

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS ANTÔNIO LINDOLFO VIEIRA DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE, PARAMETRIZAÇÃO E ENSAIOS DO RELÉ DIFERENCIAL DE
CORRENTE SEL-387A COM AUXÍLIO DA MALA DE TESTES SMC MENTOR 12**

São Luís

2017

MARCOS ANTÔNIO LINDOLFO VIEIRA DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE, PARAMETRIZAÇÃO E ENSAIOS DO RELÉ DIFERENCIAL DE
CORRENTE SEL-387A COM AUXÍLIO DA MALA DE TESTES SMC MENTOR 12**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Clovis Bosco Mendonça Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto

São Luís

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Silva Júnior, Marcos Antônio Lindolfo Vieira da

Análise, parametrização e ensaios do relé diferencial de corrente SEL-387A com auxílio da Mala de Testes SMC Mentor 12 / Marcos Antônio Lindolfo Vieira da Silva Júnior. - 2017.

108 f.

Coorientador(a): João Viana da Fonseca Neto.
Orientador(a): Clovis Bosco Mendonça Oliveira.
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

1. Correntes. 2. Mala de Testes SMC Mentor 12. 3. Parametrização. 4. Proteção. 5. Relé SEL-387A. I. Fonseca Neto, João Viana da. II. Oliveira, Clovis Bosco Mendonça. III. Título.

MARCOS ANTÔNIO LINDOLFO VIEIRA DA SILVA JÚNIOR

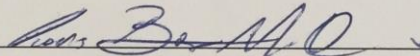
ANÁLISE, PARAMETRIZAÇÃO E ENSAIOS DO RELÉ DIFERENCIAL DE
CORRENTE SEL-387A COM AUXÍLIO DA MALA DE TESTES SMC MENTOR

12

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

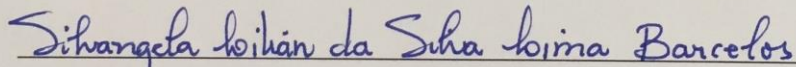
Aprovado em: 26/ 07/2017

BANCA EXAMINADORA



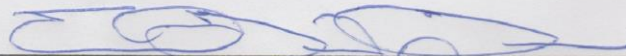
Prof. Dr. Clovis Bosco Mendonça Oliveira (Orientador)

Universidade Federal do Maranhão




Prof.ª Dra. Silvangela Lilian da Silva Lima Barcelos

Universidade Federal do Maranhão



Prof. Me. Ernesto Franklin Marçal Ferreira

Instituto Federal do Maranhão



Prof. Dr. Denisson Queiroz Oliveira

Universidade Federal do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter concedido tamanhas bênçãos em minha vida.

Agradeço aos meus pais Marcos Antônio e Vanessa Maria, por nunca terem me deixado nada faltar e por estarem sempre ao meu lado, apoiando e mostrando o caminho correto a seguir.

Agradeço ao meu orientador, Clovis Bosco, pela paciência, e, sobretudo por ter me ajudado a desenvolver um trabalho que será posteriormente aprofundado, ajudando a gerar mais conhecimentos entre os alunos de Engenharia Elétrica da UFMA.

Agradeço a minha colega de sala e namorada, Sílvia Letícia, por ter caminhado lado a lado comigo nesta dura empreitada.

RESUMO

O presente trabalho foi elaborado com o intuito de desenvolver um estudo acerca do relé SEL-387A, de maneira que este trabalho sirva como um documento técnico que auxilie, de forma didática, os próximos alunos que se interessarem pelo tema, a entender sobre as funções de proteção presentes no relé estudado, sobre como parametriza-lo e sobre como ensaia-lo. Vários são os motivos que levam as empresas do ramo da energia elétrica a investirem na proteção, controle e automação de sistemas de potência. Seja para manter bons índices de continuidade e garantir a qualidade dos serviços prestados e a satisfação dos seus clientes, seja para garantir a integridade dos equipamentos atuantes no sistema de potência mediante contingências, os principais dispositivos utilizados são os relés de proteção, como, por exemplo, o relé SEL-387A. Este trabalho apresentará um estudo sobre o relé SEL-387A, sobre o seu software de parametrização AcSELerator QuickSet, além de um estudo que busca concatenar a teoria e a aplicação das funções de proteção presentes nesse relé. Também será abordado um estudo sobre o funcionamento e funções de testes da mala de testes SMC Mentor 12, e por fim, serão apresentados os ensaios executados, parâmetros ajustados e resultados obtidos nos ensaios.

Palavras-chave: Parametrização. Correntes. Proteção. Relé SEL-387A. Mala de Testes SMC Mentor 12.

ABSTRACT

The present work was elaborated with the intention to develop a study about the SEL-387A relay, so that this work serves as a technical document that helps, in a didactic way, the next students who are interested in the subject, to understand about the Protection functions present in the relay studied, how to parameterize it and how to test it. There are several reasons why electric power companies invest in the protection, control and automation of power systems. Whether it is to maintain good continuity indices and guarantee the quality of the services provided and the satisfaction of its customers, or to guarantee the integrity of the equipments operating in the power system through contingencies, the main devices used are the protection relays, as the SEL-387A relay. This work will present a study on the SEL-387A relay on its AcSELeator QuickSet parameterization software, in addition to a study that seeks to concatenate the theory and application of the protection functions present in this relay. A study will also be presented on the operation and functions of the SMC Mentor 12 test case, and finally, the tests performed, the adjusted parameters and the results obtained in the tests will be presented.

Keywords: Parametrization. Currents. Protection. SEL-387A Relay. SMC Mentor 12 Test box.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Relé SEL - 387A.....	17
Figura 2	–	Painel traseiro do relé SEL – 387A.....	18
Figura 3	–	Painel frontal do relé SEL-387A	18
Figura 4	–	Conexão do Relé SEL – 387A a um transformador.....	21
Figura 5	–	Tela principal do software AcSELerator QuickSet	22
Figura 6	–	Janela para criação de novos ajustes	23
Figura 7	–	Ajustes lidos do IED conectado	23
Figura 8	–	Comando para enviar os ajustes ao IED conectado.....	24
Figura 9	–	Ajustes salvos no banco de dados	25
Figura 10	–	Árvore de acesso às senhas padrão de cada IED.....	26
Figura 11	–	Cabo SEL-C662	26
Figura 12	–	Janela de parâmetros de comunicação	27
Figura 13	–	Tela de gerenciamento de banco de dados	28
Figura 14	–	Esquema estrela e delta de ligação dos TC's.....	31
Figura 15	–	Matrizes de compensação de conexão interna de enrolamento.....	33
Figura 16	–	Gráfico de atuação para a função 87	35
Figura 17	–	Aplicações da função de proteção de falta à terra restrita.....	40
Figura 18	–	Mala de testes SMC Mentor 12	46
Figura 19	–	Canais de potência.....	47
Figura 20	–	Saídas binárias.....	47
Figura 21	–	Saídas binárias.....	47
Figura 22	–	Saída de tensão contínua para simulação de baterias.....	48
Figura 23	–	Entrada para medição de tensão ou corrente	48
Figura 24	–	Entradas para comunicação ou conexão de acessórios	48
Figura 25	–	Tela de controle básico	49
Figura 26	–	Fluxo para seleção das saídas dos canais de potência	51
Figura 27	–	Função Fault.....	53
Figura 28	–	Janela para habilitação das entradas binárias	54
Figura 29	–	Função RAMP	55

