 a 0,45. Geralmente,  $F_{Seg}$  é igual ao adotado no relé 51 de fase. A corrente de curto-circuito monofásica mínima é calculada considerando a impedância de falta de 40 a 100 $\Omega$ , dependendo do padrão adotado pela concessionária. Desse modo, deve-se escolher a corrente de ajuste do relé o mais próximo da limitação inferior da inequação 2.6.

### 2.3.4 Ajuste da corrente de atuação para a função 50 instantânea de fase

Os relés instantâneos, como o nome já sugere, atuam “instantaneamente” para qualquer corrente de curto-circuito maior que o seu ajuste. O termo instantâneo é por não haver um atraso intencional na atuação, como nos relés temporizados. Porém, não são de fato instantâneos, pois seu tempo de atuação depende do projeto, tipo e fabricação do relé (KINDERMANN, 2005). Em geral, considera-se o tempo de operação de aproximadamente um ciclo para estes relés. Sendo assim, para que não haja sobreposição de zonas de atuação, deve ser realizado o critério de uso da unidade 50 apresentado na Equação 2.7 e, se necessário o uso desse relé, realizar os cálculos de critérios de ajuste da corrente de atuação a partir das Equações 2.8 e 2.9 (ELMORE, 2004).

- Critério do uso:

$$I_{ccMaxA} > 2,5 \cdot I_{ccMaxB} \quad (2.7)$$

- Ajuste da corrente de *pick up*:

$$I_{pickup} > F_{ass} \cdot I_{ccMinB} \quad (2.8)$$

$$I_{pickup} > 8 \cdot I_{Nominal} \quad (2.9)$$

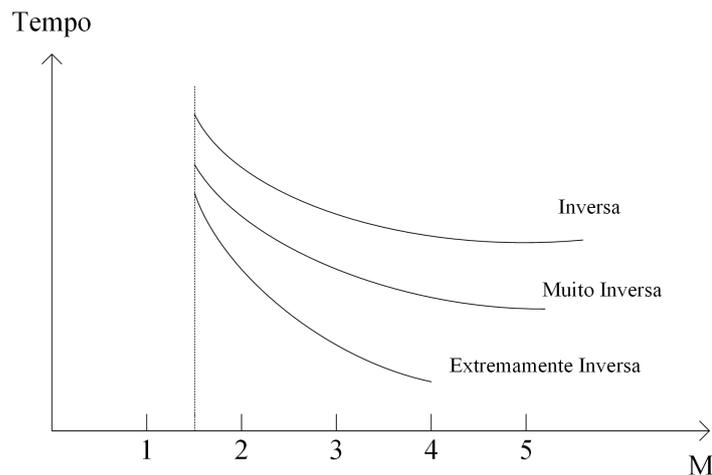
A variável  $F_{ass}$  (Fator de Assimetria) da Equação 2.8 é utilizada como uma média de fator de assimetria, que varia de 1,1 a 1,3 para que não haja disparo indevido no caso de curto-circuito assimétrico. A Equação 2.9 é utilizada quando há transformador no trecho protegido pelo relé, no caso de *Inrush*.

Sendo assim, escolhe-se o maior valor de corrente obtida em 2.8 e 2.9 para a corrente de ajuste do relé.

### 2.3.5 Escolha das curvas dos relés temporizados

Para a determinação do tempo de atuação dos relés 51, faz-se necessário a escolha da curva de atuação que depende das condições do sistema elétrico (KINDERMANN, 2005). As curvas, também conhecidas por Dial de Tempo (*DT*), são definidas pela norma IEC (2009) e estão representadas na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Curvas características de tempo inverso



Fonte: Adaptado de IEC (2009).

A escolha do grau de inclinação da curva é determinada pelos comprimentos das linhas que serão protegidas. Cada modelo de curva possui a mesma Equação característica 2.10, que tem os coeficientes apresentados na Tabela 2.1.

$$t = \left( \frac{A}{M^P - 1} \right) \cdot DT \quad (2.10)$$

Tabela 2.1 – Características de tempo inverso

Função	Alcance ou valor
Normalmente Inversa	A=0,14, P=0,02
Muito Inversa	A=13,5, P=1,0
Inversa	A=0,14, P=0,02
Extremamente Inversa	A=80,0, P=2,0
Tempo curto Inversa	A=0,05, P=0,04
Tempo longo Inversa	A=120, P=1,0

Além disso, o múltiplo  $M$  é calculado da mesma maneira para todas, conforme a Equação 2.11.

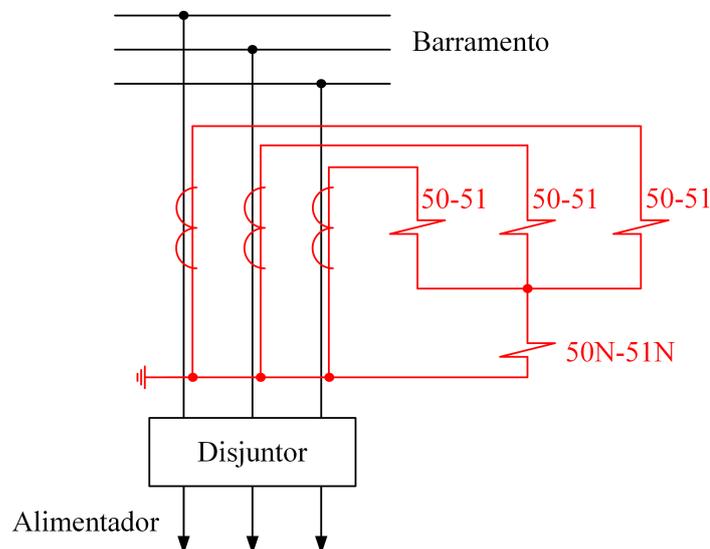
$$M = \frac{I_{op}}{RTC \cdot I_{pickup}} \quad (2.11)$$

em que  $I_{op}$  é a corrente de curto-circuito no final do trecho protegido.

### 2.3.6 Diagramas de ligações elétricas entre os TCs e os relés

São mostrados nas Figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 um diagrama trifilar e a análise dos tipos de curto-circuito retratando as ligações elétricas dos TCs com os relés.

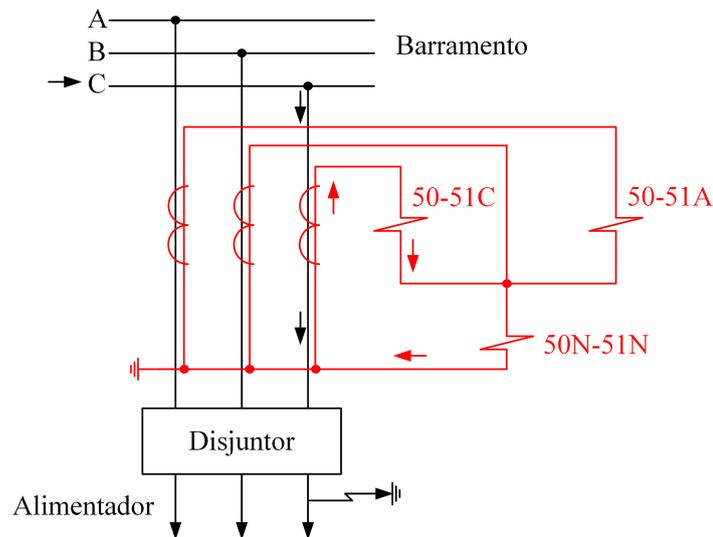
Figura 2.4 – Diagrama trifilar e ligações elétricas dos TCs e relés



Fonte: Adaptado de Dias (2002).

Para uma falta monofásica, sendo o curto-circuito entre a fase C e a terra, tem-se na Figura 2.5 a circulação da corrente no circuito e a operação do relé de neutro 50N-51N. O relé da fase C também atua, porém o relé de neutro atuará mais rápido para falta monofásica (DIAS, 2002).

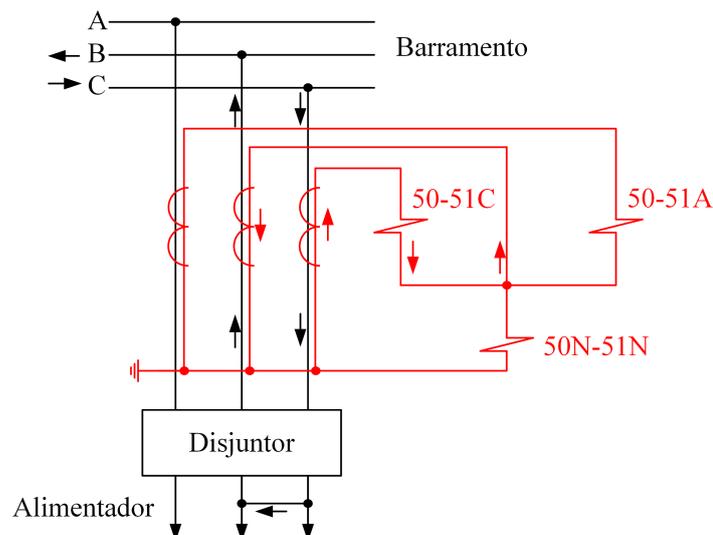
Figura 2.5 – Circulação da corrente e conexões para uma falta monofásica na fase C



Fonte: Adaptado de Dias (2002).

Para uma falta bifásica, sendo o curto-circuito entre as fases B e C, tem-se na Figura 2.6 a circulação da corrente no circuito e a operação do relé 50-51 da fase C. Na situação da falta ser entre as fases A e C, os relés 50-51 da fase A e 50-51 da fase C atuariam (DIAS, 2002).

Figura 2.6 – Circulação da corrente e conexões para uma falta bifásica nas fases B e C

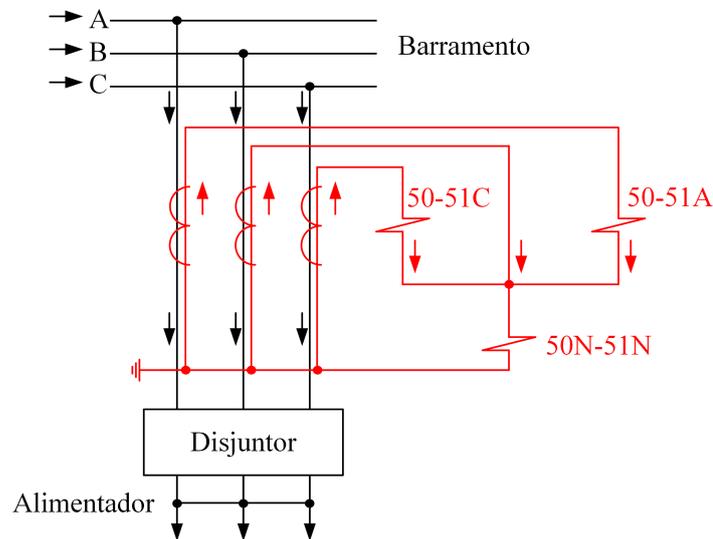


Fonte: Adaptado de Dias (2002).

Para uma falta trifásica, sendo o curto-circuito entre as três fases, tem-se na Figura 2.7

a circulação da corrente no circuito e a operação dos relés de fase 50-51 da fase C e 50-51 da fase A, porém não ocorre a atuação dos relés de neutro 50N-51N (DIAS, 2002).

Figura 2.7 – Circulação da corrente e conexões para uma falta trifásica



Fonte: Adaptado de Dias (2002).

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi apresentada a filosofia da proteção de sistemas elétricos considerada neste trabalho, as equações utilizadas para os cálculos de ajuste, coordenação e seletividade dos relés de sobrecorrente e os diagramas de conexões entre os TCs e relés.

No próximo capítulo será abordada a metodologia proposta neste trabalho para o dimensionamento da proteção de um sistema elétrico e o comissionamento de relés digitais de sobrecorrente.

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia desenvolvida neste trabalho para o estudo e comissionamento da proteção de sobrecorrente em um sistema elétrico. Primeiramente, será apresentado um esquemático geral da metodologia proposta e as três etapas que a compõe. Após isso, serão detalhadas as etapas de análise teórica, simulação e ensaios práticos. Além disso, o *software* de simulação e os equipamentos utilizados para o comissionamento do sistema de proteção também serão apresentados e especificados.

##### 3.1.1 Roteiro geral da metodologia proposta

A metodologia empregada foi dividida em três etapas e está representada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: elaborado pela autora

Inicialmente, são realizados cálculos teóricos de correntes de curto-circuito trifásicos e monofásicos, de dimensionamento de transformadores de corrente e ajustes dos relés de sobre-

corrente do sistema de potência. Posteriormente, o mesmo sistema é analisado em um *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos. Na parametrização da proteção de sobrecorrente do sistema, são utilizadas as RTCs e os ajustes dos relés obtidos nos cálculos teóricos. Após isso, são simuladas as faltas no modo estático e dinâmico. Para utilizar os dados de simulação, são gerados e exportados os arquivos no formato COMTRADE que contém as correntes de curto-circuito em cada trecho simulado no *software* para a etapa de implementação prática utilizando arquivos COMTRADE.

Feito isso, é realizada a parametrização dos relés comerciais com os mesmos ajustes utilizados no *software DIGSILENT Power Factory* versão 15.2. Após, são executados Testes Automáticos e Manuais que validam o tempo de resposta de cada relé parametrizado com base na exatidão do relé comercial. Por último, realizam-se os ensaios com arquivos COMTRADE dos relés comerciais utilizando um o Testador Universal de Relés (mala de testes de relés) Conprove CE6006.

Para finalizar, são feitas análises comparativas dos ajustes e tempos de resposta procedentes das três etapas.

## 3.2 SOFTWARE E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

### 3.2.1 *DIGSILENT Power Factory*

É um *software* utilizado na análise de sistemas elétricos e de controle. O programa tem uma interface computacional gráfica que permite a construção de sistemas elétricos em diagramas unifilares para estudos de transmissão, distribuição e sistemas industriais. As funcionalidades do *Power Factory* foram implementadas com a finalidade de simular funções da maneira mais realista possível. O usuário tem a disponibilidade de criar um novo dispositivo ou alterar os existentes, a fim de alcançar os principais objetivos de planejamento e otimização da operação (POWERFACTORY, 2014).

Neste trabalho, são utilizadas as ferramentas de proteção de sobrecorrente, de simulação de curtos-circuitos e simulações estáticas e dinâmicas para obter tempos de operação de relés.

### 3.2.2 Testador Universal Hexafásico e Analisador de Energia Microprocessado com protocolo IEC 61850 (mala de testes de relés hexafásica) – CE 6006

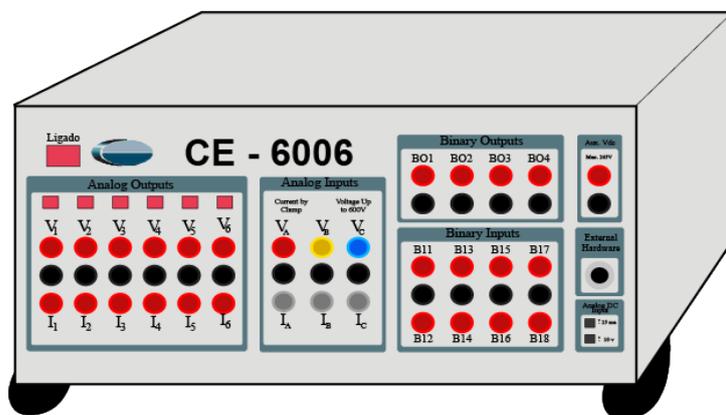
O Testador Universal Hexafásico e Analisador de Energia Microprocessado com protocolo de comunicação IEC 61850 referenciado na norma IEC (2013), também conhecido como mala de testes de relés hexafásica, modelo CE 6006, é um equipamento utilizado para testar, calibrar e aferir instrumentos como relés e medidores. Possui saídas hexafásicas de tensões e correntes, entradas e saídas binárias que podem ser utilizadas em testes específicos de diferentes

funções de proteção como: sobrecorrente, diferencial, distância, direcional e etc. A comunicação é feita via interface computacional com o *software* disponibilizado pelo fabricante e permite realizar diversos ensaios identificados pelo nome da função de proteção ou o teste Master.

Uma das opções do teste Master é utilizar arquivos oriundos de *softwares* de simulação para que a mala de testes reproduza dados de corrente e tensão do sistema analisado. Já nos testes das funções específicas, as correntes e tensões são originadas pelo próprio equipamento, esses testes são denominados testes manuais e automáticos (CONPROVE, 2018a).

Na Figura 3.2, que é uma ilustração do equipamento, na parte esquerda da mala de testes, percebe-se os canais analógicos de saída de tensão e corrente e no lado direito, as entradas e saídas binárias.

Figura 3.2 – Mala de testes CE 6006



Fonte: elaborado pela autora.

### 3.2.3 Relé Pextron URP 6000-5

É um relé digital de proteção multifuncional que possui funções como: sub/sobrecorrente, sub/sobretensão, sobretensão residual, desequilíbrio de corrente e outros. O relé possui um *display* frontal que exibe valores de correntes e tensões lidas por ele nas fases, além de permitir parametrização via Interface Homem-Máquina (IHM). Ademais, a porta *Universal Serial Bus* (USB) frontal também é utilizada para comunicar com o relé, utilizando a interface computacional disponibilizada pelo fabricante que possibilita parametrização, monitoriamento, oscilografia e acesso a memória (PEXTRON, 2016).

Na Figura 3.3, que é uma ilustração do relé Pextron URP 6000-5, tem-se o *display* que exibe os valores de constantes lidas pelo equipamento, além de possuir LEDs que indicam a função de proteção que está atuando. Além disso, pode-se visualizar a entrada USB no canto inferior direito, que realiza a comunicação com o computador pessoal (PC).

Figura 3.3 – Relé Pextron URP 6000-5

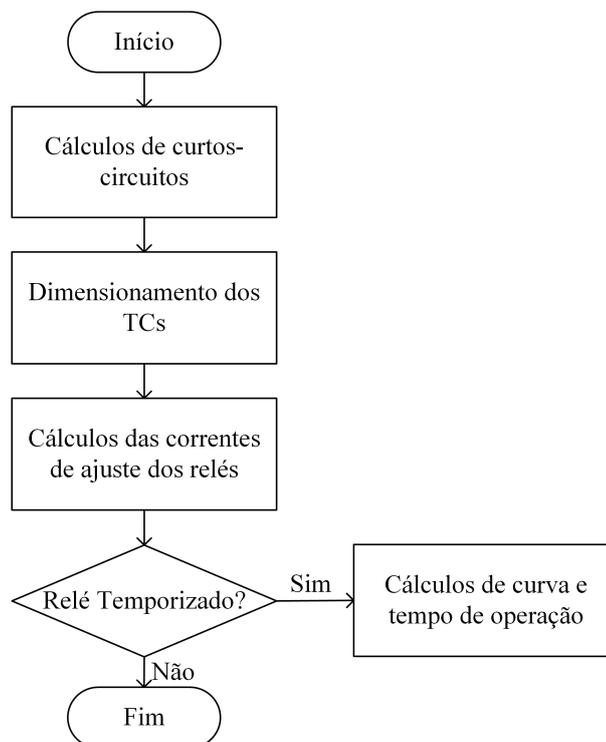


Fonte: elaborado pela autora.

### 3.3 ETAPA 1: ANÁLISE TEÓRICA

Essa etapa caracteriza os cálculos teóricos para dimensionamento da proteção do sistema-teste e está apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Fluxograma da Análise Teórica



Fonte: elaborado pela autora.

Primeiramente, são calculados os curtos-circuitos nos pontos de falta indicados (f1-f5)

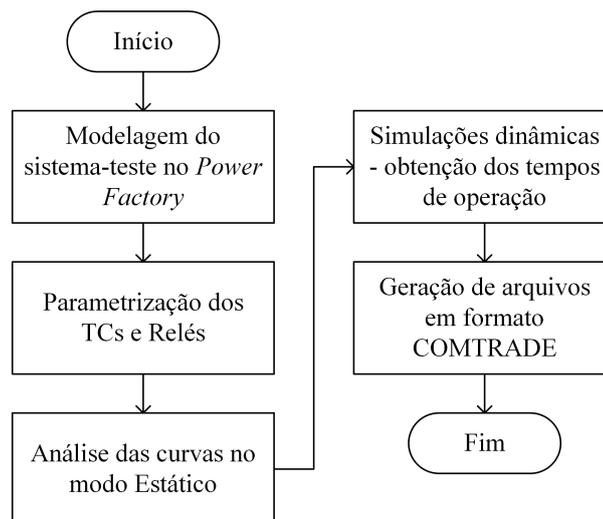
no sistema-teste da Figura 4.1. Após isso, são dimensionados os TCs, com base nas inequações 2.1 e 2.2.

Posteriormente, as correntes de ajuste dos relés são calculadas utilizando as inequações 2.4, 2.6, 2.8 e 2.9. Para os relés temporizados, são realizados os cálculos de coordenação para encontrar as curvas e os tempos de operação, utilizando a Equação 2.10 e a característica de normalmente inversa apresentada na Tabela 2.1. Para os relés instantâneos, a literatura considera que o tempo de atuação é em torno de um ciclo, ou seja, aproximadamente de 0,02s.

### 3.4 ETAPA 2: NÍVEL DE SIMULAÇÃO

Após os cálculos teóricos, é realizada a Etapa 2 em que é utilizado o *Power Factory* para simulação do sistema-teste. A Figura 3.5 apresenta o procedimento de simulação a ser realizado.

Figura 3.5 – Fluxograma da Simulação



Fonte: elaborado pela autora.

Inicialmente, é necessário modelar o sistema-teste no *software*. Após isso, são parametrizados os TCs com os valores de RTC e os relés com as correntes de ajuste e as curvas.

Posteriormente, é realizada a análise das curvas no modo estático que permite verificar a coordenação dos relés a partir dos dimensionamentos calculados anteriormente. A seguir, são realizadas simulações dinâmicas para obter os tempos de operação dos relés. As simulações dinâmicas se dividem em duas: instantânea e RMS.

A simulação instantânea tem uma maior aproximação com a realidade, uma vez que ao observar as formas de onda das correntes nessa simulação, percebe-se o elevado número de pontos que os gráficos englobam. Já na simulação RMS, tem-se a representação de um número muito limitado de pontos nas formas de onda. Essas explicações se tornam mais claras ao analisar as Figuras 3.6 e 3.7, que são gráficos de simulações de curto-circuito nestas duas

modalidades.

Figura 3.6 – Simulação Instantânea de curto-circuito

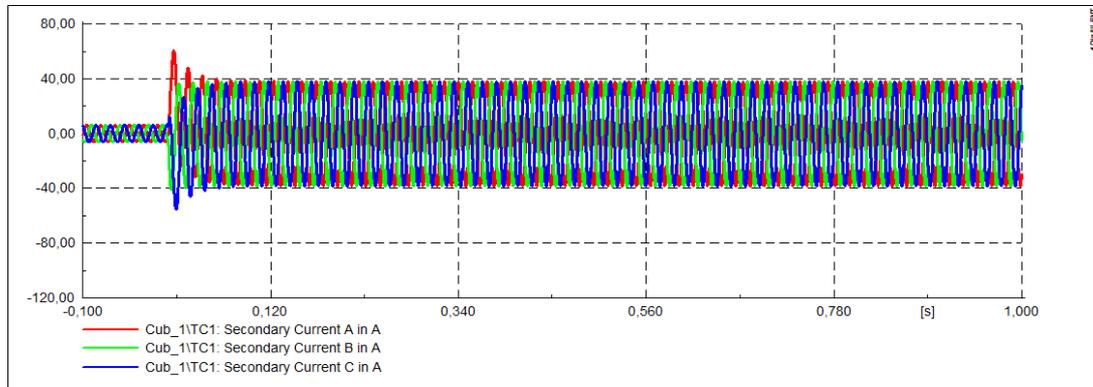
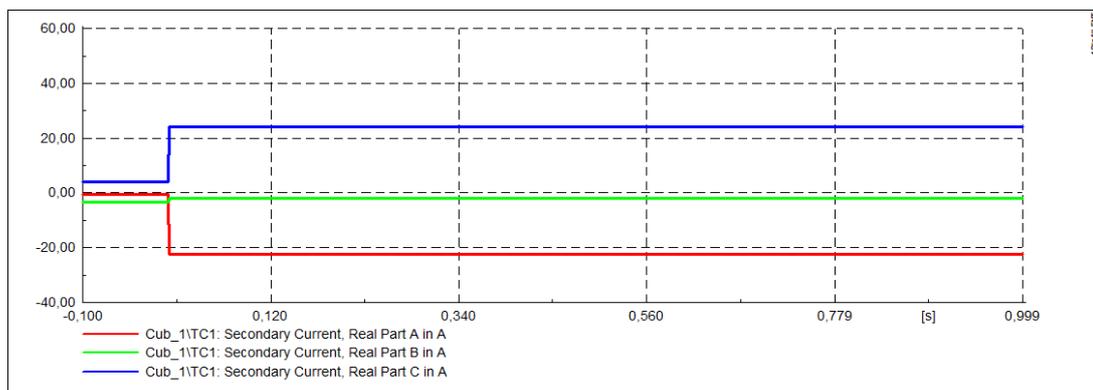


Figura 3.7 – Simulação RMS de curto-circuito

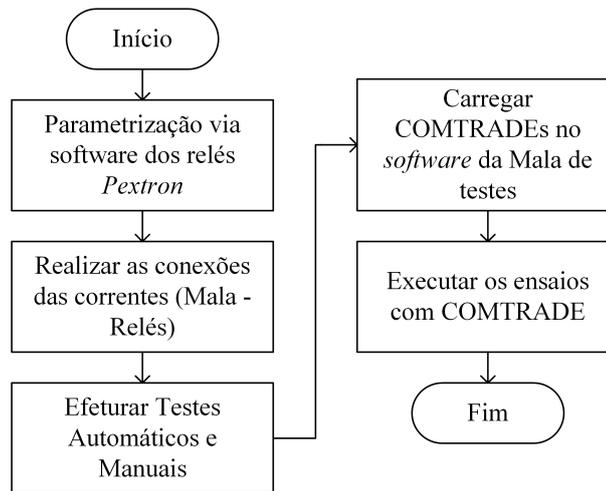


Dessa forma, com a simulação dinâmica no modo instantâneo, são gerados os arquivos de COMTRADE nos trechos onde existem os curtos-circuitos. Esses documentos serão inseridos no *software* da mala de testes para execução dos ensaios práticos.

### 3.5 ETAPA 3: IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Os ensaios práticos correspondem a etapa 3 e são implementados na mala de testes utilizando os relés Pextron. A Figura 3.8 exibe os passos a serem realizados.

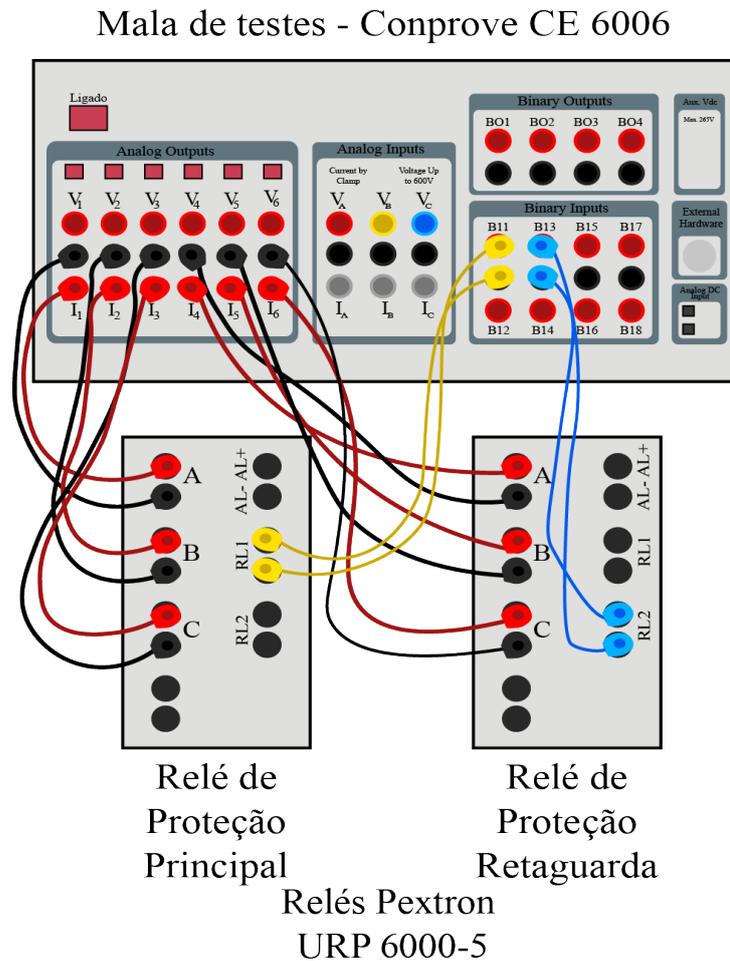
Figura 3.8 – Fluxograma da Implementação Prática



Fonte: elaborado pela autora.

Primeiramente, os relés *Pextron* são parametrizados com os dados das análises anteriores, utilizando comunicação via interface computacional com o *software* disponibilizado pelo fabricante. Após isso, é necessário fazer as conexões de injeção das correntes da mala de testes para os relés, como mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Conexões para injeção de correntes



Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 3.9, os cabos da cor vermelha indicam a passagem de corrente nas fases A-B-C, saindo da mala de testes e entrando nas conexões dos relés. Já os cabos da cor em preta, por sua vez, indicam o neutro do circuito. Os cabos em amarelo e azul são os sinais de *trip* enviados dos relés para a mala de testes. As conexões dos relés AL+ e AL- indicam a alimentação na rede elétrica.

Feitas as conexões das correntes, realizam-se os Testes Automáticos que classificam se o tempo de atuação do relé está ou não aprovado dentro da faixa de tolerância que é encontrada no manual do relé Pextron. Além disso, são executados Testes Manuais que têm por função legitimar os resultados obtidos nos Testes Automáticos. As correntes injetadas nos relés nesses dois testes são originadas pelo próprio equipamento de testes.

Por último, no *software* da mala de testes são carregados os arquivos COMTRADE, que contém as correntes de curto-circuito obtidas na simulação, e executados os ensaios práticos para obter os tempos de operação dos relés. A área de trabalho dos ensaios dessa etapa está representada na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Área de trabalho



Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 3.10, são ilustrados os dispositivos utilizados na implementação prática. Observa-se os cabos de conexão entre o equipamento de testes e os relés Pextron, nas cores vermelho e preto, por onde são carregadas as correntes. Além disso, é possível visualizar a comunicação feita via USB entre os relés e o computador, representada no cabo da cor verde.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi abordada a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho bem como o *software* e os equipamentos utilizados.

No próximo capítulo, serão apresentados o sistema-teste utilizado para análise e os resultados do dimensionamento e comissionamento da proteção de sobrecorrente, bem como comparações dos tempos de resposta oriundos das três etapas do roteiro de testes para validação do trabalho.

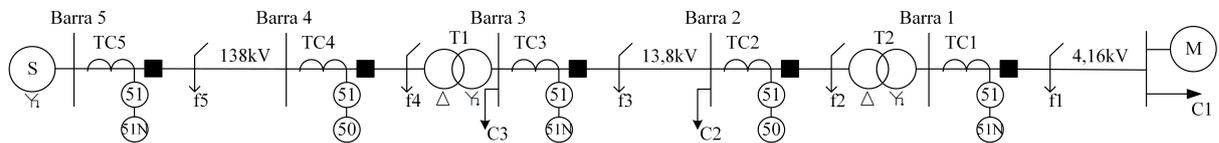
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das etapas de Análise Teórica, Simulação e Implementação Prática que compõe a metodologia proposta no capítulo 3. Em vista disso, serão feitas comparações dos tempos de resposta obtidos em cada uma das etapas para a validação da rotina de comissionamento desenvolvida neste trabalho.

Além disso, o sistema de potência utilizado para a análise da proteção de sobrecorrente realizada neste trabalho é apresentado na Figura 4.1. O sistema é composto pela geração S, cinco barras (B1-B5), duas linhas de transmissão, sendo uma de 138 kV e a outra de 13,8 kV, dois transformadores (T1-T2), um motor de indução e 3 cargas (C1-C3). As cinco faltas existentes estão indicadas por f1 – f5. Os relés 51N não foram alocados nas linhas em que há transformador, pois estes possuem a ligação  $\Delta$ -Y-g. Desse modo, apenas onde há componente de sequência zero foram posicionados os relés 51N. Para os relés 50, foi testado o critério de uso, apresentado na Equação 2.7. Os relés 51 são utilizados para qualquer tipo de curto-circuito. Os dados nominais do sistema são apresentados no Anexo A.

Figura 4.1 – Sistema-teste



Fonte: Adaptado de (MEASUREMENTS, 1975)

### 4.2 CÁLCULOS E SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITOS

Os valores de curto-circuito calculados e simulados no *Power Factory* no modo estático para as faltas indicadas no sistema-teste, podem ser verificados na Tabela 4.1, bem como os erros relativos oriundos da comparação entre cálculos teóricos e simulação.

Tabela 4.1 – Valores das correntes de curto-circuito e erros relativos percentuais das comparações

Falta	Tipo de falta	$I_{cc}$ Calculada (A)	$I_{cc}$ Power Factory (A)	Erro relativo percentual
f1	Trifásica	4488,0730	4452,1467	0,8069%
	Monofásica	5254,4426	5219,1874	0,6755%
f2	Trifásica	3039,4730	3014,4151	0,8313%
f3	Trifásica	4137,8380	4116,3917	0,5210%
	Monofásica	4676,2171	4655,5691	0,4435%
f4	Trifásica	1153,5602	1153,4852	0,0065%
f5	Trifásica	3346,6528	3346,9569	0,0091%
	Monofásica	3346,6528	3347,0062	0,0106%

Ao analisar a Tabela 4.1, observa-se que os erros são menores que 1%. Esses erros surgem devido às variações no modo de calcular os curtos-circuitos. Por exemplo, no *software*, existem opções de cálculo de faltas, que têm como base normas ANSI, IEC, completo e etc. Em cada opção, tem-se um cálculo de fluxo de carga diferente. Por essa razão, aparecem esses pequenos erros ao comparar os valores de cálculos teóricos com os de simulação.

Como pretende-se, neste trabalho, aproximar-se o máximo da realidade, optou-se por utilizar os valores de curto-circuito simulados para efetuar os cálculos de ajustes dos relés.

### 4.3 ETAPA1 - ESTUDO TEÓRICO DA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

Diante dos conceitos apresentados no capítulo 2, foram realizados os cálculos teóricos da proteção de sobrecorrente no sistema-teste. Como os cálculos se repetem, será demonstrado no Apêndice A a coordenação de um trecho do sistema, entre os relés da barra 1 e barra 2, considerando a falta 1.

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 exibe os valores calculados de RTC, ajustes de corrente de atuação, curvas e tempos de operação dos cinco relés posicionados no sistema-teste. Os relés são identificados pelo número da função seguido do número da barra ao qual estão inseridos, por exemplo, o relé de fase 51 da barra 1 é nomeado 51-1.

Tabela 4.2 – Ajustes dos relés do sistema-teste na etapa teórica

Barra	RTC (A)	Relé	<i>Pick up</i> (A)	Curva
1	5/800	51N	0,45	0,1
	5/800	51	6,25	0,11
2	5/250	50	33,75	Instantâneo
	5/250	51	5,25	0,2
3	5/600	51N	0,45	0,26
	5/600	51	4,75	0,21
4	5/100	50	25,75	Instantâneo
	5/100	51	4,75	0,22
5	5/200	51N	0,3	0,29
	5/200	51	2,5	0,33

Tabela 4.3 – Tempos de operação para faltas trifásicas

Falta	Relé	Tempo (s)
1	51-1	0,5079
	51-2	0,9079
2	50-2	0,0200
	51-2	0,5597
	51-3	0,8597
3	51-3	0,7289
	51-4	1,0289
4	50-4	0,0200
	51-4	0,6016
	51-5	0,9016
5	51-5	0,6352

Tabela 4.4 – Tempos de operação para faltas monofásicas

Falta	Relé	Tempo (s)
1	51N-1	0,1565
	51-1	0,4565
	51-2	1,2030
3	51N-3	0,3853
	51-3	0,6853
	51-4	1,3653
5	51N-5	0,3352
	51-5	0,6352

Na Tabela 4.3 das faltas trifásicas, observa-se a filosofia de proteção, apresentada no capítulo 2, sendo aplicada. Para a falta 1, por exemplo, tem-se a atuação da proteção principal, que é o relé 51-1, em 0,5079 s e a atuação do relé de proteção retaguarda, que é o 51-2, em 0,9079 s. Para a falta 2, tem-se a proteção principal, que é o relé 50-2, atuando em um tempo aproximado de um ciclo e o relé 51-2, que também opera como proteção principal da falta 2, em 0,5597 s. A proteção retaguarda da falta 2 é realizada pelo relé 51-3 que atua em 0,8597 s.

Na Tabela 4.4 das faltas monofásicas, também observa-se a filosofia apresentada no capítulo 2. Para a falta 1, por exemplo, tem-se a atuação da proteção principal do relé 51N-1 em 0,1565 s. O relé de fase 51-1 é o relé que está na fase do curto-circuito e também opera como proteção principal da falta 1, atuando em 0,4565 s. A proteção retaguarda da falta 1 é feita pelo relé 51-2, que atua em 1,203 s.

#### 4.4 ETAPA 2 - SIMULAÇÃO NO *SOFTWARE POWER FACTORY*

No Apêndice B, pode-se verificar o roteiro para simulação no *Power Factory* do sistema-teste da Figura 4.1. Nessa seção, serão apresentados os resultados e considerações das simulações estáticas e dinâmicas.

As Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os valores de parametrização dos equipamentos do SEP, além dos valores de tempos de resposta dos cinco relés posicionados no sistema-teste das simulações estáticas e dinâmicas (instantâneas e RMS).

Tabela 4.5 – Ajustes dos relés do sistema-teste na etapa de simulação

Barra	RTC (A)	Relé	<i>Pick up</i> (A)	Curva
1	5/800	51N	0,45	0,1
	5/800	51	6,25	0,11
2	5/250	50	33,75	Instantâneo
	5/250	51	5,75	0,2
3	5/600	51N	0,45	0,26
	5/600	51	4,75	0,21
4	5/100	50	30	Instantâneo
	5/100	51	4,75	0,22
5	5/200	51N	0,3	0,29
	5/200	51	2,5	0,33

Tabela 4.6 – Tempo de operação para faltas trifásicas

Falta	Relé	Tempo (s)		
		Estática	Instantânea	RMS
1	51-1	0,5079	0,5178	0,5186
	51-2	0,8947	0,9125	0,9131
2	50-2	0,0200	0,0239	0,0203
	51-2	0,5895	0,5811	0,5827
	51-3	0,8680	0,8655	0,8650
3	51-3	0,7289	0,7214	0,7223
	51-4	1,035	1,0220	1,0230
4	50-4	0,0200	0,0247	0,0202
	51-4	0,6575	0,5993	0,5986
	51-5	0,9217	0,9177	0,9177
5	51-5	0,7482	0,7487	0,7479

Tabela 4.7 – Tempos de operação para faltas monofásicas

Falta	Relé	Tempo(s)		
		Estática	Instantânea	RMS
1	51N-1	0,2267	0,2272	0,2264
	51-1	0,4583	0,4698	0,4710
	51-2	1,2030	1,1480	1,1490
3	51N-3	0,5895	0,5900	0,5892
	51-3	0,6853	0,6834	0,6827
	51-4	1,4653	1,3200	1,3180
5	51N-5	0,6575	0,6580	0,6572
	51-5	0,7482	0,7487	0,7479

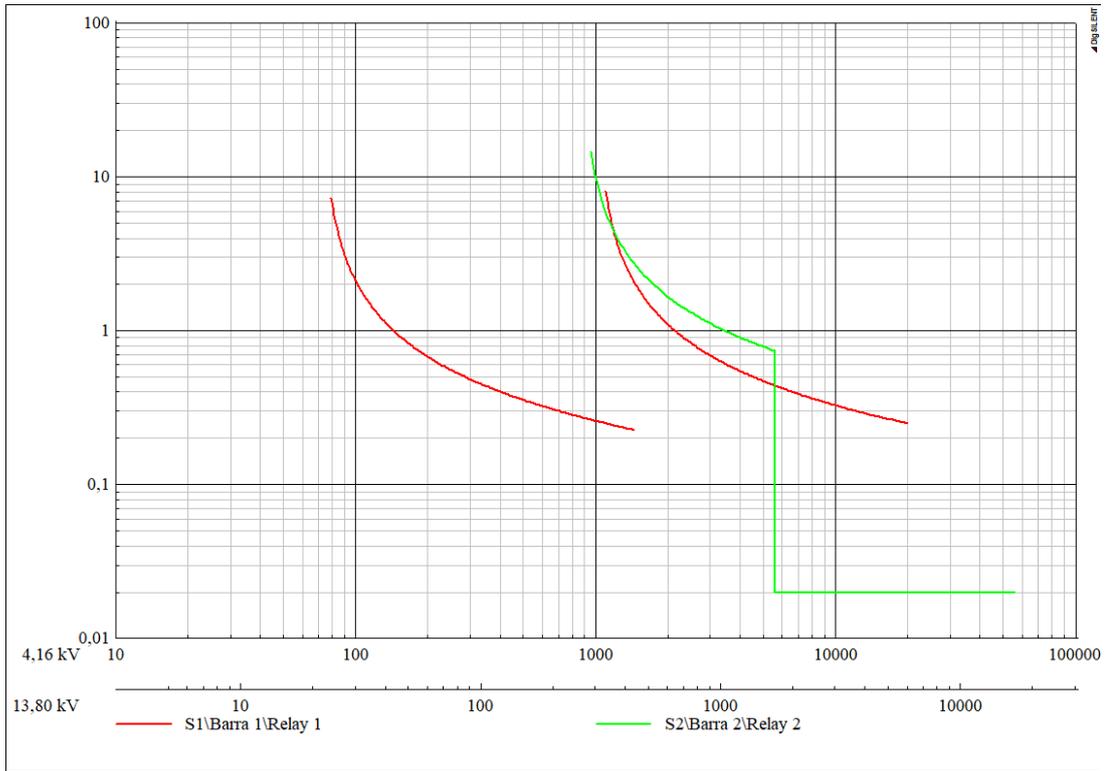
Na Tabela 4.6 das faltas trifásicas, para a falta 1, por exemplo, considerando os resultados das simulações na seguinte ordem: simulação em modo estático, instantânea e RMS, tem-se a atuação da proteção principal, que é o relé 51-1, em 0,5079 s, 0,5178 s e 0,5186 s. A atuação do relé de proteção retaguarda, que é o 51-2, em 0,8947 s, 0,9125 s e 0,9131 s. Para a falta 2, considerando a mesma ordem dos resultados, tem-se a proteção principal, que é o relé 50-2, atuando em um tempo aproximado de um ciclo, 0,0239 s e 0,0203 s. O relé 51-2, que também opera como proteção principal da falta 2, atua em 0,5895 s, 0,5811 s e 0,5827 s. A proteção retaguarda da falta 2 é feita pelo relé 51-3, que atua em 0,868 s, 0,8655 s e 0,8650 s.

Na Tabela 4.7 das faltas monofásicas, para a falta 1, por exemplo, considerando os resultados das simulações na mesma ordem apresentada para as faltas trifásicas, tem-se a atuação da proteção principal, que é o relé 51N-1, em 0,2267 s, 0,2272 s e 0,2264 s. O relé de fase 51-1 é o relé que está na fase do curto-circuito e também opera como proteção principal da falta 1, atuando em 0,4583 s, 0,4698 s e 0,471 s. A proteção retaguarda da falta 1 é feita pelo relé 51-2, que atua em 1,203 s, 1,148 s e 1,149 s.