Figura 30	–	Janela de determinação do parâmetro modificado.....	56
Figura 31	–	Função Pulse Ramp	57
Figura 32	–	Função Binary Search	57
Figura 33	–	Função State sequencer	58
Figura 34	–	Função Fault playback	59
Figura 35	–	Conexão entre os canais de corrente da mala de testes e do relé diferencial	61
Figura 36	–	Conexão para comunicação Relé-Notebook	61
Figura 37	–	Ajustes de configuração	62
Figura 38	–	Informações gerais	63
Figura 39	–	Elementos diferenciais	65
Figura 40	–	Tempo de ação do relé mediante condição de trip.....	70
Figura 41	–	Monitoramento das correntes do enrolamento primário	70
Figura 42	–	Painel frontal do relé no momento de trip.....	71
Figura 43	–	Tempo de ação do relé mediante condição de trip.....	72
Figura 44	–	Monitoramento das correntes do enrolamento primário	73
Figura 45	–	Painel frontal do relé no momento de trip.....	73
Figura 46	–	Tempo de ação do relé mediante condição de trip.....	74
Figura 47	–	Monitoramento das correntes do enrolamento primário	75
Figura 48	–	Painel frontal do relé no momento de trip.....	75
Figura 49	–	Ajustes de configuração	76
Figura 50	–	Informações gerais	77
Figura 51	–	Parâmetros de sobrecorrente temporizada	78
Figura 52	–	Tempo de ação do relé mediante condição de sobrecorrente.....	81
Figura 53	–	Monitoramento das correntes do enrolamento primário	81
Figura 54	–	Painel frontal do relé no momento de trip.....	82
Figura 55	–	Tempo de ação do relé mediante condição de sobrecorrente.....	83
Figura 56	–	Monitoramento das correntes do enrolamento primário	84
Figura 57	–	Painel frontal do relé no momento de trip.....	84
Figura 58	–	Tempo de ação do relé mediante condição de sobrecorrente.....	85
Figura 59	–	Monitoramento das correntes do enrolamento primário	86
Figura 60	–	Painel frontal do relé no momento de trip.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Padrão IEC de curvas de operação para função de sobrecorrente temporizada.....	42
Tabela 2	– Padrão americano de curvas de operação para função de sobrecorrente temporizada.....	42
Tabela 3	– Atuação do relé	68
Tabela 4	– Ajustes para o teste de corrente diferencial na fase “B”	69
Tabela 5	– Ajustes para o teste de corrente diferencial nas fases "A" e “C”	71
Tabela 6	– Ajustes para o teste de corrente diferencial nas fases "A", “B” e “C”	74
Tabela 7	– Tempo de atuação do relé.....	79
Tabela 8	– Ajustes para o teste de sobrecorrente temporizada (1500 A)	80
Tabela 9	– Ajustes para o teste de sobrecorrente temporizada (2000 A)	82
Tabela 10	– Ajustes para o teste de sobrecorrente temporizada (2500 A)	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Metodologia	15
2	RELÉ SEL – 387A E SOFTWARE DE PARAMETRIZAÇÃO	17
2.1	Relé Diferencial de Corrente SEL-387A	17
2.2	Software de parametrização AcSELerator Quickset	21
2.2.1	Ajustes	22
2.2.2	Configuração	26
3	FUNÇÕES DE PROTEÇÃO RELÉ SEL-387A	29
3.1	Função diferencial – 87	29
3.2	Esquema de ligação dos TC's	30
3.3	Relação de transformação dos TC's	31
3.4	Compensação de conexão interna de enrolamento	32
3.5	Cálculo da corrente base	33
3.6	Corrente diferencial de atuação do relé	34
3.7	Corrente diferencial sem restrição	37
3.8	Bloqueio da função diferencial por segunda, quarta e quinta harmônica	38
3.9	Proteção de falta à terra restrita – REF (<i>Restrict Earth Fault</i>)	39
3.10	Sobrecorrente instantânea e temporizada	41
3.11	Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada para o primário e secundário do transformador – 50/51	43
3.12	Sobrecorrente residual instantânea e temporizada para o primário e secundário do transformador – 50/51G	43
3.13	Sobrecorrente instantânea e temporizada de sequência negativa para o primário e secundário do transformador –	

	50/51Q(46).....	44
3.14	Falha no disjuntor – 50BF	44
3.15	Proteção térmica (opcional através de RTD'S e Módulo SEL 2600A – 49T	45
4	MALA DE TESTES SMC MENTOR 12	46
4.1	Características	46
4.2	Funções de teste	48
4.2.1	Controle básico.....	48
4.2.2	Controle avançado.....	52
4.2.2.1	<i>FAULT</i>	53
4.2.2.2	<i>RAMP</i>	54
4.2.2.3	<i>PULSE RAMP</i>	56
4.2.2.4	<i>Binary Search</i>	57
4.2.2.5	<i>State Sequencer</i>	58
4.2.2.6	<i>Fault Playback</i>	59
5	ENSAIOS E TESTES EM BANCADA	60
5.1	Equipamentos utilizados	60
5.2	Esquemas de ligação	60
5.2.1	Alimentação elétrica dos equipamentos	60
5.2.2	Conexão dos canais de corrente	60
5.2.3	Conexão de comunicação	61
5.3	Ensaio	62
5.3.1	Ensaio da função diferencial (87)	62
5.3.1.1	<i>Parametrização do relé</i>	62
5.3.1.2	<i>Resultados esperados</i>	67
5.3.1.3	<i>Resultados obtidos</i>	69
5.3.1.3.1	<i>Ensaio com corrente diferencial na fase “B”</i>	69
5.3.1.3.2	<i>Ensaio com corrente diferencial nas fases “A” E “C”</i>	71
5.3.1.3.3	<i>Ensaio com corrente diferencial nas fases “A”, “B” E “C”</i>	73
5.3.2	Ensaio da função de sobrecorrente temporizada (51)	76
5.3.2.1	<i>Parametrização do relé</i>	76
5.3.2.2	<i>Resultados esperados</i>	78
5.3.2.3	<i>Resultados obtidos</i>	80

5.3.2.3.1	<i>Ensaio com curto-circuito de 1500 A (fases “A”, “B” E “C”)</i>	80
5.3.2.3.2	<i>Ensaio com curto-circuito de 2000 A (fases “A” E “C”)</i>	82
5.3.2.3.3	<i>Ensaio com curto-circuito de 2500 A (Fase B)</i>	84
6	CONCLUSÃO	87
6.1	Sugestão para trabalhos futuros	89
	REFERÊNCIAS	90
	ANEXO A – Relatório de Ensaios elaborados pela mala de testes	
	SMC MENTOR 12	91

1 INTRODUÇÃO

Antes de chegar ao consumidor final a eletricidade passa por diversas etapas de um complexo sistema elétrico, geração, transmissão, distribuição, e assim por diante. O desafio das empresas responsáveis por cada uma dessas etapas é garantir a continuidade e a qualidade do serviço, ou seja, garantir que os níveis de tensão e frequência permaneçam sempre o mais próximo da faixa padrão e, principalmente, manter adequados índices de continuidade de energia, pois a cada violação da faixa padrão, cada energia que deixa de ser entregue ao consumidor implica em prejuízo financeiro pra companhia elétrica envolvida e prejuízo de diversas ordens para o consumidor final. Além disso, os equipamentos utilizados no sistema elétrico de potência são extremamente caros, portanto é imprescindível que exista um sistema de proteção para estes equipamentos em caso de contingências.

Um dos primeiros dispositivos de proteção para atuação sobre sistemas elétricos foram os relés eletromecânicos, que eram conectados diretamente ao sistema elétrico e tinham seu funcionamento baseado em princípios eletromagnéticos, no qual o fluxo de corrente em uma bobina gera um campo eletromagnético atuante sobre discos ou núcleos ferromagnéticos desta forma exercendo uma força que acarreta na abertura e fechamento de contatos elétricos. Entretanto, por serem conectados diretamente ao sistema elétrico, era inviável a utilização destes relés em sistemas de média e alta tensão, além disso, o relé eletromecânico possuía uma margem de precisão muito baixa, se comparada aos dos relés atuais, e também só podiam atuar para uma determinada função de proteção, por isso deram espaço a chegada dos relés estáticos (COUTINHO, 2015; MARCELINO et al., 2009).

Os relés estáticos, assim chamados por não terem componentes móveis, são o que mais se aproximam dos relés de proteção utilizados em sistemas de potência hoje, pois eram constituídos exclusivamente por hardwares e atuavam de modo a comandar outro relé auxiliar, todavia os relés estáticos tinham uma grande deficiência, qualquer mudança que se desejasse fazer nos parâmetros de proteção implicaria em uma mudança física no circuito do relé, como por exemplo, a substituição de um capacitor ou mudança de malha do circuito e por isso estes relés não atendiam ainda aos anseios do que se idealizava como um bom dispositivo de proteção, dando espaço à chegada dos relés de proteção de sistemas de potência

como são conhecidos atualmente (COUTINHO, 2015; MARCELINO et al., 2009).

Atualmente os relés utilizados para proteção de sistemas de potência são chamados de Relés Digitais ou Relés Microprocessados, são classificados como relés secundários por não estarem ligados diretamente ao sistema elétrico, mas sim através de transformadores de corrente (TC's) e transformadores de potencial (TP's), que tem a função de fornecer ao relé uma "amostra" da corrente e tensão do sistema tornando possível a atuação deste relé sobre sistemas de média, alta e extra-alta tensão (COUTINHO, 2015; MARCELINO et al., 2009).

Por serem microprocessados os relés digitais podem fazer o tratamento de diversos dados adquiridos do sistema elétrico de forma a interpretar em tempo real o que está acontecendo e tomar as decisões programadas através de lógicas desenvolvidas pelo fabricante ou pelo próprio operador, sendo assim, os relés digitais também podem concentrar em si diversas funções de proteção, como por exemplo, sobretensão, sobrecorrente, funções diferenciais, e assim por diante. Além das funções de proteção, os relés digitais também podem funcionar como verdadeiros dispositivos de medição, fornecendo relatórios com históricos de medições, e dispositivos de controle, podendo ser operados através de um software SCADA mesmo de forma remota (COUTINHO, 2015; MARCELINO et al., 2009).

Um dos maiores fabricantes de relés digitais é a Schweitzer Engineering Laboratories – SEL, que desenvolve equipamentos amplamente utilizados no mercado, inclusive o Relé Diferencial de Corrente SEL 387A existente no Laboratório de Redes Inteligentes da UFMA, alvo de estudo neste trabalho. O Relé Diferencial de Corrente SEL 387A possibilita a proteção de transformadores de potência de dois enrolamentos, reatores, geradores, motores de grande porte e outros aparelhos multiterminais, no que tange proteções relacionadas à corrente, como diferencial de corrente, sobrecorrente instantânea e temporizada (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2016).

Tendo em vista que os relés digitais ou relés microprocessados tem se consagrado cada vez mais importantes instrumentos para a proteção de sistemas elétricos de potência, dadas às inúmeras e eficientes possibilidades de atuação que estes equipamentos podem trazer, é imprescindível que se promovam o desenvolvimento de ferramentas de aprendizagem sobre estes relés.

1.1 Justificativa

O constante desenvolvimento econômico implica diretamente no aumento da demanda por eletricidade, que, por sua vez, implica em constantes ampliações da capacidade dos sistemas elétricos, logo, é cada vez mais exigido do mercado de trabalho engenheiros eletricitas capacitados a aplicar as soluções de proteção existentes através de relés digitais.

Em muitas literaturas existentes sobre proteção só é possível encontrar as teorias e métodos de cálculo de parâmetros de proteção, deixando a desejar em aspectos como aplicação prática das funções em um relé digital, ao passo que os manuais dos relés não explicam as teorias das funções de proteção exercida por eles, apenas indicam como inserir os parâmetros de proteção, as lógicas desejadas e o esquema físico de ligação do relé. Por estas razões é de suma importância que sejam cada vez mais desenvolvidos trabalhos que unam as teorias de proteção com as suas aplicações práticas em um relé digital, de forma que facilitem a compreensão não só da metodologia das funções de proteção, mas também de suas aplicações.

Os relés digitais são equipamentos muitas vezes inacessíveis para estudantes universitários por serem equipamentos caros, entretanto, a Universidade Federal do Maranhão – UFMA tem em seu Laboratório de Redes Inteligentes um grande potencial em relés digitais (SEL-487V, 387A, 351A), além de uma Mala de “Testes Mentor 12” do fabricante SMC, que são equipamentos amplamente utilizados em subestações. Juntos esses equipamentos permitem realizar inúmeros experimentos de simulação de subestações. A realização de simulações com esses equipamentos incentivam a busca por aprendizagem e agrega bastante conhecimento a quem os realiza, sendo assim, é de suma importância explorar esse potencial, que anteriormente não vinha sendo utilizado.

A partir da necessidade do mercado de trabalho por engenheiros eletricitas capacitados a aplicar as soluções de proteção existentes através de relés digitais, somado ao fato que as literaturas de proteção e manuais de instrução, em sua maioria, se ministrados de forma independente um do outro, não são capazes de atender aos anseios de quem busca aprofundar-se em proteção de sistemas de potência, somado, também, ao fato que a UFMA possui em seu Laboratório de Redes Inteligentes um grande potencial em sistemas de proteção que se busca

desenvolver um trabalho que seja uma verdadeira ferramenta de aprendizagem para os demais alunos que busquem conhecimento em proteção de sistemas elétricos de potência.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar, parametrizar, realizar ensaios e analisar de forma experimental o comportamento do relé diferencial de corrente SEL-387A através da mala de testes SMC Mentor 12, elaborando relatório sobre a atuação do relé diante das simulações realizadas.

Deixar a disposição esta monografia que servirá como um documento técnico que auxilie de forma didática os próximos alunos que se interessarem pelo tema.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Revisar teorias das funções de proteção existentes no relé SEL-387A;
- b) Estudar como são aplicadas as funções de proteção no relé SEL-387A;
- c) Parametrizar o relé SEL-387A;
- d) Estudar o funcionamento da mala de testes SMC Mentor 12;
- e) Realizar testes com o relé SEL-387A, com auxílio da mala de testes SMC Mentor 12;
- f) Elaborar relatório de simulação e resultados.

1.3 Metodologia

Serão realizados estudos para revisão das funções de proteção presentes no relé SEL-387A a partir de literaturas diversas, então será realizado estudo do manual para aprender de que maneira são aplicadas e parametrizadas estas funções. Também deverão ser estudadas as demais características do relé, como por exemplos entradas e saídas binárias e analógicas.

Serão realizados estudos sobre a mala de testes SMC Mentor 12, para que seja possível, simular um sistema em operação normal, bem como uma contingência.

Por fim, será feita a conexão entre a mala de teste e o relé, para que se possam colocar em operação as funções de proteção do relé, além de elaborar o relatório sobre as operações simuladas.

Cada passo das simulações será registrado de modo que outros possíveis interessados neste trabalho possam reproduzi-lo e/ou aprofunda-lo.