#### 4.4.1 Simulações Estáticas

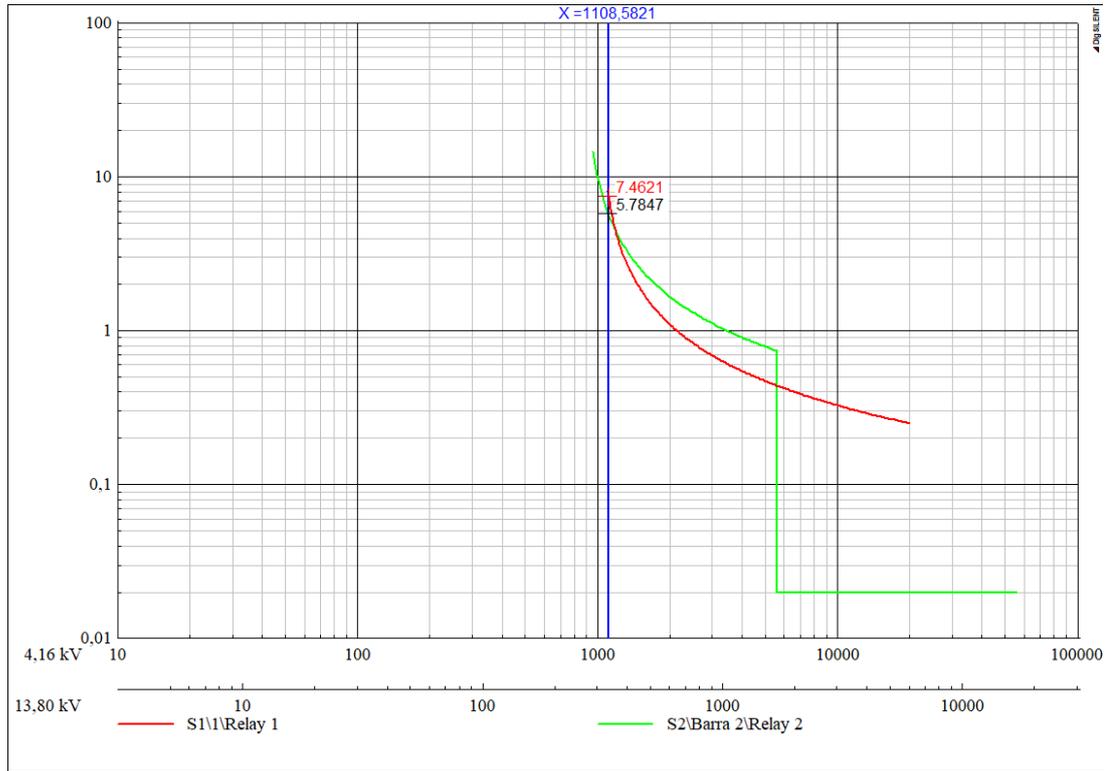
Ao analisar as curvas dos relés do sistema-teste, verificou-se a existência de um erro na coordenação entre os relés 1 e 2. A curva do relé 2 se sobrepôs a do relé 1, como pode-se observar na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Curvas não-coordenadas dos relés 51-1 e 51-2



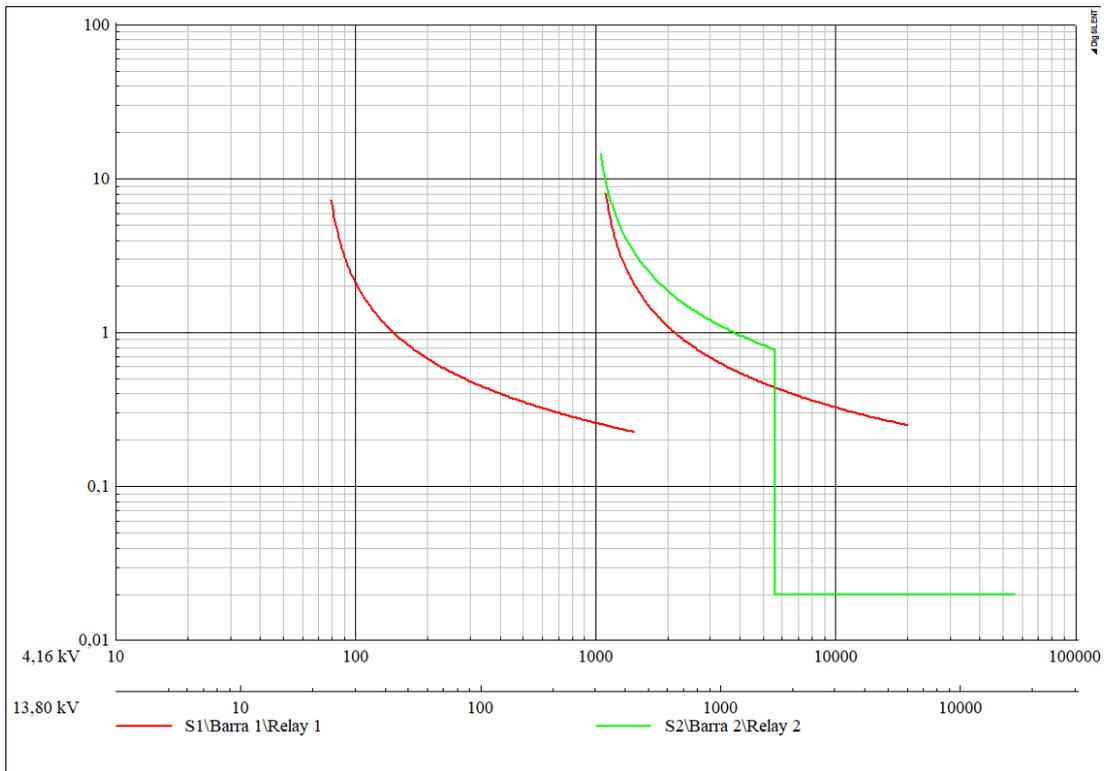
Essa coordenação incorreta ocasiona atuações indevidas em situações de faltas, como pode-se analisar na Figura 4.3, a simulação de uma corrente de falta no final das curvas dos relés de 1108,5821 A e a operação do relé 51-2 em 5,7847 s e a do relé 51-1 em 7,4621 s. Ou seja, o relé 51-2 atuando antes do 51-1, de maneira não-coordenada.

Figura 4.3 – Curvas não-coordenadas dos relés 51-1 e 51-2 - Tempo de Operação



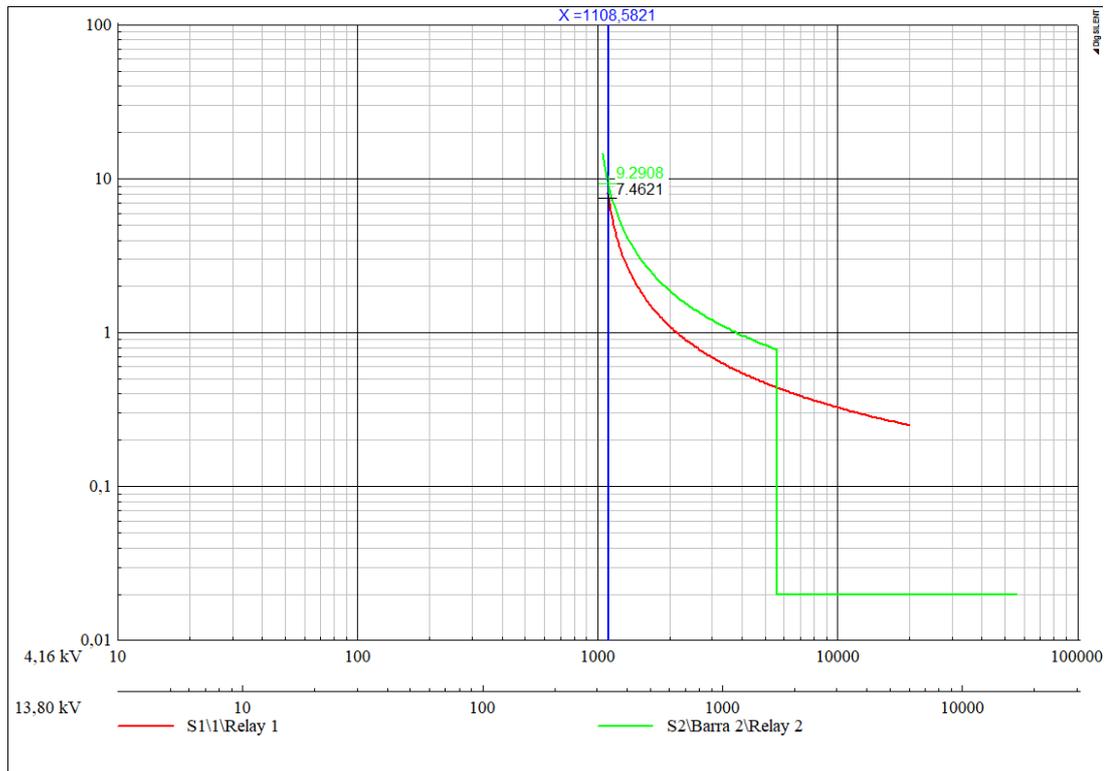
Para solucionar este problema, como o ajuste do *pick up* do relé 2 foi calculado para uma faixa de  $5,0204 \leq I_{pickup} \leq 6,7645A$ , alterou-se o *pick up* que, inicialmente, foi ajustado em 5,25 A para 5,75 A. Dessa forma, observa-se na Figura 4.4 que as curvas de sobrecorrente não estão mais sobrepostas.

Figura 4.4 – Curvas coordenadas dos relés 51-1 e 51-2



Além disso, ao simular o curto-circuito de 1108,5821 A novamente, tem-se a coordenação correta. A operação do relé 51-1 em 7,4621 s e a do 51-2 em 9,2908 s, conforme a Figura 4.5.

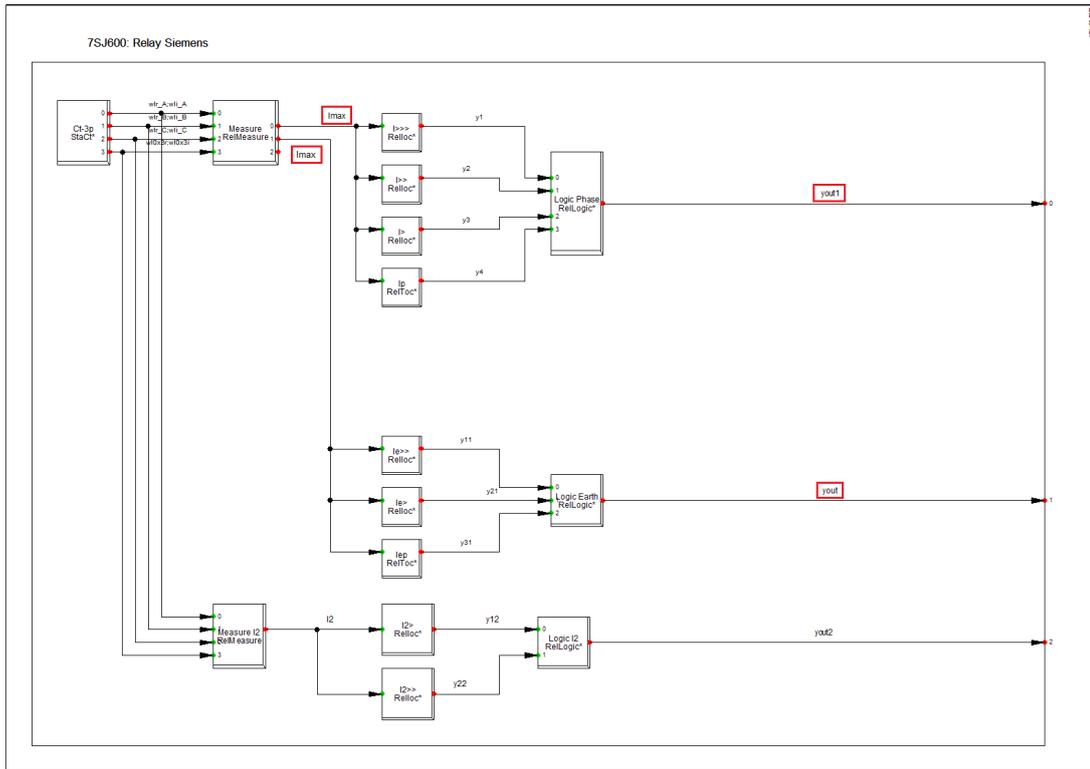
Figura 4.5 – Curvas coordenadas dos relés 51-1 e 51-2 - Tempo de Operação



#### 4.4.2 Simulações Dinâmicas

Na Figura 4.6, tem-se os blocos com as ligações lógicas do relé Siemens 7SJ600 (modelo utilizado para realizar a proteção do sistema-teste), disponibilizado pelo *Power Factory*. Pode-se observar que,  $I_{max}$  é uma variável de leitura dos blocos das funções de fase ( $I>$  e  $I_p$ ) e de neutro ( $I_{ep}$ ). Além disso,  $I_{max}$  também é lida pelos blocos *Logic Phase* e *Logic Earth*. Estes blocos possuem as saídas lógicas *yout1* e *yout2* que representam o *trip* do relé de sobrecorrente. Assim, percebe-se que  $I_{max}$  é a lógica responsável por sensibilizar a operação do relé.

Figura 4.6 – Conexões lógicas do relé Siemens 7SJ600

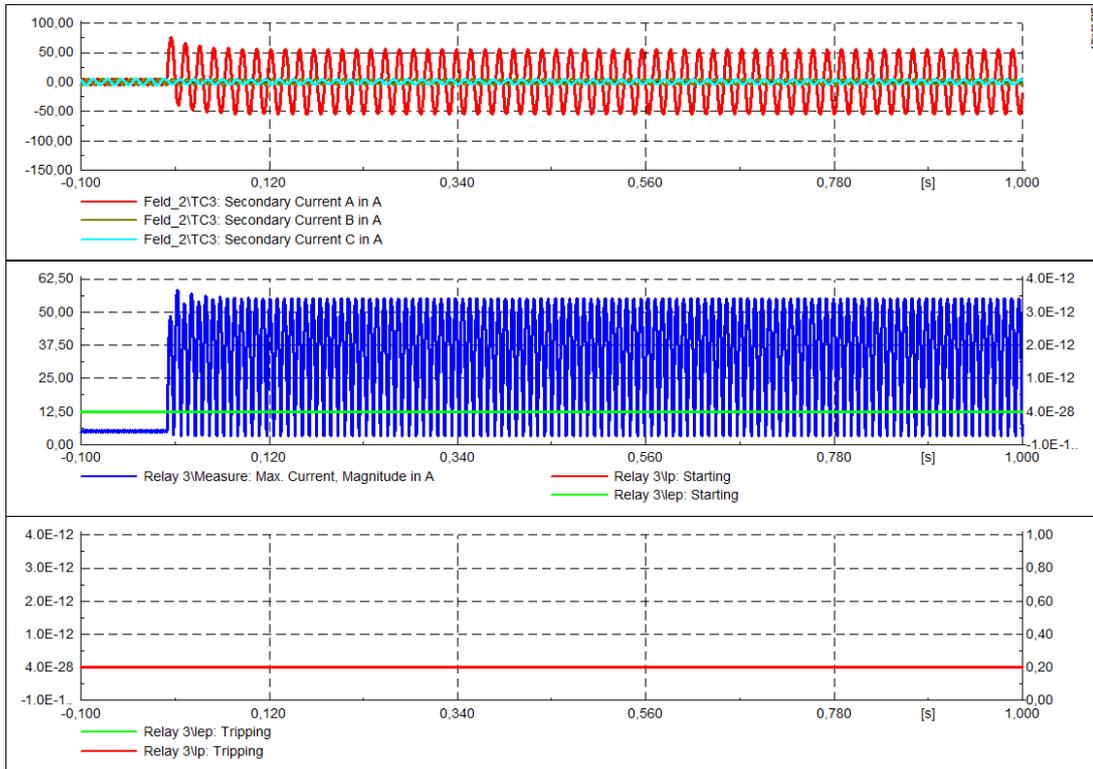


Dessa forma, é importante compreender a atuação de  $I_{max}$  na construção do modelo do relé Siemens, pois com essas informações foi possível resolver os problemas que serão descritos nas seções 4.4.2.1 e 4.4.2.2.

#### 4.4.2.1 Ativação do bloco “RMS Calculation”

Nas simulações dinâmicas instantâneas, surgiram problemas ao simular os curtos-circuitos monofásicos. Para as faltas 3 e 5, foram observadas situações em que os relés não estavam sendo sensibilizados por  $I_{max}$ , que não assumiu uma forma estável. Em vista disso, as lógicas *Starting* dos relés não atuaram, conforme observa-se na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Falta monofásica 3 e lógica *Starting* não sensibilizada



Para a resolução disso, analisando o modelo do relé Siemens descobriu-se que o bloco que faz com que  $I_{max}$  assumia forma para sensibilizar o relé é o RMS Calculation. Este bloco é acessado na função Measure do relé, conforme as Figuras 4.8 - 4.10.

Figura 4.8 – Relé 3 - função Measure

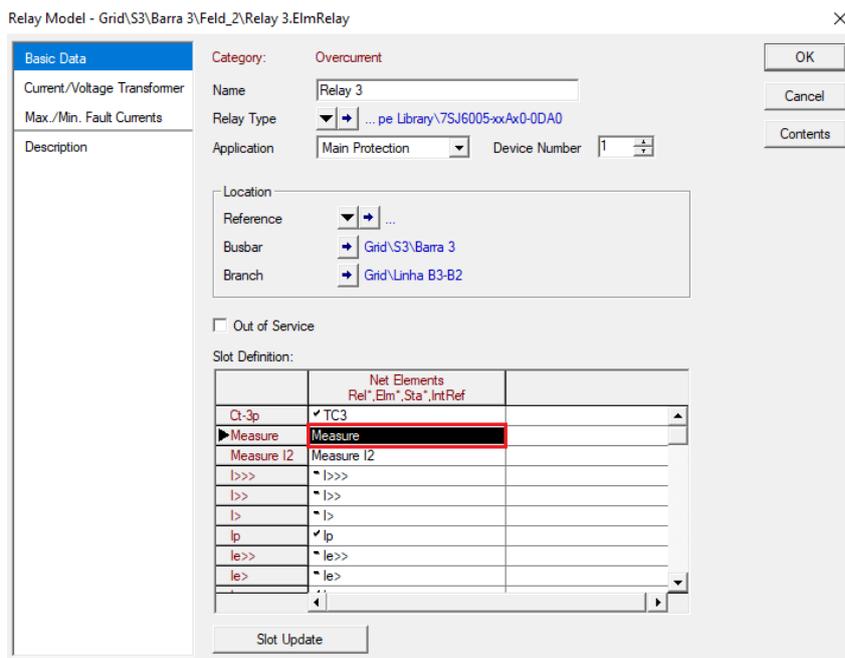


Figura 4.9 – Acessar modelo do relé

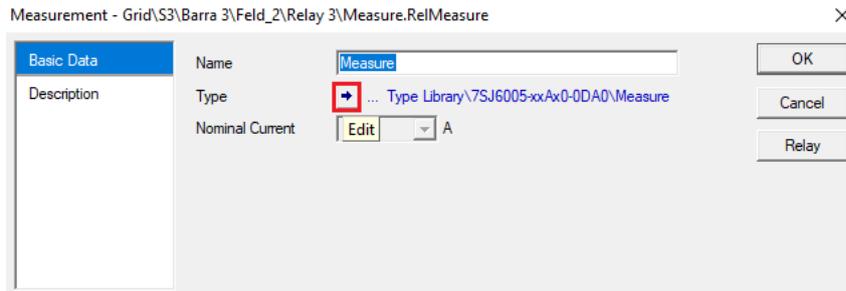
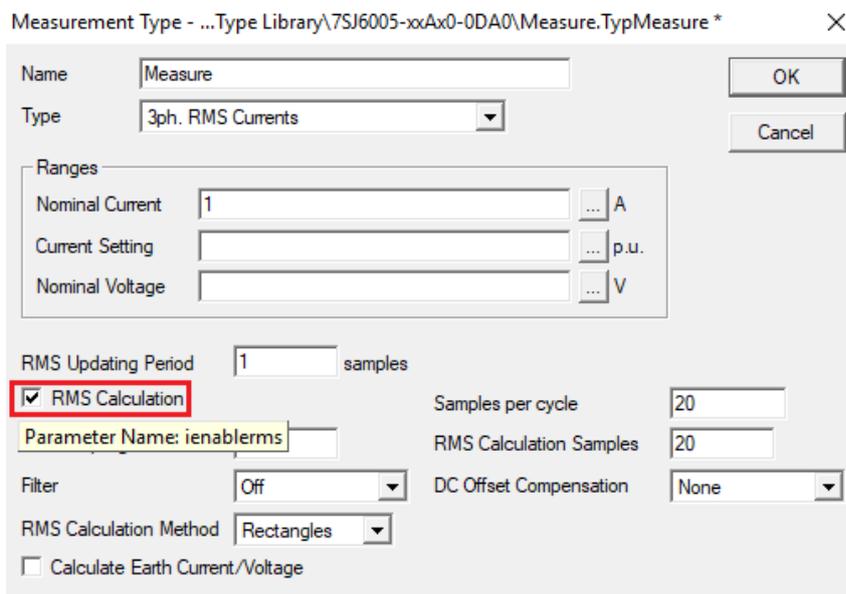
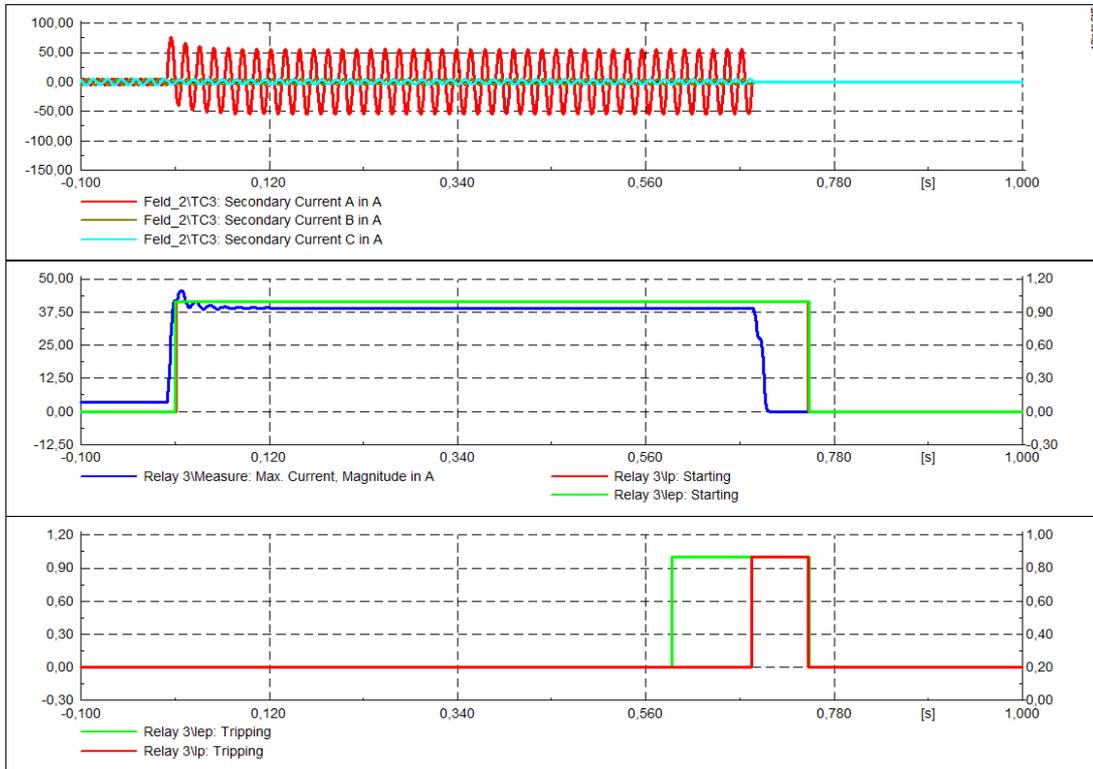


Figura 4.10 – Ativar bloco RMS Calculation



Feito isso, os curtos-circuitos monofásicos foram simulados novamente. Dessa maneira, na Figura 4.11, observa-se que agora  $I_{max}$  possui uma forma definida e a lógica *Starting* do relé 3 entra em operação com a atuação do relé de neutro (gráfico na cor verde -  $I_{ep}$ ) antes da atuação do relé de fase (gráfico na cor vermelha -  $I_p$ ).

Figura 4.11 – Falta monofásica 3 e lógica *Starting* operando

#### 4.4.2.2 Atuação indevida do relé 50-4

Ao parametrizar no *Power Factory* o relé 50-4 com o valor da corrente de ajuste obtido nos cálculos teóricos, observou-se a atuação inadequada do relé nas simulações dinâmicas. Ao simular a falta 3, o relé 50-4 estava operando antes da proteção principal, que é o relé 51-3, conforme pode-se observar na Figura 4.12, que ilustra a janela de comando do *Power Factory*.

Figura 4.12 – Simulação da falta 3 e coordenação incorreta dos relés de proteção

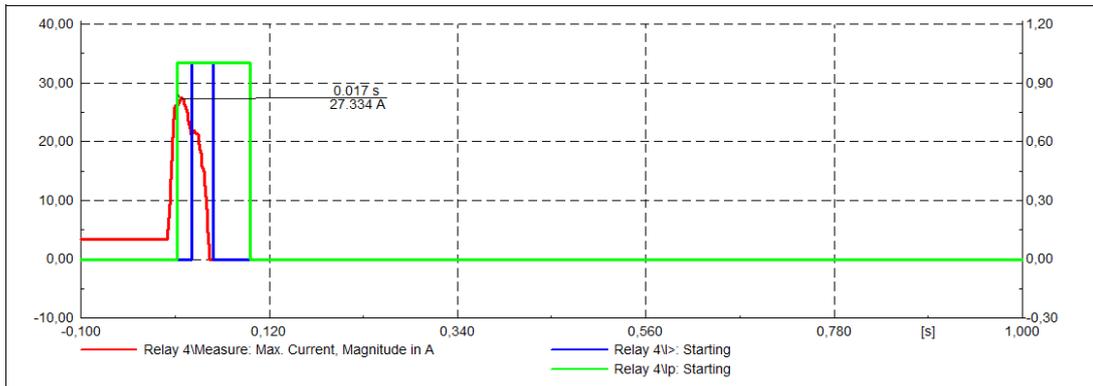
```

DIgSI/info - Element ' Sistema' is reference in 60,0 Hz-system
DIgSI/info - (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
DIgSI/pcl - (t=000:000 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=000:000 ms) 'Grid\S3\3.ElmTerm':
DIgSI/pcl - (t=000:000 ms) 3-Phase Short-Circuit.
DIgSI/pcl - (t=000:000 ms) with Fault Impedance Rf = 0,000000 Ohm Xf = 0,000000 Ohm
DIgSI/pcl - (t=029:692 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=029:692 ms) 'Grid\S4\Barra 4\Feld_1\Relay 4.ElmRelay':
DIgSI/pcl - (t=029:692 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DIgSI/pcl - (t=029:692 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=029:692 ms) 'Grid\S4\CB2.ElmCoup':
DIgSI/pcl - (t=029:692 ms) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DIgSI/info - (t=029:692 ms) Element ' Sistema' is local reference in separated area of '1'

```

Dessa forma, mais uma vez analisou-se Imáx e constatou-se que a corrente que chegava no relé 50-4 era de aproximadamente 27 A, conforme a Figura 4.13.

Figura 4.13 – Análise de Imáx do relé 50-4



Ou seja, a corrente de 27 A era maior que o ajuste do *pick up* do relé, que inicialmente foi parametrizado em 25,75 A. Por essa razão, estava acontecendo a operação indevida.

Para solucionar este problema, alterou-se o *pick up* do relé para 30 A, obtendo assim, a coordenação correta para a falta 3, como pode-se verificar na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Simulação da falta 3 e coordenação correta dos relés de proteção

```

DtgSI/info - (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
DtgSI/pc1 - (t=000:000 ms) -----
DtgSI/pc1 - (t=000:000 ms) 'Grid\S3\3.ElmTerm':
DtgSI/pc1 - (t=000:000 ms) 3-Phase Short-Circuit.
DtgSI/pc1 - (t=000:000 ms) with Fault Impedance Rf = 0,000000 Ohm Xf = 0,000000 Ohm
DtgSI/pc1 - (t=721:438 ms) -----
DtgSI/pc1 - (t=721:438 ms) 'Grid\S3\Barra 3\Feld_2\Relay 3.ElmRelay':
DtgSI/pc1 - (t=721:438 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DtgSI/pc1 - (t=01:022 s) -----
DtgSI/pc1 - (t=01:022 s) 'Grid\S4\Barra 4\Feld_1\Relay 4.ElmRelay':
DtgSI/pc1 - (t=01:022 s) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DtgSI/pc1 - (t=01:022 s) -----
DtgSI/pc1 - (t=01:022 s) 'Grid\S4\CB2.ElmCoup':
DtgSI/pc1 - (t=01:022 s) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DtgSI/info - (t=01:022 s) Element ' Sistema' is local reference in separated area of '1'

```

#### 4.4.2.3 Documentos COMTRADE

Neste trabalho, os documentos COMTRADE são arquivos de simulação que contém os dados das correntes de curto-circuito simuladas no sistema-teste na etapa instantânea. A obtenção desses arquivos é uma das partes mais importantes do trabalho, pois são eles que serão inseridos no *software* da mala de testes para que o equipamento reproduza as correntes simuladas na etapa 2.

Após exportados, os arquivos COMTRADE constam de dois documentos, cada um com extensões ".CFG" e ".DAT", que podem ser gerenciados através de aplicativos de texto de extensão ".txt". É importante observar o que cada um desses arquivos carrega de informações, nos itens I e II tem-se a descrição de conhecimentos necessários acerca dos dados desses arquivos.

- I. No arquivo de extensão .CFG, Figura 4.15, tem-se as correntes no secundário do TC, com os valores de pico por fase. Além disso, deve-se realizar algumas modificações no nome das variáveis exportadas, para que ao importar o COMTRADE no equipamento de testes seja acessível reconhecer as variáveis de correntes que serão utilizadas para os ensaios práticos. Além disso, a frequência da rede elétrica também deve ser modificada para 60 Hz. As informações que devem ser alteradas estão destacadas abaixo.

Figura 4.15 – Alteração de dados do COMTRADE

```

Relé1 - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
DIgSILENT PowerFactory,15000000,2000
4,04A,000
1,TEMPO:b:tnow,,s,0.000000,0.000000,0.000000,0,0,1,1,P
2,Ia:s:I2r_A,,A,0.0010000000,-40.254578,0.000000,2170,99998,1,1,P
3,Ib:s:I2r_B,,A,0.0010000000,-61.868820,0.000000,21011,99998,1,1,P
4,Ic:s:I2r_C,,A,0.0010000000,-61.907272,0.000000,6985,99998,1,1,P
60
1
10000.000000,31000
29/03/2018,15:42:52.900000
29/03/2018,15:42:53.000000
ASCII
1.000000

```

- II. O arquivo de extensão .DAT compreende os valores dos pontos exportados da forma de onda da corrente, esse documento não deve ser modificado.

Além disso, outra observação importante acerca dos documentos COMTRADE é que, neste trabalho, optou-se por exportá-los com as variáveis de corrente no secundário do TCs. Sendo assim, para testar a proteção principal e retaguarda para falta 1, por exemplo, deve-se obter dois COMTRADEs, os arquivos do TC1 e os arquivos do TC2.

No Apêndice B, o roteiro da simulação no *Power Factory* inclui o passo a passo de como exportar os arquivos COMTRADE do *software*.

## 4.5 ETAPA 3 - ENSAIOS PRÁTICOS

Nos ensaios práticos, utilizando o equipamento de testes conectado a relés comerciais, foram realizados ensaios de sobrecorrente automáticos e manuais, em que a mala de testes origina as correntes que serão injetadas nos relés. Além disso, também foram executados ensaios com arquivos COMTRADE, os quais contém os dados das correntes de curto-circuito simulados no *Power Factory* e que após carregados no *software* do equipamento de testes, tem-se a reprodução das correntes.

No apêndice C, pode-se verificar o roteiro de configuração da mala de testes e dos relés Pextron para realização dos ensaios práticos do sistema-teste da Figura 4.1. Nessa seção, serão apresentados os resultados e considerações destes ensaios.

### 4.5.1 Ensaios de Sobrecorrente Automáticos e Manuais

Nos testes manuais e automáticos, as correntes são originadas pelo próprio equipamento de testes e visam a validação dos tempos de operação dos relés, a partir dos ajustes de *pick up* configurados e com base na exatidão dos relés Pextron.

Nos ensaios automáticos, parametriza-se o relé que se deseja testar com a exatidão do relé Pextron que é de 5%, conforme o manual do fabricante PEXTRON (2016), e escolhe-se um intervalo de corrente, que depende da conexão feita no *hardware* da mala de testes, para que a curva de sobrecorrente desse relé seja criada na faixa de correntes configurada.

Já nos ensaios manuais, faz-se o mesmo procedimento de ajuste do relé que se pretende testar, porém só é possível injetar um valor de corrente por vez, que também depende da conexão do *hardware* do equipamento de testes.

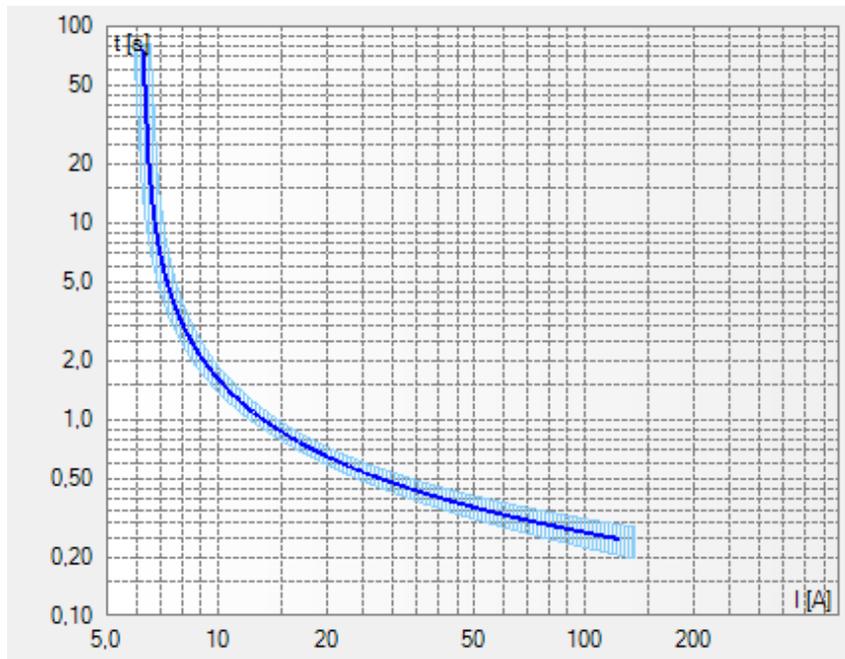
Os procedimentos realizados para a execução desses testes estão apresentados na seção C.2 do Apêndice C. Nas próximas seções serão abordados os resultados acerca desses ensaios.

#### 4.5.1.1 Ensaios de Sobrecorrente Automáticos

Como já mencionado anteriormente, os ensaios automáticos classificam os tempos de operação dos relés em aprovado ou reprovado com base na faixa de tolerância admitida pelo relé Pextron, que é de 5%. Dessa forma, foram testados todos os relés do sistema-teste da Figura 4.1 que obtiveram o status de aprovação nos testes de tempo. Em virtude disso, serão apresentados os dados mais importantes retirados do relatório de ensaio gerado pelo próprio equipamento de testes para o relé 51-1, além de apresentar as curvas de sobrecorrentes criadas nos testes para todos os relés do sistema-teste.

Inicialmente, ao parametrizar o relé a ser testado, a característica de sobrecorrente, representada na Figura 4.16 é criada, onde é possível visualizar a faixa de tolerância de tempo em azul claro ao redor da curva.

Figura 4.16 – Curva característica de sobrecorrente dos relés 51 de fase



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio

Na Tabela 4.8, pode-se observar a injeção de correntes numa faixa de 7 A a 40 A no relé 51-1 do sistema-teste. Além disso, na coluna da direita verifica-se o status de aprovação ou reprovação do relé.

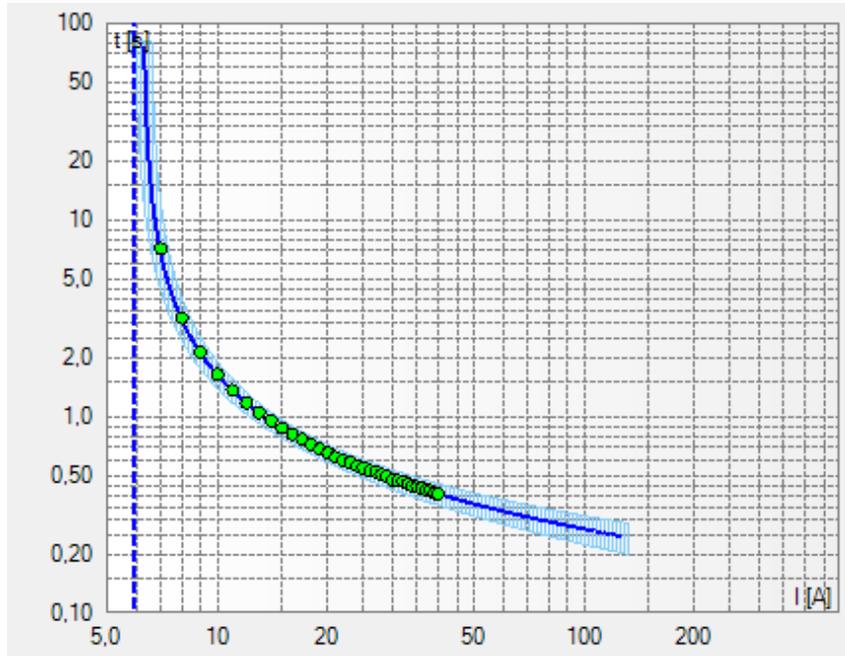
Tabela 4.8 – Tabela de tempos do ensaio automático com o relé 51-1

Corrente	Região	Atuou	tOp Nom (s)	tOp Real (s)	Status
7,00 A	Op.	Sim	6,7900	7,1800	Aprovado
8,00 A	Op.	Sim	3,1100	3,1900	Aprovado
9,00 A	Op.	Sim	2,1000	2,1400	Aprovado
10,00 A	Op.	Sim	1,6300	1,6500	Aprovado
11,00 A	Op.	Sim	1,3500	1,3700	Aprovado
12,00 A	Op.	Sim	1,1700	1,1800	Aprovado
13,00 A	Op.	Sim	1,0400	1,0500	Aprovado
14,00 A	Op.	Sim	0,9471	0,9597	Aprovado
15,00 A	Op.	Sim	0,8719	0,8805	Aprovado
16,00 A	Op.	Sim	0,8115	0,8165	Aprovado
17,00 A	Op.	Sim	0,7618	0,7711	Aprovado
18,00 A	Op.	Sim	0,7203	0,7290	Aprovado
19,00 A	Op.	Sim	0,6849	0,6870	Aprovado
20,00 A	Op.	Sim	0,6543	0,6594	Aprovado
21,00 A	Op.	Sim	0,6277	0,6262	Aprovado
22,00 A	Op.	Sim	0,6042	0,6038	Aprovado
23,00 A	Op.	Sim	0,5833	0,5885	Aprovado
24,00 A	Op.	Sim	0,5646	0,5664	Aprovado
25,00 A	Op.	Sim	0,5478	0,5516	Aprovado
26,00 A	Op.	Sim	0,5325	0,5331	Aprovado
27,00 A	Op.	Sim	0,5186	0,5259	Aprovado
28,00 A	Op.	Sim	0,5058	0,5112	Aprovado
29,00 A	Op.	Sim	0,4941	0,5011	Aprovado
30,00 A	Op.	Sim	0,4832	0,4784	Aprovado
31,00 A	Op.	Sim	0,4732	0,4760	Aprovado
32,00 A	Op.	Sim	0,4638	0,4718	Aprovado
33,00 A	Op.	Sim	0,4551	0,4571	Aprovado
34,00 A	Op.	Sim	0,4469	0,4473	Aprovado
35,00 A	Op.	Sim	0,4393	0,4431	Aprovado
36,00 A	Op.	Sim	0,4321	0,4365	Aprovado
37,00 A	Op.	Sim	0,4253	0,4263	Aprovado
38,00 A	Op.	Sim	0,4189	0,4231	Aprovado
39,00 A	Op.	Sim	0,4129	0,4120	Aprovado
40,00 A	Op.	Sim	0,4072	0,4095	Aprovado

Fonte: adaptado de relatório CONPROVE de ensaio.

Com isso, tem-se a curva de sobrecorrente construída para o relé 51-1, como mostra a Figura 4.17.

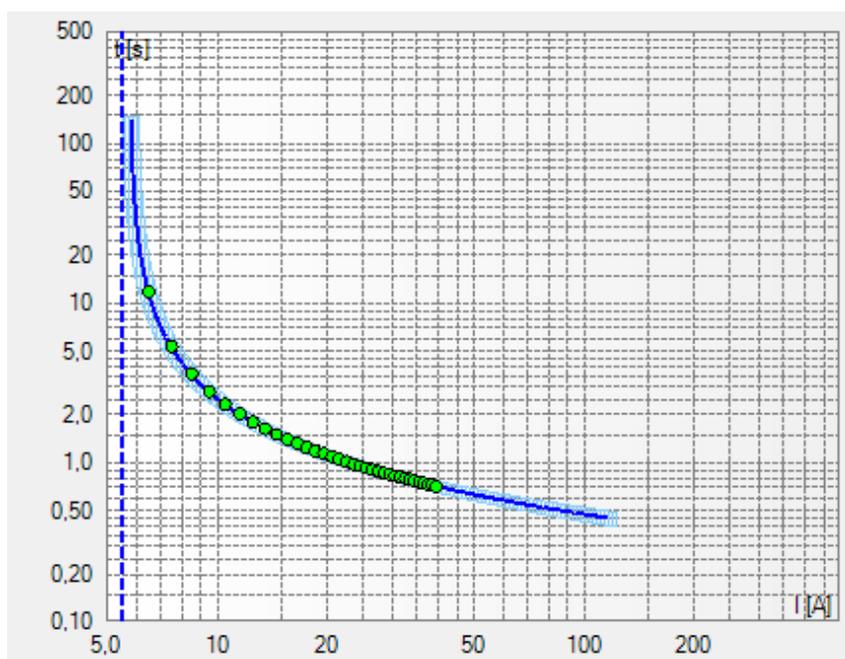
Figura 4.17 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-1 para faltas trifásicas



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

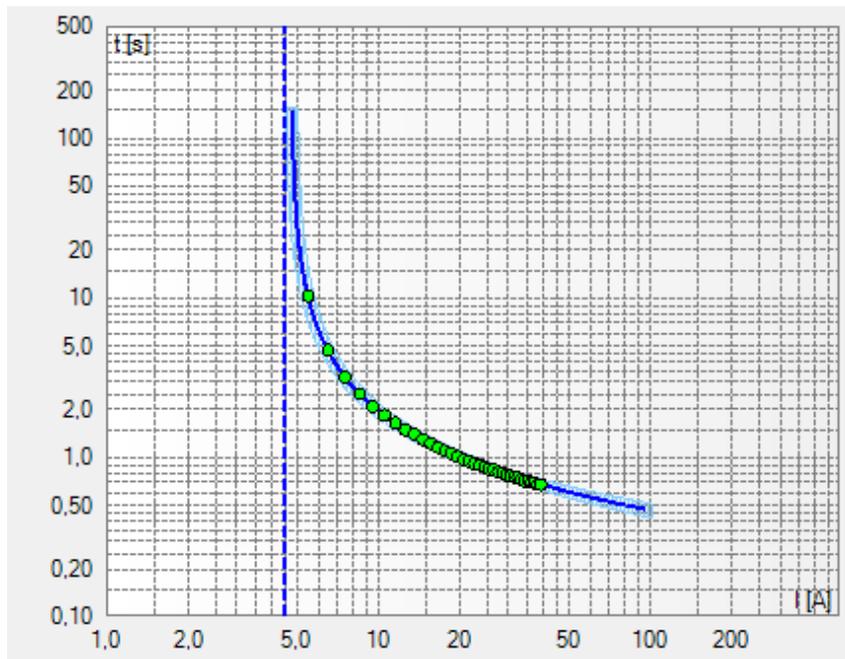
Nas Figuras 4.18, 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 estão apresentadas as curvas características de tempo construídas nesses ensaios para os relés 51-2, 51-3, 51-4 e 51-5 do sistema-teste.