2 RELÉ SEL – 387A E SOFTWARE DE PARAMETRIZAÇÃO

2.1 Relé Diferencial de Corrente SEL-387A

O Relé Diferencial de Corrente SEL-387A é um relé microprocessado produzido pela Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) que pode ser usado para proteger transformadores de potência de dois enrolamentos, reatores, geradores, motores grandes ou outros aparelhos multiterminais, contra faltas como: Diferencial de corrente – 87, sobrecorrente instantânea e temporizada de fase – 50/51, sobrecorrente residual instantânea e temporizada – 50/51G, sobrecorrente instantânea e temporizada de sequência negativa – 50/51Q, falha no disjuntor – 50/62BF, e assim por diante (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016). A figura 1 mostra o Relé Diferencial de Corrente SEL – 387A.

Figura 1 – Relé SEL - 387A

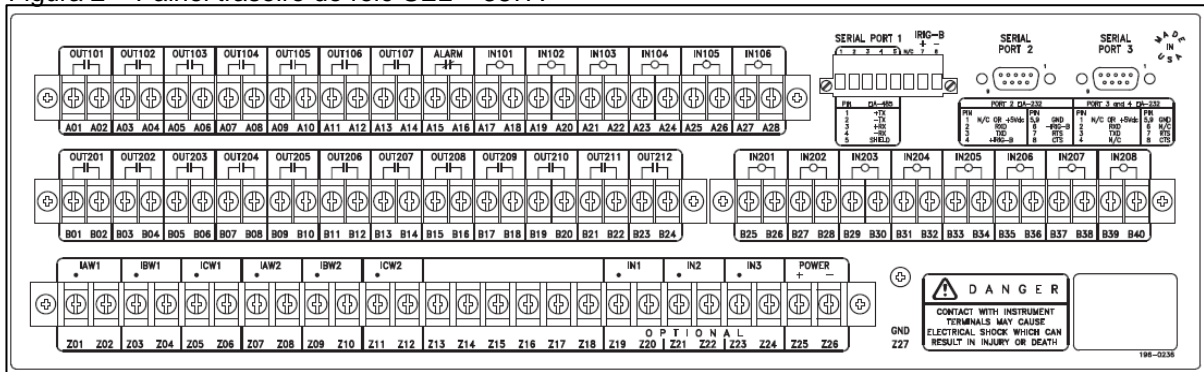


Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories ([2006?]).

De uma forma geral, o Relé SEL – 387A opera monitorando continuamente as correntes do primário e secundário do equipamento (transformador, reator, gerador, motor, etc.) que se deseja proteger através das entradas analógicas IAW1, IBW, ICW1 (primário) e IAW2, IBW2, ICW2 (secundário), bem como o estado (aberto/fechado) dos disjuntores (até dois disjuntores), que são adquiridos através das entradas binárias IN101, IN102. A partir daí o relé compara as informações recebidas com os parâmetros predeterminados e executa as lógicas implementadas de fábrica ou pelo próprio usuário. Em caso de falta, o relé enviará sinal de TRIP para os disjuntores, que por sua vez deverão abrir o circuito. Normalmente as saídas utilizadas para o comando de TRIP dos disjuntores controlados são OUT101 e OUT102 (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Existem no relé SEL – 387A outras entradas e saídas binárias, além das citadas anteriormente, que podem executar funções lógicas, conforme forem programadas. A figura 2 mostra o painel traseiro do relé, onde se pode observar as entradas e saídas do relé.

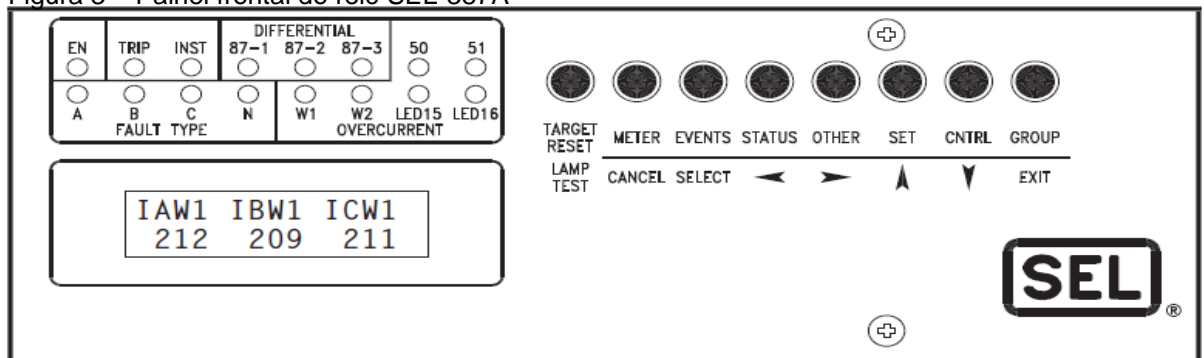
Figura 2 – Painel traseiro do relé SEL – 387A



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories ([2006?]).

A figura 3 mostra o painel frontal do relé SEL-387A de uma forma mais detalhada, onde é possível observar os LED's de sinalização, botões de navegação e acesso às informações do relé, bem como o display que serve para monitoramento das correntes e acesso as informações do relé.

Figura 3 – Painel frontal do relé SEL-387A



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories ([2006?]).

Os LED's tem a função de informar a situação do equipamento protegido de maneira mais ágil. Há um significado individual para cada LED:

- a) EN – Significa que o relé está ligado corretamente e que o auto-teste foi realizado com sucesso;
- b) TRIP – Significa que foi enviado o comando de trip ao disjuntor, devido

- à ocorrência de alguma falta no sistema;
- c) INST – Indica que a falta ocorrida foi de caráter instantâneo;
 - d) 87-1 – Indica que a função diferencial atuou por falta ocorrida na fase A do sistema;
 - e) 87-2 – Indica que a função diferencial atuou por falta ocorrida na fase B do sistema;
 - f) 87-3 – Indica que a função diferencial atuou por falta ocorrida na fase C do sistema;
 - g) 50 – Indica que houve falta de sobrecorrente instantânea;
 - h) 51 – Indica que houve falta de sobrecorrente temporizada;
 - i) A – Indica que a fase A está envolvida na falta ocorrida, independente de qual tenha sido a falta;
 - j) B – Indica que a fase B está envolvida na falta ocorrida, independente de qual tenha sido a falta;
 - k) C – Indica que a fase C está envolvida na falta ocorrida, independente de qual tenha sido a falta;
 - l) N – Indica que a falta ocorrida envolve correntes residuais;
 - m)W1 – Indica que o lado primário do equipamento protegido está envolvido na falta ocorrida;
 - n) W2 – Indica que o lado secundário do equipamento protegido está envolvido na falta ocorrida;
 - o) LED 15 e LED 16 – Estão disponíveis para que para programação, para que ascendam de acordo com um critério estabelecido pelo operador.

Cada botão do relé SEL-387A tem duas funções, descritas a seguir:

- 1) TARGET RESET/LAMP TEST – Quando o relé está na tela inicial, tem a função de resetar o relé, normalmente utilizada quando o relé está no modo TRIP. Quando o operador está visualizando ou editando alguma configuração este botão tem a função de iluminar todos os LED's para um teste de lâmpada.
- 2) METER/CANCEL – Quando o relé está na tela inicial, tem a função de acessar as medições do relé. Quando o operador está visualizando ou

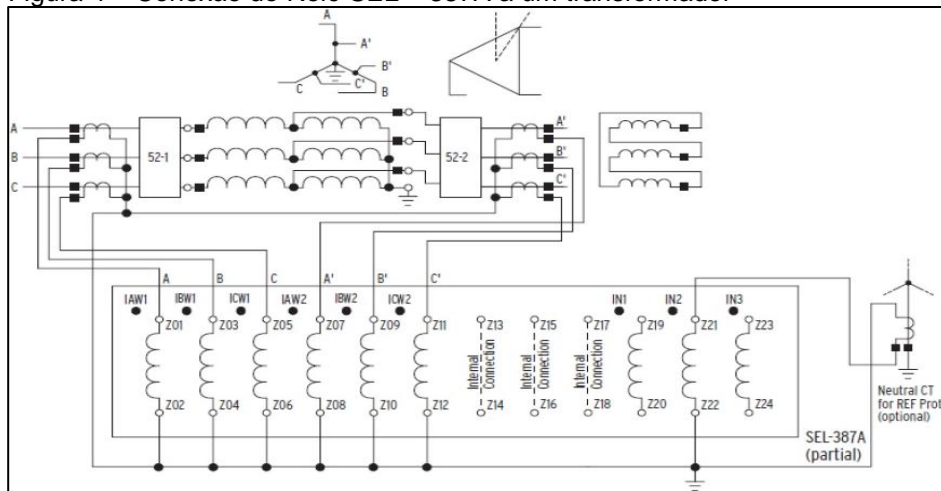
editando alguma configuração este botão tem a função de voltar ao nível de acesso imediatamente anterior da navegação, como uma função “voltar”.

- 3) EVENTS/SELECT – Quando o relé está na tela inicial, tem a função de acessar as faltas ocorridas. Quando o operador está visualizando ou editando alguma configuração este botão tem a função de acessar um item da navegação.
- 4) STATUS – Quando o relé está na tela inicial, tem a função de acessar o banco de dados dos piores registros de cada parâmetro examinado pelo relé. Quando o operador está visualizando ou editando alguma configuração este botão tem a função de navegação.
- 5) OTHER – Quando o relé está na tela inicial, tem funções diversas, como alterar a data e horário do relé, alterar o nome de identificação do relé, alterar a tela da função rotativa, que apresenta diferentes dados por cada período de tempo, para a função fixa, que mostra apenas um dado, e assim por diante. Quando o operador está visualizando ou editando alguma configuração este botão tem a função de navegação.
- 6) SET – Quando o relé está na tela inicial, tem a função de visualizar ou editar os ajustes parametrizados no relé, como por exemplo, alterar os valores das correntes de falta, ou a relação de transformação de um TC configurado no relé. Este recurso é útil quando se deseja alterar poucos parâmetros do relé, caso seja necessário realizar alteração em muitos ajustes do relé é necessário fazê-lo com auxílio do software de parametrização AcSELeRator QuickSet. Quando o operador já está visualizando ou editando alguma configuração este botão tem a função de navegação.
- 7) CNTRL – Quando o relé está na tela inicial, tem a função de controle de disjuntores ou chaves, conforme a lógica estabelecida. Quando o operador já está visualizando ou editando alguma configuração este botão tem a função de navegação.
- 8) GROUP – É possível inserir no Relé SEL 387A até seis, conjuntos (grupos) de parametrização, com ajustes diferentes entre. Este botão, quando o relé está na tela inicial, permite alterar entre esses grupos de parametrização. Quando o operador já está visualizando ou editando

alguma configuração este botão tem a função de cancelar a operação e voltar para a tela inicial.

A figura 4 mostra uma típica conexão do Relé SEL-387A a um transformador de dois enrolamentos, para monitoramento das correntes do primário e secundário do transformador.

Figura 4 – Conexão do Relé SEL – 387A a um transformador



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (2010).

2.2 Software de parametrização AcSELerator Quickset

O software AcSELerator Quickset é uma poderosa ferramenta para realização de ajustes, análises de eventos e visualização de relatórios e medições fornecidas pelos IEDs (Intelligent Electronic Devices) da SEL. O software pode ser aplicado a todos os principais relés de proteção, medidores, módulos e rádio (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Através deste software é possível realizar diversas atividades, como por exemplo:

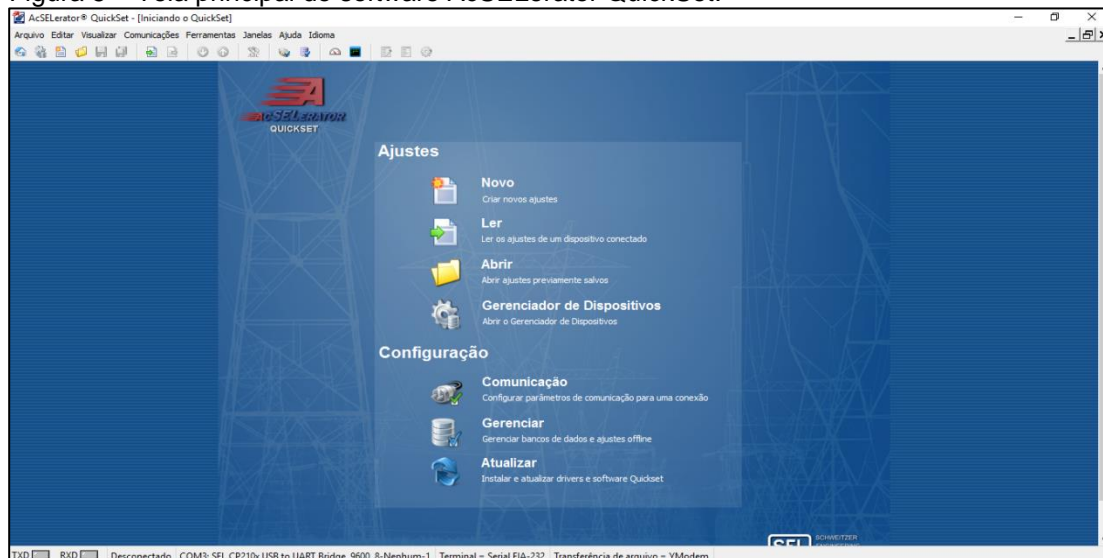
- Criar e gerenciar ajustes do relé;
- Desenvolver ajustes off-line;
- Programar lógicas de controle facilmente através das equações SELLogic;
- Coletar e armazenar eventos de oscilografias;
- Armazenar e coletar ajustes através de computadores pessoais;

- f) Ler e enviar todos os ajustes ao relé;
- g) Analisar eventos e oscilografias;
- h) Utilizar a interface homem máquina (IHM) para visualizar medições, Relay Word Bits e controle;
- i) Controle de disjuntores, através de chaves remotas.

É possível visualizar ou editar as equações lógicas de controle SELogic através de editores de textos ou gráficos, além de monitorar as medições analógicas, estados de bits, fasores, status do relé e controlar em tempo real o IED ao qual estiver conectado (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

A figura 5 mostra a tela inicial do Software AcSELErator Quickset.

Figura 5 – Tela principal do software AcSELErator QuickSet.



Fonte: Próprio autor (2017).