Figura 4.18 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-2 para faltas trifásicas



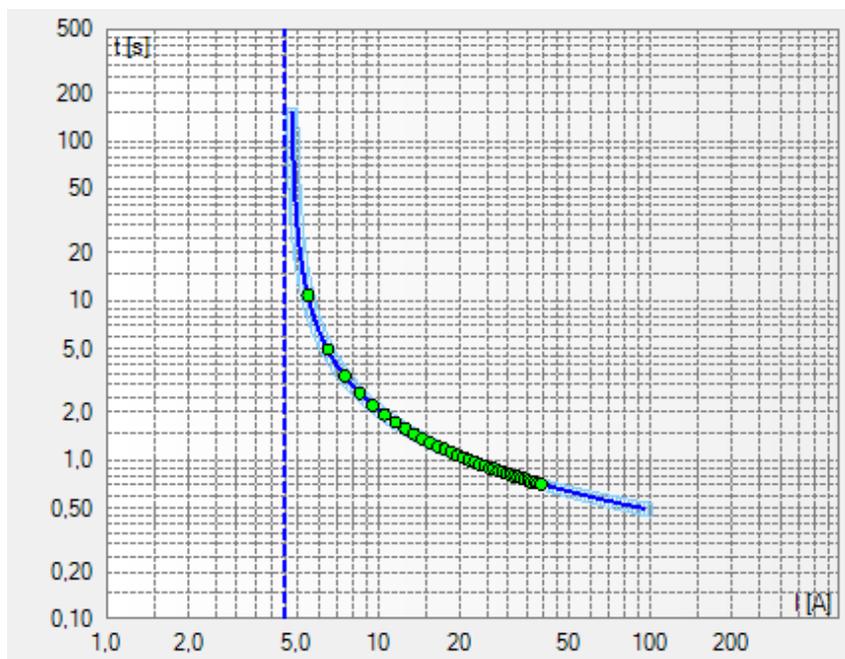
Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

Figura 4.19 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-3 para faltas trifásicas



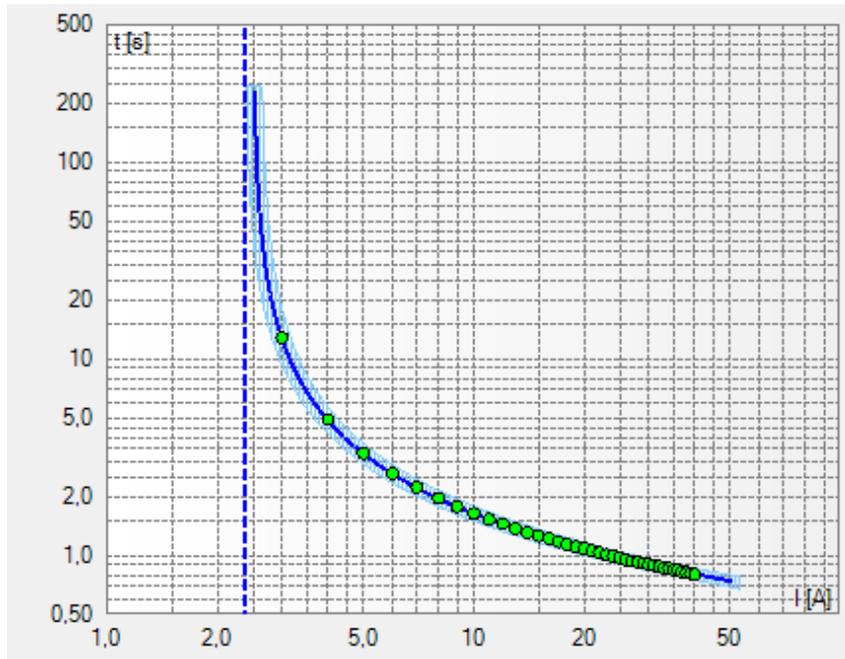
Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

Figura 4.20 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-4 para faltas trifásicas



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

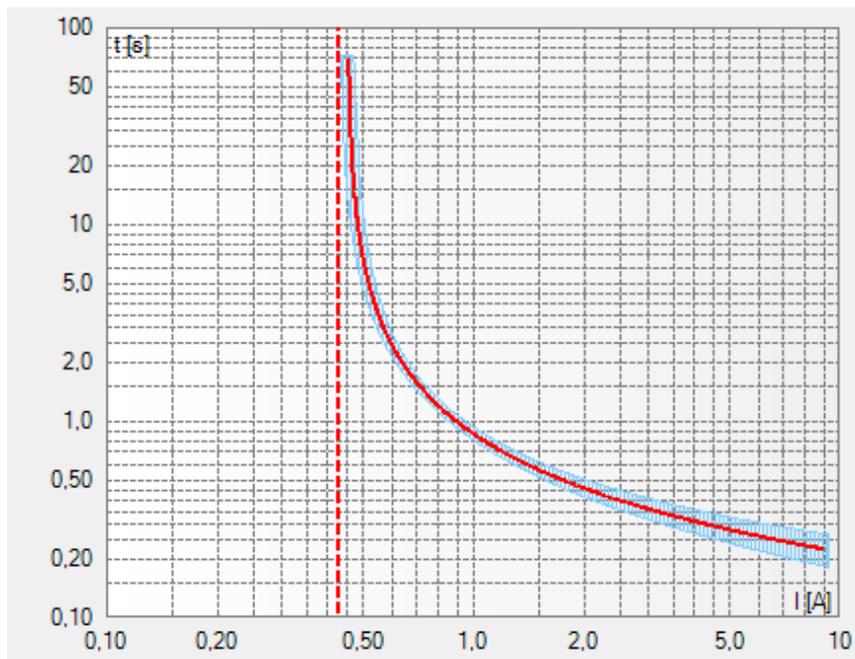
Figura 4.21 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51-5 para faltas trifásicas



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

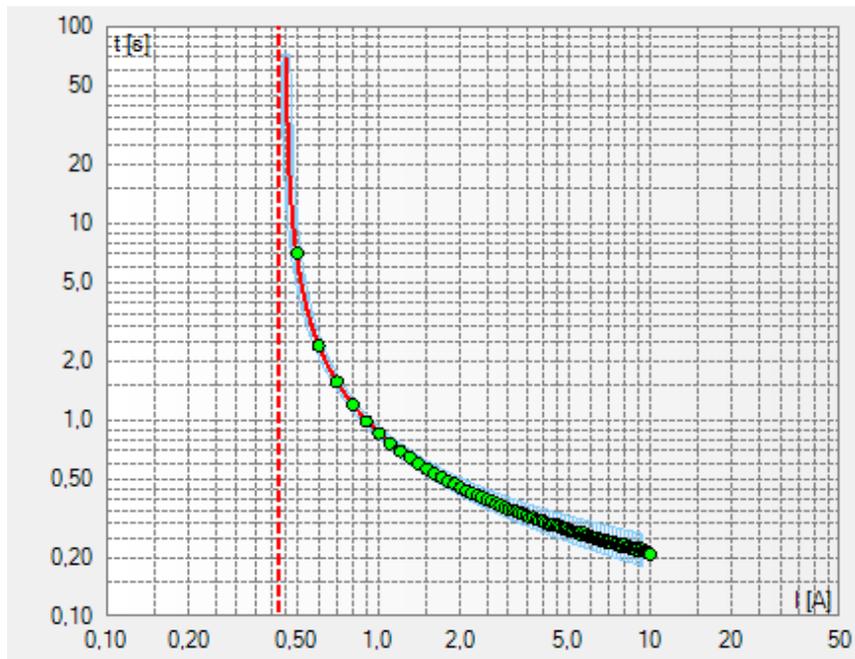
Para os relés 51 de neutro, a característica de sobrecorrente criada está representada na Figura 4.22, onde é possível visualizar a faixa de tolerância de tempo em azul claro ao redor da curva. Além disso, nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 são apresentadas as curvas características de tempo construídas nesses ensaios para os relés 51N-1, 51N-3 e 51N-5 do sistema-teste.

Figura 4.22 – Curva característica de sobrecorrente dos relés 51 de neutro



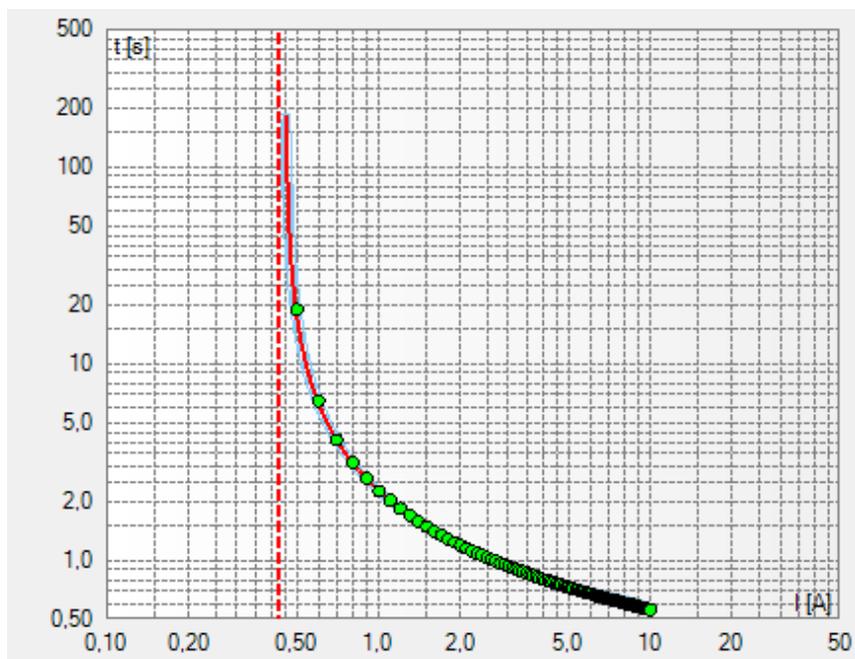
Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

Figura 4.23 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51N-1 para faltas monofásicas



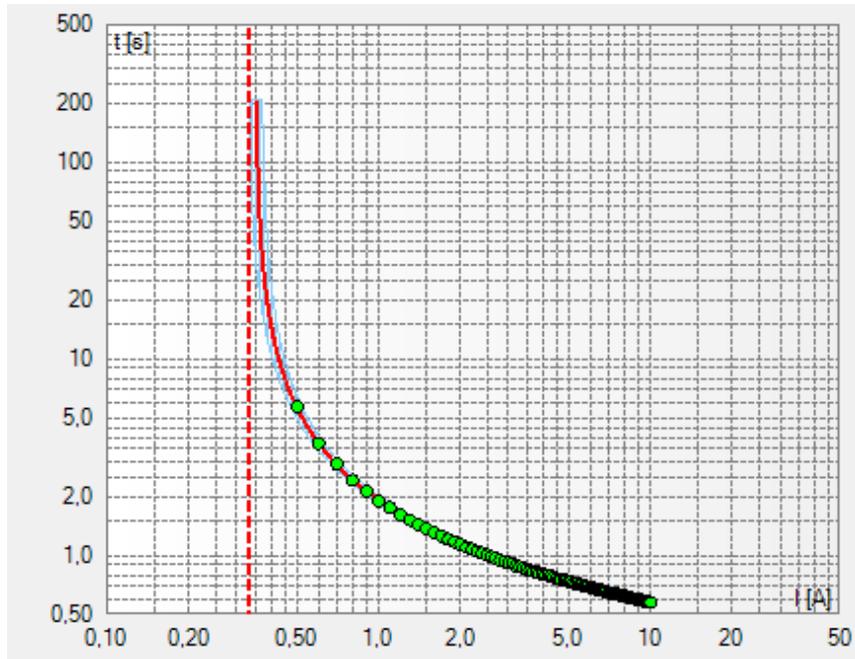
Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

Figura 4.24 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51N-3 para faltas monofásicas



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

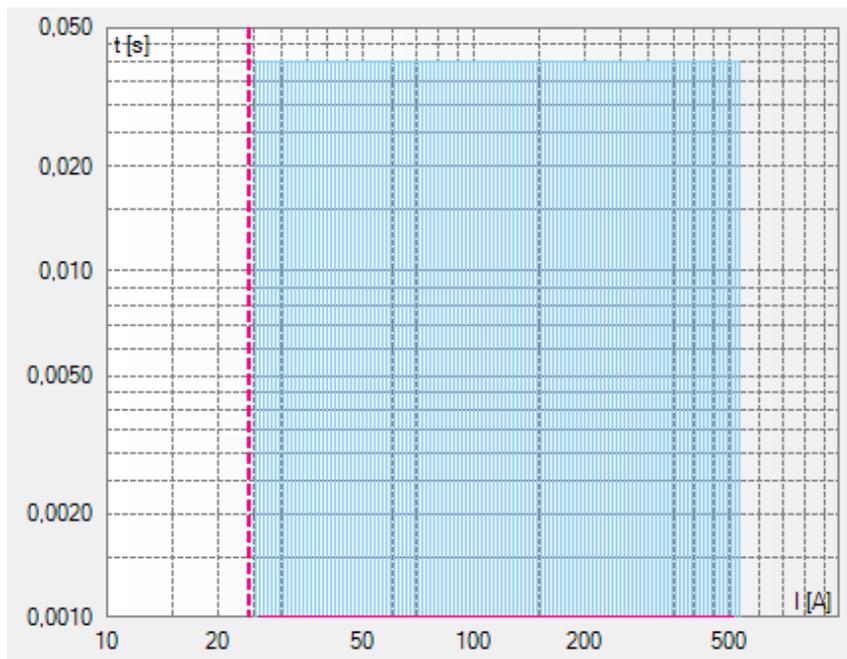
Figura 4.25 – Curva característica de sobrecorrente do relé 51N-5 para faltas monofásicas



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

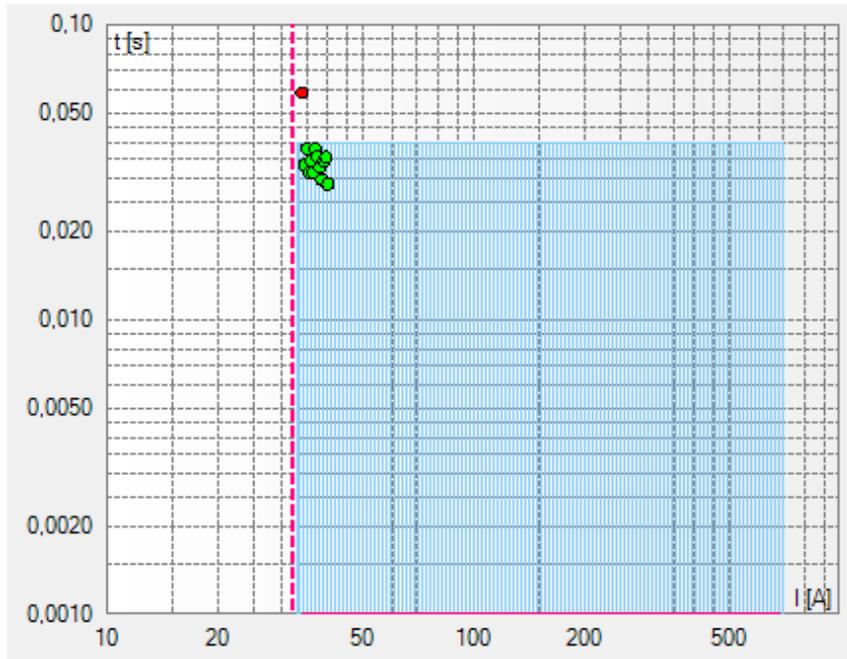
Para os relés 50, a característica de sobrecorrente criada está representada na Figura 4.26, onde é possível visualizar a faixa de tolerância de tempo em azul claro. Além disso, nas Figuras 4.27 e 4.28 são apresentadas as curvas características de tempo construídas nesses ensaios para os relés 50-2 e 50-4 do sistema-teste.

Figura 4.26 – Curva característica de sobrecorrente dos relés 50



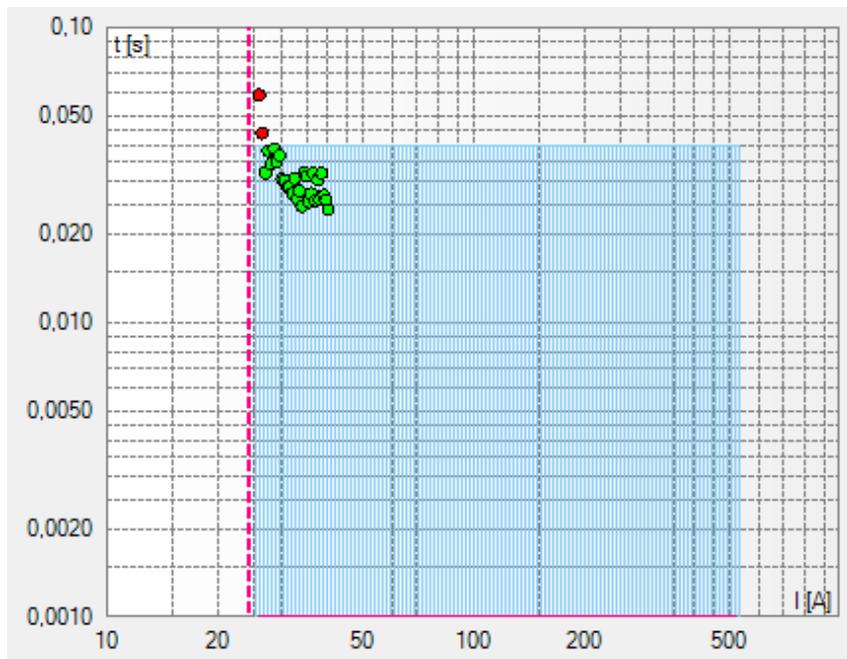
Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

Figura 4.27 – Curva característica de sobrecorrente do relé 50-2 para faltas trifásicas



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

Figura 4.28 – Curva característica de sobrecorrente do relé 50-4 para faltas trifásicas



Fonte: relatório CONPROVE de ensaio.

As reprovações decorrentes dos ensaios com relés instantâneos, vistas nas Figuras 4.27 e 4.28, devem-se ao fato da faixa de injeção de corrente no relé começar muito próxima ao *pick up*.

#### 4.5.1.2 Ensaio de Sobrecorrente Manuais

Como já mencionado, os testes manuais, assim como os automáticos, validam o tempo de atuação dos relés com base na parametrização de seus ajustes e da exatidão do relé comercial. Contudo, diferentemente dos ensaios de sobrecorrente automáticos, que permitem definir uma faixa de injeção de corrente, os testes de sobrecorrente manual permitem injetar apenas um valor de corrente por vez. Em vista disso, realizou-se o ensaio manual de dois relés do sistema-teste da Figura 4.1, que foram os relés 51-1 e 51-2. Nas Tabelas 4.9 e 4.10, são apresentados os tempos de operação obtidos para cada corrente injetada.

Tabela 4.9 – Tempos do ensaio manual com relé 51-1

Corrente(A)	Tempo(s)	Corrente(A)	Tempo(s)
7	7,0600	24	0,5599
8	3,1700	25	0,5522
9	2,1300	26	0,5330
10	1,6500	27	0,5196
11	1,3700	28	0,5058
12	1,1800	29	0,5020
13	1,0500	30	0,4845
14	0,9541	31	0,4726
15	0,8724	32	0,4663
16	0,8231	33	0,4573
17	0,7674	34	0,4486
18	0,7817	35	0,4382
19	0,6896	36	0,4354
20	0,6500	37	0,4296
21	0,6271	38	0,4256
22	0,6004	39	0,4108
23	0,5854	40	0,4125

Tabela 4.10 – Tempos do ensaio manual com relé 51-2

Corrente(A)	Tempo(s)	Corrente(A)	Tempo(s)
7	7,2800	24	0,9669
8	4,2800	25	0,9437
9	3,1400	26	0,9099
10	2,5400	27	0,8877
11	2,1600	28	0,8701
12	1,9000	29	0,8522
13	1,7100	30	0,8326
14	1,5700	31	0,8110
15	1,4600	32	0,7989
16	1,3600	33	0,7844
17	1,2800	34	0,7764
18	1,2200	35	0,7597
19	1,1600	36	0,7501
20	1,1100	37	0,7396
21	1,0600	38	0,7322
22	1,0300	39	0,7194
23	0,9883	40	0,7048

Além disso, pode-se visualizar nas Figuras 4.29 e 4.30, as capturas de tela dos ensaios manuais para a injeção de 11 A no relé 51-1 e 21 A no relé 51-2.

Figura 4.29 – Injeção de 11 A de corrente no relé 51-1

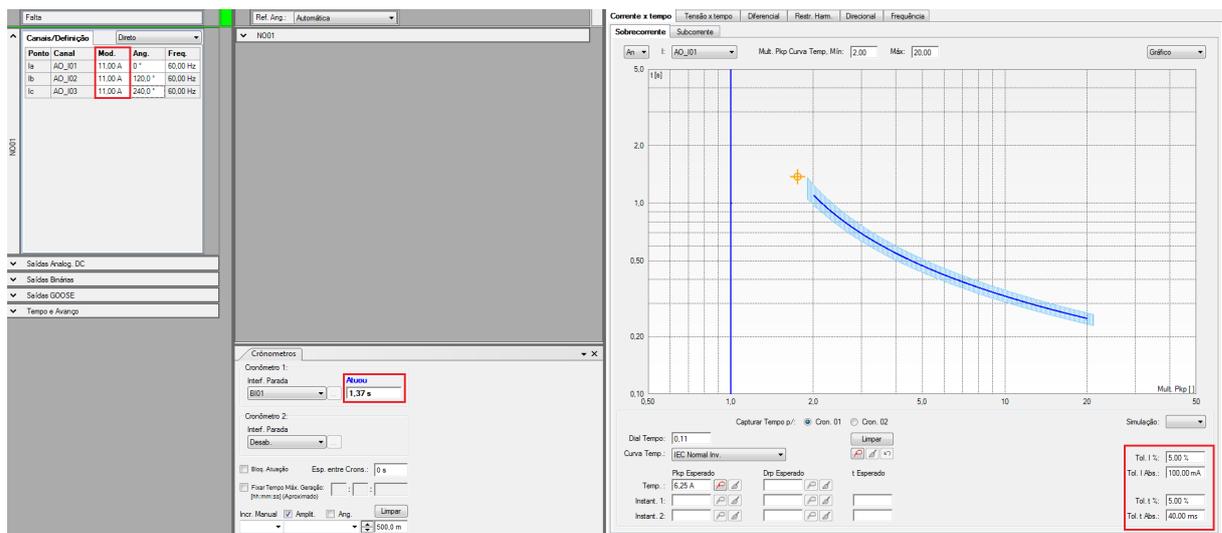
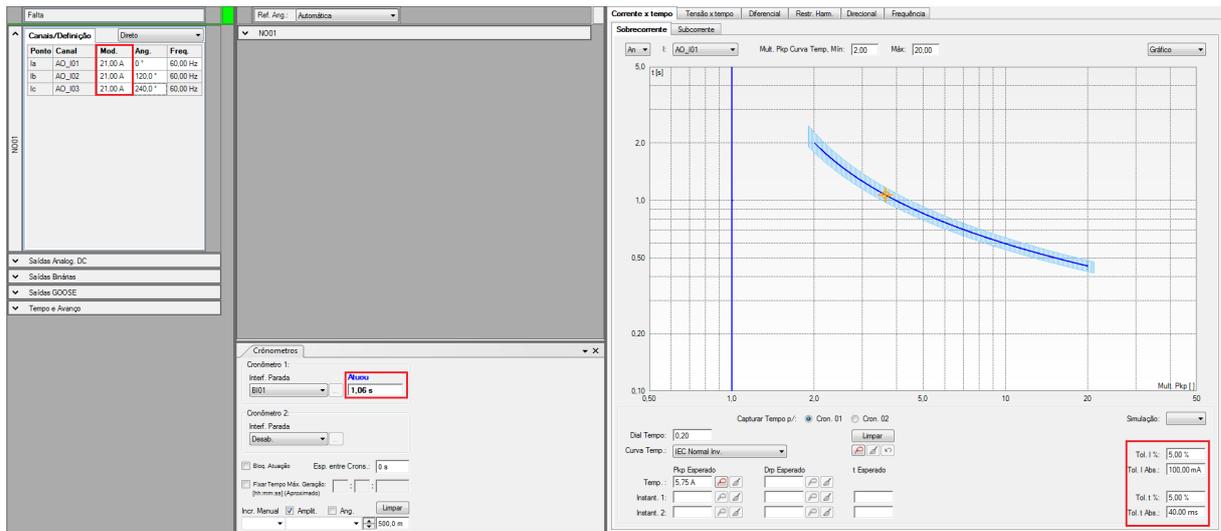


Figura 4.30 – Injeção de 21 A de corrente no relé 51-2



Nos testes manuais, todos os tempos foram aprovados. Além disso, é interessante observar que os tempos da Tabela 4.9 são muito próximos aos da Tabela 4.8, o que confirma a legitimidade dos testes de sobrecorrente automáticos e manuais. Dessa forma, neste trabalho, os testes manuais tiveram por função a validação dos testes de sobrecorrente automáticos.

#### 4.5.2 Ensaios de sobrecorrente utilizando arquivos COMTRADE

Os ensaios com COMTRADE, como já mencionado anteriormente, são os testes executados com arquivos que contêm dados de simulação. Dessa maneira, para posterior comparação e validação da teoria aplicada à prática. Nas próximas seções, serão apresentados resultados e considerações importantes acerca dos ensaios realizados com COMTRADES.

##### 4.5.2.1 Ajustes e tempos de operação dos relés Pextron

Nas Tabelas 4.11 a 4.17 são apresentados os valores de parametrização dos relés Pextron com o respectivo ganho utilizado no equipamento de testes para a realização dos ensaios com COMTRADES das faltas trifásicas e monofásicas do sistema-teste da Figura 4.1. O ganho citado na frase anterior refere-se às variáveis que foram multiplicadas pelos valores de curto-circuito e pelas correntes de ajuste dos relés nos ensaios para que se tivesse redução das correntes de falta devido às limitações do equipamento de testes. O item II da seção 4.5.2.2, destina-se somente a esclarecimentos sobre isso.

Tabela 4.11 – Ajustes Pextron para falta trifásica 1

<b>Falta 1</b>					
Relé 1: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	20%	160	6,25	200	0,11
Relé 2: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	20%	50	5,75	57,5	0,2

Tabela 4.12 – Ajustes Pextron para falta trifásica 2

<b>Falta 2</b>					
Relé 2: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
50	15%	50	33,75	253,125	Instantâneo
51	15%	50	5,75	43,125	0,2
Relé 3: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	25%	120	4,75	142,5	0,21

Tabela 4.13 – Ajustes Pextron para falta trifásica 3

<b>Falta 3</b>					
Relé 3: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	20%	120	4,75	114	0,21
Relé 4: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	30%	20	4,75	28,5	0,22

Tabela 4.14 – Ajustes Pextron para falta trifásica 4

<b>Falta 4</b>					
Relé 4: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
50	15%	20	30	90	Instantâneo
51	15%	20	4,75	14,25	0,22
Relé 5: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	20%	40	2,5	20	0,33

Tabela 4.15 – Ajustes Pextron para falta trifásica 5

<b>Falta 5</b>					
Relé 5: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	8%	40	2,5	8	0,33

Tabela 4.16 – Ajustes Pextron para falta monofásica 1

<b>Falta 1</b>					
Relé 1: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	20%	160	6,25	200	0,11
51N	20%	160	0,45	14,4	0,1
Relé 2: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	30%	50	5,75	86,25	0,2

Tabela 4.17 – Ajustes Pextron para falta monofásica 3

<b>Falta 3</b>					
Relé 3: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	20%	120	4,75	114	0,21
51N	20%	120	0,45	10,8	0,26
Relé 4: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	50%	20	4,74	28,5	0,22

Tabela 4.18 – Ajustes Pextron para falta monofásica 5

<b>Falta 5</b>					
Relé 5: Função	Ganho na Mala	RTC	Pickup sem ganho(A)	Pickup com ganho(A)	DT
51	15%	40	2,5	15	0,33
51N	15%	40	0,35	2,1	0,29

Além disso, nas Tabelas 4.19 e 4.20 pode-se verificar os valores dos tempos de reposta dos relés do sistema-teste nos ensaios com COMTRADE.

Tabela 4.19 – Tempo de operação para faltas trifásicas

Falta	Relé	Tempo (s)
1	51-1	0,5117
	51-2	0,9100
2	50-2	0,0289
	51-2	0,5717
	51-3	0,8576
3	51-3	0,7073
	51-4	1,0200
4	50-4	0,0218
	51-4	0,5939
	51-5	0,9200
5	51-5	0,6284

Tabela 4.20 – Tempo de operação para faltas monofásicas

Falta	Relé	Tempo (s)
1	51N-1	0,1552
	51-1	0,4669
	51-2	1,1600
3	51N-3	0,3855
	51-3	0,6696
	51-4	1,3200
5	51N-5	0,3886
	51-5	0,7175

Na Tabela 4.19 das faltas trifásicas, para a falta 1, por exemplo, tem-se a atuação da proteção principal, que é o relé 51-1, em 0,5117 s e a atuação do relé de proteção retaguarda, que é o 51-2, em 0,91 s. Para a falta 2, tem-se a proteção principal, que é o relé 50-2, atuando em 0,0289 s. O relé 51-2, que também opera como proteção principal da falta 2, atua em 0,5717 s. A proteção retaguarda da falta 2 é feita pelo relé 51-3, que atua em 0,8576 s.

Na Tabela 4.20 das faltas monofásicas, para a falta 1, por exemplo, tem-se a atuação da proteção principal, que é o relé 51N-1, em 0,1552 s. O relé de fase 51-1 é o relé que está na fase do curto-circuito e também opera como proteção principal da falta 1, atuando em 0,4669 s. A proteção retaguarda da falta 1 é do relé 51-2, que atua em 1,16 s.

#### 4.5.2.2 Configuração da Mala de testes

Nos ensaios utilizando os arquivos COMTRADE, tem-se observações importantes sobre as configurações do equipamento de testes que serão descritas nos itens I-III.

##### I. Análise da proteção principal e retaguarda

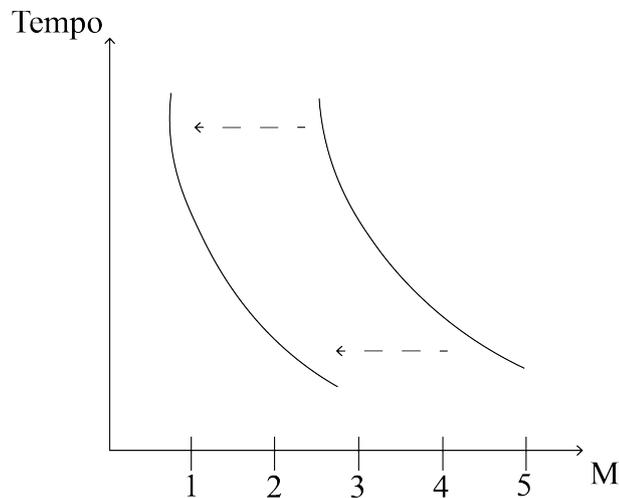
Nos ensaios com COMTRADEs, pretende-se analisar a proteção principal e retaguarda para um curto-circuito. Desse modo, necessitou-se utilizar a configuração de *hardware* da Figura C.6 do Apêndice C, de maneira que se tenha injeção de corrente nas três fases do relé de proteção principal e nas três fases do relé de proteção retaguarda. Para isso, os arquivos COMTRADE devem ser importados para os nós 1 e 2. No nó 1, foi carregado o COMTRADE que contém as correntes da falta trifásica 1 no secundário do TC1. Já no nó 2, foi carregado o COMTRADE que contém as correntes da falta trifásica 1 no secundário do TC2, conforme a Figura C.13 do Apêndice C.

## II. Determinação do ganho de corrente

Quando selecionadas as correntes nas fases A-B-C, dos arquivos COMTRADE, seus valores excediam 20 A. Para solucionar este problema, foram fundamentais os conhecimentos sobre a curva característica do relé de sobrecorrente apresentadas na Figura 2.3.

O eixo identificado pela letra M representa o múltiplo da Equação Característica da curva referenciada na Equação 2.10. Então, como a Equação do múltiplo M é a Equação 2.11, ao multiplicar por uma variável (ganho) a corrente de curto-circuito  $I_{op}$  e corrente de atuação  $I_{pickup}$  do relé, não se tem alterações no tempo de atuação, apenas um deslocamento horizontal proporcional da curva, conforme ilustrado na Figura 4.31.

Figura 4.31 – Deslocamento da curva de sobrecorrente



Fonte: elaborado pela autora.

## III. Tempo de pré-falta

Após analisar os relatórios de ensaios práticos, notou-se que os valores dos tempos de operação dos relés são registrados desde o momento da pré-falta, configurada no *Power Factory*, conforme observa-se nas Figuras 4.32 e 4.33.

Figura 4.32 – Simulação da falta 1 no *Power Factory*

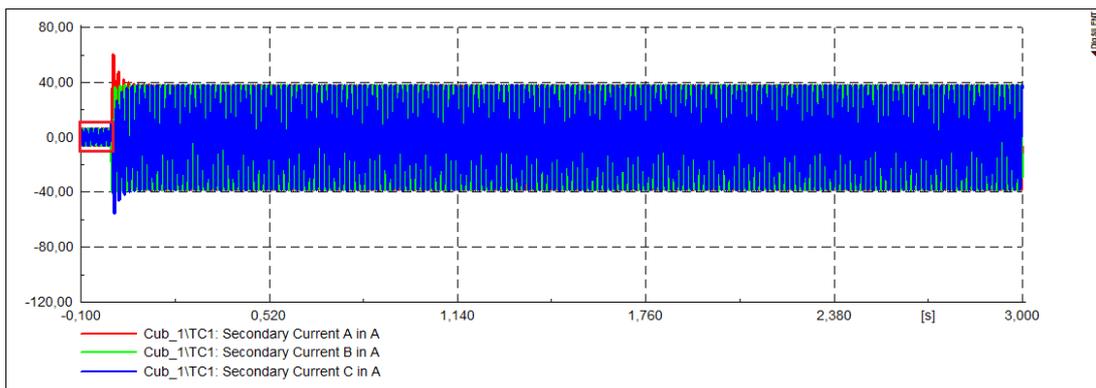
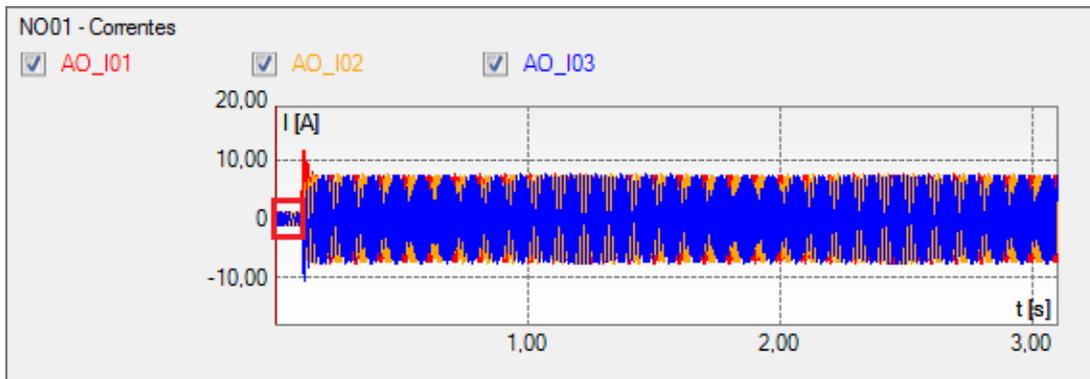
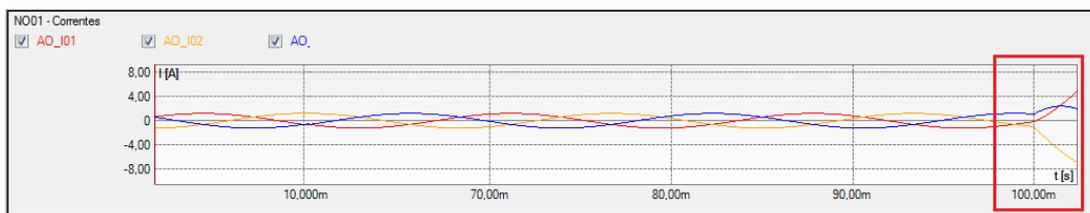


Figura 4.33 – Forma de onda da falta 1 no *software* da mala de testes



Ao aproximar a imagem da falta 1 carregada no *software* do equipamento de testes, confirma-se que a duração da pré falta é de 100 ms, Figura 4.34.

Figura 4.34 – Análise do tempo de pré-falta



Sendo assim, para posteriormente comparar os valores de tempos de resposta dos relés, é necessário que seja desconsiderado o tempo de pré-falta. Desse modo, retira-se 100 ms dos tempos registrados nos relatórios dos ensaios práticos.

#### 4.5.2.3 Parametrização dos relés Pextron

Nos ensaios utilizando os arquivos COMTRADE, tem-se considerações importantes sobre a parametrização dos relés que serão descritas nos itens I -III.

##### I. Ajuste dos relés utilizando o valor do ganho das correntes

Como demonstrado no item II da seção 4.5.2.2, foi necessário a utilização de variáveis de ganho para redução dos valores dos curtos-circuitos simulados. Com isso, esses valores também foram utilizados para ajustar os *pick up* dos relés Pextron, conforme as Tabelas ?? e ??.

##### II. Mudança do *pick up* do relé 51N-5 devido limitações dos relés Pextron

As limitações de ajuste dos relés Pextron apresentadas na Tabela 4.21, mostram que para relés 51N não é possível inserir um valor de *pick up* menor que 0,048 A.

Tabela 4.21 – Limites de ajuste dos relés Pextron

$I_{Partida}$	Faixa de ajuste
50	0,10...100 A(x RTC FN)
51	0,04...6,50 A(x RTC FN)
51N	i) 0,048...6,50 A (x RTC FN) p/ IN N/D=0 ii) 0,012...1,625 A (x RTC FN) p/ IN N/D=01

Fonte: retirada de (PEXTRON, 2016).

No caso da simulação do ensaio para falta monofásica 5, foi utilizado um ganho de 15% na mala de testes. Como o *pick up* ajustado inicialmente era de 0,3 A, o valor multiplicado pelo ganho resultaria em um número inferior a 0,048 A. Dessa maneira, optou-se por definir um valor de ajuste com base na faixa calculada na etapa 1 dos cálculos teóricos que é de  $0,1569 \leq I_{pickup} \leq 0,75$  A. Assim, alterou-se o valor de *pick up* do relé 51N-5 para 0,35 A.

### III. Parametrização do relé 50-4:

Na simulação no *Power Factory*, ocorreu uma atuação incorreta do relé 50-4 quando ajustado com a corrente de *pick up* em 25,75 A, devido a lógica do modelo do relé Siemens, utilizado na simulação.

Nos ensaios com a mala de testes e os relés Pextron, foi testado o ajuste de 25,75 A para verificar se ocorreria a mesma atuação incorreta. Porém, como previsto, não aconteceu, pois o projeto do modelo do relé Pextron é diferente do Siemens. Ou seja, a lógica de operação do relé Pextron não é a mesma que nos Siemens, que têm  $I_{máx}$  como componente lógica. Porém, para maior precisão nas posteriores comparações entre os tempos de resposta dos relés, optou-se por utilizar o mesmo ajuste da simulação, que é de 30 A.

## 4.6 COMPARAÇÕES DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO PARA FALTAS TRIFÁSICAS

Na Tabela 4.22 são apresentados os tempos de operação dos relés de sobrecorrente obtidos de forma teórica ( $T_{calculado}$ ), por meio de simulação instantânea no *Power Factory* ( $T_{simulado}$ ) e por meio de ensaios práticos ( $T_{real}$ ), para as faltas trifásicas (f1-f5).

É importante ressaltar que, os tempos das simulações utilizados para as comparações, tanto para faltas trifásicas como monofásicas, são oriundos das simulações instantâneas, pelo motivo dessa simulação se aproximar mais da realidade, o que já foi comentado na seção 3.4.

Tabela 4.22 – Tempos de operação da proteção para faltas trifásicas

Falta	Relé	Tempo de operação (s)		
		$T_{calculado}$	$T_{simulado}$	$T_{real}$
f1	51-1	0,5079	0,5178	0,5117
	51-2	0,9079	0,9125	0,9100
f2	50-2	0,0200	0,0239	0,0289
	51-2	0,5597	0,5811	0,5717
	51-3	0,8597	0,8655	0,8576
f3	51-3	0,7289	0,7214	0,7073
	51-4	1,0289	1,0220	1,0200
f4	50-4	0,0200	0,0247	0,0218
	51-4	0,6016	0,5993	0,5939
	51-5	0,9016	0,9177	0,9200
f5	51-5	0,6352	0,7487	0,6284

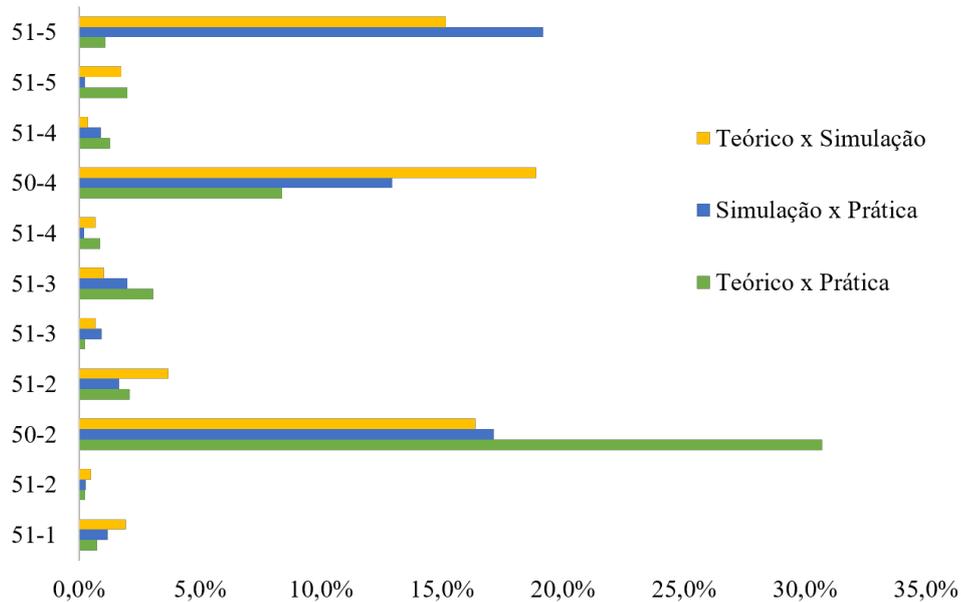
A Tabela 4.23 indica os erros relativos oriundos das comparações dos valores da Tabela 4.22 entre as três etapas.

Tabela 4.23 – Tabela de erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas trifásicas

Falta	Relé	$T_{calculado}/T_{real}$	$T_{simulado}/T_{real}$	$T_{calculado}/T_{simulado}$
f1	51-1	0,7465%	1,1948%	1,9184%
	51-2	0,2308%	0,2712%	0,5006%
f2	50-2	30,6999%	17,1344%	16,3705%
	51-2	2,0922%	1,6505%	3,6818%
	51-3	0,2484%	0,9220%	0,6675%
f3	51-3	3,0582%	2,0032%	1,0343%
	51-4	0,8725%	0,1961%	0,6751%
f4	50-4	8,3830%	12,9272%	18,8707%
	51-4	1,2897%	0,9073%	0,3789%
	51-5	2,0000%	0,2527%	1,7517%
f5	51-5	1,0902%	19,1525%	15,1590%

Para uma melhor análise visual, o gráfico da Figura 4.35 ilustra os erros apresentados na Tabela 4.23.

Figura 4.35 – Erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas trifásicas



Fonte: elaborado pela autora.

Ao analisar os dados da Tabela 4.22 e o gráfico da Figura 4.35, percebe-se que os maiores erros obtidos são nas comparações dos relés 50, conforme a Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Erros relativos percentuais obtidos nos relés 50

Relé	$T_{calculado}/T_{real}$	$T_{simulado}/T_{real}$	$T_{calculado}/T_{simulado}$
50-2	30,6999%	17,1344%	16,3705%
50-4	8,3830%	12,9272%	18,8707%

Esses valores consideráveis de erros devem-se ao fato de, por exemplo, nos cálculos teóricos considera-se um tempo de atuação de um ciclo para os relés instantâneos. Contudo, nas outras etapas isso não é válido, visto que, tanto na simulação quanto na prática, os modelos de relés utilizados são de fabricantes diferentes e possuem projetos distintos. Além disso, eles dispõem de algoritmos próprios para o tempo do relé 50, os quais não é possível obter acesso.

O outro cenário que obteve valores consideráveis de erros é o relé 51-5, conforme a Tabela 4.25.

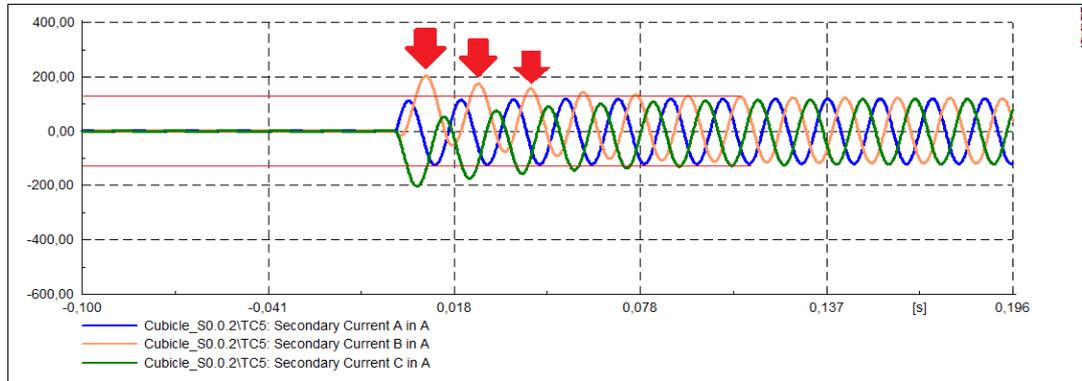
Tabela 4.25 – Erros relativos percentuais no relé 51-5 para faltas trifásicas

Relé	$T_{calculado}/T_{real}$	$T_{simulado}/T_{real}$	$T_{calculado}/T_{simulado}$
51-5	1,0902%	19,1525%	15,1590%

Analisando os valores da Tabela 4.25, entre cálculo teórico e ensaios práticos não se observou erros consideráveis. Entretanto, nas comparações com a simulação existem erros signifi-

cativos. A explicação para tal é a componente assimétrica. Um curto-circuito trifásico próximo a barra de geração possui uma elevada componente de assimetria, que é possível observar ao simular a falta 5 no *Power Factory*, como demonstrado na Figura 4.36.

Figura 4.36 – Simulação da falta trifásica 5 e sinalização dos picos de corrente



Como nos cálculos teóricos não se leva em consideração a componente assimétrica, concluiu-se que no equipamento de testes o pico de corrente também não foi considerado. Já na simulação esse valor é levado em conta. Em vista disso, tem-se uma pequena variação no tempo de operação dado pelo *software*.

Os demais cenários obtiveram erros menores que 4%.

#### 4.7 COMPARAÇÕES DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO PARA FALTAS MONOFÁSICAS

Na Tabela 4.26, são apresentados os valores de cálculos teóricos, simulação instantânea com o *Power Factory* e de ensaios práticos dos tempos de resposta dos relés para as faltas monofásicas (f1-f5).

Tabela 4.26 – Tempos de operação da proteção para faltas monofásicas

Faltas	Relé	Tempo de operação (s)		
		$T_{calculado}$	$T_{simulado}$	$T_{real}$
f1	51N-1	0,1565	0,2272	0,1552
	51-1	0,4565	0,4698	0,4669
	51-2	1,2030	1,1480	1,1600
f3	51N-3	0,3853	0,5900	0,3855
	51-3	0,6853	0,6834	0,6696
	51-4	1,3653	1,3200	1,3200
f5	51N-5	0,3352	0,6580	0,3886
	51-5	0,6352	0,7486	0,7175

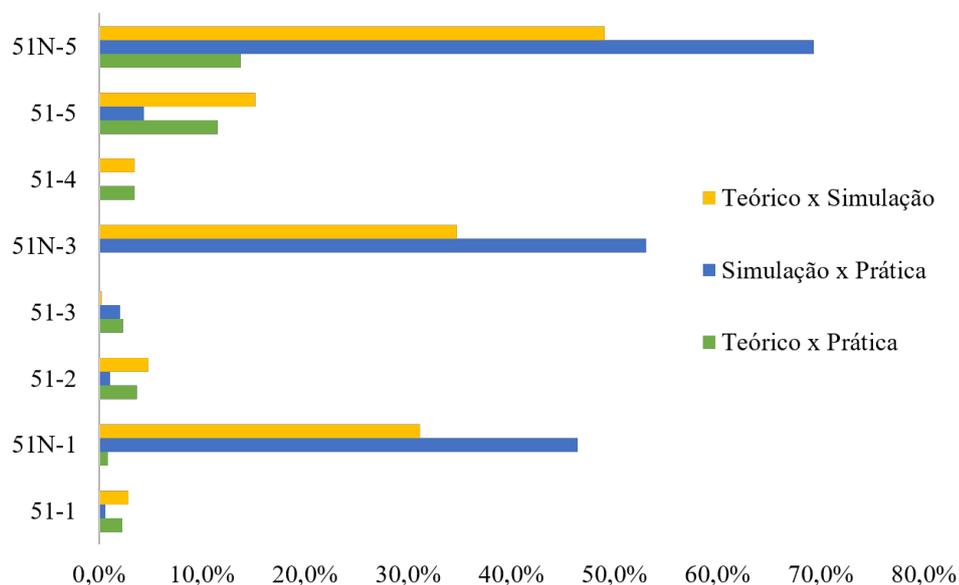
A Tabela 4.27 indica os erros relativos oriundos das comparações dos valores da Tabela 4.26 entre as três etapas.

Tabela 4.27 – Tabela de erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas monofásicas

Falta	Relé	$T_{calculado}/T_{real}$	$T_{simulado}/T_{real}$	$T_{calculado}/T_{simulado}$
f1	51N-1	0,8636%	46,4314%	31,1189%
	51-1	2,2275%	0,6123%	2,8225%
	51-2	3,7069%	1,0345%	4,7909%
f3	51N-3	0,0571%	53,0349%	34,6927%
	51-3	2,3386%	2,0622%	0,2708%
	51-4	3,4318%	0,0000%	3,4318%
f5	51N-5	13,7439%	69,3217%	49,0578%
	51-5	11,4691%	4,3353%	15,1477%

Para uma melhor análise visual, o gráfico da Figura 4.37 ilustra os erros apresentados na Tabela 4.27.

Figura 4.37 – Erros relativos percentuais resultantes das comparações para faltas monofásicas



Fonte: elaborado pela autora.

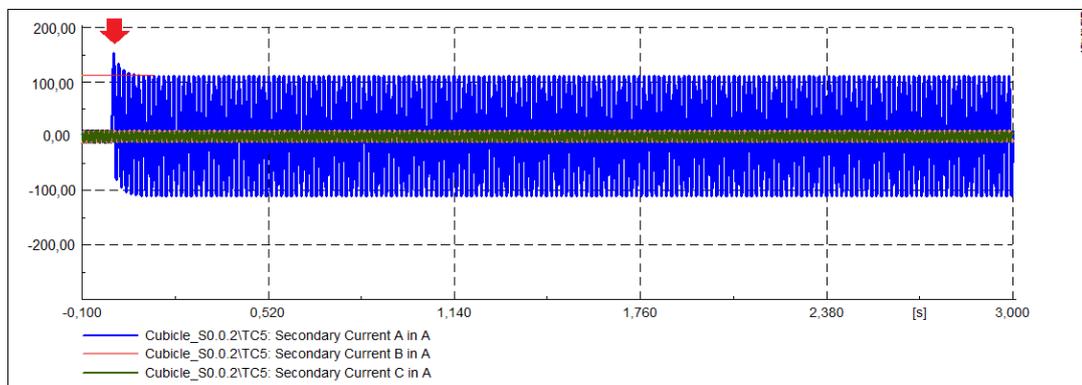
Observando os dados da Tabela 4.26 e o gráfico da Figura 4.37, os tempos dos relés 51 de fase para as faltas monofásicas não tiveram erros relativos relevantes, exceto no caso do relé 51-5, em que se pode observar erros na faixa de 10% a 15%, conforme mostra a Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Erros percentuais obtidos no relé 51-1 para faltas monofásicas

Relé	$T_{calculado}/T_{real}$	$T_{calculado}/T_{simulado}$
51-5	11,4691%	15,1477%

Analisando os valores da Tabela 4.28, observa-se que existem erros apenas nas comparações com cálculo teórico. A Figura 4.38 é a simulação instantânea da falta monofásica 5. Ao analisar graficamente o curto-circuito monofásico 5, observa-se que existe uma pequena componente de assimetria. É importante essa análise para que se possa compreender os erros oriundos das comparações para a simulação dessa falta.

Figura 4.38 – Simulação da falta monofásica 5 e sinalização do pico de corrente



Nesse cenário da falta monofásica 5, observou-se que nos ensaios práticos obteve-se um tempo próximo ao tempo de simulação. Ao analisar a Tabela 4.1, percebe-se que os valores de curto-circuito monofásico e trifásico 5 são praticamente idênticos. Dessa forma, o tempo de atuação nos cálculos teóricos e na simulação para a falta monofásica 5 são os mesmos que para a falta trifásica 5, conforme mostra as Tabelas 4.22 e 4.26. Já nos ensaios práticos, se observamos novamente as Tabelas 4.22 e 4.26, o equipamento de testes resulta em tempos diferentes para essas faltas. Isso ocorre por não existir um valor de componente assimétrica elevado, conforme mostra a Figura 4.38.

Além disso, outro contexto que deve ser analisado é para as atuações dos relés 51 de neutro, as comparações com a simulação resultaram em erros relativos consideráveis, Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Erros relativos percentuais obtidos nos relés 51N

Relé	$T_{simulado}/T_{real}$	$T_{calculado}/T_{simulado}$
51N-1	46,43140%	31,11890%
51N-3	53,03490%	34,69270%
51N-5	69,32170%	49,05780%

Estes valores consideráveis de erros apresentados na Tabela 4.29 devem-se ao mesmo fato dos relés 50, os modelos de relés utilizados possuem algoritmos próprios para o tempo do relé de neutro, os quais não são disponibilizados pelos fabricantes.

Os demais cenários obtiveram erros menores que 5%.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os resultados decorrentes do roteiro de comissionamento proposto além de comparações entre os valores provenientes das três etapas para legitimar e validar a rotina de testes desenvolvida.

No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões do trabalho e as concepções para trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um roteiro de testes para o ajuste e coordenação do sistema de proteção de sobrecorrente de um SEP e para o comissionamento de relés digitais. A partir de um sistema-teste e com o intuito de validar os resultados teóricos oriundos das equações de ajuste dos relés, foi realizada a simulação da proteção de sobrecorrente no *Power Factory* e a comparação dos tempos de operação da proteção no *software* com os tempos obtidos no ensaio experimental utilizando um relé de sobrecorrente da Pextron e o testador universal de relés.

Os resultados mostram que, a comparação dos tempos de operação resultantes das etapas de teoria, simulação e prática possuem erros relativos percentuais menores que 5%, salvo em alguns casos em que foram obtidos erros significativos, mas justificáveis. Para os relés 50 e 51N, os erros estão associados ao projeto e algoritmo do modelo dos relés que diferem no *Power Factory* e nos ensaios práticos. Já para o relé 51-5, como tem-se um curto-circuito muito próximo a barra de geração, o erro surge devido a existência de uma alta componente assimétrica que na etapa de simulação é levada em consideração no tempo de resposta.

Dessa maneira, acredita-se que empregar o plano de testes desenvolvido como parte experimental da disciplina de proteção na graduação, irá auxiliar e tornar o aprendizado dos alunos mais acessível além de que estes terão um aproveitamento muito maior. Na indústria, ter uma rotina de testes definida pode contribuir para redução de falhas da proteção oriundas de ajustes e coordenação incorretos.

Em vista disso, a metodologia proposta obteve os resultados esperados e se mostrou promissora para ser empregada tanto no ensino da graduação quanto no treinamento de profissionais da área de proteção.

### 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas para trabalhos futuros, é importante aplicar o roteiro de comissionamento testando outras funções como Direcional de Sobrecorrente (67), Diferencial (87), Distância (21) e outras. Pode-se também utilizar relés digitais de outro fabricante como SEL e Siemens, ou fazer o uso de outro *software* de simulação de SEP como *ATP DRAW*.

Além disso, é interessante realizar um estudo mais aprofundado acerca dos projetos e algoritmos de relés digitais de diferentes fabricantes. Esse procedimento visa a compreensão das variáveis lógicas que integram cada relé, de maneira que seja possível uma análise mais concreta dos erros obtidos neste trabalho e o encontro de possíveis soluções para tal. Sendo assim, são inúmeras as concepções para o desenvolvimento de trabalhos futuros, todas com o objetivo de obter uma maior validação da metodologia desenvolvida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIMAN, O.; MUSIRIN, I. Overcurrent relays coordination for commercial building. In: **2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 608–612.

ALMEIDA, M. A. D. de. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. Rio Grande do Norte, Natal: [s.n.], 2000.

ANSI, A. N. S. I. **Guide for Field Testing of Relaying Current Transformers**. 1993. C 57.13.

CONPROVE. **Manual de Operação - EQUIPAMENTOS DE TESTES FAMÍLIAS 600X-67XX-70XX**. [S.l.], 2018. Disponível em: <[www.conprove.com.br](http://www.conprove.com.br)>. Acesso em: Abr, 2018.

\_\_\_\_\_. **Tutorial de Teste - Relé Pextron URP 7104 - Sobrecorrente**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.conprove.com.br/pub/tutoriais.html>>. Acesso em: Abr, 2018.

DIAS, C. A. S. A. e José Roberto R. Cândido e Flávio Camara de Souza e M. P. **Proteção de Sistemas Elétricos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2002.

ELMORE, W. A. **Protective relaying theory and application**. Second. New York: [s.n.], 2004.

FREITAS, F. S. e W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1ª. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014.

GARCIA, A. M. e A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. 1ª. ed. São Paulo: Unicamp, 2003. v. 1.

IEC, I. E. C. **Measuring relays and protection equipment**. 2009. IEC 60255-151 Ed.1.0.

\_\_\_\_\_. **Communication Network and Systems in Substations**. 2013. IEC 61850 Ed.1.0,.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Segunda. [S.l.]: Florianópolis: Editora UFSC, 2005. v. 1.

LIU, J. et al. Study of relay protection modeling and simulation on the basis of digilent. In: **2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.

MAMEDE, J. M. F. D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. [S.l.]: LTC, 2011.

MEASUREMENTS, G. **Protective Relays Application Guide**. Second. [S.l.]: GEC Measurements, 1975.

MOZINA, C. J. Application and commissioning of multifunction digital transformer relays. In: **2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 444–448.

NBR, N. B. **Transformador de corrente - Especificação e ensaios**. 2015. ABNT NBR 6856.

PEXTRON. **URP600X - Manual de operação**. [S.l.], 2016. Disponível em: <http://www.pextron.com.br/downloads/manuaiseaplicativos.html>. Acesso em: Abr, 2018.

POWERFACTORY. **DIgSILENT Power Factory 15.2.6 User's Manual**. 3. ed. Gomaringen/-Germany: DIgSILENT GmbH, 2014.

REZAEI, N. et al. Coordination of overcurrent relays protection systems for wind power plants. In: **2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 394–399.

TURNER, S. Testing numerical transformer differential relays. In: **2011 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 251–256.

\_\_\_\_\_. Using comtrade records to commission protection. In: **PES T D 2012**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–8. ISSN 2160-8563.

WELTON, D.; KNAPEK, W. Important considerations in testing and commissioning digital protective relays. In: **2017 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 12–16. ISSN 2153-3636.

YANG, Y. et al. Analysis and extration of comtrade based data in short-circuit fault. In: **International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.

ZIMMERMAN, K. Commissioning of protective relay systems. In: **2008 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 467–476.

## APÊNDICE A – ROTEIRO PARA CÁLCULOS DE AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS DO SISTEMA-TESTE

Nesse capítulo, serão apresentados os procedimentos realizados para os cálculos de ajustes dos relés de sobrecorrente do sistema-teste. Para o desenvolvimento do apêndice, será utilizado como exemplo o ajuste e coordenação dos relés 1 e 2 para falta 1 do sistema-teste da Figura 4.1.

Os procedimentos realizados tem como base a teoria e as equações de ajustes apresentadas no capítulo 2.

### A.1 – DIMENSIONAMENTO DOS TCS

Para o TC da barra 1 do sistema-teste, deve-se observar a existência do Motor. Desse modo, é necessário calcular a potência aparente  $S$  do mesmo. Para isso, utilizam-se os valores de potência ativa ( $P$ ), o fator de potência ( $FP$ ) e o rendimento ( $R$ ) informados no Anexo A.

- Critério 1: cálculo da corrente de carga na barra 1.

$$S_{Motor} = \frac{P \cdot 746}{FP \cdot R} = \frac{2000 \cdot 746}{0,9 \cdot 0,92} = 1,8MVA$$

$$S_{Carga} = 3MVA$$

$$I_{Sobrecarga} = \frac{3MVA + 1,8MVA}{\sqrt{3} \cdot 4,16kV} = 666,1733A$$

- Critério 2: o máximo curto-circuito simétrico na barra 1 é monofásico e tem o valor de 5219,1874 A.

$$\frac{I_{ccMx}}{20} = \frac{5219,1874}{20} = 260,95A$$

Como 666,1733 A é superior a 260,95 A e pela NBR (2015), escolhe-se uma corrente primária de 800 A.

Para o TC da barra 2, tem-se a presença do transformador 2, o qual deve-se levar em consideração a sobrecarga máxima de 25% nos cálculos.

- Critério 1: cálculo da corrente de carga na barra 1.

$$S_{Transformador} = 4MVA$$

$$I_{Sobrecarga} = 1,25 \cdot \frac{4MVA}{\sqrt{3} \cdot 13,8kV} = 209,1848A$$

- Critério 2: o máximo curto-circuito simétrico na barra 2 é trifásico e tem o valor de 3039 A.

$$\frac{I_{ccMx}}{20} = \frac{3014,4151}{20} = 150,72A$$

Como 209,1848 A é superior a 150,72 A e segundo NBR (2015), escolhe-se uma corrente primária de 250 A.

## A.2 – AJUSTE DAS CORRENTES DE ATUAÇÃO DOS RELÉS

Antes de iniciar os cálculos de ajustes de *pick up* e curva de tempo dos relés do sistema-teste, é importante ressaltar que, a constante  $\frac{4,16k}{13,8k} = 0,30145$  refere-se a relação de transformação do transformador 2, utilizada para passar a corrente de falta da baixa tensão para a alta tensão. Já a constante  $\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5773$  refere-se a relação de transformação utilizada para passar o curto-circuito monofásico da baixa tensão para a alta tensão, devido a ligação do transformador em  $\Delta$ -Y-g (FREITAS, 2014).

### • Para a unidade de sobrecorrente 51:

O relé 51 da barra 1 (51-1) do sistema-teste, será proteção principal para a falta trifásica 1. Desse modo, tem-se o cálculo a partir da Equação 2.4.

Sendo RTC de 800/5 A, o *FF* igual a 1,5, o curto-circuito trifásico 4488 A e o  $F_{Seg}$  igual a 2,0 e não esquecendo de utilizar a relação 2.5.

$$1,5 \cdot \frac{5}{800} \cdot \frac{3M + 1,8M}{\sqrt{3} \cdot 4,16kV} \leq I_{pickup} \leq \frac{4452,1467 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{5}{800}}{2}$$

$$6,2454 \leq I_{pickup} \leq 12,0489A$$

O  $I_{pickup}$  escolhido foi de 6,25 A, em concordância com os intervalos de corrente apresentados no Anexo A.

O relé 51-2 será proteção retaguarda para a falta trifásica 1. Desse modo, tem-se o cálculo a partir da Equação 2.4.

Sendo RTC de 250/5 A, o  $FF$  igual a 1,5, o curto-circuito trifásico 4488 A e o  $F_{Seg}$  igual a 2,0, não esquecendo de utilizar a relação 2.5 e além disso, a relação de transformação do T2.

$$1,5 \cdot \frac{5}{250} \cdot \frac{4M}{\sqrt{3} \cdot 13,8kV} \leq I_{pickup} \leq \frac{4452,1467 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{5}{250} \cdot \frac{4,16kV}{13,8kV}}{2}$$

$$5,0204 \leq I_{pickup} \leq 11,6228A$$

Inicialmente, o  $I_{pickup}$  escolhido foi de 5,25 A. Porém, após os resultados da etapa de simulação, apresentada na seção 4.4.1, determinou-se o  $I_{pickup}$  de 5,75 A.

O relé 51 de neutro da barra 1 (51N-1) será proteção principal para a falta monofásica 1. Desse modo, tem-se o cálculo a partir da Equação 2.6.

Sendo RTC de 800/5 A, o  $FD$  igual a 0,1, o curto-circuito monofásico mínimo fornecido no Anexo A 240 A e o  $F_{Seg}$  igual a 2,0.

$$0,1 \cdot \frac{5}{800} \cdot \frac{3M + 1,8M}{\sqrt{3} \cdot 4,16kV} \leq I_{pickup} \leq \frac{240 \cdot \frac{5}{800}}{2}$$

$$0,4164 \leq I_{pickup} \leq 0,75A$$

O  $I_{pickup}$  escolhido foi de 0,45 A, em concordância com os intervalos de corrente apresentados no Anexo A.

- **Para a unidade de sobrecorrente 50:**

Primeiramente, deve-se testar o uso do relé 50 do sistema-teste com base no critério 2.7.

$$3014,4151 > 2,5 \cdot 5219,1874 \cdot \frac{4,16kV}{13,8kV} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (A.1)$$

Como a inequação A.1 é verdadeira, a função 50 pode ser usada para proteção principal da falta trifásica 2.

Em virtude disso, para ajustar o relé 50-2, observa-se que a Equação 2.8 mostra que a corrente de atuação do relé é ajustada usando o curto-circuito no final do trecho protegido, ou seja, a falta trifásica 1. Como tem-se o transformador T2, faz-se o uso da Equação 2.9 também.

I.

$$1,25 \cdot \frac{5}{250} \cdot 4452,1467 \cdot \frac{4,16kV}{13,8kV} = 33,5524A$$

II.

$$8 \cdot \frac{5}{250} \cdot \frac{4M}{\sqrt{3} \cdot 13,8kV} = 26,7757A$$

Como 33,5524 A é maior que 26,7757 A, o  $I_{pickup}$  escolhido é de 33,75 A, em concordância com os intervalos de corrente apresentados no Anexo A.

### A.3 – COORDENAÇÃO DOS RELÉS TEMPORIZADOS DE FASE E NEUTRO

Como o sistema-teste é radial, deve-se coordenar os dois últimos relés 51, utilizando o mesmo curto-circuito. O relé de neutro tem um ajuste inferior ao de fase, dessa maneira, tendo em vista a faixa de ajuste de curvas no Anexo A, escolhe-se a curva 0,1 para encontrar o tempo de operação do 51N-1.

Os parâmetros utilizados na coordenação estão na Tabela A.1 .

Quadro A.1 – Parâmetros utilizados para coordenação 51-1 com 51N-1

RTC	800/5 A
Curto-circuito Monofásico	5219,1874 A
<i>pick up</i> 51N	0,45 A
<i>pick up</i> 51	6,25 A
Curva 51N	0,1

Os cálculos devem ser realizados a partir da Equação 2.10 e os coeficientes da curva normalmente inversa, como sugerido nos dados nominais do Anexo A.

- O tempo de 51N-1:

$$T_{51N-1} = \left( \frac{0,14}{\left( \frac{5219,1874}{160 \cdot 0,45} \right)^{0,02} - 1} \right) \cdot 0,1 = 0,1565s$$

- O tempo de coordenação entre 51N-1 e 51-1, considerando o tempo de 0,3 segundos, indicado no Anexo A:

$$t_{51-1} = T_{51N-1} + \Delta t = 0,1565 + 0,3 = 0,4565s$$

- A curva de 51-1:

$$C_{51-1} = \left( \frac{0,14}{\left( \frac{5219,1874}{160 \cdot 6,25} \right)^{0,02} - 1} \right)^{-1} \cdot 0,4565 = 0,11$$

Com isso, tem-se o tempo de atuação dos relés 51N-1 e 51-1 para a falta monofásica 1 e a curva do relé 51-1. Com esses dados em mãos, é possível calcular a coordenação entre os relés 51-1 e 51-2 para a falta trifásica 1 e também a proteção retaguarda da falta monofásica 1, que é realizada pelo relé 51-2.

- Coordenação do relé 51-1 com 51-2:

Com a curva do 51-1 calculada, é possível encontrar o tempo de atuação desse relé para um curto-circuito trifásico na barra em que ele atua como proteção principal. Feito isso, realiza-se um posterior cálculo da curva do 51-2, o qual realiza a proteção retaguarda para o mesmo curto-circuito. Além disso, após calculada a curva do relé 51-2, deve-se calcular o tempo de operação deste relé, que atua como proteção retaguarda da falta monofásica 1.

Os parâmetros utilizados na coordenação estão apresentados na Tabela A.2.

Quadro A.2 – Parâmetros utilizados para coordenação 51-1 com 51-2

RTC 1	800/5 A
RTC 2	250/5 A
Curto-circuito Trifásico	4452,1467 A
<i>pick up</i> 51-1	6,25 A
<i>pick up</i> 51-2	5,75A
Curva 51-1	0,11
Relação de transformação do T2	0,30145
Transformação $\Delta$ -Y-g do T2	0,5773

- O tempo do relé 51-1:

$$T_{51-1} = \left( \frac{0,14}{\left( \frac{4452,1467}{160 \cdot 6,25} \right)^{0,02} - 1} \right) \cdot 0,11 = 0,5079s$$

- O tempo de coordenação entre 51-1 e 51-2:

$$T_{51-2} = T_{51-1} + \Delta t = 0,5079 + 0,4 = 0,9079s$$

- A curva de 51-2:

$$C_{51-2} = \left( \frac{0,14}{\left( \frac{4452,1467 \cdot 0,30145}{50 \cdot 5,75} \right)^{0,02} - 1} \right)^{-1} \cdot 0,9079 = 0,2$$

Agora, deve-se calcular o tempo da proteção retaguarda para a falta monofásica 1, que é realizada pelo relé 51-2:

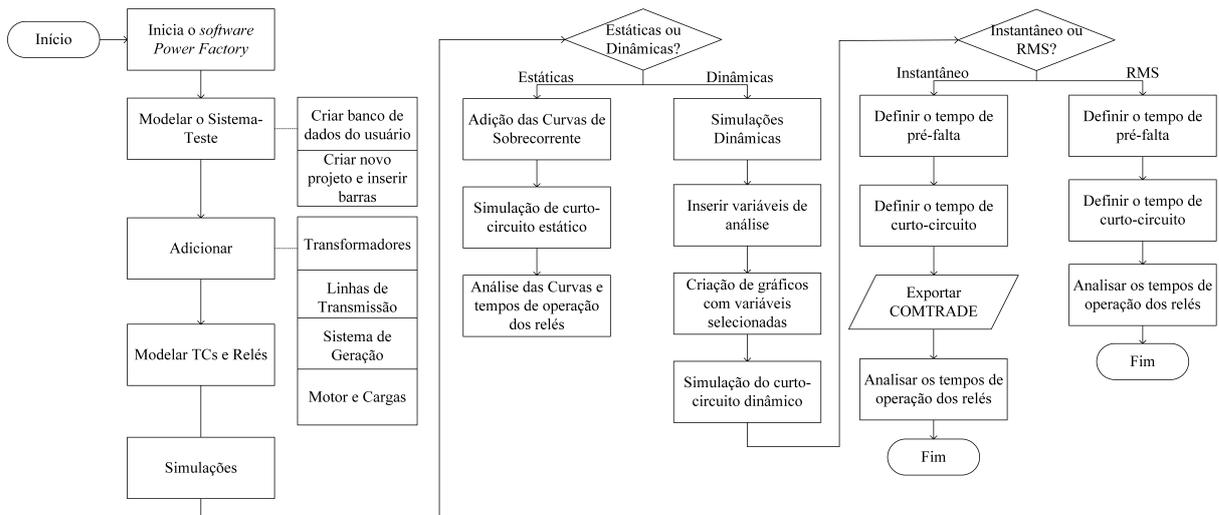
$$T_{51-2} = \left( \frac{0,14}{\left( \frac{5219,1874 \cdot 0,30145 \cdot 0,5773}{50 \cdot 5,75} \right)^{0,02} - 1} \right) \cdot 0,2 = 1,203s$$

Desse modo, tem-se os valores de curvas dos relés 51N-1, 51-1 e 51-2 e os valores dos tempos de operação desses relés para as faltas trifásica e monofásica 1.

## APÊNDICE B – ROTEIRO DE SIMULAÇÃO NO *SOFTWARE POWER FACTORY*

Nesse capítulo, serão apresentadas as etapas realizadas para a análise da proteção de sobrecorrente do sistema-teste da Figura 4.1 no *Power Factory*. Os procedimentos gerais que configuram a etapa de simulação estão representados no fluxograma da Figura B.1.

Figura B.1 – Procedimentos gerais para simulação da proteção de sobrecorrente no *Power Factory*



Fonte: elaborado pela autora.

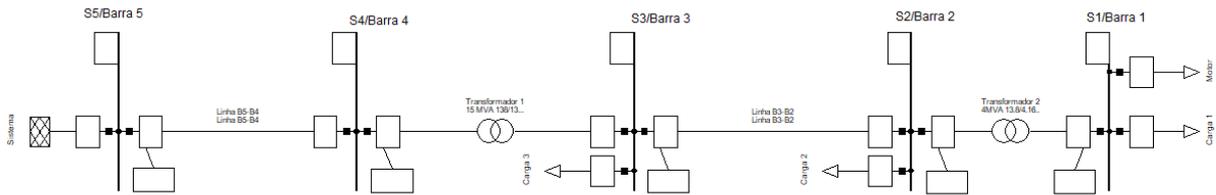
O desenvolvimento desse roteiro tem como base o manual do usuário do *software Power-Factory* (2014).

### B.1 – CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA UNIFILAR E PARAMETRIZAÇÃO DOS ESQUIPAMENTOS DO SISTEMA-TESTE

#### B.1.1 – Modelagem do sistema-teste

A Figura B.2 refere-se ao diagrama unifilar do sistema-teste construído no *Power Factory*. Com base nos dados nominais do Anexo A, determina-se o sistema equivalente, o modelo dos transformadores, do motor, das cargas, das linhas de transmissão, dos TCs e dos relés.

Figura B.2 – Sistema-teste construído no *Power Factory*

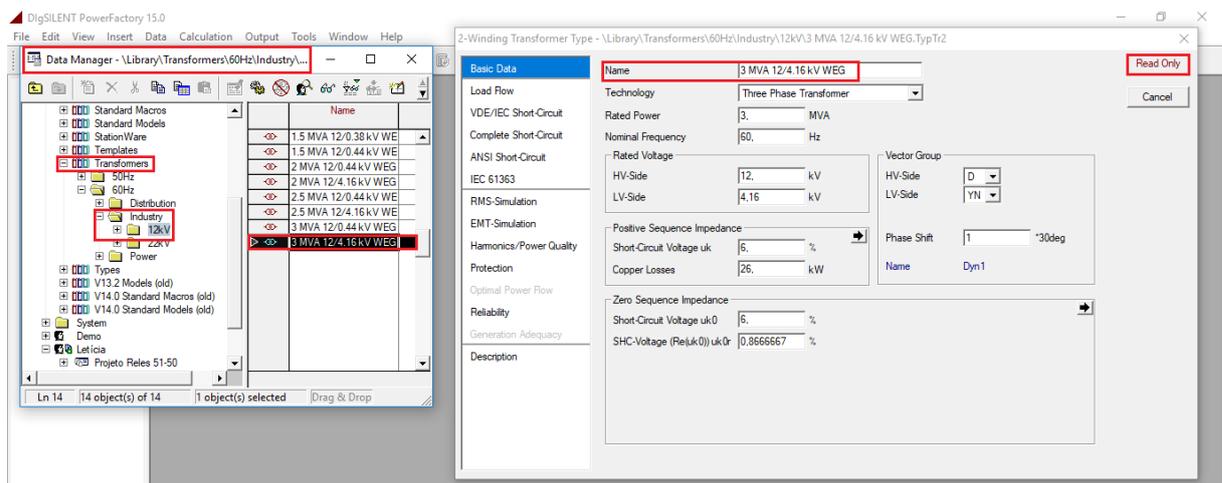


### B.1.2 – Data Manager

Ao abrir o *software* aparecerá uma caixa onde deve ser selecionada a inicialização do usuário e criação de uma pasta para banco de dados. No canto superior esquerdo, tem-se a opção de abrir o Data Manager. Nesse bloco existe, além do usuário criado, o usuário demo, que consta de vários exemplos que podem solucionar eventuais dúvidas.

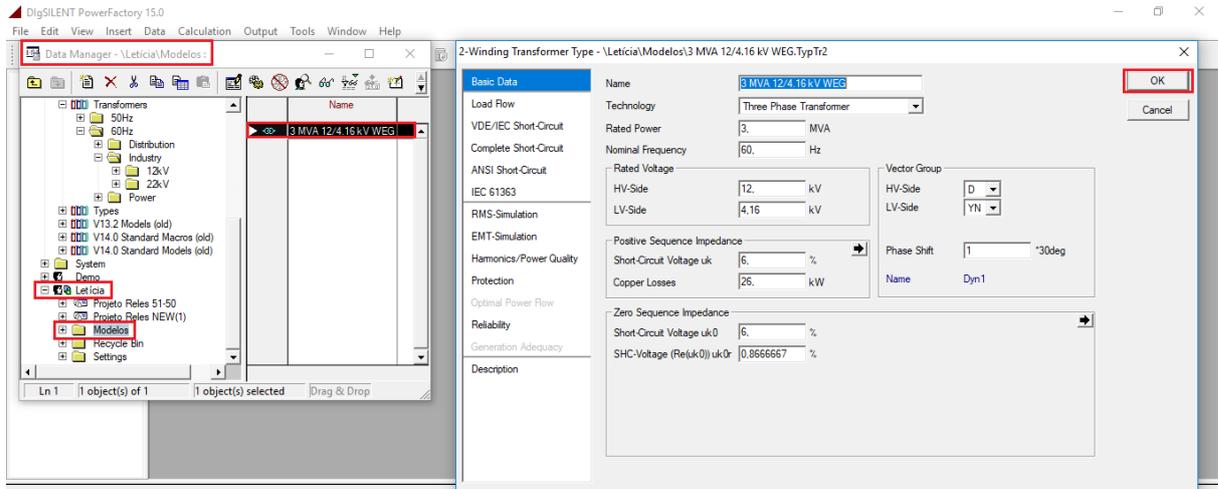
Além disso, no Data Manager, também está a biblioteca do programa que contém um infinidade de modelos de equipamentos como transformadores, relés, linhas de transmissão e etc. Contudo, esses modelos são imutáveis, como pode-se observar a mensagem ‘ready only’ na Figura B.3.

Figura B.3 – Biblioteca e Transformador não sujeito a alterações



Para que seja possível alterar configurações dos modelos dos equipamentos pré-existent, é necessário que esses modelos sejam copiados para uma pasta do usuário criado, que pode ser chamada de modelos do usuário. Dessa maneira, o usuário terá sua própria biblioteca e poderá alterar os parâmetros no equipamento que desejar, conforme indicado na Figura B.4.

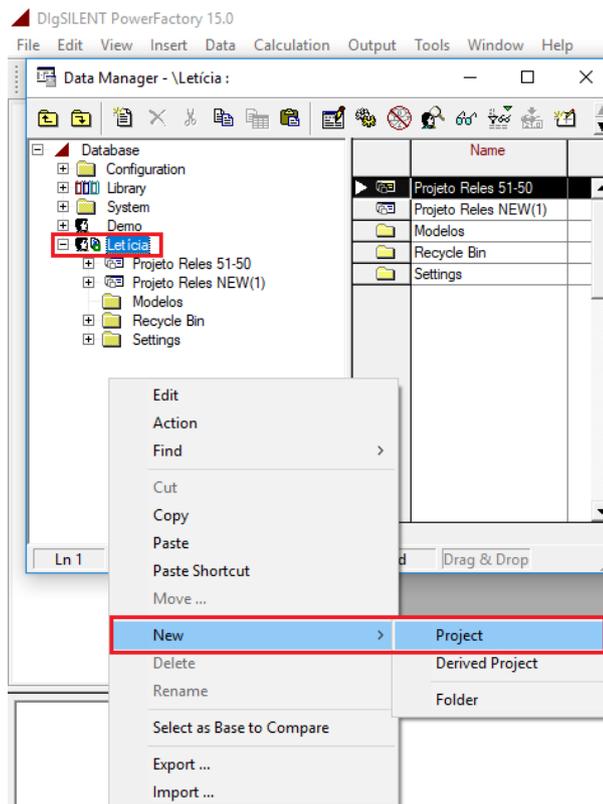
Figura B.4 – Transformador copiado para a biblioteca do usuário e sujeito a alterações



### B.1.3 – Criação de um novo projeto e inserção de barras

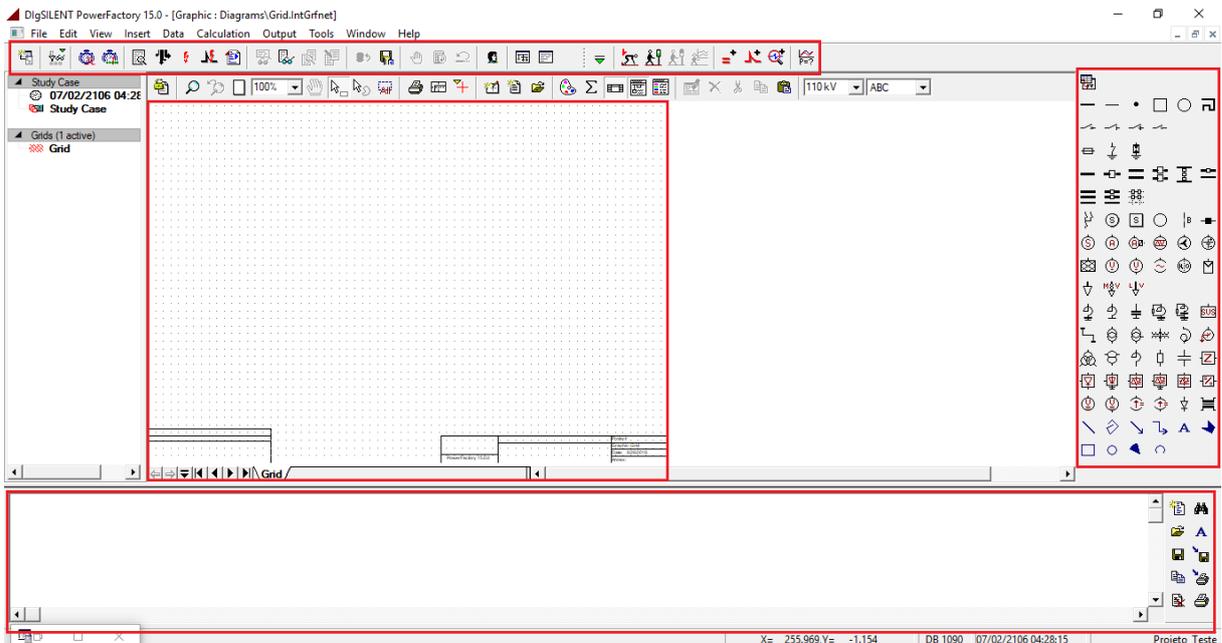
Para ser criado um projeto deve-se clicar com o botão direito o usuário criado e selecionar “New Project”, Figura B.5.

Figura B.5 – Criando um novo projeto



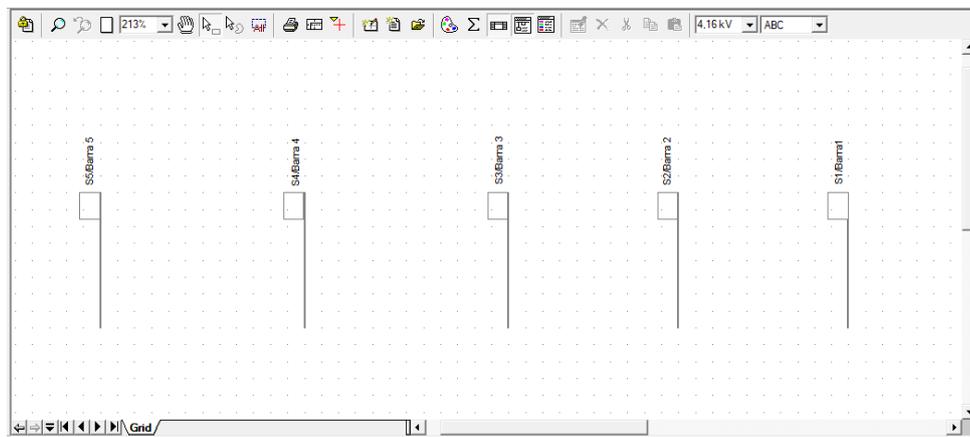
Abrirá uma janela de trabalho (*grid*) onde será construído o sistema, na parte superior da *grid*, estão as ferramentas de simulação, na parte inferior está a janela de comando, que fornece os resultados das simulações, e no canto direito está a janela de ferramentas, que é onde são selecionados os componentes necessários para construir o sistema, como ilustra a Figura B.6.

Figura B.6 – *Grid*, ferramentas de simulação, janela de comando e janela de componentes



Após a criação da *grid*, devem ser inseridas as barras do sistema, estas são os únicos componentes do *software* que não necessitam de um modelo. As barras utilizadas estão identificadas por “Single Busbar System” na janela de componentes, e alocadas na *grid*, como pode ser visto na Figura B.7.

Figura B.7 – Barras do sistema



### B.1.4 – Transformadores

Para inserir os transformadores do sistema-teste, escolhe-se o componente “2-Winding Transformer”. Além disso, realiza-se o procedimento apresentado na Figura B.4 para possível alteração dos parâmetros do modelo baseados nos dados nominais do Anexo A. Esse exemplo refere-se ao transformador 2 do sistema-teste, conforme as Figuras B.8 e B.9.