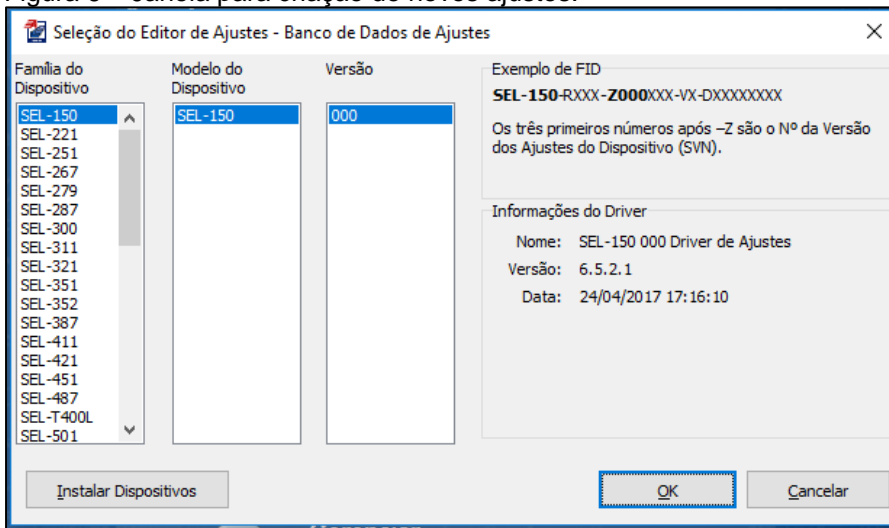
2.2.1 Ajustes

a) **Novo**

O ícone “Novo” permite que o usuário crie um novo pacote de configurações/parâmetros para ser inserido em qualquer IED da SEL. Ao clicar em “Novo” aparecerá à tela mostrada na figura 6. Onde é possível selecionar qual equipamento da SEL se deseja parametrizar. Escolhido o dispositivo desejado, basta clicar em “OK”, e inserir os parâmetros desejados em cada campo indicado (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Este ajuste é indiferente ao estado da comunicação entre o PC e o IED, tendo em vista que ele apenas criará um pacote configurações que serão salvos da memória interna do PC, para que posteriormente sejam enviados a um IED (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Figura 6 – Janela para criação de novos ajustes.



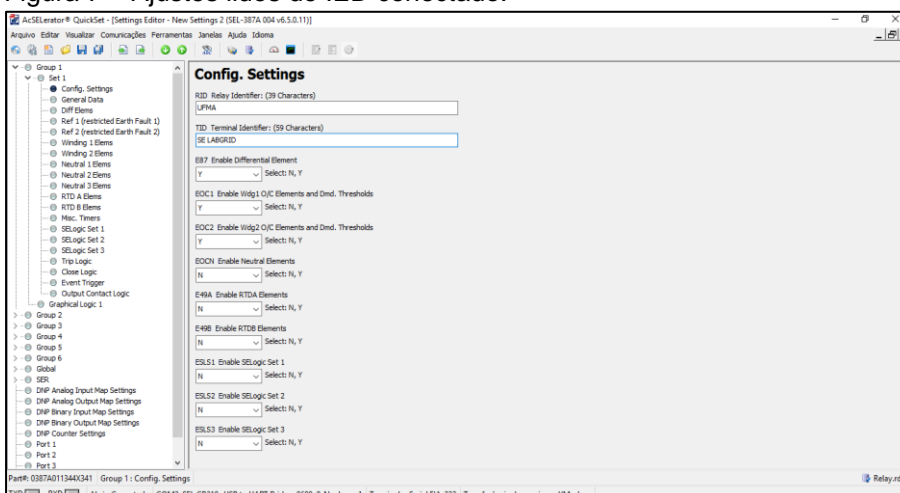
Fonte: Próprio autor (2017).

b) Ler

O ícone “Ler” permite que o usuário leia as configurações salvas em um relé. Para utilizar essa função é necessário que o PC esteja com comunicação estabelecida com o IED (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Ao clicar em “Ler” aparecerá a janela mostrada na figura 7, onde é possível visualizar todos os valores ajustados para cada parâmetro do relé.

Figura 7 – Ajustes lidos do IED conectado.

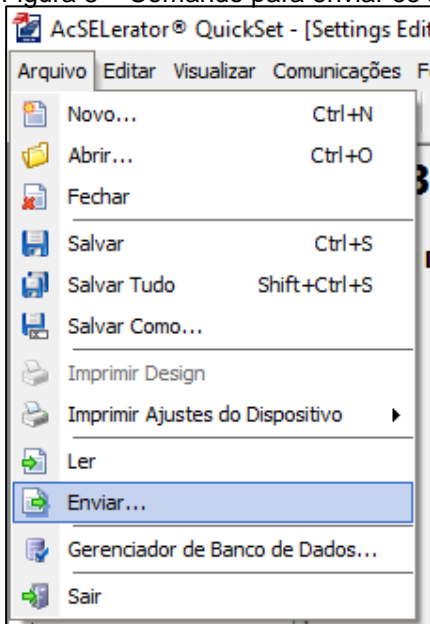


Fonte: Próprio autor (2017).

Caso seja necessário realizar a alteração de algum parâmetro, basta clicar em cima do campo referente ao parâmetro desejado e salvar o ajuste clicando na ilustração do disquete. Feito isso, estará criado o arquivo com a alteração desejada, mas ainda não terá sido enviada essa informação ao relé (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Para enviar os parâmetros atualizados é necessário clicar em “Arquivo”, depois “Enviar...”, como mostrado na figura 8. Vale ressaltar que a opção “Enviar” só estará disponível se houver sido estabelecido à comunicação entre o PC e o IED que se deseja parametrizar (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Figura 8 – Comando para enviar os ajustes ao IED conectado.

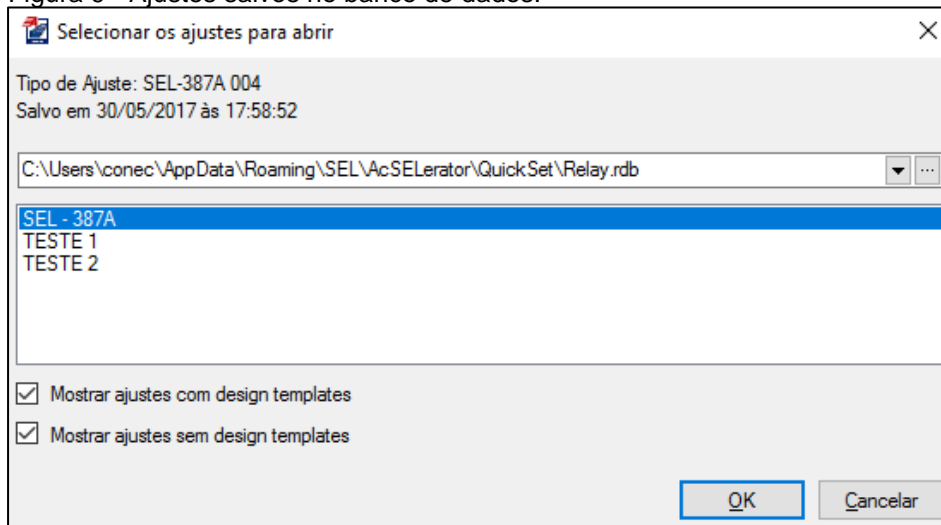


Fonte: Próprio autor (2017).

c) **Abrir**

Este ícone permite que o operador abra um pacote de parâmetros salvos na memória do PC, que pode ter sido criado através de “Novo” ou “Ler”. Ao clicar em “Abrir” aparecerá a janela mostrada na figura 9, onde serão exibidos os ajustes disponíveis (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Figura 9 - Ajustes salvos no banco de dados.



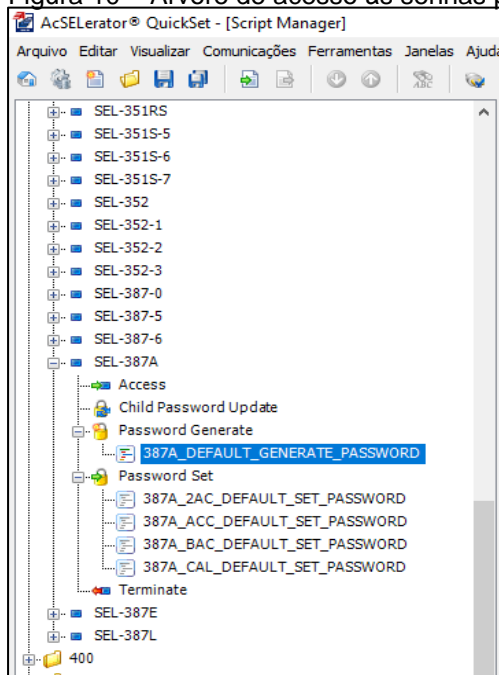
Fonte: Próprio autor (2017).

Ao abrir um desses arquivos, aparecerá a tela dos ajustes como foi mostrado na figura 7, então poderão ser realizadas modificações nos ajustes, bem como enviar estes ajustes ao IED de destino.

d) Gerenciador de dispositivo

Este ícone permite visualizar senhas padrão do dispositivo bem como altera-las, além de criar contas de acesso e assim por diante (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012). A figura 10 mostra como exemplo a árvore de acesso às senhas padrão dos dispositivos.

Figura 10 – Árvore de acesso às senhas padrão de cada IED.



Fonte: Próprio autor (2017).

2.2.2 Configuração

a) Comunicação

Este ícone permite que o operador estabeleça a comunicação entre o PC e o IED ao qual se deseja parametrizar. De uma forma geral os equipamentos da SEL possibilitam comunicação via porta serial ou via porta ethernet. No caso específico do relé SEL-387A, só é possível estabelecer comunicação via porta serial, já que o mesmo não possui porta ethernet. Como os notebooks atuais não possuem entrada serial, a SEL desenvolveu o cabo SEL-C662 que faz a conversão serial-USB, para que seja possível estabelecer a comunicação (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012). A figura 11 mostra o cabo SEL-C662.

Figura 11 - Cabo SEL-C662.



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (2012)

Clicando no ícone “Comunicação”, aparecerá a janela mostrada na figura 12, onde é possível inserir os parâmetros de comunicação. Vale ressaltar que os ajustes mostrados nesta figura são os mesmo utilizados para estabelecer comunicação com o relé SEL-387A.

Figura 12 - Janela de parâmetros de comunicação.

Defina o tipo de conexão (serial neste caso)

Porta de comunicação do seu computador

Velocidade = *

* A maioria dos relés SEL possuem como ajuste de fábrica a velocidade de 9600 bps. Na dúvida, verifique os parâmetros do relé ou escolha a opção "Auto Detect"

Data bits = 8
Stop bits = 1
Paridade = N

Senhas Padrão
nível 1 = OTTER
nível 2 = TAIL

Communication Parameters

Active Connection Type
Serial

Serial Network Modem

Device
COM2: SEL CP210x USB to UART Bridge

Data Speed
 Auto detect 2400 38400
 300 4800 57600
 600 9600 115200
 1200 19200

Data Bits
 8
 7

Stop Bits
 2
 1

Parity
 None
 Odd
 Even

RTS/CTS
 Off On

DTR
 Off On

XON/XOFF
 Off On

RTS
 Off On

Level One Password

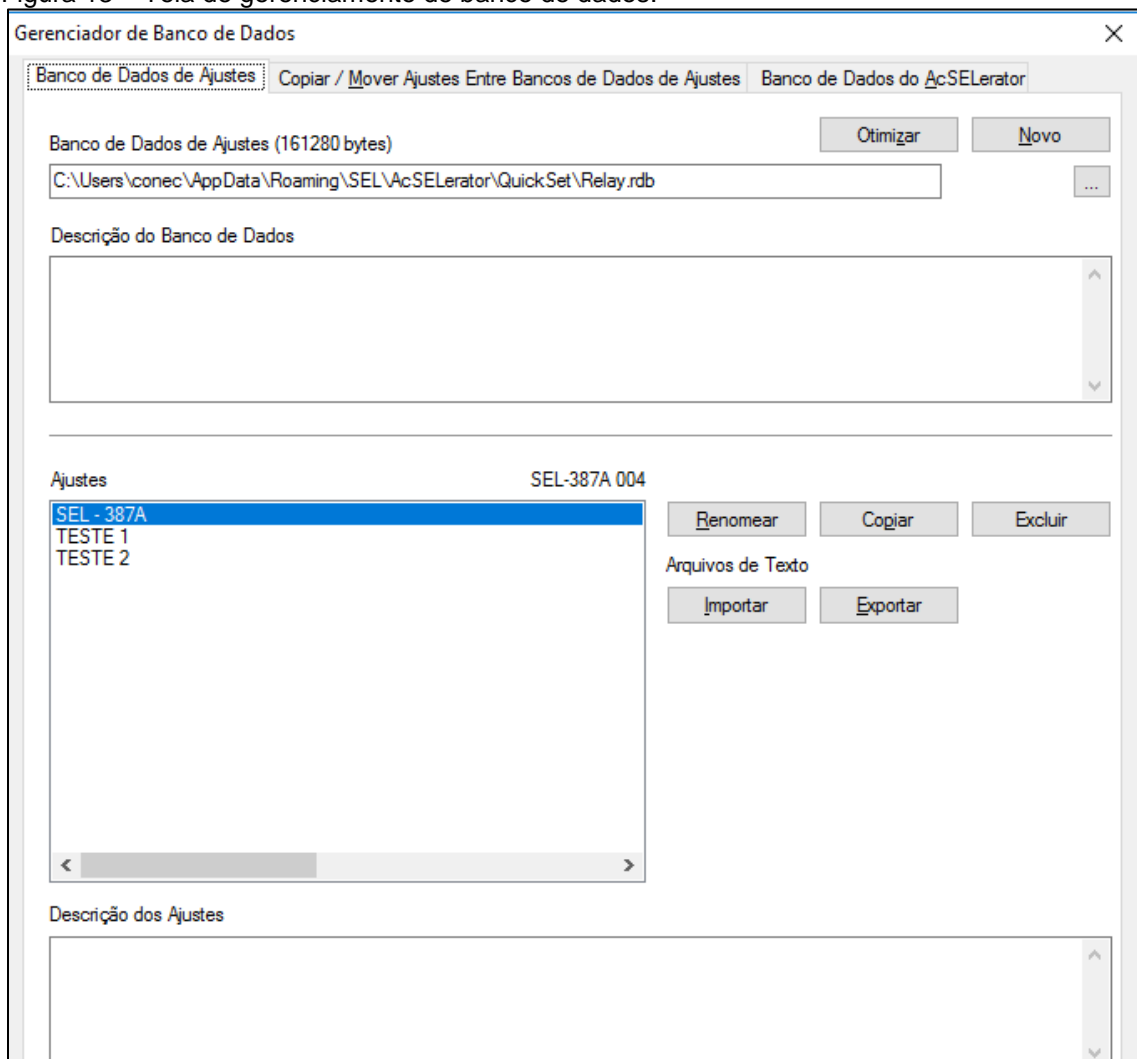
Level Two Password

Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (2012)

b) Gerenciar

Este ícone permite gerenciar o banco de dados onde estão salvos todos os arquivos de parametrização, como por exemplo, alterar ajustes, mover ajustes entre pastas (banco de dados) realizar backups, e assim por diante (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012). A figura 13 mostra a janela do gerenciador de banco de dados.

Figura 13 – Tela de gerenciamento de banco de dados.



Fonte: Próprio autor (2017).

c) Atualizar

O ícone atualizar permite que o operador atualize o software AcSElerator QuickSet para a versão mais atual.