Figura B.8 – Parametrização Transformador 2

2-Winding Transformer Type - Modelos\4 MVA 13.8/4.16 kV WEG.TypTr2

Basic Data	Name	4 MVA 13.8/4.16 kV WEG	OK
Load Flow	Technology	Three Phase Transformer	Cancel
VDE/IEC Short-Circuit	Rated Power	4 MVA	
Complete Short-Circuit	Nominal Frequency	60 Hz	
ANSI Short-Circuit	Rated Voltage		
IEC 61363	HV-Side	13.8 kV	
RMS-Simulation	LV-Side	4.16 kV	
EMT-Simulation	Vector Group		
Hamonics/Power Quality	HV-Side	D	
Protection	LV-Side	YN	
Optimal Power Flow	Phase Shift	1 *30deg	
Reliability	Name	Dyn1	
Generation Adequacy	Positive Sequence Impedance		
Description	Short-Circuit Voltage uk	7 %	
	Copper Losses	0 kW	
	Zero Sequence Impedance		
	Short-Circuit Voltage uk0	7 %	
	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0 %	

Figura B.9 – Parametrização do Transformador 2

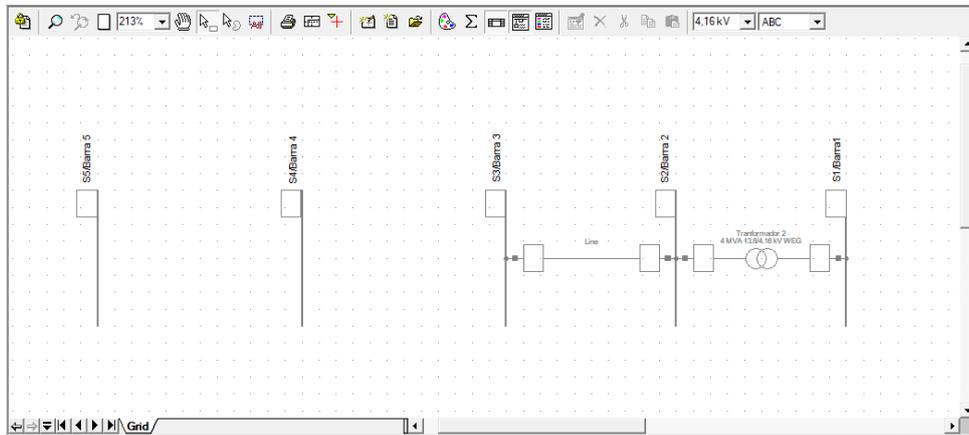
2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\4MVA 13.8/4.16 kV WEG.TypTr2

Basic Data	General	Advanced	
Load Flow	Tap Changer		
VDE/IEC Short-Circuit	at Side	HV	
Complete Short-Circuit	Additional Voltage per Tap	1.25 %	
ANSI Short-Circuit	Phase of du	0 deg	
IEC 61363	Neutral Position	0	
RMS-Simulation	Minimum Position	-3	
EMT-Simulation	Maximum Position	3	
Hamonics/Power Quality	Magnetizing Impedance		
Protection	No Load Current	1 %	
Optimal Power Flow	No Load Losses	4 kW	
Reliability	Tap dependent impedance	<input type="checkbox"/>	
Generation Adequacy			
Description			

### B.1.5 – Linhas de Transmissão

Para inserir as linhas de transmissão(LT), escolhe-se o componente “Line”. O exemplo na Figura B.10 refere-se a LT de 13,8 kV do sistema-teste.

Figura B.10 – Inserindo a LT



Após isso, realiza-se o procedimento demonstrado na Figura B.4 e alteram-se os parâmetros do modelo para os dados nominais do Anexo A, como demonstrado nas Figuras B.11 e B.12.

Figura B.11 – Parametrização da LT de 13,8 kV

Figura B.12 – Parametrização da LT 13,8 kV

Pode-se também observar o resumo da modelagem da LT na Figura B.13.

Figura B.13 – Resumo da parametrização da LT de 13,8 kV

Line - Grid/Linha B3-B2.ElmLine

Name: Linha B3-B2

Type: Equipment Type Library/Linha B3-B2

Terminal i: Grid\S3\3\Cub\_1 Barra 3

Terminal j: Grid\S2\1\Cub\_1 Barra 2

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Thermal Rating: ...

Length of Line: 1 km

Derating Factor: 1

Type of Line: Overhead Line

Line Model

Lumped Parameter (PI)

Distributed Parameter

Sections/Line Loads

Resulting Values

Rated Current (act.)	1, kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0,781025 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	50,19443 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0,5 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0,6 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	1,5 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	1,8 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0, A
Earth Factor, Magnitude	0,6666666
Earth Factor, Angle	-0,0000028 deg

### B.1.6 – Sistema S

Para adicionar o sistema equivalente S do sistema-teste, escolhe-se o componente “External Grid”. Parametriza-se o sistema de geração com os dados do Anexo A, conforme as Figuras B.14 e B.15.

Figura B.14 – Parametrização do sistema S

External Grid - Grid/Sistema.ElmXnet

Bus Type: SL

Setpoint: local

Operation Point

Angle: 0 deg

Voltage Setpoint: 1 p.u.

Reference Busbar: ...

Figura B.15 – Parametrização do sistema S

External Grid - Grid/Sistema.ElmXnet

Max. Values

Short-Circuit Power Sk\*max: 800 MVA

Short-Circuit Current Ik\*max: 3,346958 kA

X/R Ratio (max.): 15

Impedance Ratio

Z2/Z1 max.: 1

X0/X1 max.: 1

R0/X0 max.: 0,066

Min. Values

Short-Circuit Power Sk\*min: 800 MVA

Short-Circuit Current Ik\*min: 3,346958 kA

X/R Ratio (min.): 15

Impedance Ratio

Z2/Z1 min.: 1

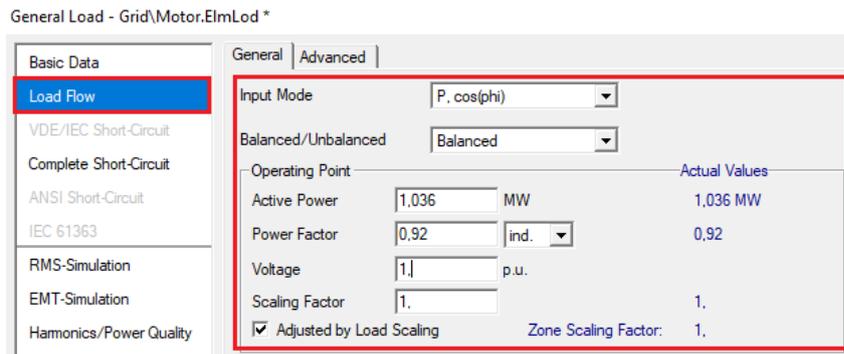
X0/X1 min.: 1

R0/X0 min.: 0,066

### B.1.7 – Motor e Cargas

Para adicionar o motor no sistema utiliza-se o componente “General Load”, visto que o motor se comporta como uma carga. A parametrização do motor é apresentada na Figura B.16 e também é aplicada as cargas C1-C3.

Figura B.16 – Parametrização do Motor

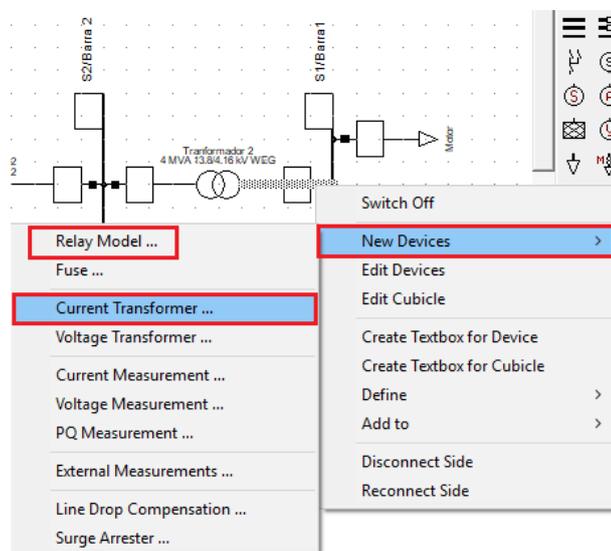


### B.1.8 – TCs e Relés

A inserção dos TCs e Relés requer um procedimento um pouco diferente, pois estes não se encontram na janela de componentes como os demais dispositivos do sistema.

Para adicioná-los, é necessário clicar com o botão direito no quadrado da linha (disjuntor) que se deseja adicionar o equipamento, escolher a opção “New Devices” e depois “Current Transformer” ou “Relay Model”, conforme as instruções na Figura B.17.

Figura B.17 – Inserir TCs e Relés



Da mesma maneira que para os outros equipamentos, escolheu-se um modelo da bibli-

oteca do usuário para o TC e o Relé. A parametrização dos TCs e relés do sistema é realizada com o dimensionamento e os ajustes calculados na etapa teórica.

O exemplo nas Figuras B.18 e B.19 refere-se ao dimensionamento do TC da barra 1.

Figura B.18 – Parametrização TC1

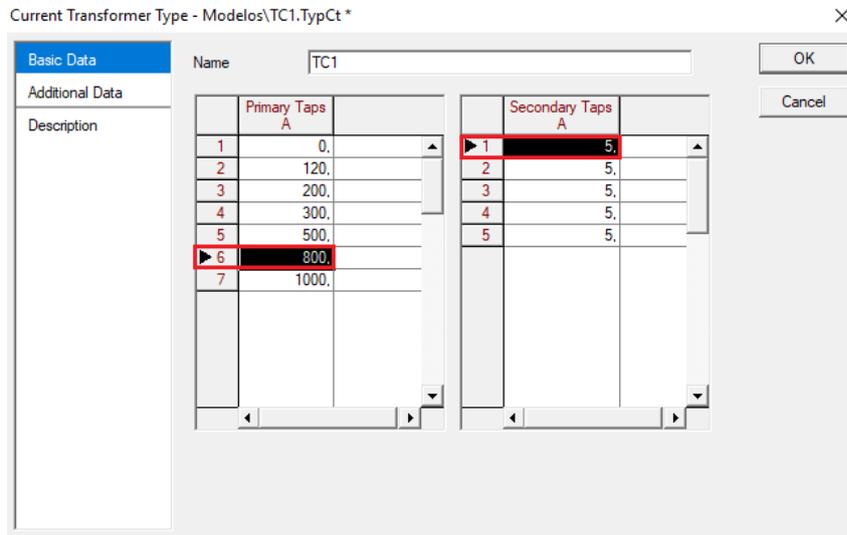
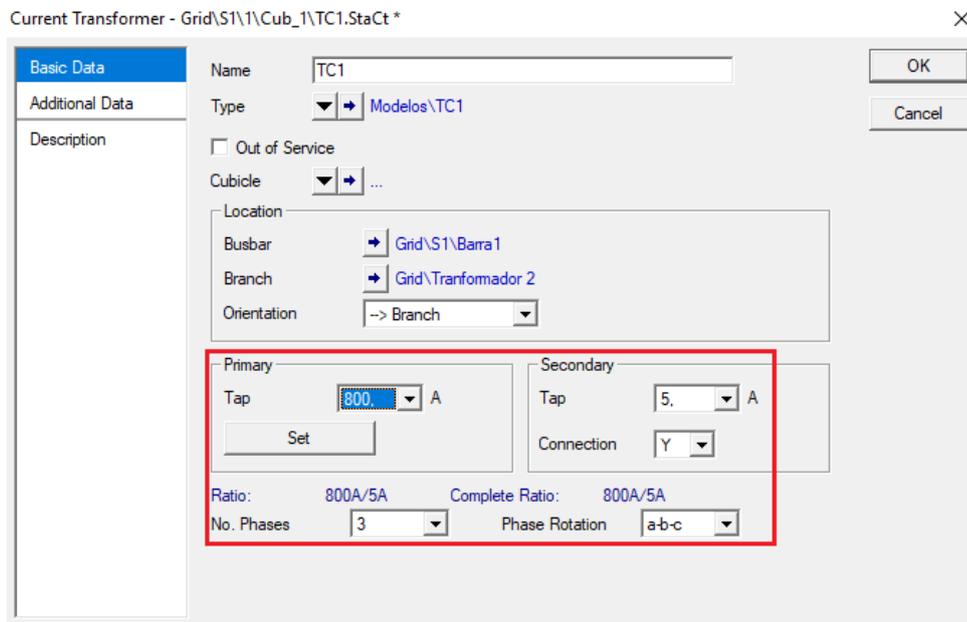


Figura B.19 – Parametrização TC1



O modelo escolhido para o relé é um SIEMENS JSJ6005, Figura B.20.

Figura B.20 – Modelo do Relé

Relay Model - Grid\S1\1\Cub\_1\Relé 1.ElmRelay \*

Category: Overcurrent

Name: Relé 1

Relay Type: Modelos\7SJ6005-xxAx0-0DA0

Application: Main Protection Device Number: 1

Location:

Reference: ...

Busbar: Grid\S1\Barra1

Branch: Grid\Tranformador 2

Out of Service

Slot Definition:

	Net Elements Rel",Elm",Sta",IntRef	
▶ Ct-3p	TC1	
Measure	Measure	
Measure I2	Measure I2	
I>>>	I>>>	
I>>	I>>	
I>	I>	
I <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	
I <sub>e&gt;&gt;</sub>	I <sub>e&gt;&gt;</sub>	
I <sub>e&gt;</sub>	I <sub>e&gt;</sub>	

Slot Update

Para parametrizar os relés temporizados de fase, função 51, deve-se abrir o bloco do relé, Figura B.21, e clicar no item "Ip".

Figura B.21 – Bloco do relé - Selecionar "Ip"

Relay Model - Grid\S1\1\Cub\_1\Relé 1.ElmRelay

Category: Overcurrent

Name: Relé 1

Relay Type: Modelos\7SJ6005-xxAx0-0DA0

Application: Main Protection Device Number: 1

Location:

Reference: ...

Busbar: Grid\S1\Barra1

Branch: Grid\Tranformador 2

Out of Service

Slot Definition:

	Net Elements Rel",Elm",Sta",IntRef	
Ct-3p	TC1	
Measure	Measure	
Measure I2	Measure I2	
I>>>	I>>>	
I>>	I>>	
I>	I>	
▶ I <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	
I <sub>e&gt;&gt;</sub>	I <sub>e&gt;&gt;</sub>	
I <sub>e&gt;</sub>	I <sub>e&gt;</sub>	

Slot Update

Após isso, insere-se os parâmetros necessários. O exemplo na Figura B.22 refere-se a parametrização do relé 51 da barra 1 do sistema-teste.

Figura B.22 – Parametrização do relé 51-1

Time Overcurrent - Grid\S1\1\Cub\_1\Relay 1\Ip.RelToc \*

Basic Data	IEC Symbol: I>t	ANSI Symbol: 51	OK
Tripping Times	Measure Type: Phase Current (1ph)		Cancel
Blocking	Name: Ip		Relay
Description	Type: Modelos\7SJ6005-xxAx0-0DA0\Toc Phase		Calculate
	<input type="checkbox"/> Out of Service		
	Tripping Direction: None		
	Characteristic: IEC 255-3 inverse		
	Current Setting: 6.25 sec.A	6,25 p.u. 1000, pri.A	
	Time Dial: 0.11		

Para configurar os relés temporizados de neutro, função 51N, deve-se selecionar o item “Iep” no bloco do relé. Após isso inserir os parâmetros necessário. O exemplo na Figura B.23 refere-se a parametrização do relé 51N da barra 1 do sistema-teste.

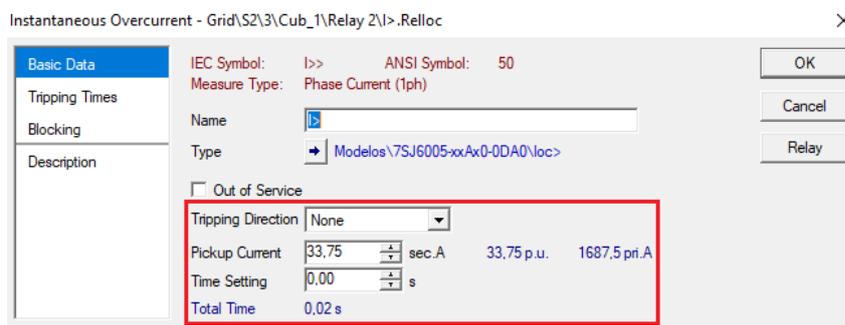
Figura B.23 – Parametrização do relé 51N-1

Time Overcurrent - Grid\S1\1\Cub\_1\Relay 1\Iep.RelToc \*

Basic Data	IEC Symbol: IE>t	ANSI Symbol: 51N	OK
Tripping Times	Measure Type: Earth Current (3*IO)		Cancel
Blocking	Name: Iep		Relay
Description	Type: Modelos\7SJ6005-xxAx0-0DA0\Toc Earth		Calculate
	<input type="checkbox"/> Out of Service		
	Tripping Direction: None		
	Characteristic: IEC 255-3 inverse		
	Current Setting: 0.45 sec.A	0,45 p.u. 72, pri.A	
	Time Dial: 0.10		

Para os relés instantâneos de fase, função 50, deve-se selecionar o item “I>” no bloco do relé e então inserir os parâmetros necessários. O exemplo da Figura B.24 refere-se a parametrização do relé 50 da barra 2 do sistema-teste.

Figura B.24 – Parametrização do relé 50-2



## B.2 – SIMULAÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

### B.2.1 – Análise das curvas dos relés na simulação estática

Após modelado o sistema-teste e inserido os parâmetros dos equipamentos, realiza-se a simulação estática para analisar a coordenação dos relés.

A Figura B.25 ilustra como criar as curvas do relé que atua como proteção principal e a Figura B.26 como adicionar a curva do relé de proteção retaguarda. O exemplo a seguir refere-se a simulação da falta 1 e coordenação dos relés 51-1 e 51-2 do sistema-teste.

Figura B.25 – Criando a curva do relé de proteção principal

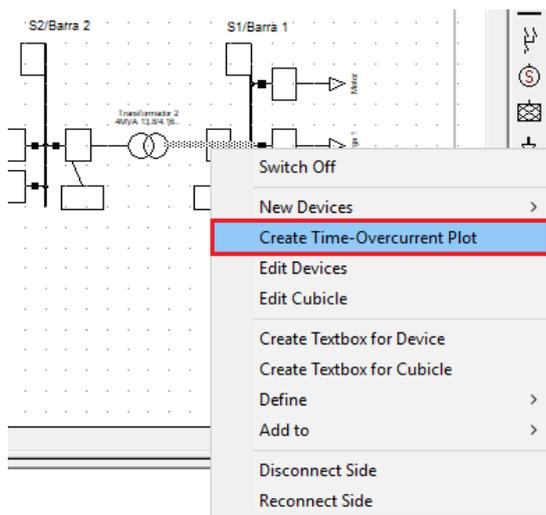


Figura B.26 – Criando a curva do relé de proteção retaguarda

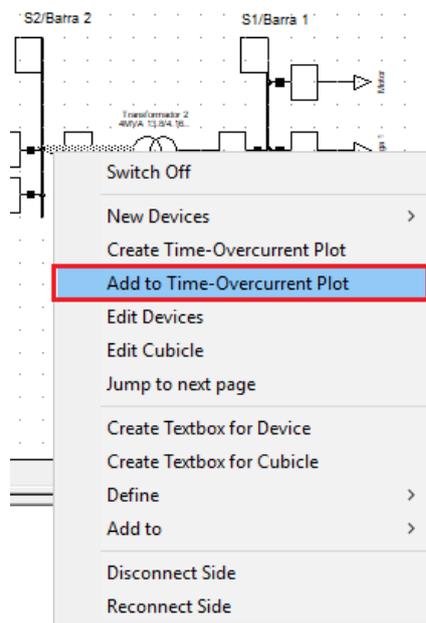
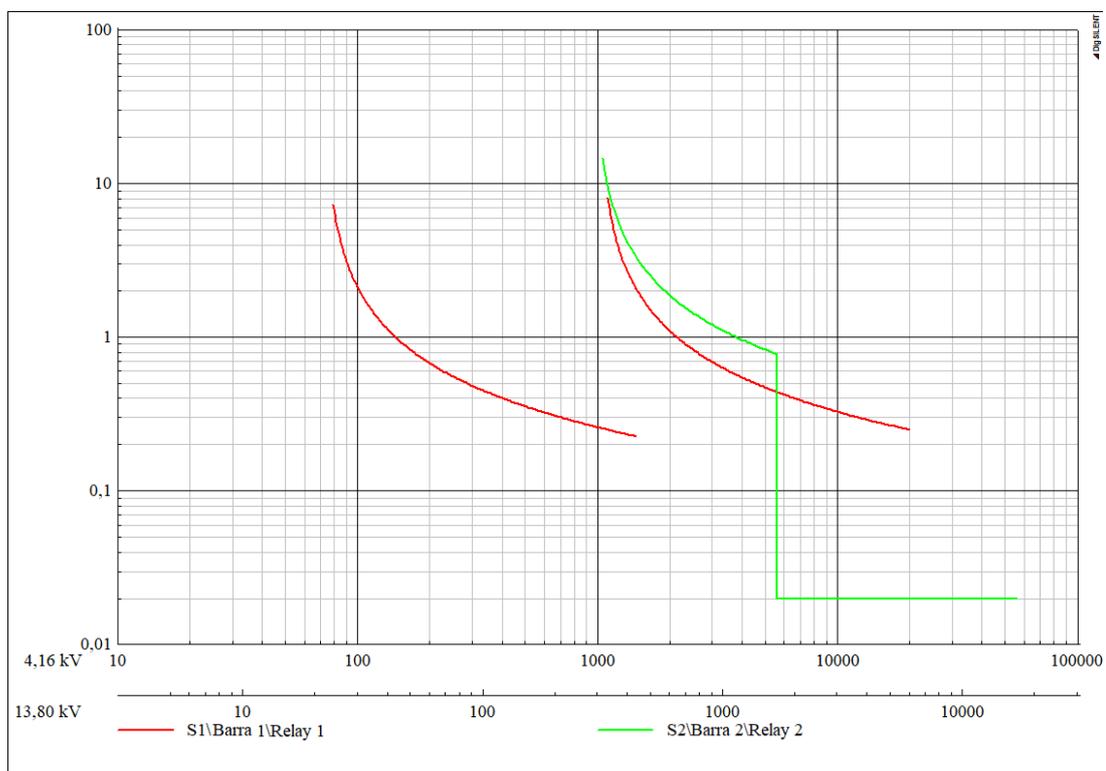
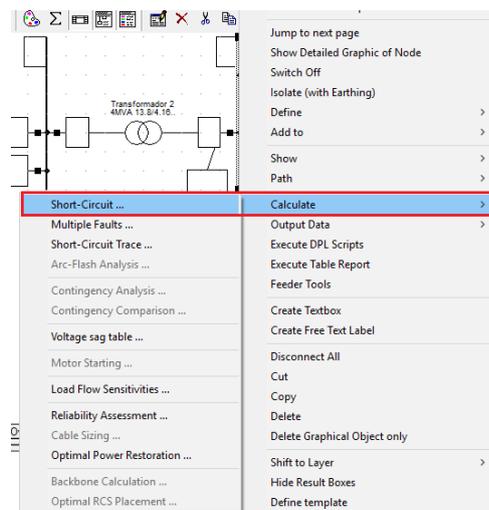


Figura B.27 – Curvas dos relés 51-1 e 51-2



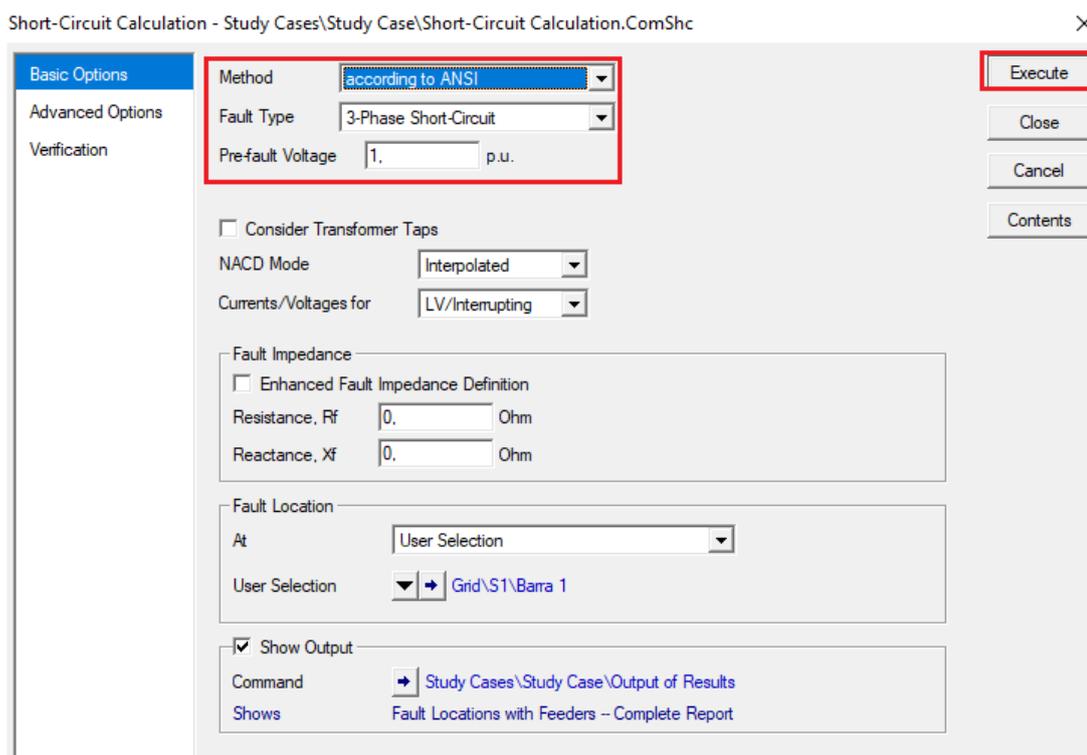
Para a simulação de curto-circuito no modo estático, deve-se clicar com o botão direito em um ponto a frente do relé e selecionar "Calculate" e "Short-Circuit", Figura B.28.

Figura B.28 – Curto-circuito no modo estático



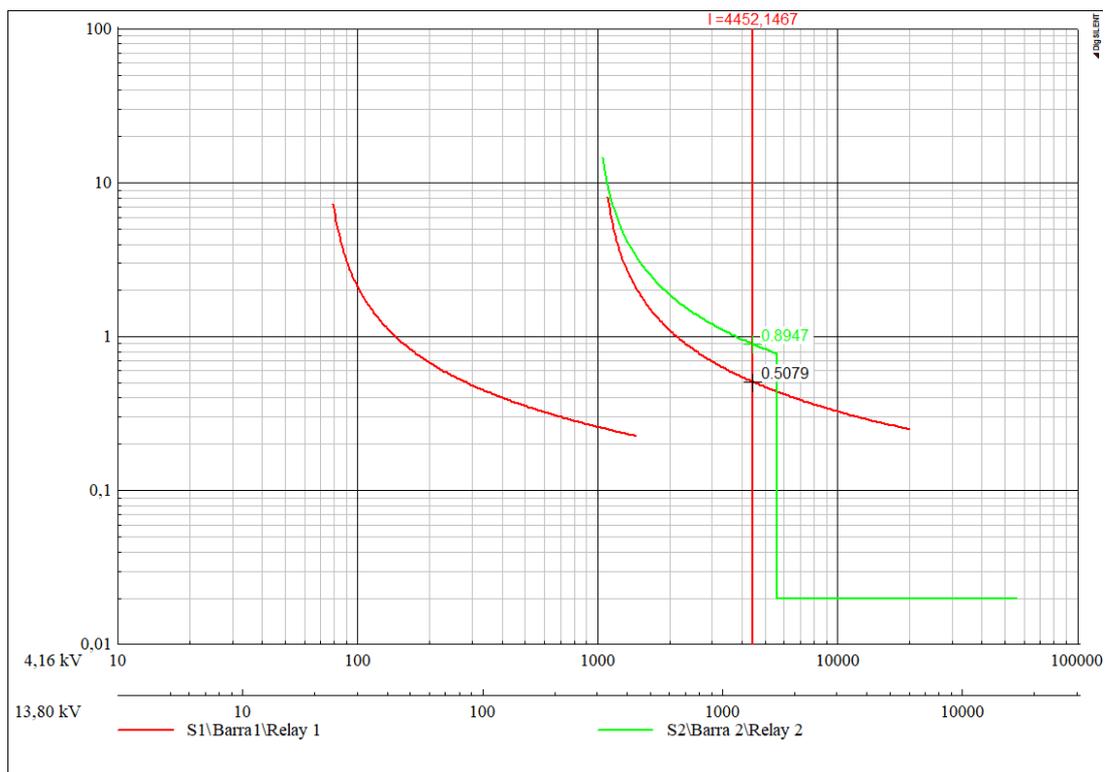
Com isso, tem-se uma caixa para escolha do padrão e tipo do curto-circuito, Figura B.29.

Figura B.29 – Determinar padrão e tipo do curto-circuito



Após simular o curto-circuito, é possível analisar os tempos de operação para a falta nas curvas dos relés, conforme ilustra a Figura B.30.

Figura B.30 – Tempos de operação dos relés 51-1 e 51-2



## B.2.2 – Análise das Simulações Dinâmicas

Nas simulações dinâmicas, pretende-se obter o tempo de operação dos relés nas situações de curto-circuito em circunstâncias que se aproximam mais da realidade.

Nesse capítulo será apresentado como selecionar as variáveis de estudo aos gráficos e os procedimentos para realizar as simulações dinâmicas.

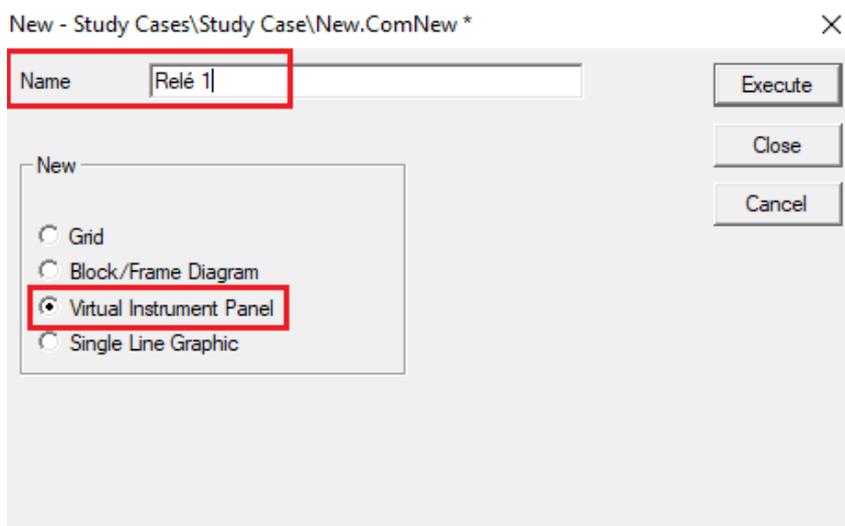
### B.2.2.1 – Inserindo as variáveis de estudo

Para realizar as simulações dinâmicas é necessário que se determine as variáveis a serem analisadas. Primeiro, seleciona-se a opção “Insert New Graphic” que abrirá uma nova janela onde serão criados os gráficos os quais irão conter as variáveis que serão estudadas, como demonstrado nas Figuras B.31 - B.34.

Figura B.31 – "Insert New Graphic"



Figura B.32 – "Virtual Instrument Panel"

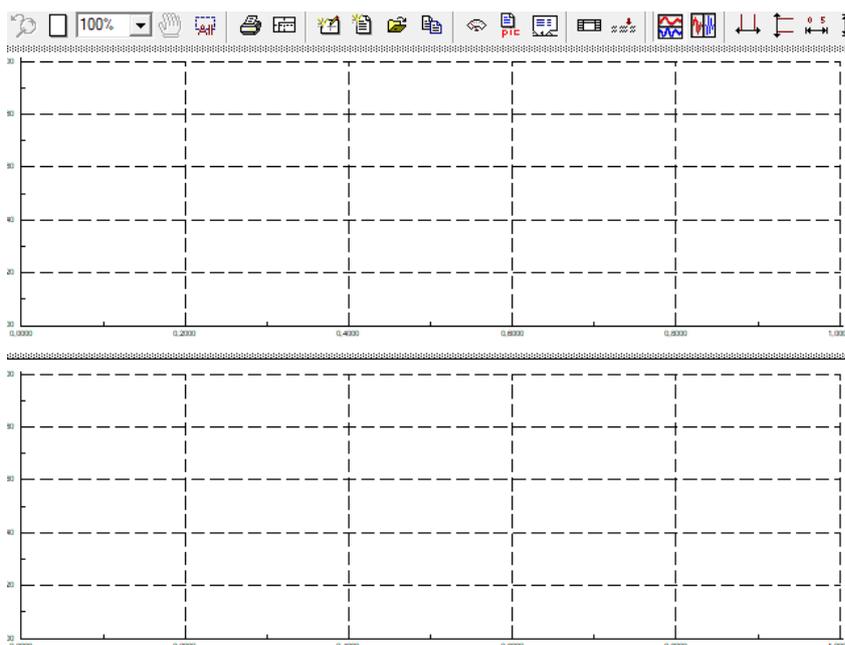


Para inserir os gráficos na nova aba, seleciona-se “Append New” que abrirá uma caixa para escolher a quantidade de gráficos e o estilo mais conveniente para análise.

Figura B.33 – "Append New"



Figura B.34 – Gráficos criados



Para adicionar as variáveis, deve-se selecionar o componente do sistema e com o botão direito do mouse ir em “Define” e selecionar a opção “Variable Set (Sim)”. Após isso, acessar

o bloco do equipamento e escolher as variáveis de estudo.

O exemplo que descreve esses procedimentos refere-se as variáveis seleccionadas para o TC 1 do sistema-teste, conforme as Figuras B.35 - B.37.

Figura B.35 – Acessar o componente do sistema

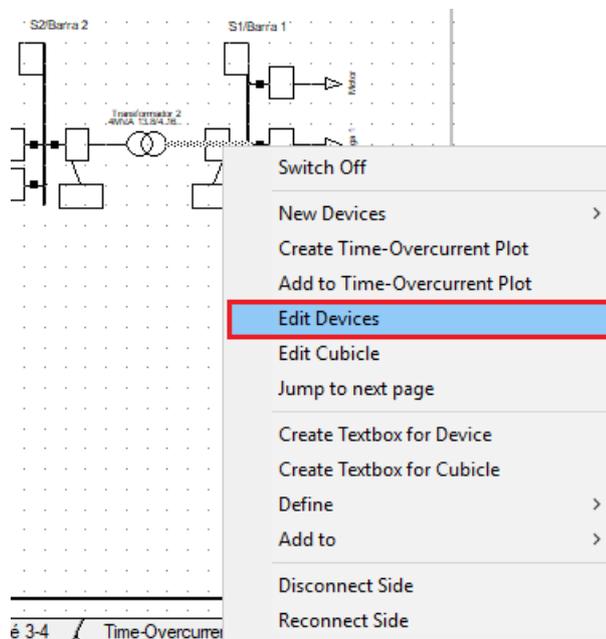


Figura B.36 – Selecionar as opções "Define" e "Variable Set (Sim)"

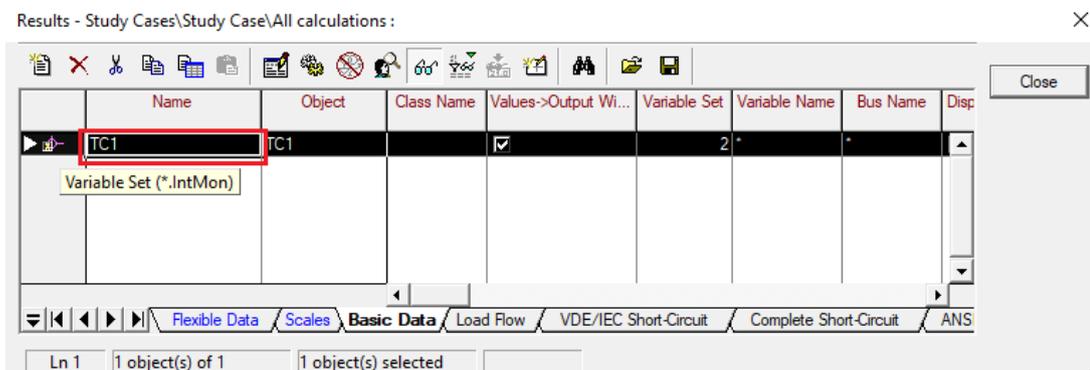
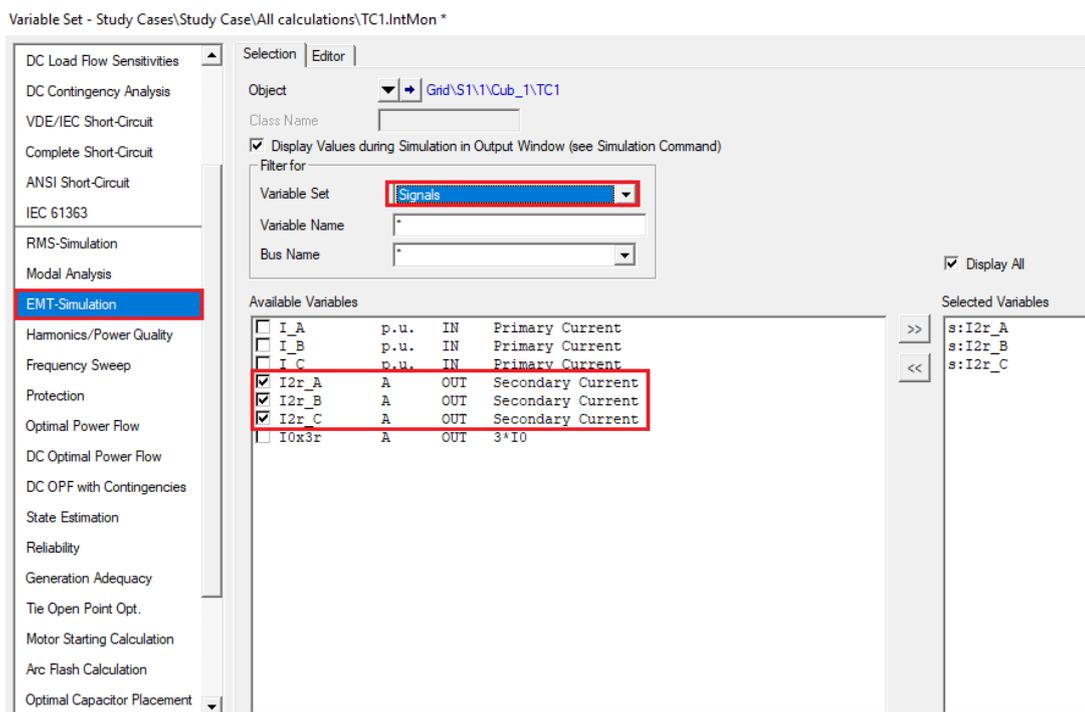
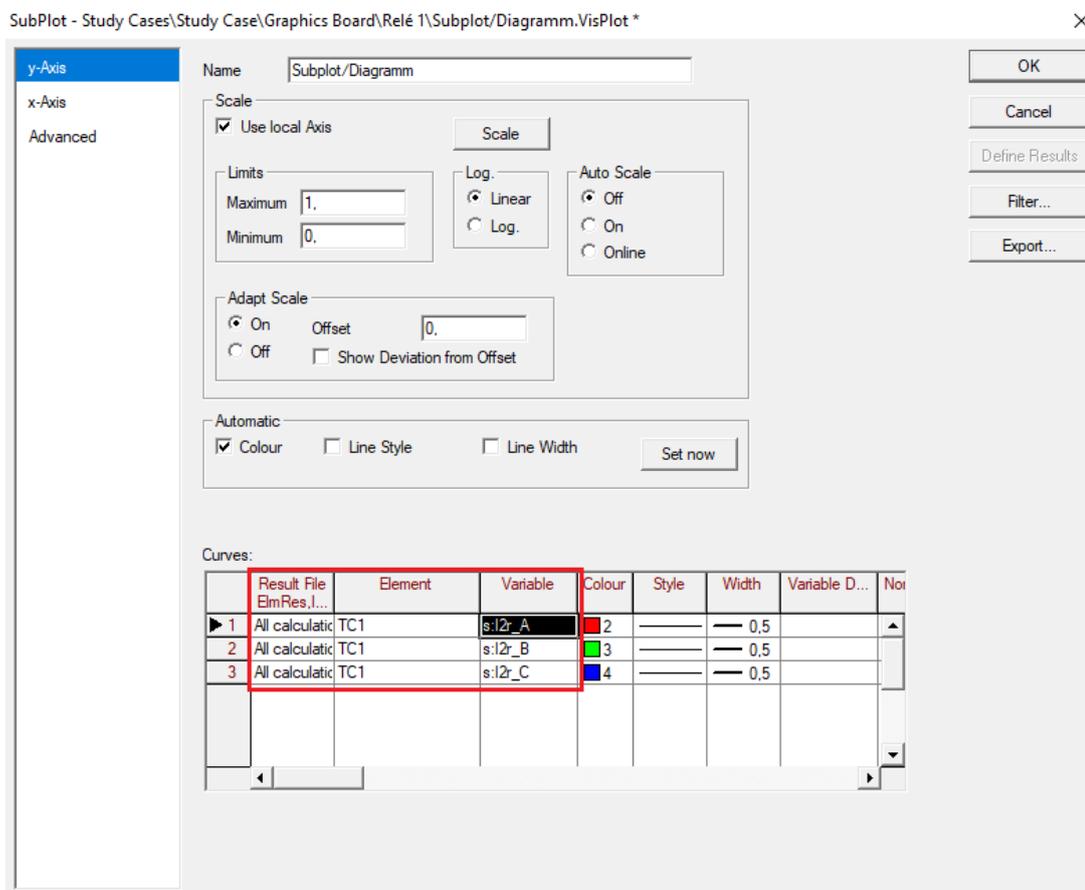


Figura B.37 – Selecionar as variáveis de estudo



Agora, para adicionar essas variáveis aos gráficos criados, deve-se clicar duas vezes com o botão esquerdo em cima do gráfico, selecionar no primeiro quadrado a opção “All calculations”, no segundo o componente em questão, nesse caso o TC1, e no terceiro as variáveis a serem analisadas, nesse caso as correntes secundárias nas três fases, Figura B.38.

Figura B.38 – Adição das variáveis de estudo aos gráficos



### B.2.2.2 – Simulação Instantânea

Adicionadas as variáveis de análise nos respectivos gráficos, para realizar a simulação instantânea, deve-se aplicar o curto-circuito a frente do relé, como já citado na seção B.2.1.

Dessa maneira, a falta 1 do sistema-teste pode ser simulada tanto no diagrama unifilar do sistema, como também na subestação que compõe a barra 1. Para visualizar a subestação da barra 1, deve-se seguir os passos das Figuras B.39 e B.40.

Figura B.39 – Mostrar a Subestação

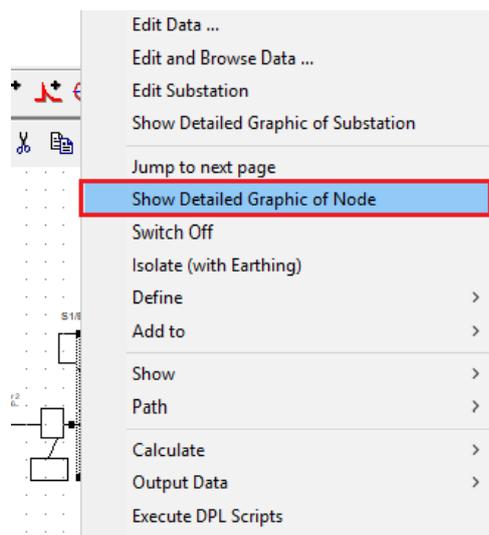
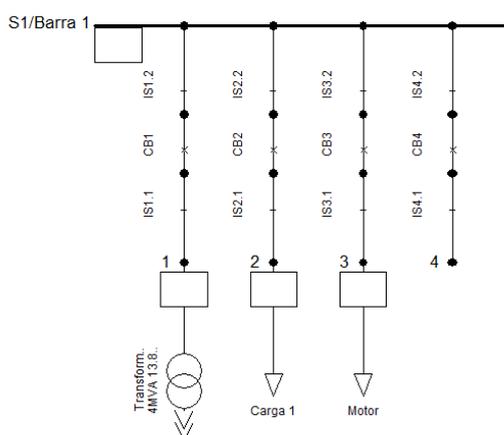


Figura B.40 – Subestação da Barra 1



Para simular o curto-circuito, deve-se seguir as instruções dadas pelas Figuras B.41 - B.47.

Figura B.41 – Definir o CC

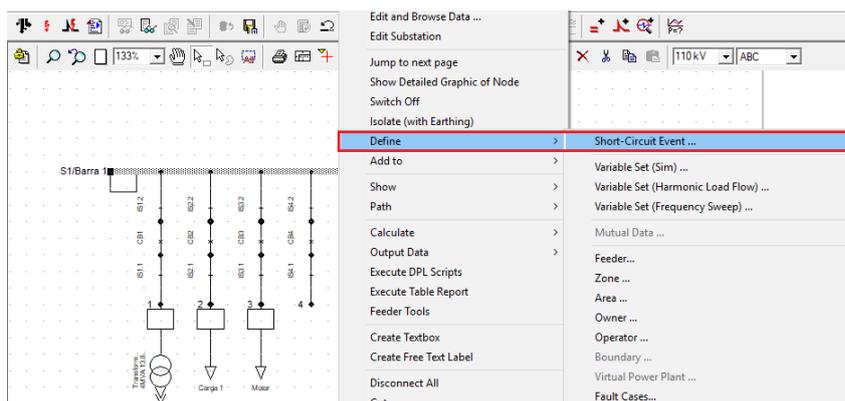


Figura B.42 – Definir o tipo de CC

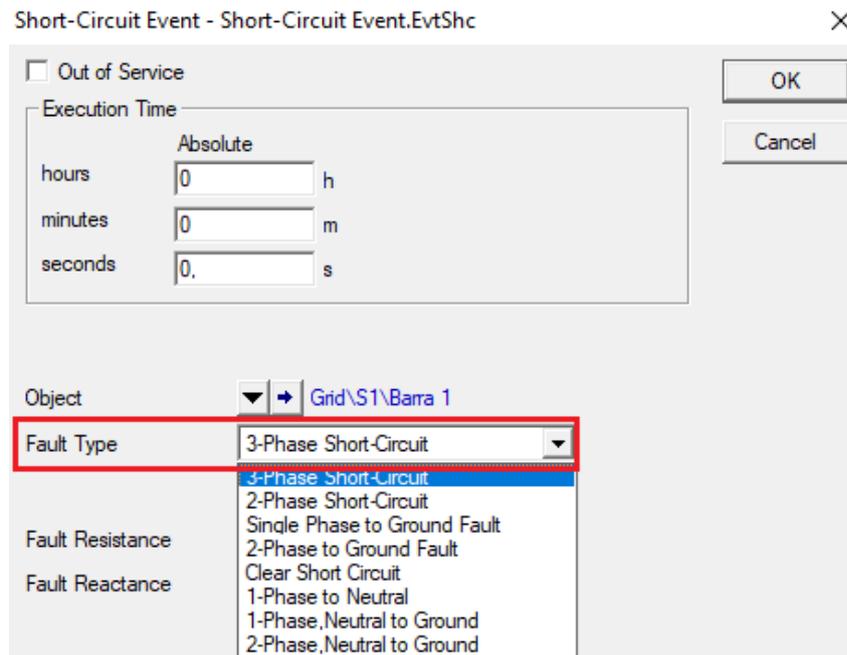
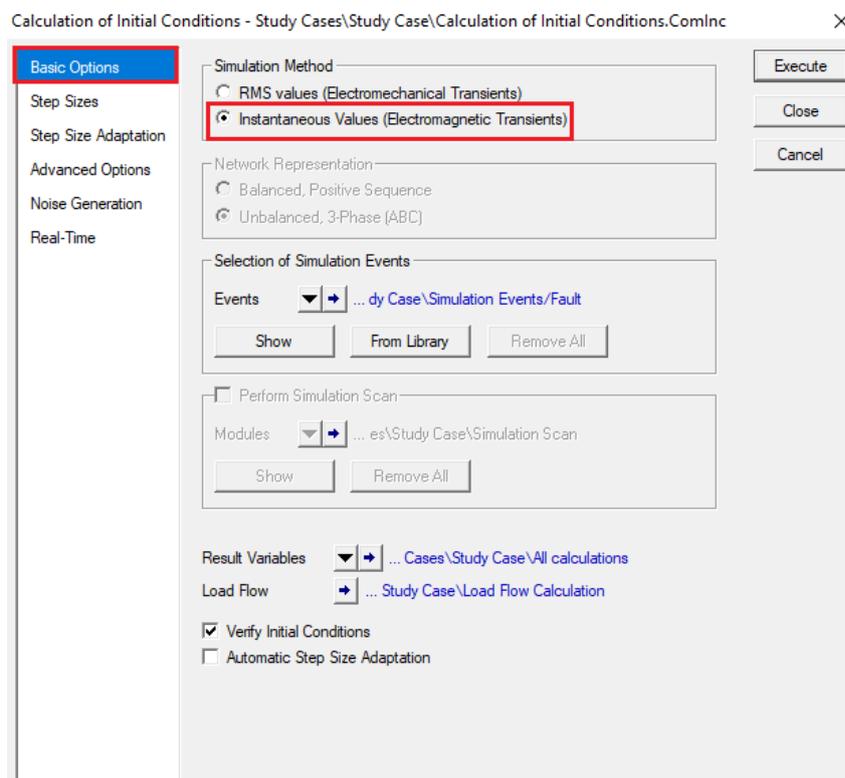


Figura B.43 – Calculate Initial Conditions

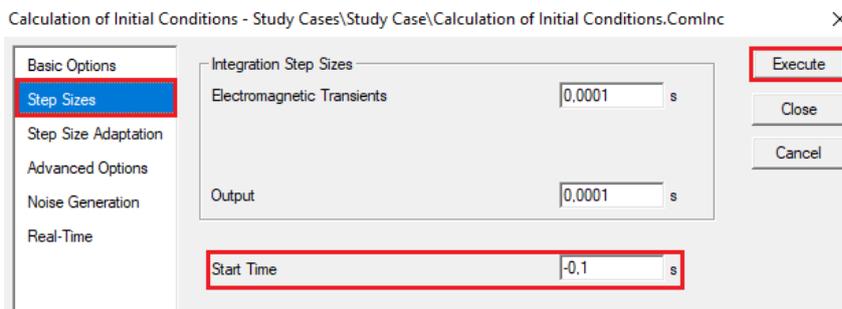


Figura B.44 – Selecionar Simulação Instantânea



Agora, configura-se o tempo de pré-falta, como demonstrado na Figura B.45.

Figura B.45 – Tempo de pré-falta

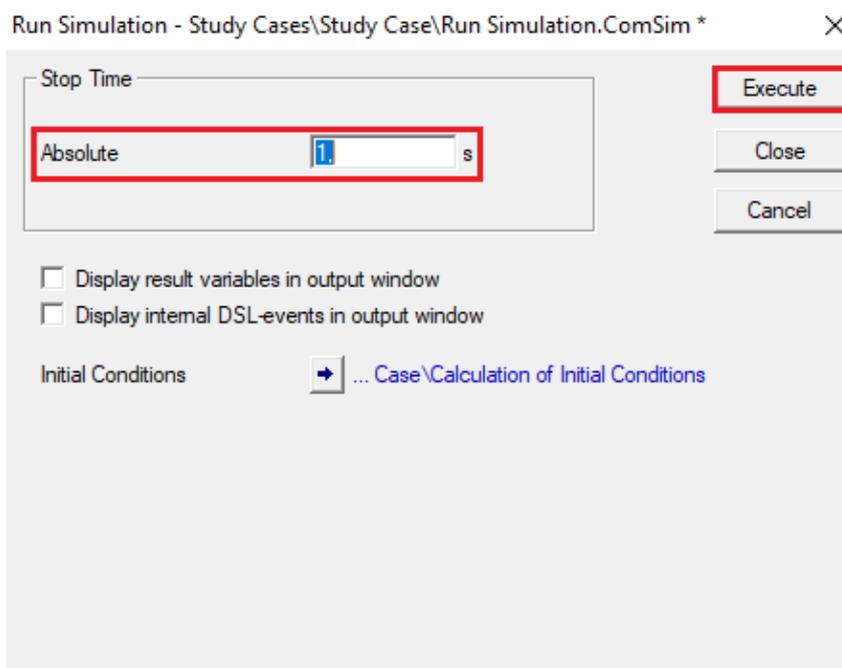


Finalmente, deve-se iniciar a simulação e determinar o tempo de falta, Figura B.46.

Figura B.46 – "Start Simulation"



Figura B.47 – Tempo de simulação do CC



Nas Figuras B.48 - B.49, pode-se verificar os gráficos das correntes de falta 1 no secundário do TC1 do sistema-teste, o curto-circuito isolado após atuação do relé 51-1 e o trip do relé 51-1 para a falta 1.

Figura B.48 – CC no secundário do TC1

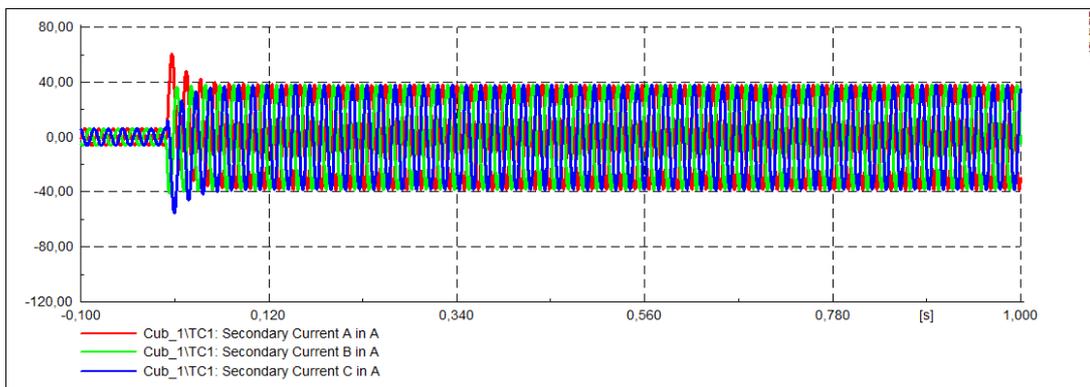


Figura B.49 – CC isolado após a atuação do Relé 51-1

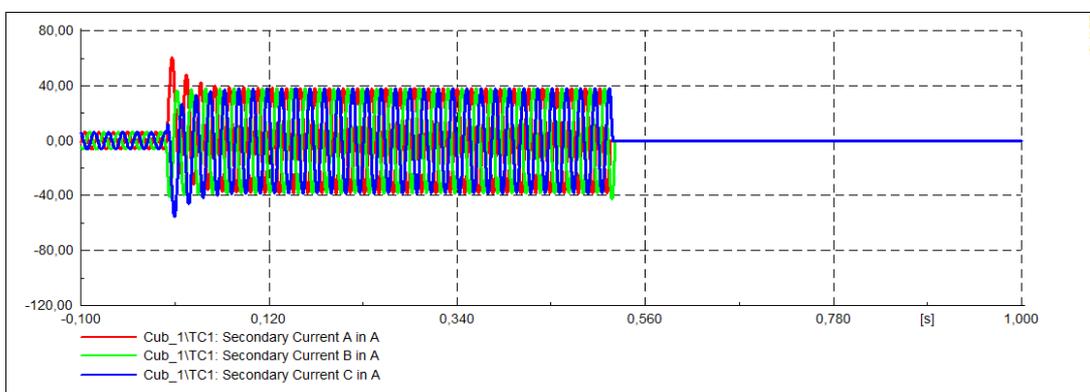
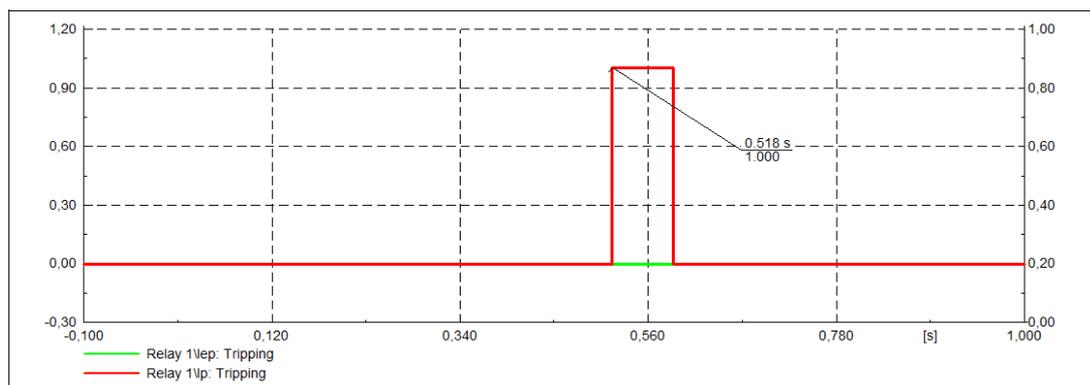


Figura B.50 – Trip do Relé 51-1



Além disso, na janela de comando também pode-se observar os valores de tempo de *trip* do relé. O interessante é poder simular as proteções principal e retaguarda e obter os tempos das duas atuações na mesma simulação. Para isso, deve-se abrir o bloco do relé, clicar duas vezes em “Logic Phase (ou Earth)” e marcar “Out of Service”, conforme as Figuras B.51 e B.52.

Figura B.51 – Selecionar opção Logic Phase/Earth

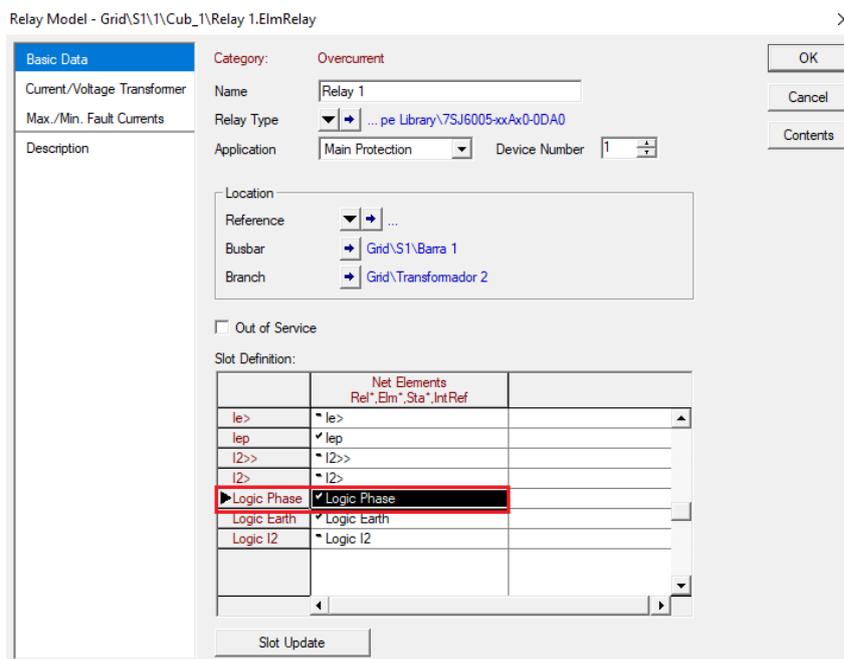
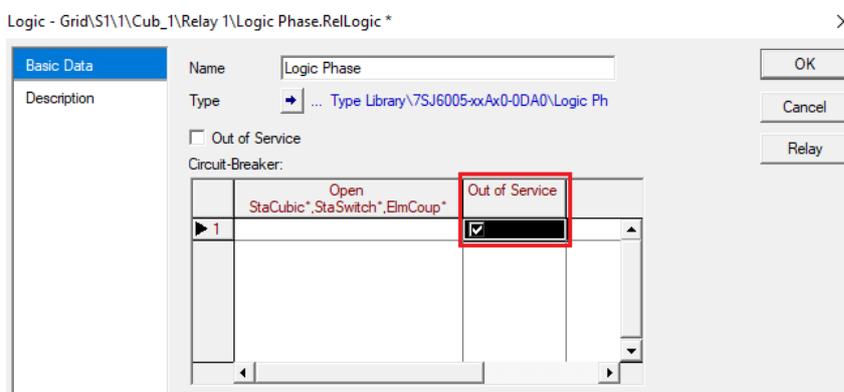
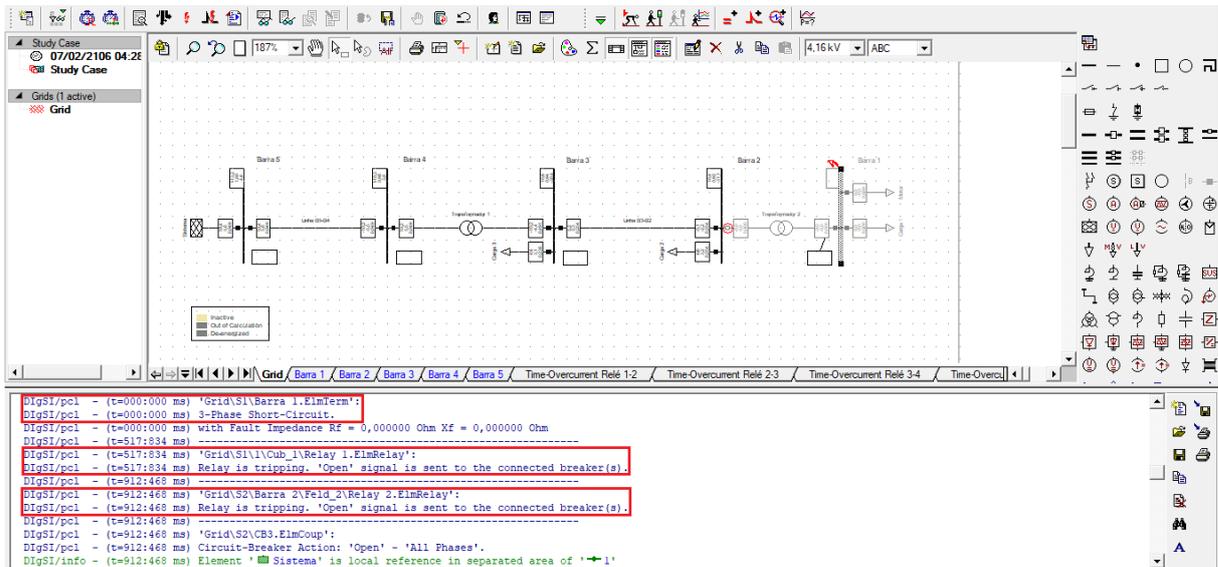


Figura B.52 – Selecionar opção "Out of Service"



Ao rodar a simulação, os tempos das duas proteções são mostrados na janela de comando. Como a opção “Out of Service” foi marcada para o relé 51-1, o conjunto “trip + abertura de disjuntor” permaneceu ativo para o relé 51-2, e como pode-se observar na Figura B.53, o disjuntor do relé 51-2 isolou a falta trifásica 1 do sistema-teste.

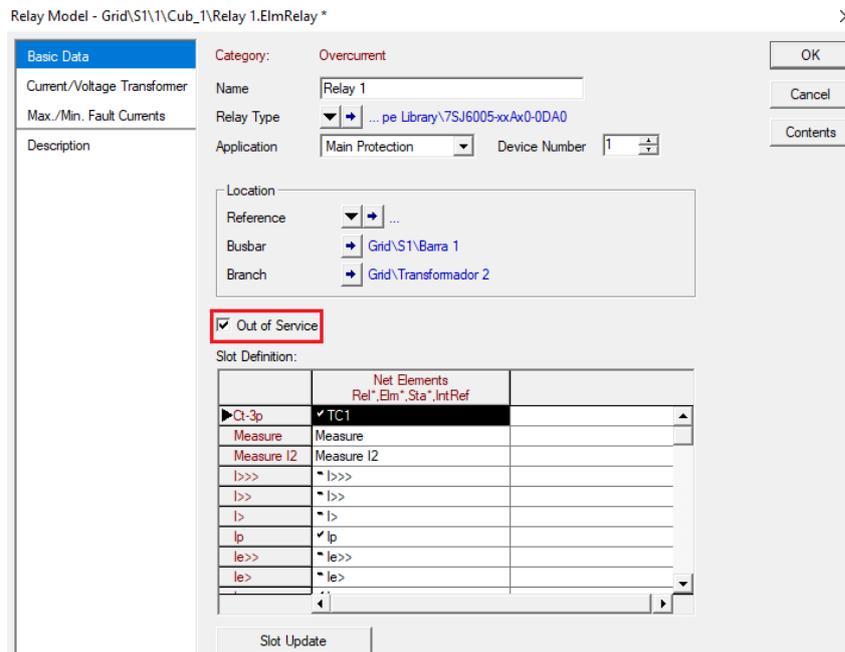
Figura B.53 – Simulação da falta trifásica 1 e atuações da proteção principal e retaguarda



### B.2.2.3 – Obtenção do arquivo COMTRADE

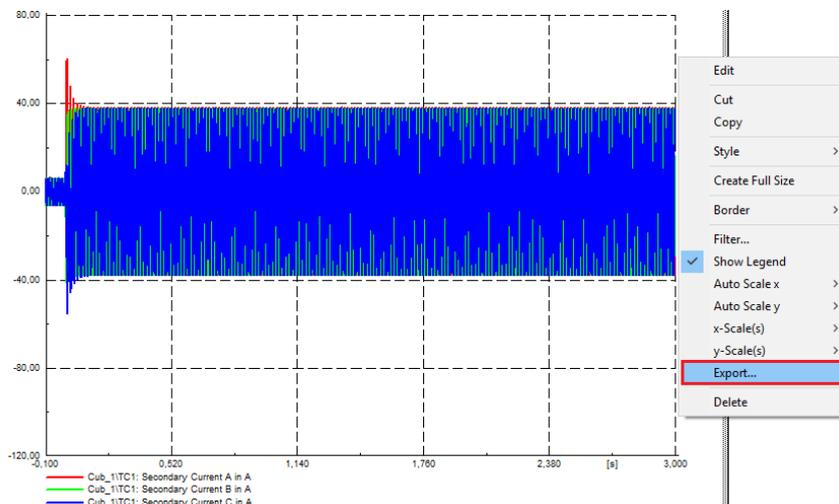
Para gerar os COMTRADEs, deve-se simular os curtos circuitos no modo instantâneo e marcar a opção “Out of Service” no bloco de todos os relés do sistema, de maneira que se tenha as correntes de falta nos trechos indicados com todos os pontos possíveis da forma de onda, conforme a Figura B.54.

Figura B.54 – Relés fora de serviço



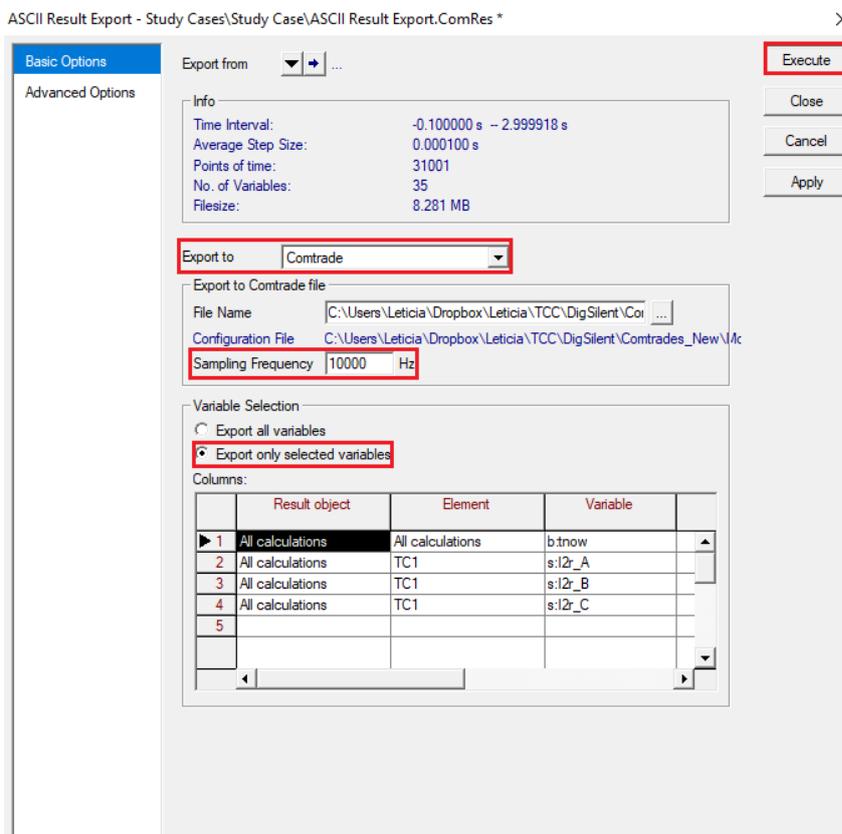
Feito isso, deve-se clicar como botão direito em cima do gráfico das correntes de falta e selecionar a opção “Export”, como mostra a Figura B.55.

Figura B.55 – Selecionar opção "Export"



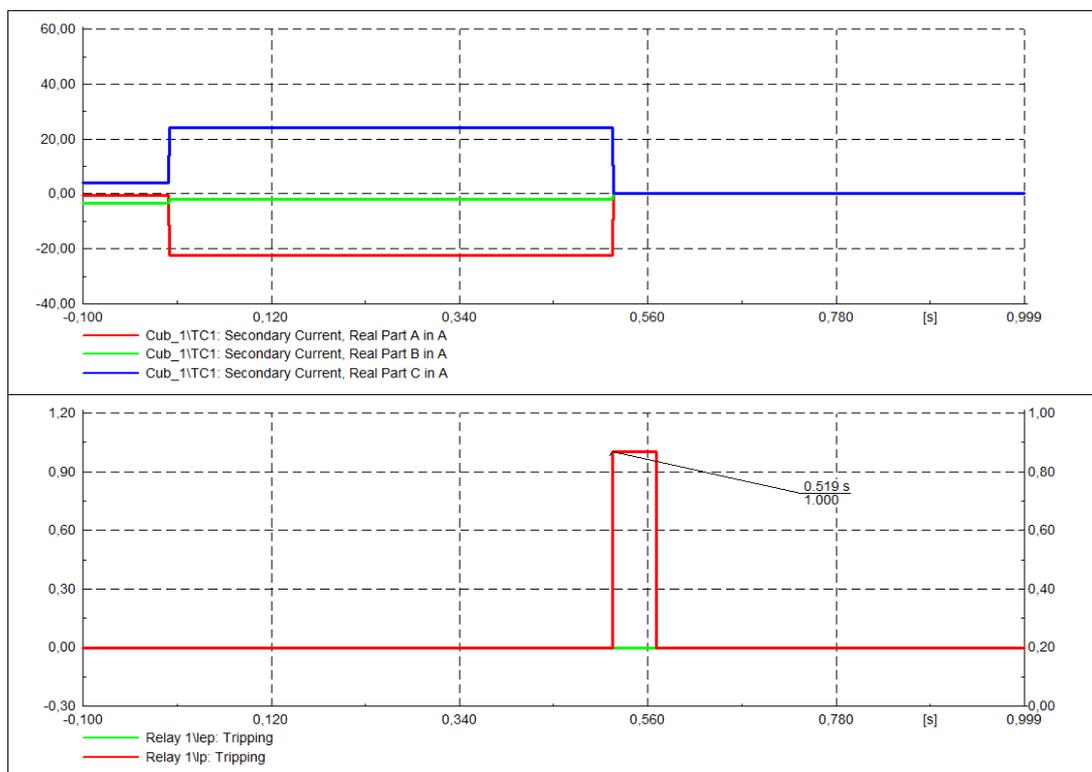
Uma caixa será aberta e deve-se escolher a opção COMTRADE, a frequência de amostragem do arquivo e por último, selecionar “Execute”, Figura B.56. Para admitir um valor de frequência de amostragem é interessante saber a frequência de amostragem do equipamento que será inserido o COMTRADE. Caso não se tenha essa informação, o melhor a fazer é escolher uma frequência de amostragem relativamente alta.

Figura B.56 – Exportar o COMTRADE



#### B.2.2.4 – Simulação RMS

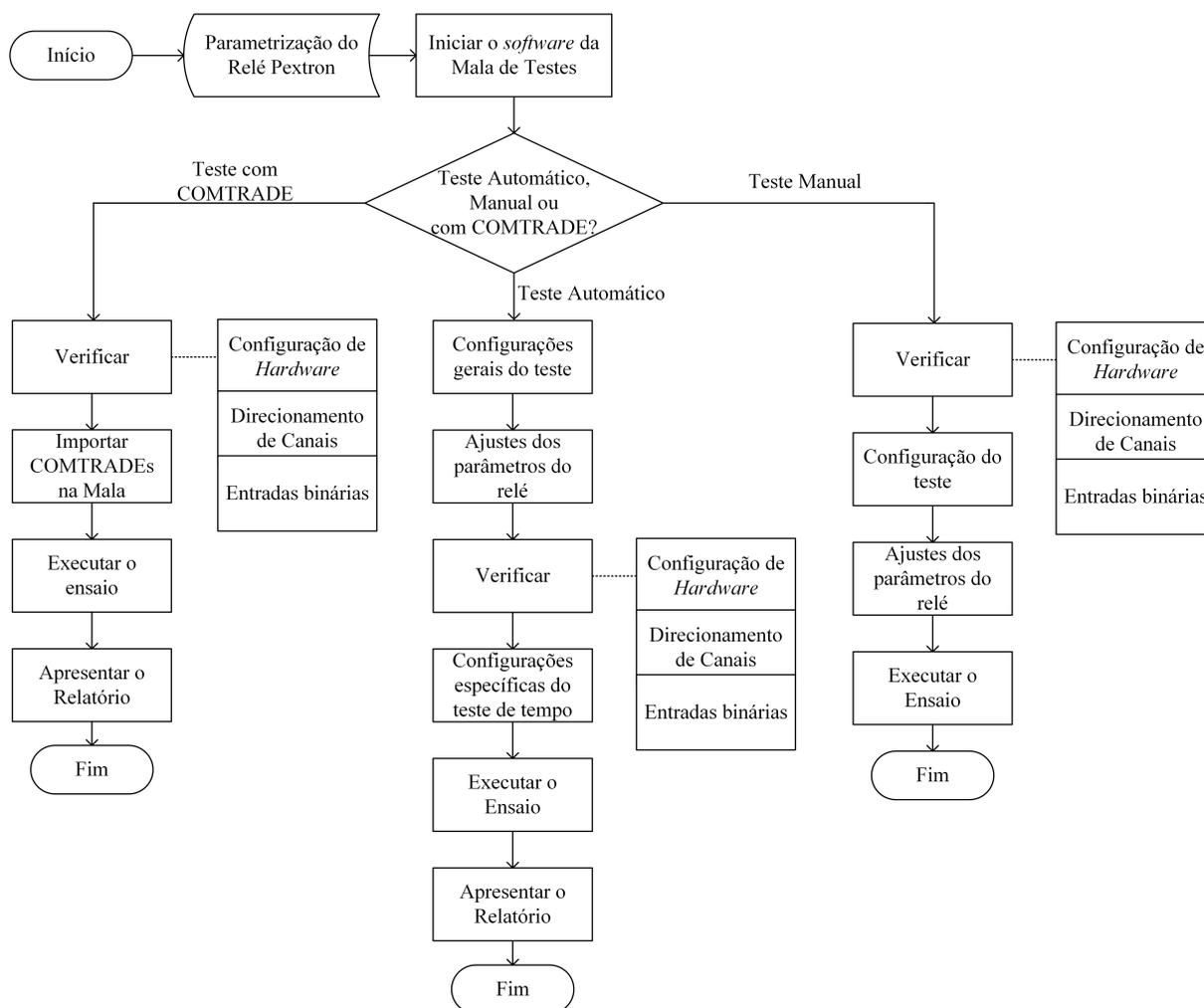
Para executar essa simulação, tem-se como base os procedimentos realizados para a instantânea que são os mesmos, o único detalhe é no bloco da Figura B.44 seleciona-se a opção RMS. Na Figura B.57, tem-se o curto-circuito isolado pela atuação do relé 51-1 do sistema-teste e o *trip* desse relé.

Figura B.57 – CC isolado pela atuação do relé 51- 1 e *trip* do relé 51-1

## APÊNDICE C – ROTEIRO DE COMISSONAMENTO DE RELÉS DIGITAIS DE SOBRECORRENTE

Os procedimentos gerais que conFiguram os ensaios práticos da proteção de sobrecorrente do sistema-teste da Figura 4.1 utilizando o equipamento Mala de Testes estão representados no fluxograma da Figura C.1.

Figura C.1 – Procedimentos gerais para realização dos ensaios práticos



Fonte: elaborado pela autora.

A seguir, tem-se a divisão em seções dos roteiros de ensaios práticos utilizando arquivos COMTRADE e testes diretos (manuais e automáticos).

## C.1 – CONFIGURAÇÃO DA MALA DE TESTES PARA ENSAIOS COM COMTRADE

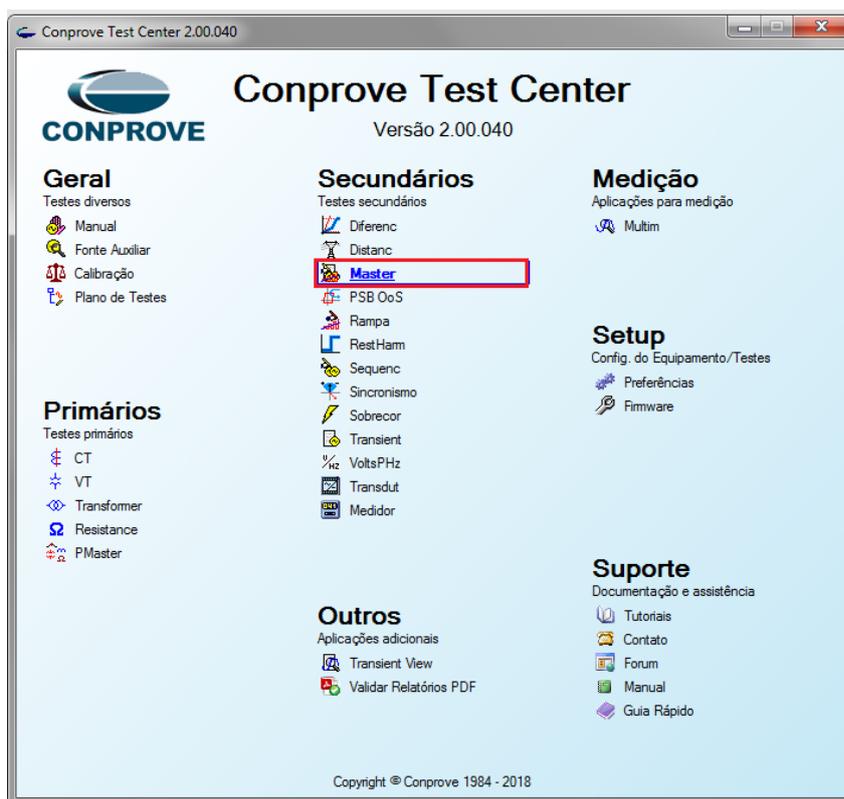
Para o desenvolvimento desse tutorial, será usada como exemplo a coordenação dos relés 1 e 2 para a falta trifásica 1 do sistema-teste da Figura 4.1.

Os procedimentos apresentados tem como base o Manual de Orientação do equipamento de testes CONPROVE (2018a).

### C.1.1 – Iniciando o *software* da Mala de Testes

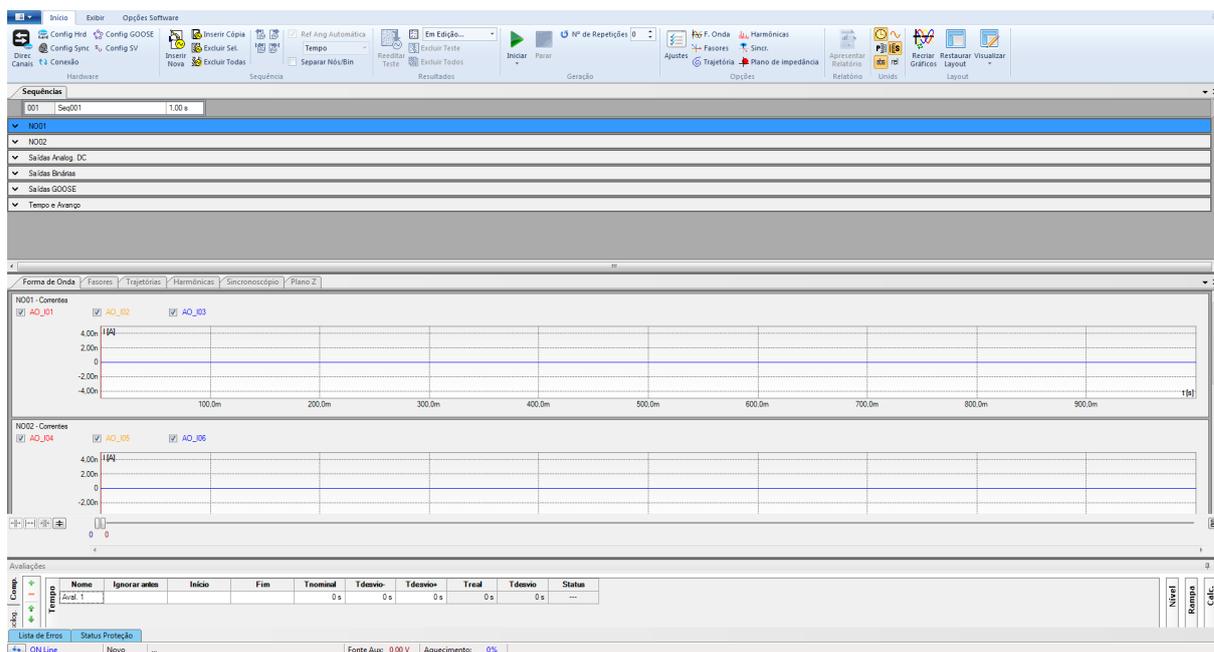
Ao executar o *software* da equipamento, denominado "Conprove Test Center", seleciona-se a opção "Master", Figura C.2, para ser possível a realização dos ensaios com os arquivos COMTRADE.

Figura C.2 – Selecionar a opção "Master"



Após isso, tem-se a tela de trabalho da interface computacional da mala, Figura C.3.

Figura C.3 – Área de trabalho



### C.1.2 – ConFigurações de *Hardware*

Para estabelecer a conexão das bobinas de corrente com os terminais do relé comercial deve-se selecionar a opção “Config Hrd”, Figura C.4

Figura C.4 – Selecionar a opção "Config Hrd"



Ao abrir a opção escolhida, existirão algumas possibilidades de ligações que permitem maiores ou menores correntes e tensões, dependendo do que se deseja executar no ensaio, nas Figuras C.5 e C.6 são apresentadas duas das sete opções existentes.

Figura C.5 – Conexão de três canais independentes

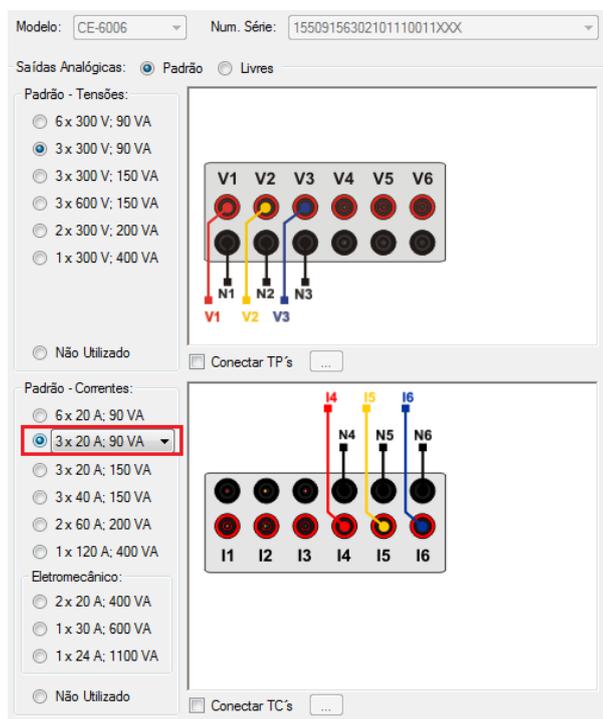
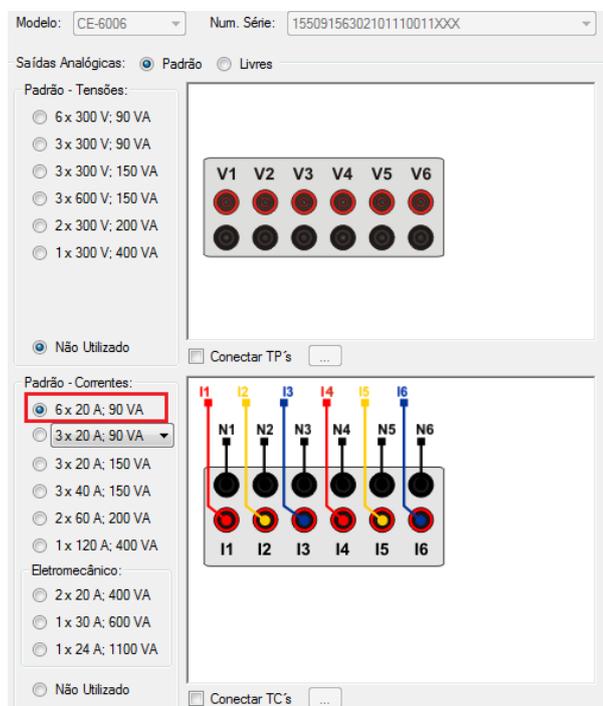


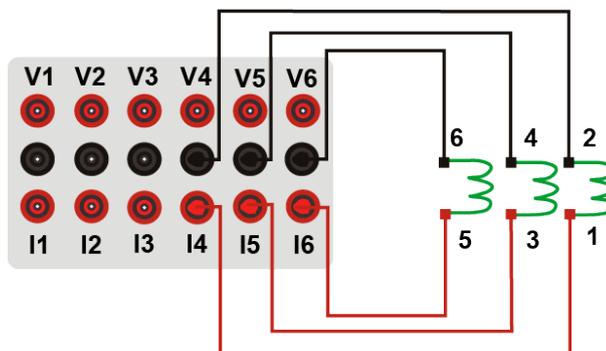
Figura C.6 – Conexão de seis canais independentes



Na ligação da Figura C.5, tem-se três canais de corrente conectados de maneira independente e que permitem um máximo de 20 A de corrente e 90 VA de potência por canal. Já na ligação da Figura C.6, tem-se a conexão de seis canais de corrente independentes, cada um permitindo a passagem de 20 A e 90 VA.

O modelo de ligação das saídas de corrente para o relé, ilustrado na Figura C.7 é o mesmo para todas as possibilidades de conexões da mala de testes. Os canais I4, I5 e I6 devem ser conectados aos pinos 1, 3 e 5 do terminal do relé e os comuns do equipamento aos pinos 2, 4 e 6 do relé.

Figura C.7 – Ligação dos bornes de corrente com os terminais do relé



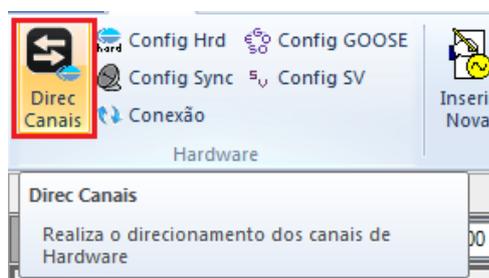
Fonte: (CONPROVE, 2018b).

Como já mencionado anteriormente, as conexões físicas das saídas de corrente e tensão dependem do que vai ser realizado em cada teste. O próprio *software* da mala de testes ilustra como deve ser feita cada uma das conexões disponíveis.

### C.1.3 – Direcionamento de Canais

Para direcionar os canais no *software* do equipamento, deve-se selecionar a opção "Direc Canais", Figura C.8.

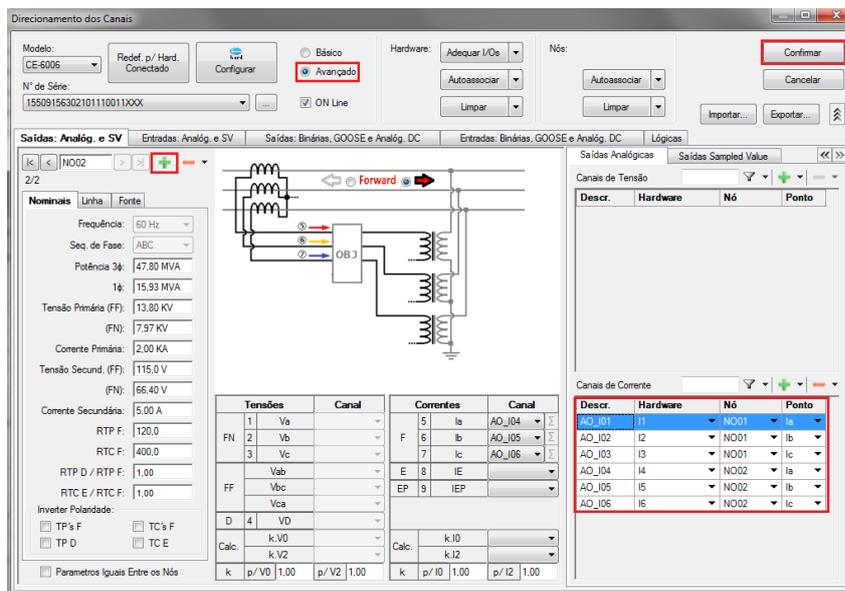
Figura C.8 – Selecionar a opção "Direc Canais"



Como pretende-se analisar as proteções principal e retaguarda, como realizado na simulação, para os testes com documentos COMTRADE deste trabalho, deve-se inserir mais um nó para habilitar os 6 canais de injeção de corrente, sendo três fases para o relé principal e as outras três fases para o relé retaguarda.

Para isso, deve-se selecionar o menu "avançado" e o botão "+", de maneira que apareçam dois nós e que se tenha injeção de correntes de I1-I6, conforme as instruções da Figura C.9.

Figura C.9 – Direcionamento dos canais

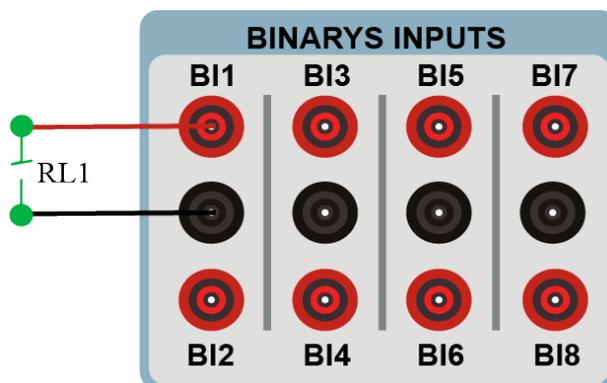


Desse modo, por organização, estabelece-se que as correntes do nó 1 são injetadas no relé principal e as correntes do nó 2 no relé retaguarda.

### C.1.4 – Entradas binárias

As entradas binárias da mala de testes recebem os sinais de *trip* dos relés. A conexão entre os relés e as entradas binárias do equipamento é realizada conforme ilustra a Figura C.10.

Figura C.10 – Entradas binárias



Fonte: Adaptado de (CONPROVE, 2018b).

Para esses ensaios, como serão analisadas atuações de mais de um relé, faz-se o uso de outras entradas binárias, que podem ser B13, B15 ou B17.

### C.1.5 – Importação dos arquivos COMTRADE e seleção das variáveis

Como já citado anteriormente, pretende-se analisar a proteção principal e retaguarda. Dessa forma, os COMTRADEs devem ser inseridos nos nós 1 e 2.

No nó 1, será carregado o COMTRADE que contém as correntes no secundário do TC1 da falta trifásica 1 do sistema-teste da Figura 4.1, conforme as instruções das Figuras C.11 - C.13.

Figura C.11 – Selecionar "NO01"

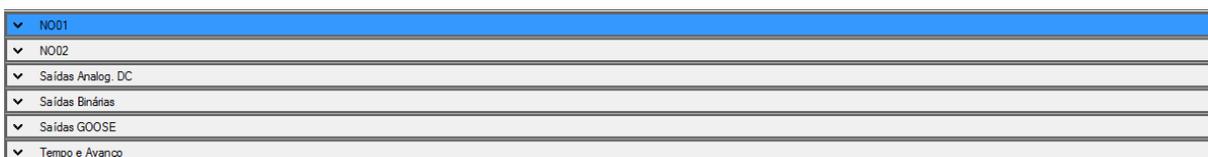


Figura C.12 – Selecionar "Comtrade"

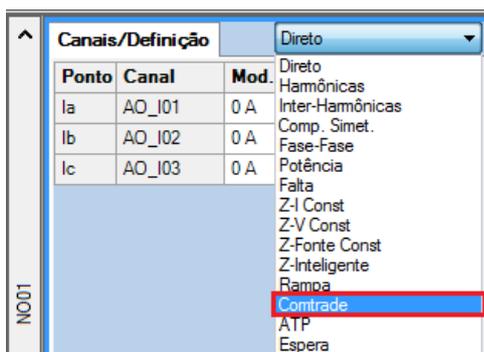
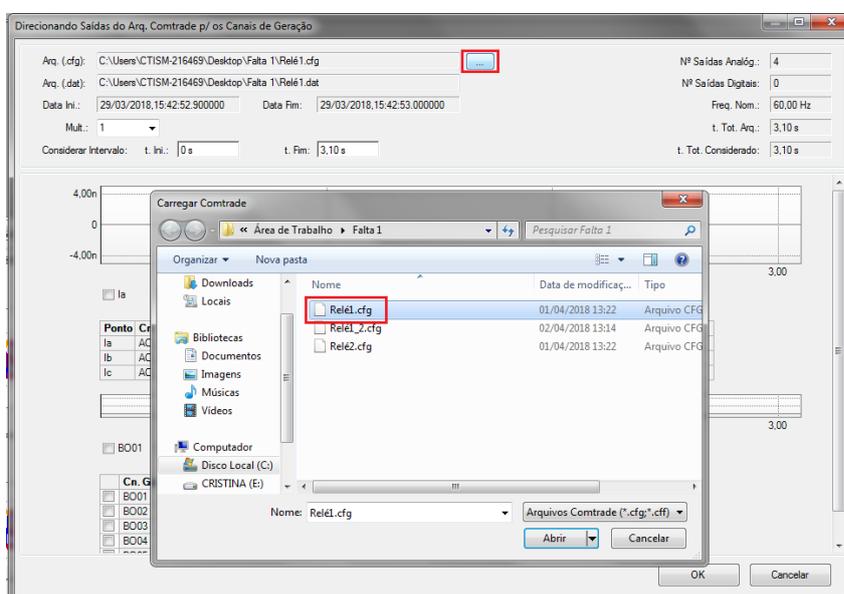
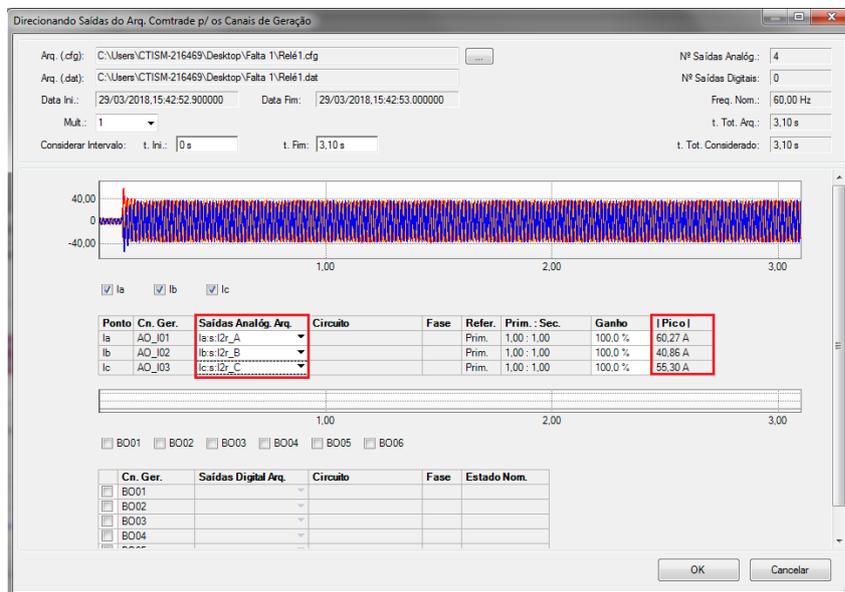


Figura C.13 – Carregar COMTRADE do relé 1 no Nó 1



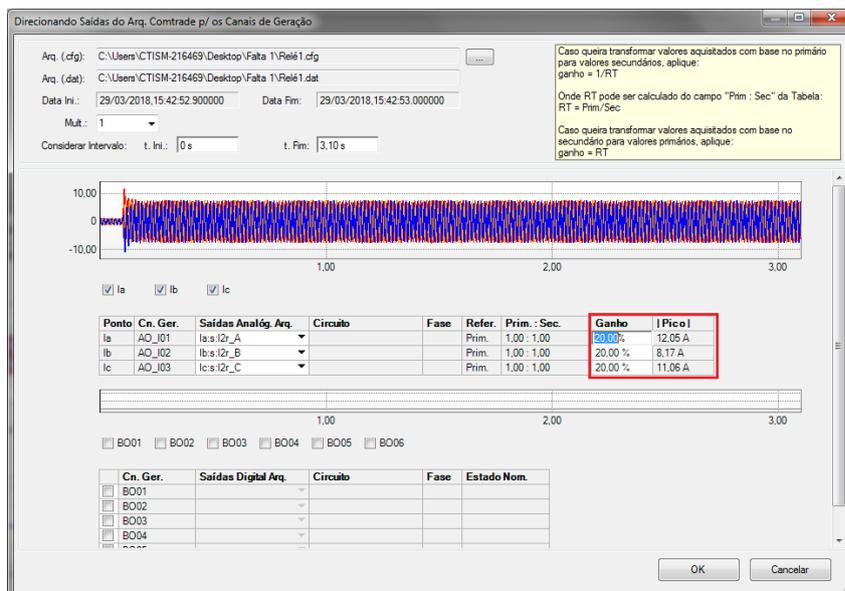
Após inserido o COMTRADE, deve-se selecionar as variáveis de correntes nomeadas no arquivo, conforme a Figura C.14.

Figura C.14 – Selecionar as variáveis de corrente



Como as correntes excedem 20 A, seleciona-se um valor de ganho que reduza esses números, como demonstrado na Figura C.15.

Figura C.15 – Selecionar o ganho



Após essas configurações tem-se o COMTRADE inserido na Figura C.16.

Figura C.16 – COMTRADE importado

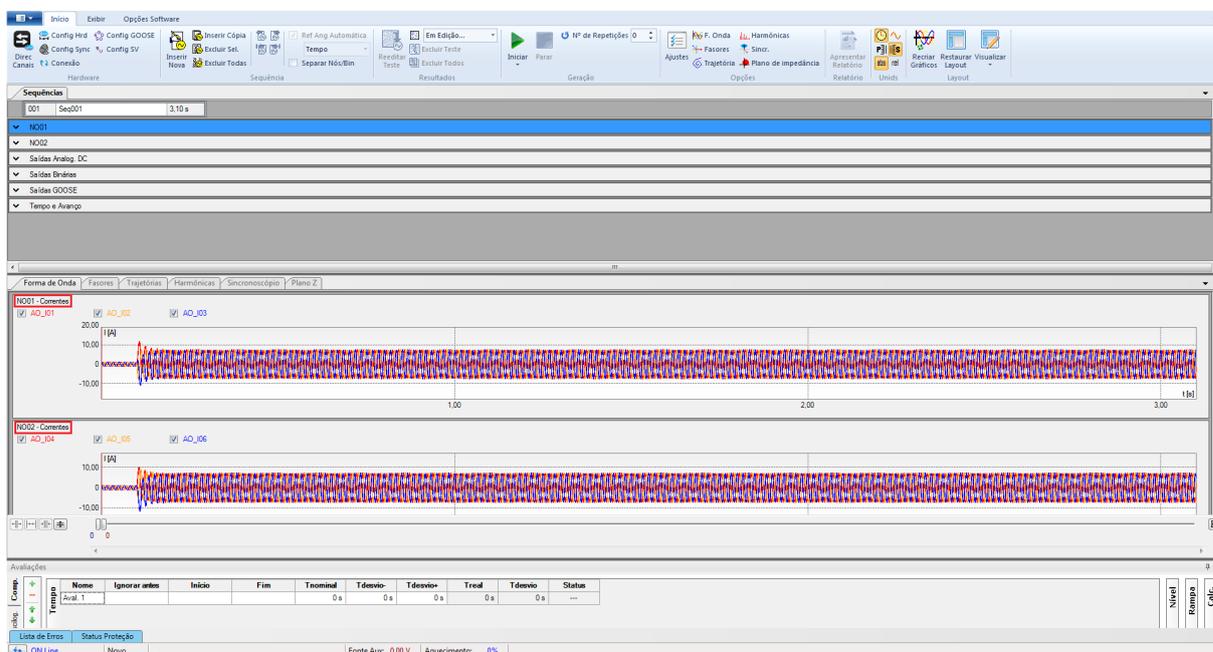
Ponto	Canal	Definições
Relé1.cfg		
Ia	AO_I01	Ia:s:I2r_A
Ib	AO_I02	Ib:s:I2r_B
Ic	AO_I03	Ic:s:I2r_C

No nó 2, será carregado o COMTRADE que contém as correntes no secundário do TC2 da falta trifásica 1 do sistema-teste da Figura 4.1. Para isso, devem ser realizados os mesmos procedimentos que foram apresentados para o COMTRADE do relé 1.

### C.1.6 – Executando os ensaios

Com os dois arquivos COMTRADE carregados, o ensaio está pronto para iniciar, conforme a Figura C.17

Figura C.17 – Visualização das correntes carregadas



Para uma maior exatidão dos resultados, escolhe-se na opção “Nº de Repetições” o número 3. Isso significa que, o teste será repetido 3 vezes e será feita uma média aritmética

dos valores finais de cada ensaio. Feito isso, pode-se iniciar o ensaio, como mostrado na Figura C.18.

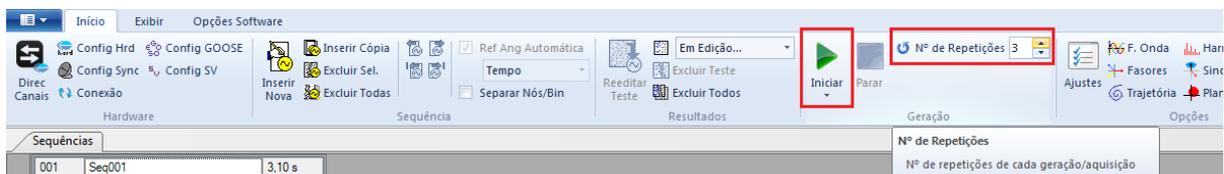


Figura C.18 – Selecionar "N de repetições" e Iniciar o ensaio

É provável que apareça um aviso de sobrecarga, conforme apresentado na Figura C.19. Para resolver isso, os LEDs dos canais de tensão e corrente da Figura C.20 devem ser acionados manualmente.

Figura C.19 – Aviso de sobrecarga

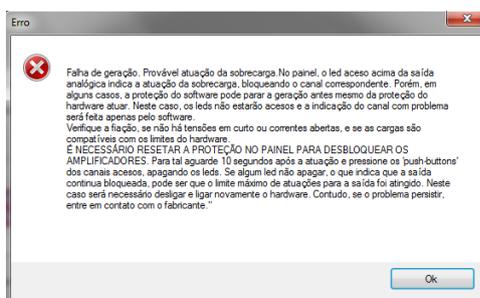
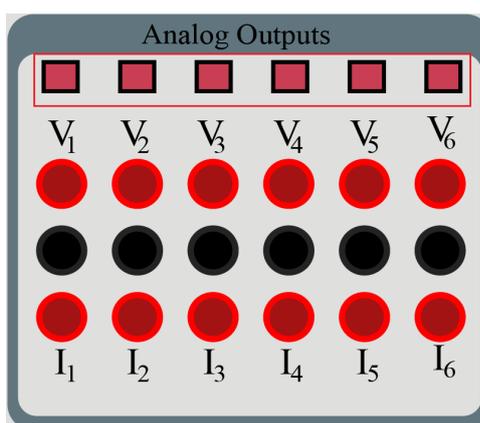
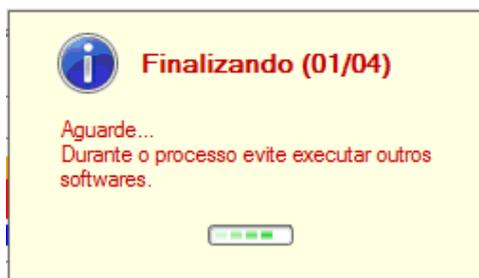


Figura C.20 – LEDs dos canais de tensão e corrente



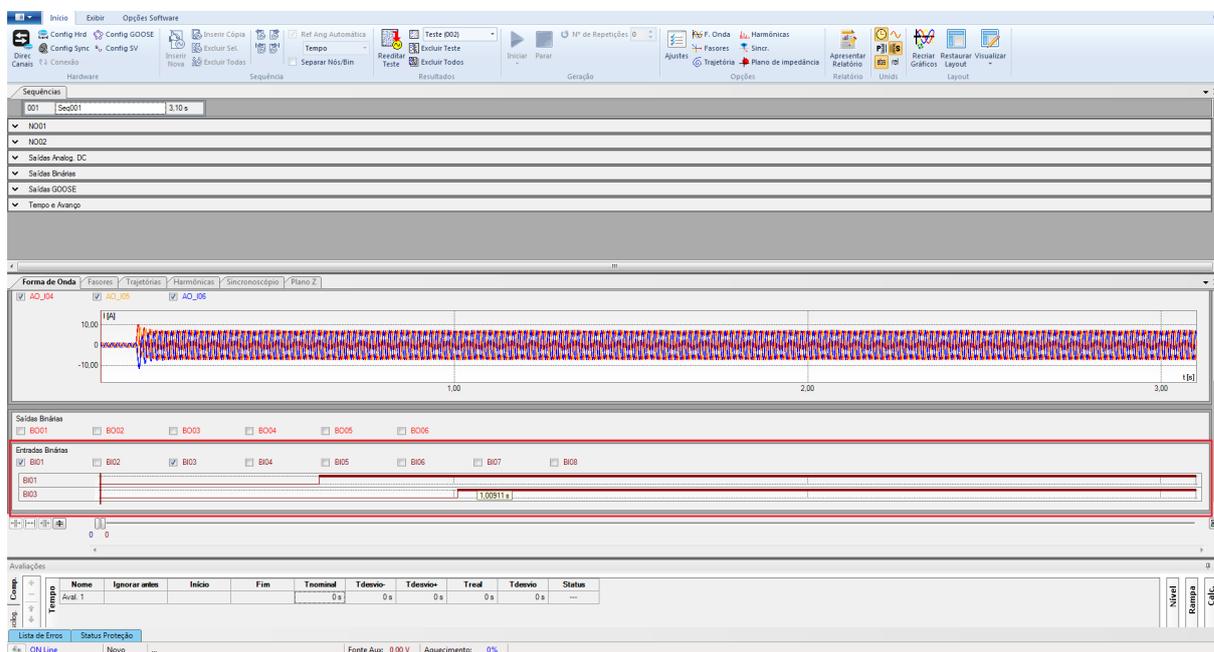
Após isso, o ensaio é iniciado e deve-se esperar alguns segundos para a finalização, conforme a Figura C.21.

Figura C.21 – Finalizando o ensaio



Finalizado o ensaio, tem-se os resultados na tela de trabalho, como ilustra a Figura C.22.

Figura C.22 – Ensaio finalizado



Na tela da Figura C.22 é possível verificar os valores de tempo de operação dos relés que as entradas binárias da mala (BI01 e BI03) receberam de cada relé.

A próxima seção apresenta como obter o relatório do ensaio.

### C.1.7 – Apresentação do relatório de ensaio

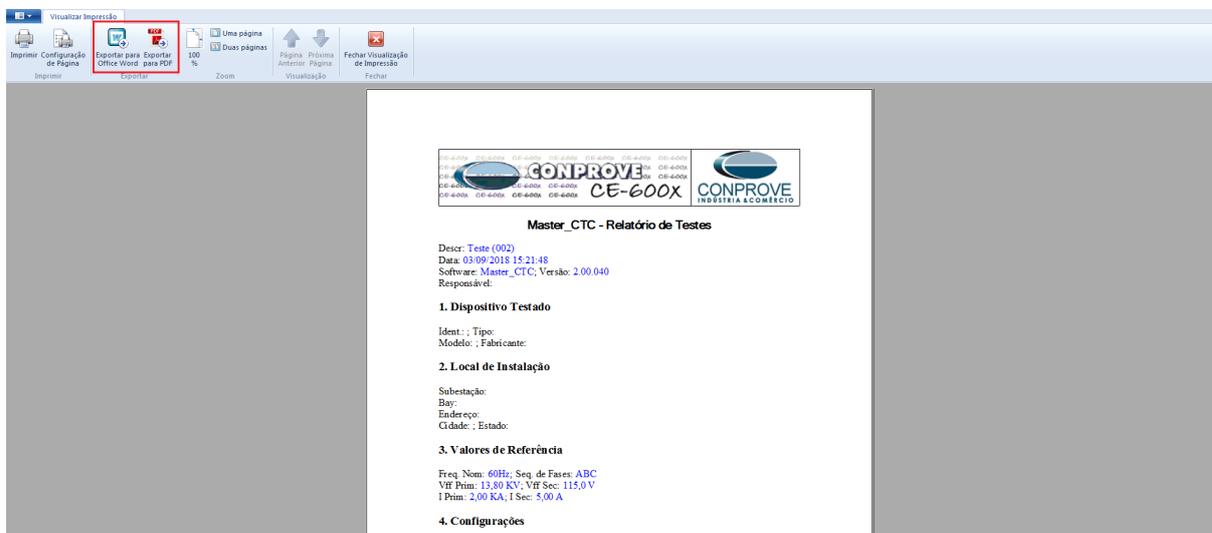
Após o término do ensaio, para ter acesso aos resultados completos, tem-se a opção "Apresentar relatório", Figura C.23.

Figura C.23 – Selecionar "Apresentar relatório"



É possível exportar esse relatório para formatos PDF ou Word, como mostrado na Figura C.24.

Figura C.24 – Exportar relatório



Dentre os dados que contém o relatório, serão listados os mais relevantes para análise.

I. O modelo e número de série da mala e a configuração do *hardware*

#### 4. Configurações

Modelo: CE-6006; Num. Série: 15509156302101110011XXX

Saídas Analógicas: Padrão

Padrão - Tensões: 6 x 20 A; 90 VA

Padrão - Correntes: 6 x 20 A; 90 VA

II. As saídas de corrente

#### 5. Direcionamento dos Canais

Saídas Analógicas

Quadro C.1 – Canais de corrente

Descr.	Hardware	Nó	Ponto	Freq. Amostr.
AO_I01	I1	NO01	Ia	26880 Hz
AO_I02	I2	NO01	Ib	26880 Hz
AO_I03	I3	NO01	Ic	26880 Hz
AO_I04	I4	NO02	Ia	26880 Hz
AO_I05	I5	NO02	Ib	26880 Hz
AO_I06	I6	NO02	Ic	26880 Hz

III. Os documentos COMTRADE carregados nos respectivos nós

### 10. Sequências

#### NO01

Figura C.25 – COMTRADE carregado no NO01

Canais/Definição			Comtrade
Ponto	Canal	Definições	
Relé1.cfg			
Ia	AO_I01	Ia:s:I2r_A	
Ib	AO_I02	Ib:s:I2r_B	
Ic	AO_I03	Ic:s:I2r_C	

#### NO02

Figura C.26 – COMTRADE carregado no NO02

Canais/Definição			Comtrade
Ponto	Canal	Definições	
Relé2.cfg			
Ia	AO_I04	IA:s:I2r_A	
Ib	AO_I05	IB:s:I2r_B	
Ic	AO_I06	IC:s:I2r_C	

#### IV. Os gráficos das correntes e os tempos obtidos

##### 11. Gráficos

Figura C.27 – Forma de onda das correntes no Nó 1 – falta 1

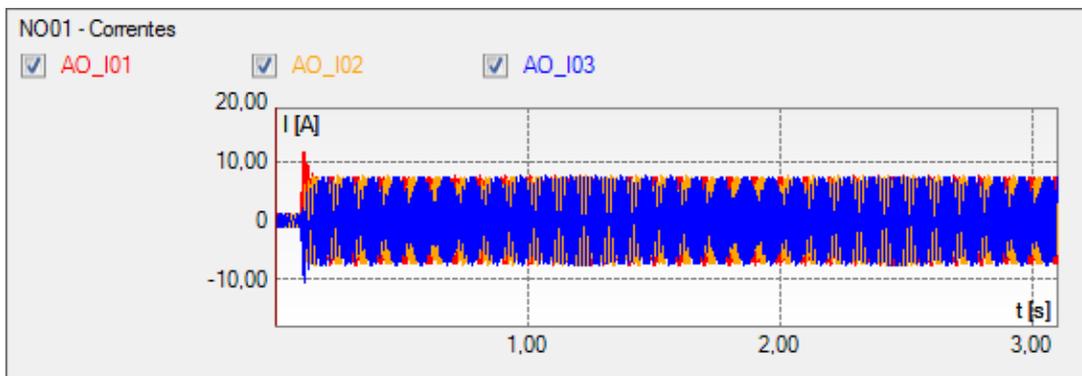


Figura C.28 – Forma de onda das correntes no Nó 2 - falta 1

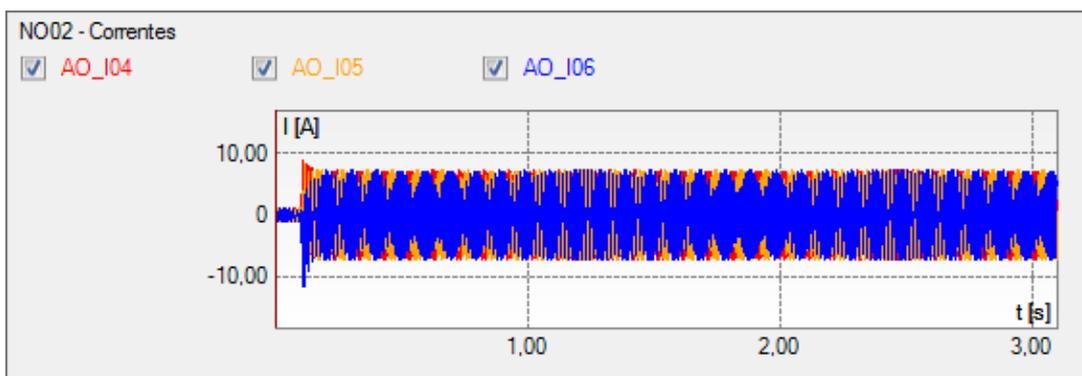
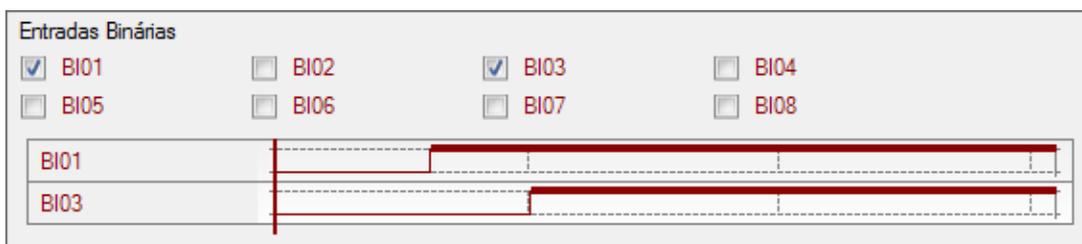


Figura C.29 – Tempos de respostas nas entradas binárias



##### 14. Transições

Quadro C.2 – Valores dos tempos de respostas recebidos pelas entradas binárias

Trans	BI01	BI02	BI03	BI04	BI05	BI06	BI07	BI08
1	611,72 ms	—	1,01 s	—	—	—	—	—

## C.2 – CONFIGURAÇÃO DA MALA DE TESTES PARA ENSAIOS MANUAIS E AUTOMÁTICOS

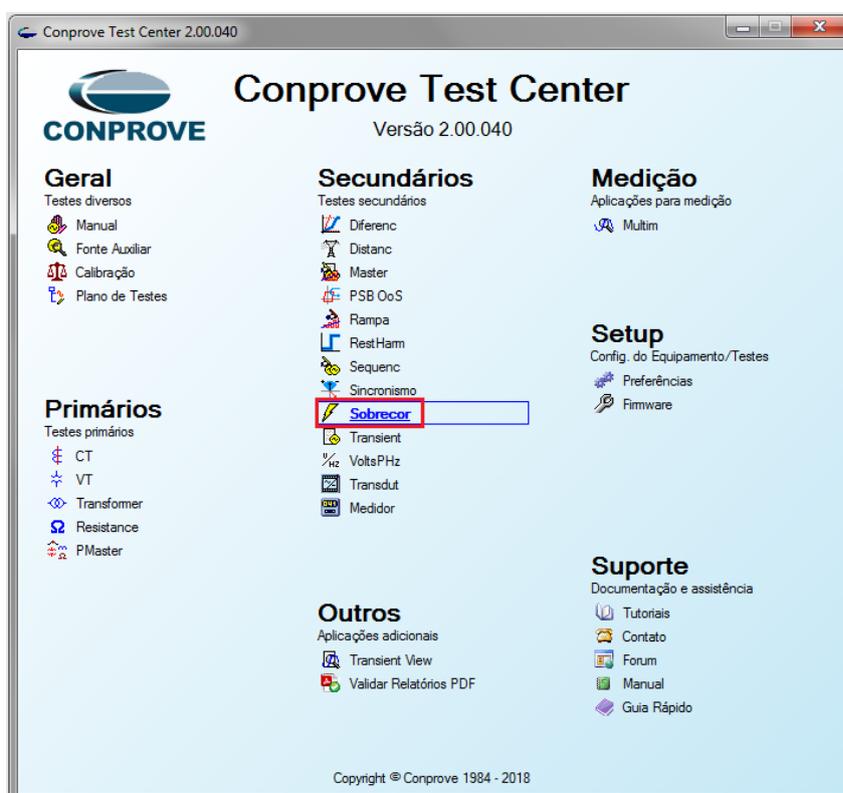
### C.2.1 – Ensaio Automático

Para apresentar os procedimentos dos ensaios automáticos, será usado como exemplo o ajuste do relé 51-1 do sistema-teste da Figura 4.1. Além disso, as instruções apresentadas tem como base o Manual de Orientação CONPROVE (2018a) e o Tutorial de Teste do equipamento utilizando o relé Pextron CONPROVE (2018b).

#### C.2.1.1 – Iniciando o software da mala de testes

Ao executar o *software* da mala de testes, deve-se selecionar a opção “Sobrecor”, conforme a Figura C.30.

Figura C.30 – Selecionar a opção "Sobrecorr"

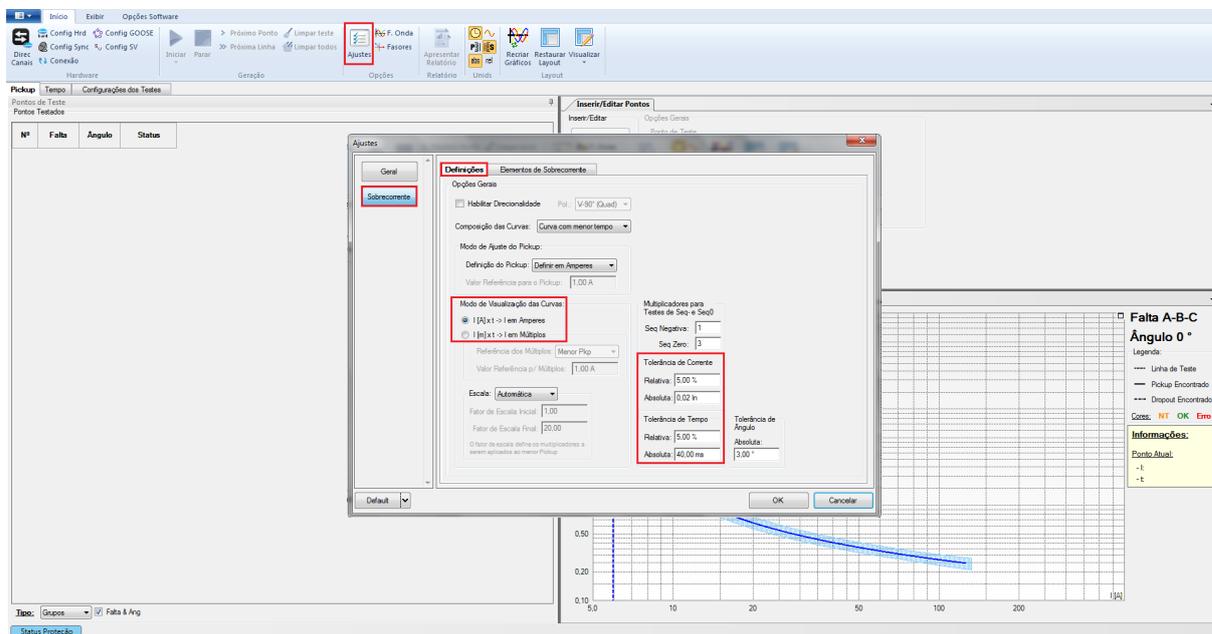


Na tela de ajustes, Figura C.31, em sobrecorrente, tem-se as opções "M" e "A", dessa maneira, pode-se escolher em que escala se pretende visualizar o gráfico da corrente(A) x tempo(s).

Além disso, com base no manual do relé da Pextron, que disponibiliza a faixa de exatidão do equipamento, deve-se parametrizar a tolerância relativa de corrente e tempo, que estará

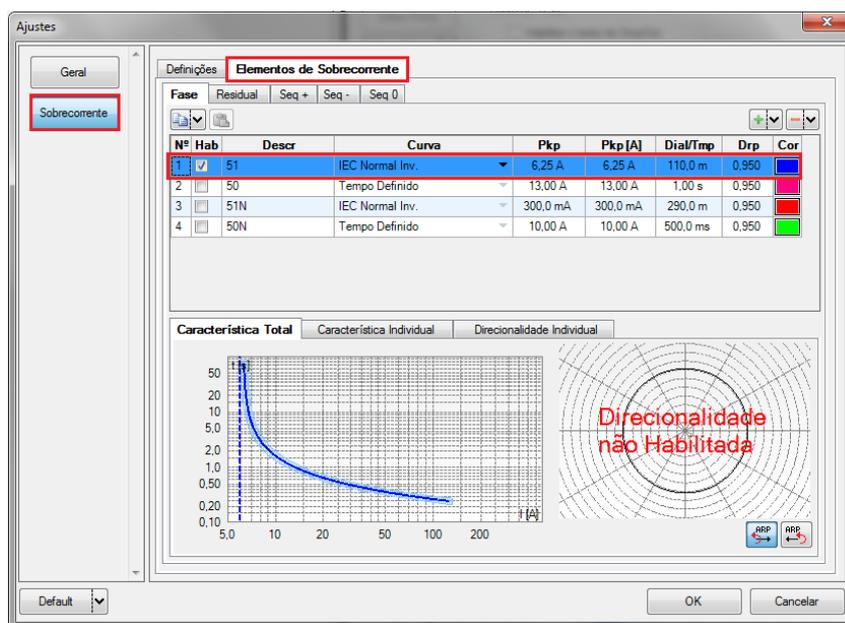
indicada na curva de tempo que será construída no ensaio.

Figura C.31 – Configurações gerais



O próximo passo é ajustar a unidade de sobrecorrente, para isso seleciona-se qual função será utilizada, o modelo de curva, *pick up* do relé e *DT*, como demonstrado na Figura C.32.

Figura C.32 – Ajustes de sobrecorrente

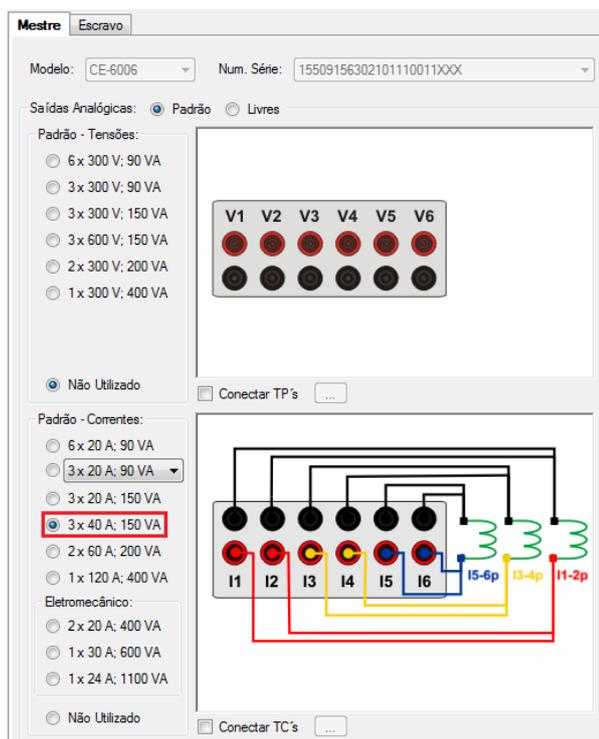


### C.2.1.2 – Configuração de Hardware

Os procedimentos realizados nesta seção são idênticos ao que está apresentado na seção C.1.2.

A diferença é que para este teste, optou-se por usar a ligação do *Hardware* que permite injetar 40 A de corrente e 150 VA de potência por fase, conectando dois canais em paralelo, conforme ilustrado na Figura C.33.

Figura C.33 – Conexão para 40 A por fase

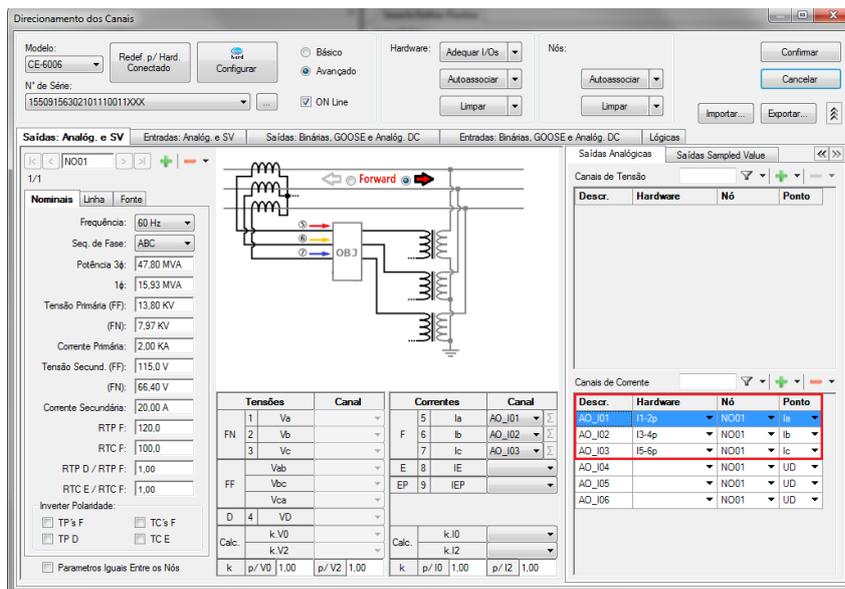


### C.2.1.3 – Direcionamento dos canais

Em "Direc Canais", da mesma maneira que na seção C.1.3, a opção selecionada direciona os canais do *Hardware*.

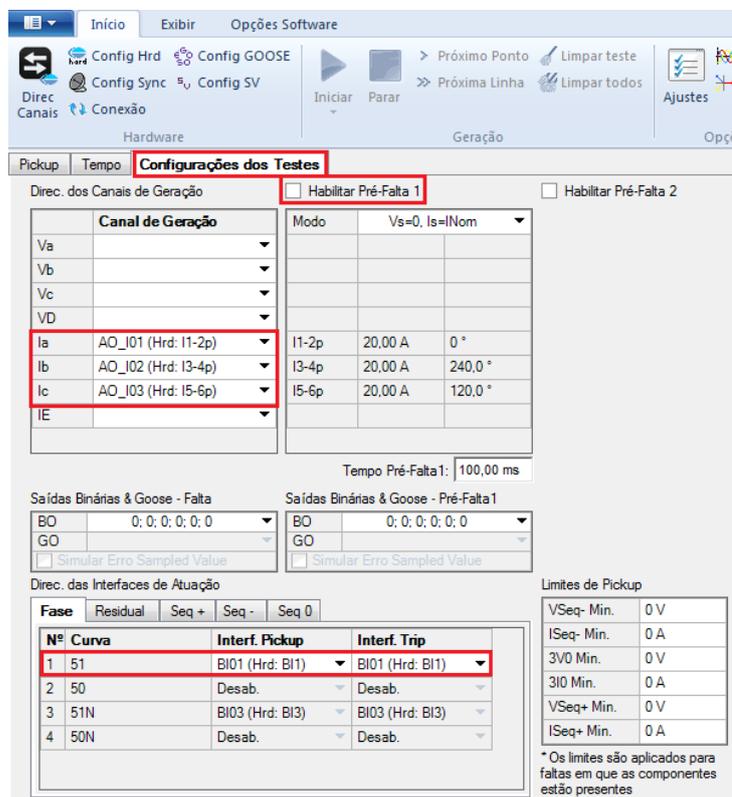
Como se pretende injetar corrente em um relé por vez, para testar as conexões e o tempo previsto para os ajustes configurados, utiliza-se o nó 1 com as saídas de corrente indicadas na Figura C.34.

Figura C.34 – Direcionamento de Canais para 40 A



Após direcionar os canais, é necessário visualizar nas configurações do teste os canais de corrente e a entrada binária da mala. Além disso, aconselha-se que se certifique se a opção "Habilitar Pré-Falta" está desmarcada, para evitar que se tenha reprovação nos tempos de operação, conforme indicado na C.35.

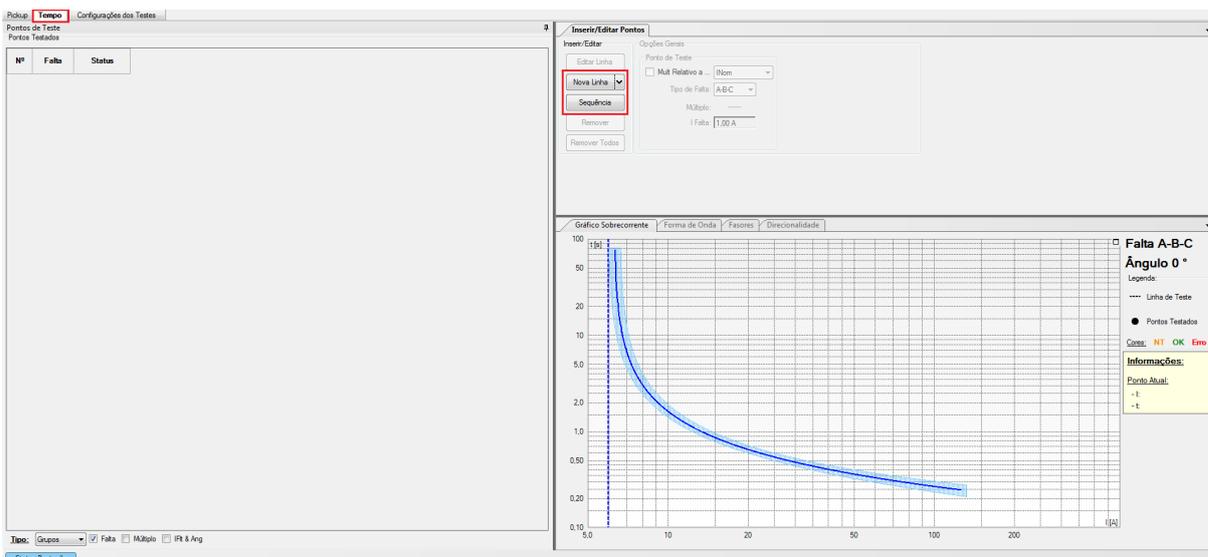
Figura C.35 – Configurações dos testes



### C.2.1.4 – Teste de tempo

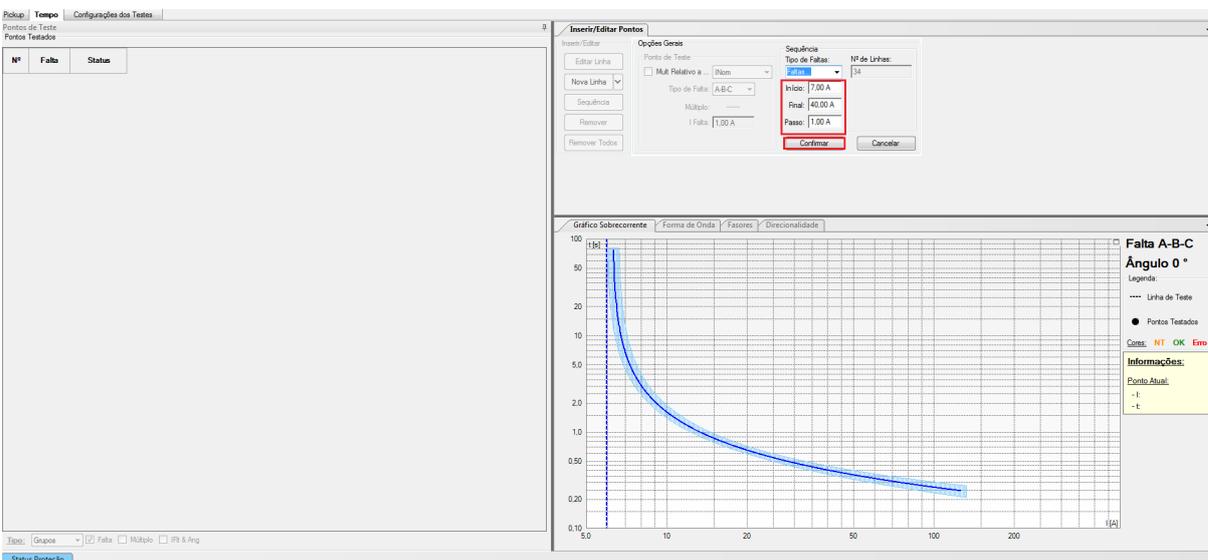
A tela de trabalho dos ensaios de tempo é apresentada na Figura C.36. Na opção “nova linha”, determina-se apenas um ponto de corrente para o teste de tempo do relé. Já na opção "sequência", deve-se selecionar um intervalo de pontos.

Figura C.36 – Interface dos testes de tempo



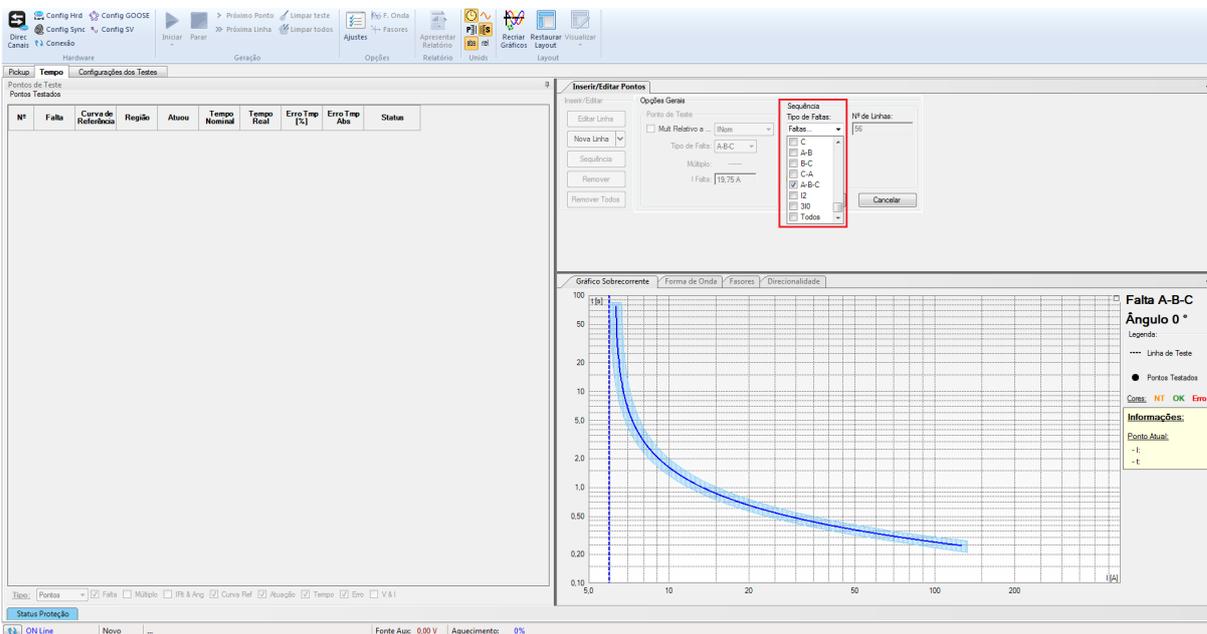
Estabeleceu-se realizar uma sequência de pontos que começam desde aproximadamente 1,1 vezes o *pick up* do relé até 40 A, em passos de 1,0 A, conforme a Figura C.37. Lembrando que deve-se sempre lembrar do máximo de corrente suportado por canal no *hardware* selecionado.

Figura C.37 – Ajuste da sequência de corrente



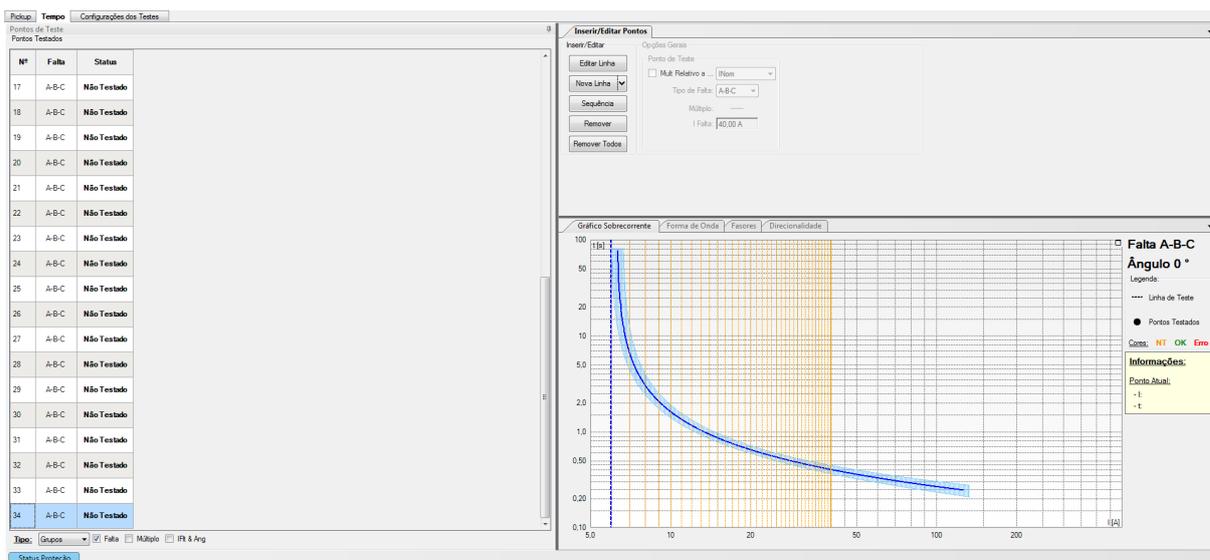
Como o ensaio é para testar a atuação do relé 51-1 para a falta trifásica 1 do sistema-teste, deve-se selecionar um curto-circuito nas três fases A-B-C, Figura C.38.

Figura C.38 – Tipo de falta



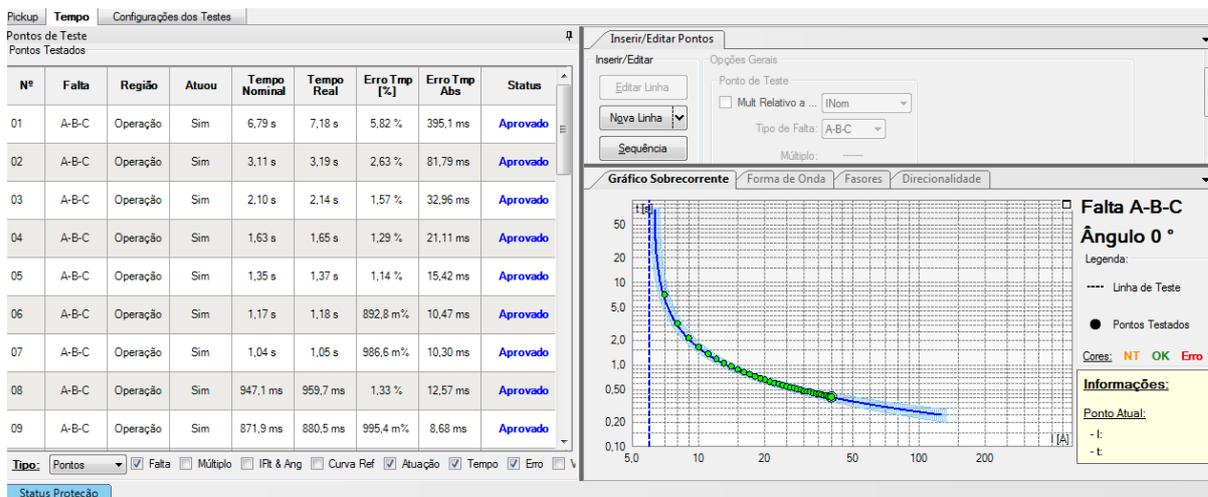
Com isso, tem-se os pontos de corrente alocados na curva e na Tabela do lado esquerdo da tela, onde será apresentada a atuação do relé, o tempo de operação e se foi aprovado com base na faixa de tolerância configurada, Figura C.39.

Figura C.39 – Iniciar o teste de tempo



Após realizado o ensaio, tem-se a curva de tempo e os pontos de aprovações e reprovações, Figura C.40.

Figura C.40 – Teste finalizado



### C.2.1.5 – Apresentação do relatório

Para gerar o relatório do ensaio, devem ser seguidos os mesmo procedimentos que na seção C.1.7.

Nessa seção, são listadas as informações mais importantes para análise do teste.

#### I. O modelo e número de série da mala e a configuração do *hardware*

##### 4. Configurações

Modelo: CE-6006; Num. Série: 15509156302101110011XXX

Saídas Analógicas: Padrão

Padrão - Tensões: 3 x 40 A; 150 VA

Padrão - Correntes: 3 x 40 A; 150 VA

#### II. As saídas de corrente

##### 7. Configurações do teste

Quadro C.3 – Canais de corrente

Fase	Canal	Modulo	Ângulo
Ia	AO_I01 (Hrd: I1-2p)	20,00 A	0 °
Ib	AO_I02 (Hrd: I3-4p)	20,00 A	240,0 °
Ic	AO_I03 (Hrd: I5-6p)	20,00 A	120,0 °
IE		0 A	0 °

### Direc. das interfaces de Atuação

Quadro C.4 – Habilitação da Entrada binária da mala de testes

Nº	Curva	Interf. Pickup	Interf. Trip
1	51	BI01 (Hrd: BI1)	BI01 (Hrd: BI1)
2	50	Desab.	Desab.
3	51N	Desab.	Desab.
4	50N	Desab.	Desab.

### III. Ajustes do relé de sobrecorrente

#### 8. Ajustes da Proteção de Sobrecorrente

Direcionalidade Habilitada: Não

Composição das Curvas: Curva com menor tempo

Definição do Pickup: Definir em Amperes

Modo de Visualização das Curvas:  $I[A] \times t \rightarrow I$  em Amperes

Quadro C.5 – Tolerâncias

	Toler. %	Toler. Abs.
Amplitude	5,00%	0,02 In
Tempo	5,00%	0,04 s
Ângulo	-	3,00 °

### Elementos de Sobrecorrente

Quadro C.6 – Ajustes do relé 51-1

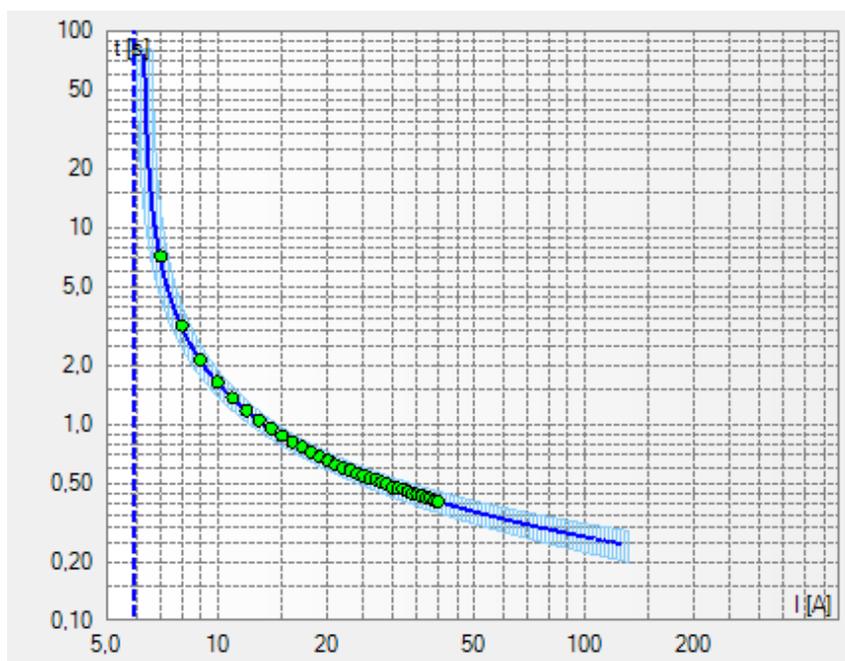
Nº	Hab	Descr	Curva	Pkp	Pkp [A]	Dial/Tm	Drp
1	Sim	51	IEC Normal Inv.	6,25 A	6,25 A	110	0,95
2	Não	50	IEC Normal Inv.	4,00 A	4,00 A	0	0,95
3	Não	51N	IEC Normal Inv.	450,00 mA	450,00 mA	260	0,95
4	Não	50N	Tempo Definido	10,00 A	10,00 A	500	0,95

#### IV. Resultados do ensaio

##### 9. Resultados do Teste de Tempo

Para falta A-B-C, as aprovações e reprovações do ensaio são apresentadas em Tabela, que podem ser visualizadas no relatório completo, e também no gráfico C.41.

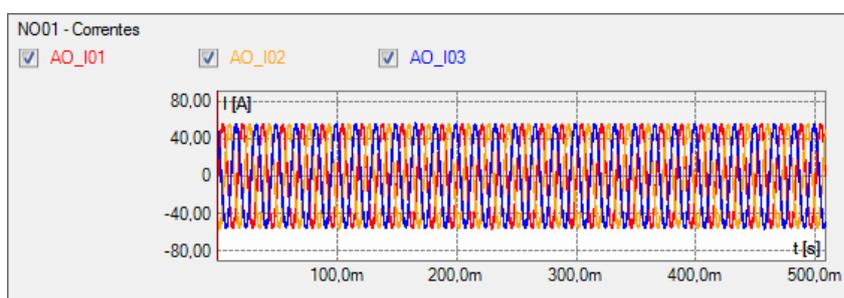
Figura C.41 – Gráfico de Teste Sobrecorrente - Falta A-B-C



##### 10. Gráficos da simulação Seleccionada

As correntes injetadas no relé podem ser visualizadas no gráfico C.42.

Figura C.42 – Correntes injetadas no teste



#### C.2.2 – Ensaios Manuais

Para apresentar os procedimentos dos ensaios manuais, será usado como exemplo o ajuste do relé 51-2 do sistema-teste.

### C.2.2.1 – Iniciando o software da Mala de Testes

Para iniciar os testes manuais, ao abrir o *software* da mala, deve-se selecionar a opção "Manual", Figura C.43.

Figura C.43 – Selecionar a opção "Manual"



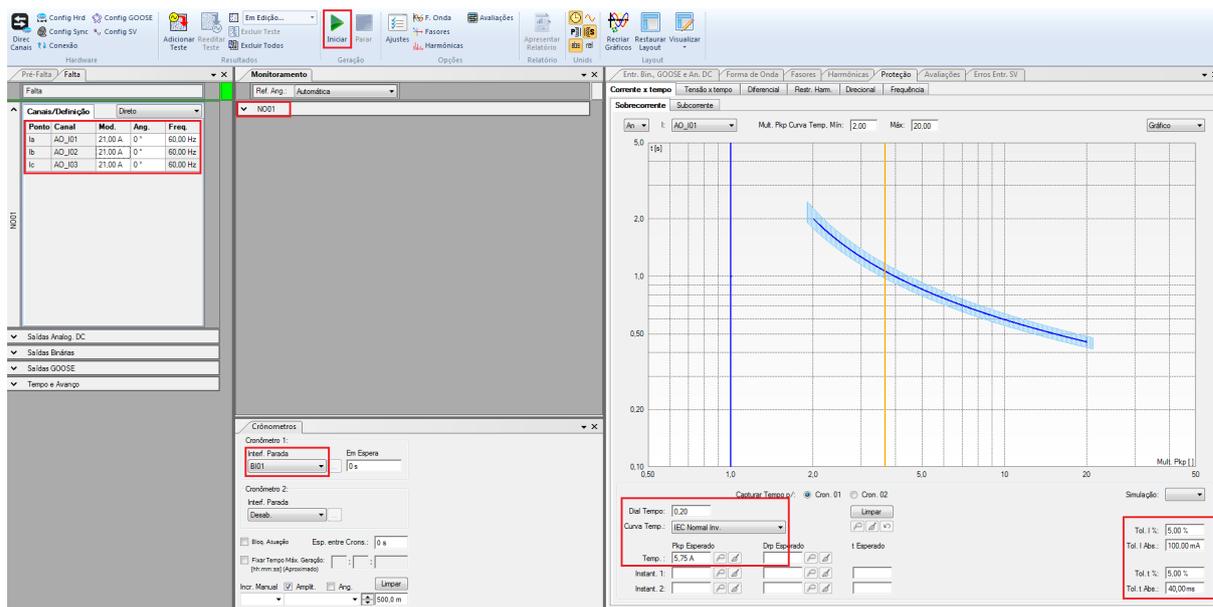
Para configurar os *Hardware* e direcionar os canais deve-se seguir os procedimentos apresentados nas seções C.1.2 e C.1.3. Lembrando sempre de analisar o máximo de corrente suportado pela ligação selecionada.

### C.2.2.2 – Teste Manual

Para começar o ensaio manual, deve-se setar o valor de corrente que se pretende injetar e, da mesma maneira que os testes automáticos e de COMTRADE, verificar a ligação do *Hardware* e o direcionamento de canais. Além disso, deve-se definir a entrada binária da mala de testes, parametrizar o relé que será testado e ajustar a tolerância de tempo e corrente.

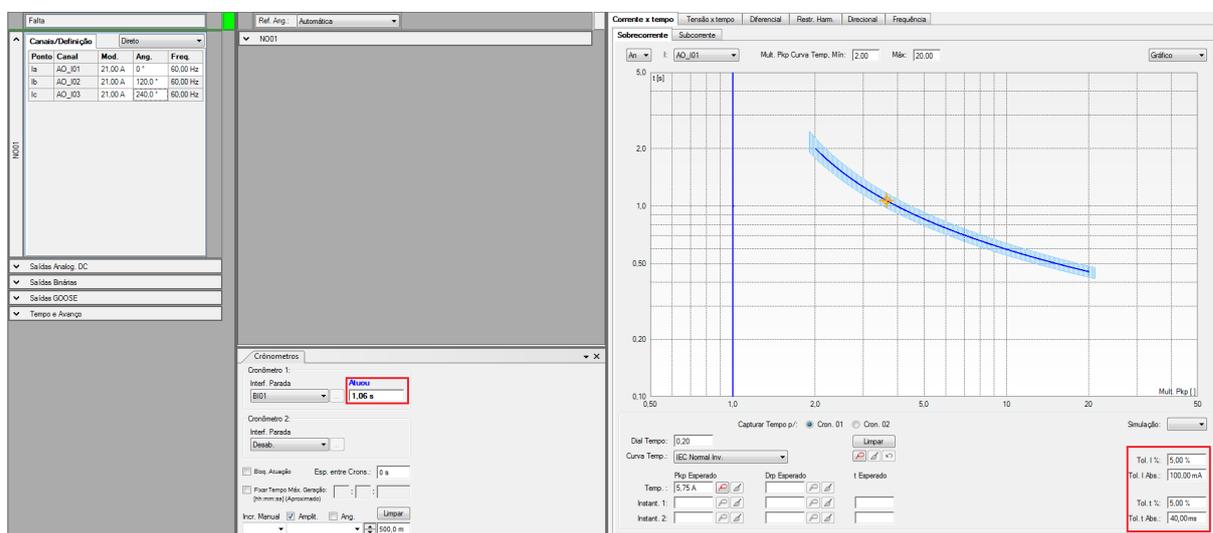
Após essas configurações, conforme as instruções da Figura C.44, basta iniciar o teste.

Figura C.44 – Configurações dos Testes Manuais



O resultado do ensaio está apresentado na Figura C.45. O tempo de operação de 1,06s na cor azul indica que o relé foi aprovado no teste.

Figura C.45 – Resultado do ensaio manual de 21A com o relé 51-2



### C.3 – PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS PEXTRON

As etapas para a parametrização utilizando a interface computacional disponibilizada pelo fabricante será detalhada nesta seção, usando como exemplo os ajustes do relé 51-1 para a

falta trifásica 1 do sistema-teste da Figura 4.1.

Os procedimentos apresentados tem como base o manual de orientação do relé PEX-TRON (2016).

### C.3.1 – Documento default e funções do relé

Para parametrizar o relé, deve-se carregar um arquivo default, que é fornecido pelo fabricante, conforme as Figuras C.46 e C.47.

Figura C.46 – Carregando o arquivo default

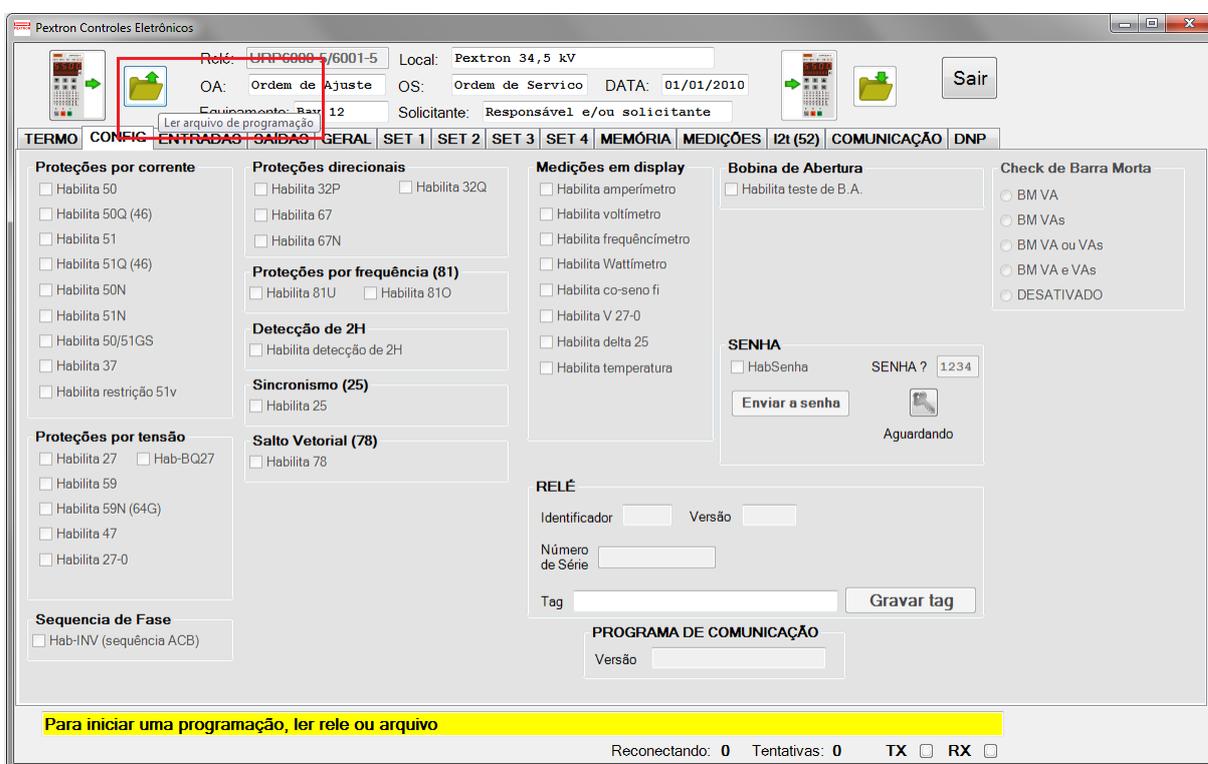
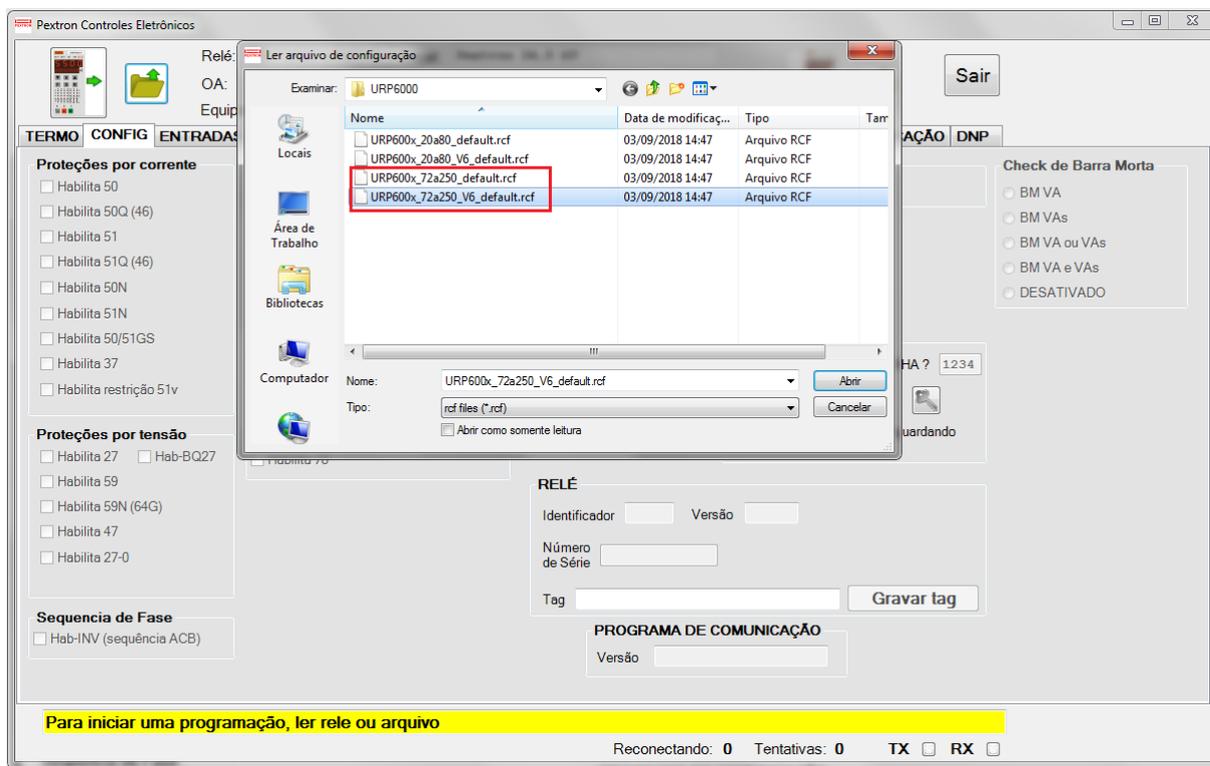
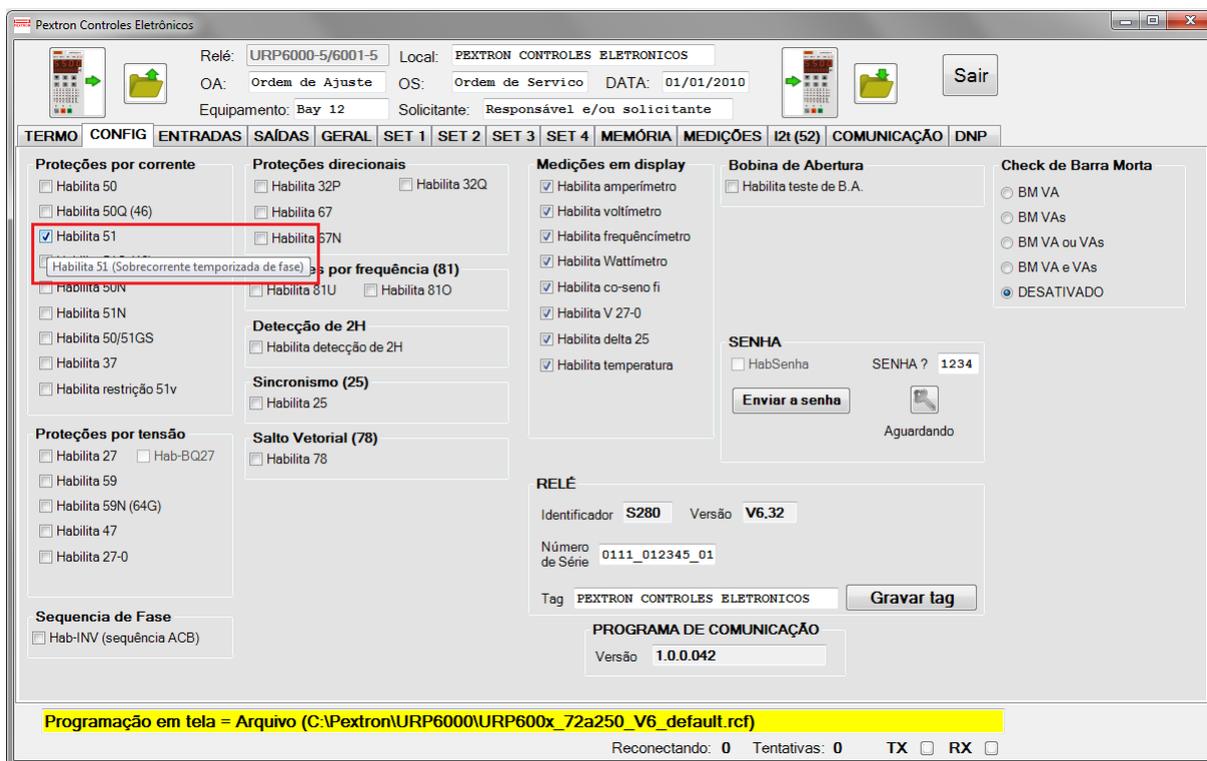


Figura C.47 – Selecionar “URP600x 72a250 default”



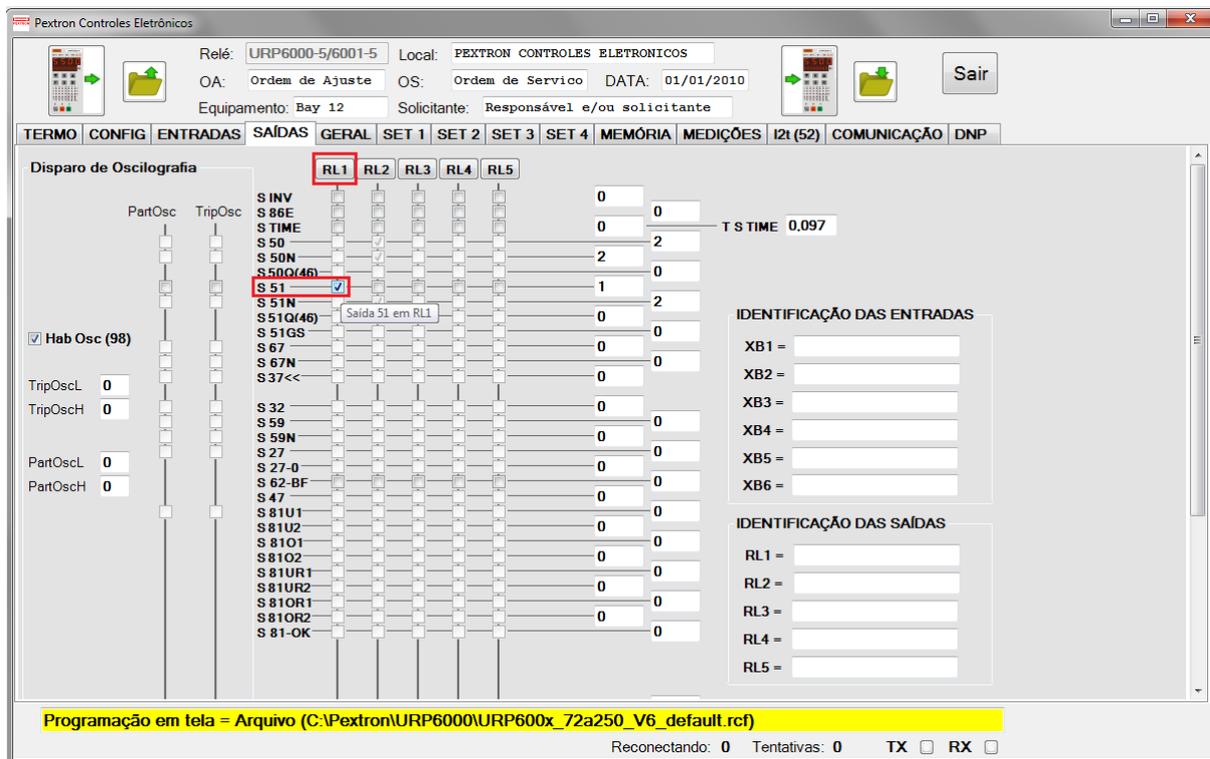
Após isso, na aba “Config” deve-se habilitar a função que será parametrizada, Figura C.48.

Figura C.48 – Habilitar função 51



Deve-se então, escolher a saída do *trip* que irá enviar o sinal para a mala de testes, nesse caso "RL1", como demonstrado na Figura C.49.

Figura C.49 – Saída do relé



### C.3.2 – Parametrização do relé

Na aba “geral”, deve-se configurar a RTC do relé e, se houver corrente de neutro, selecionar na opção “Origem da corrente de neutro” o modo “0=calculado”, conforme a Figura C.50. Isso indica que o relé irá calcular numericamente a corrente de neutro através de soma vetorial das correntes nas três fases.

Figura C.50 – Tela "geral"

Feito isso, em “SET 1”, deve-se colocar os ajustes de *pick up* e curva do relé. No manual do usuário, pode-se verificar os mínimos e máximos ajustes de *pick up* para cada função que o relé possui. Para as funções 51, 51N e 50, que foram utilizadas no trabalho, as faixas de ajustes permitidas pelo relé podem ser verificadas na Tabela 4.21.

Além disso, o padrão de ajuste dos relés Pextron requer que o *pick up* do relé seja multiplicado pela RTC. Dessa maneira, para o ajuste do relé 51-1 do sistema-teste, Figura C.51, utilizou-se os valores do quadro C.7. Não esquecendo que o valor de 0,2 refere-se ao ganho utilizado no equipamento de testes, que foi esclarecido na seção 4.5.2.2.

Quadro C.7 – Parâmetros utilizados no ajuste do relé 51-1

Corrente de ajuste:	6,25 A
RTC:	160
Ganho utilizado na mala de testes:	0,2
Corrente a ser ajustada no relé PEXTRON	$6,25 \text{ A} \cdot 160 \cdot 0,20 = 200 \text{ A}$
Tipo de curva	NI
Curva a ser ajustada no relé PEXTRON	0,11

Figura C.51 – Parametrização do relé 51-1

Relé: URP6000-5/6001-5 Local: PEXTRON CONTROLES ELETRONICOS  
 OA: Ordem de Ajuste OS: Ordem de Serviço DATA: 01/01/2010  
 Equipamento: Bay 12 Solicitante: Responsável e/ou solicitante

Sair

TERMO	CONFIG	ENTRADAS	SAÍDAS	GERAL	SET 1	SET 2	SET 3	SET 4	MEMÓRIA	MEDIÇÕES	Izt (52)	COMUNICAÇÃO	DNP
<b>Curva Fase (51)</b>		<b>Curva Neutro (51N)</b>		<b>Seq neg (51Q/46)</b>		<b>Direcional fase (67)</b>		<b>Direc. neutro (67N)</b>		<b>Direcional de potência ativa (32P)</b>		<b>Def. sobretensão (59)</b>	
>F ip 200		>N ip 160		>Q ip 800		>Fd ip 160		>Nd ip 800		dP inv <input type="checkbox"/>		V>>F vp 400	
>F curva NI		>N curva MI		>Q curva MI		>Fd cuv MI		>Nd cuv MI		Pr>>F Pp 40000		V>>F t 0,097	
>F alfa 0,019		>N alfa 1		>Q alfa 1		>Fd alfa 1		>Nd alfa 1		Pr>>F t 0,097		<b>Inst. sobretensão (59)</b>	
>F beta 1		>N beta 1		>Q beta 1		>Fd beta 1		>Nd beta 1		dQ inv <input type="checkbox"/>		V>>F vp 400	
>F delta 0		>N delta 0		>Q delta 0		>Fd delta 0		>Nd delta 0		Tipo N 0		V>>F t 0,097	
>F K 0,136		>N K 13,5		>Q K 13,5		>Fd K 13,5		>Nd K 13,5		VpoldN 10		<b>Def. sobretensão de neutro (59N/64G)</b>	
>F dt 0,109		>N dt 1		>Q dt 1		>Fd dt 1		>Nd dt 1		AMTdN 45		V>>N vp 400	
<b>Definido Fase (51)</b>		<b>Def. Neutro (51N)</b>		<b>Instantâneo de seq neg (50Q/46)</b>		<b>MEMdF</b>		<b>Direcional de potência reativa (32Q)</b>		Qr>>F Pp 40000		<b>Def. subtenção (27)</b>	
>>F ip 16000		>>N ip 32000		>>>Q ip 32000		1		dN inv <input type="checkbox"/>		Qr>>F t 0,097		V<<F vp 10	
>>F t 0,097		>>N t 0,097		>>>Q t 0,023		<b>AMTdF</b>		VpoldN 10		Qr>>F t 0,097		V<<F t 0,097	
<b>Instantâneo de Fase (50)</b>		<b>Instantâneo de Neutro (50N)</b>		<b>Restrição de 51 por tensão (51v)</b>		45		AMTdN 45		I>>N ip 16000		<b>Inst. subtenção (27)</b>	
>>>F ip 160		>>>N ip 160		>F VR 200		>>>Fd ip 32000		I>>N t 0,046		I>>N t 0,046		V<<<F vp 10	
>>>F t 0		>>>N t 0		Instantâneo/Definido de GS (50/51GS)		>>>Fd t 0,046		I>>N t 0,046		I>>N t 0,046		V<<<F t 0,097	
<b>Subcorrente de fase (37)</b>				>>GS ip 50		>>>Q t 0,023							
I<<<F ip 31,875		I<<<F t 0,097		>>GS t 0,097		>>>Q t 0,023							
Programação em tela = Arquivo (C:\Pextron\URP6000\URP600x_72a250_V6_default.rcf)													
Reconectando: 0 Tentativas: 0 TX <input type="checkbox"/> RX <input type="checkbox"/>													

COPIAR  SET 1

Uma observação importante é que, como não se pretende testar a função 51 definida de fase, deve-se setar valores altos para que essa função não tenha atuação.

Após as parametrizações, basta verificar qual a porta lógica *USB (Universal Serial Bus)* do *PC (Personal Computer)* o relé está conectado para carregar a programação, Figura C.52.

Figura C.52 – Verificar comunicação com o PC e carregar a programação no relé

Pextron Controles Eletrônicos  
 Relé: URP6000-5/6001-5 Local: PEXTRON CONTROLES ELETRONICOS  
 OA: Ordem de Ajuste OS: Ordem de Serviço DATA: 01/01/2010  
 Equipamento: Bay 12 Solicitante: Responsável e/ou solicitante

[Carregar a programação no relé] [Sair]

TERMO CONFIG ENTRADAS SAÍDAS GERAL SET 1 SET 2 SET 3 SET 4 MEMÓRIA MEDIÇÕES I2t (52) COMUNICAÇÃO DNP

**Computador**  
 Serial COM COM4 [COM]

Endereço 1  
 B.P.S. 128.0 (128000 bps)  
 StopBit 2 - 2 stop bits  
 Paridade 0 - sem paridade  
 Tempo 0,12 s  
 Tentativas 50

**Serial 1 (traseira)**  
 Prot. 1 2 Equivalente em ModBus  
 End. 1 1  
 B.P.S. 1 9.6 (9600 bps)  
 StopBit 1 1 - 1 stop bit  
 Parid. 1 0 - sem paridade  
 TimeOut 1 10 s  
 HabAckLk  HabAckRn  HabShockK

**Serial 2 (USB)**  
 MODBUS  
 End. 2 1  
 B.P.S. 2 128.0  
 StopBit 2 2  
 Parid. 2 0 = sem  
 TimeOut 2 10,0 s

**Respostas Não Solicitadas (RNS) e Variações Analógicas**  
 Habilita RNS

Banda Morta para Corrente de Fase Banda Morta para Corrente de Neutro Banda Morta para Corrente de GS  
 BandaIF 160 BandaIN 160 BandaIGS 0,25

Banda Morta para Tensão de Fase Banda Morta para Tensão de Neutro  
 BandaVF 10 BandaVN 10

Programação em tela = Arquivo (C:\Pextron\URP6000\URP600x\_72a250\_V6\_default.rcf)

Reconectando: 0 Tentativas: 0 TX  RX

## ANEXO A – DADOS NOMINAIS DO SISTEMA-TESTE

Os dados nominais do sistema-teste da Figura 4.1 são:

- **O sistema S:** possui a ligação Y-g e curto-circuito trifásico equivalente na barra 5 de potência 800 MVA e  $\frac{X_s}{R_s} = 15$ .
- **O motor equivalente M:** 2000HP; 4,16kV; Fator de potência 0,92; Rendimento 0,90. A contribuição do motor nas correntes de curto-circuito não é significativa.
- **As cargas:**  $C_1 = 3\text{MVA}$ ;  $C_2 = C_3 = 5\text{MVA}$ ; Fator de potência 0,92i.
- Os **transformadores** possuem ligação  $\Delta$ -Y-g:  $T_1 = 138\text{-}13,8\text{kV}$ ; 15MVA;  $X_0 = X_1 = X_2 = 0,10\text{pu}$ ;  $T_2 = 13,8\text{-}4,16\text{kV}$ ; 4MVA;  $X_0 = X_1 = X_2 = 0,07\text{pu}$ . Sobrecarga máxima de 25%.
- As **linhas de transmissão** são da configuração simplificada: a linha de 13,8kV  $Z_1 = Z_2 = 0,5 + j0,6\Omega$ ,  $Z_0 = 1,5 + j1,8\Omega$ ; a linha de 138kV  $Z_1 = Z_2 = 25 + j40\Omega$ ,  $Z_0 = 75 + 120\Omega$ .
- Os relés 51 de fase e 51 de neutro são relés numéricos com curvas Normalmente Inversa (NI), dadas pela Equação 2.10 e os coeficientes retirados da Tabela 2.1.
- A escolha das correntes de ajuste dos relés 50 devem variar em uma faixa de 0,25 a 100 A em passos de 0,25 A.
- A escolha das correntes de ajuste dos relés 51 de fase devem variar em uma faixa de 0,25 a 16 A em passos de 0,25 A.
- A escolha das correntes de ajuste dos relés 51 de neutro devem variar em uma faixa de 0,15 a 6 A em passos de 0,15 A. Considerar que no final do alimentador 1  $I_{cc1\phi Min} = 240$  A; em  $f_2 = I_{cc1\phi Min} = 175$  A; em  $f_4 = I_{cc1\phi Min} = 60$  A.
- O relé 51N-1 está ajustado na curva 0,1.
- As curvas (DT) devem ser ajustadas em passos de 0,01.
- A coordenação dos relés deve ser realizada usando tempo de coordenação ( $\Delta t$ ) de 0,3s, exceto na coordenação dos relés 51-1 e 51-2 em que  $\Delta t$  é 0,4s.
- Para esses cálculos, adotar uma base de 15 MVA e 138 kV no sistema S.