3 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO RELÉ SEL-387A

3.1 Função diferencial – 87

A proteção diferencial tem seu princípio de funcionamento baseado na lei das correntes de Kirchoff (ARAÚJO, 2005), onde a soma algébrica das correntes em um nó elétrico é sempre igual a zero, em outras palavras, a soma das correntes que chegam a um nó elétrico é sempre igual à soma das correntes que saem deste nó (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Sendo assim, admitindo-se um determinado dispositivo elétrico como um nó elétrico é possível estabelecer uma proteção operante contra faltas internas a este dispositivo apenas fazendo a comparação entre as corrente que entraram e as que saíram. Caso a diferença entre essas correntes ultrapassem um limite pré-estabelecido, o relé habilitado para a função diferencial de corrente deverá atuar de maneira a abrir o disjuntor de proteção do circuito em questão, eliminando, assim, a falta existente. Esta proteção é conhecida como proteção diferencial de corrente, função diferencial ou apenas função 87 (ARAÚJO, 2005).

Entretanto, para parametrizar a função 87, não basta configurar no relé um valor de corrente diferencial para atuação desta função, é necessário que sejam levados em consideração alguns fatores que poderão alterar os resultados da comparação entre as correntes que entram e saem do “nó elétrico”, fazendo com que a função 87 atue de maneira equivocada (GAUER, 2014). Alguns desses fatores são:

- a) Esquema de ligação dos TC's, que podem estar conectados em delta ou estrela;
- b) Relação de transformação dos TC's;
- c) Compensação de conexão interna de enrolamento. Em casos que a função 87 está aplicada a transformadores pode haver um defasamento angular entre as correntes do primário e secundário do transformador.
- d) Bloqueio da função diferencial por segunda, quarta e quinta harmônica. Este ajuste permite auxiliar a atuação da função 87 durante a energização do transformador ou durante a sobre-excitação do

transformador;

- e) Restrição de atuação da função 87 perante erros introduzidos pelos transformadores de correntes, como durante a saturação dos TC's.

E assim por diante.

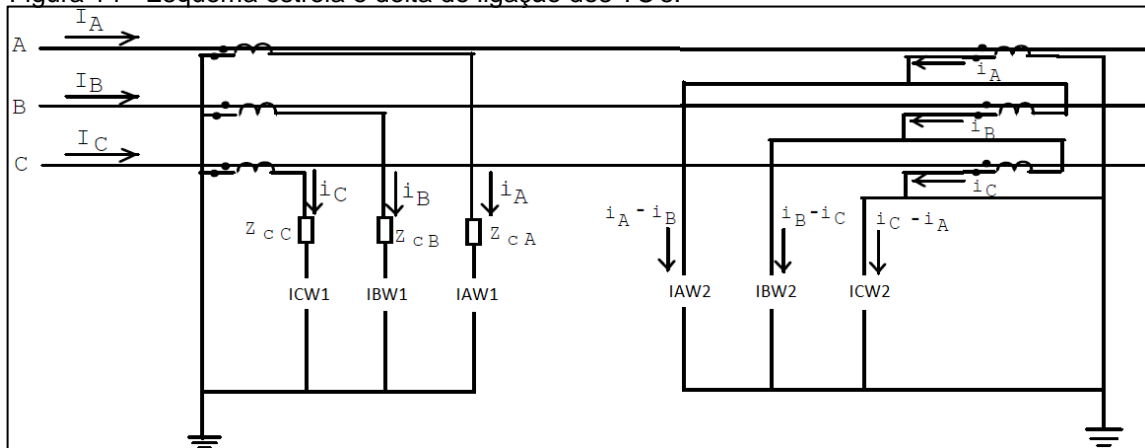
O relé SEL – 387A é contemplado com a função diferencial de corrente e leva em consideração todos os fatores que podem exercer influência sobre a operação da função 87, que serão explanados a seguir (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

3.2 Esquema de ligação dos TC's

Um dos primeiros fatores a se levar em consideração é o tipo de ligação dos TC's utilizados para conexão entre o relé e o equipamento ao qual se deseja proteger. Para a atuação da função 87 do relé SEL-387A é necessário especificar o tipo de ligação dos TC's que podem estar ligados em Estrela ou Delta. É importante ressaltar que o tipo de ligação do conjunto primário de TC's independe do conjunto secundário de TC's, ou seja, o conjunto primário pode estar conectado em estrela enquanto o conjunto secundário pode estar conectado em delta e vice-versa, ao passo que eles também podem estar de conectados na mesma maneira, ou seja, estrela-estrela ou delta-delta. O mais importante é especificar corretamente o tipo de ligação do conjunto primário e secundário durante a parametrização do relé SEL – 387A (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

A figura 14 mostra os dois tipos de esquemas de ligação, à esquerda a ligação estrela, á direita a ligação delta.

Figura 14 - Esquema estrela e delta de ligação dos TC's.



Fonte: Almeida (2000).

3.3 Relação de transformação dos TC's

Além do tipo de ligação dos TC's, também se deve informar a relação de transformação dos mesmos, para que o relé possa interpretar o valor real de corrente. No caso do Relé SEL-387A esta informação deve ser fornecida da seguinte maneira: Se a relação de transformação do TC for, por exemplo, 1000/5 A, o valor de ajuste a ser inserido no relé é 200 A, tendo em vista que $1000/5 = 200/1$. Esta informação é fornecida individualmente para o conjunto primário de TC's e para o conjunto secundário (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Se o equipamento protegido pela função diferencial é um transformador de potência, a escolha da relação de transformação dos TC's deverá seguir a seguinte lógica: Escolhida a relação de transformação do conjunto primário de TC's, a relação de transformação do conjunto secundário de TC's deverá ser obtido multiplicando a relação de transformação do TC's primários pelo tap do transformador de potência que se deseja proteger. Por exemplo: Sendo a relação de transformação dos TC's do lado primário igual a 200/1 e o tap do transformador de potência igual a 10, a relação de transformação do conjunto secundário de TC's será igual a $200 * 10 = 2000$ A (GAUER, 2014).

De maneira análoga, se já houver sido determinado o valor da relação de transformação do conjunto secundário de TC's, o valor da relação de transformação do conjunto primário será determinado dividindo o valor da relação de transformação do conjunto primário pelo valor do tap do transformador a ser protegido (GAUER,

2014).

A utilização dessa lógica para escolha da relação de transformação dos TC's fará com que o relé “enxergue” a mesma corrente tanto no primário quanto no secundário do transformador a ser protegido, logo evitará que o relé atue em condições normais de operação, já que a diferença entre as correntes do primário e secundário é uma característica inerente a um transformador.

3.4 Compensação de conexão interna de enrolamento

Outro importante parâmetro que se deve informar ao relé SEL-387A é se há necessidade de compensação de conexão interna de enrolamento para o equipamento que está sendo protegido. Por exemplo, em um transformador delta/estrela, haverá um defasamento de 30° entre as correntes do primário e secundário do transformador, o que compromete a atuação da função 87, já que a perfeita operação desta função exige que as correntes submetidas à função diferencial devam estar em fase entre si. Em casos como os do transformador, se não houver uma compensação deste defasamento, o relé entenderá como uma condição de falta e irá operar indevidamente. Portanto, a correção do defasamento deve sempre ser considerada (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Esta compensação é feita matematicamente através do relé SEL-387A, que fornece ao todo 13 matrizes de compensação, que incrementam 30° no sentido anti-horário para sistemas com sentido de rotação de fases ABC ou incrementam 30° no sentido horário para sistemas com sentido de rotação de fases ACB. A figura a seguir mostra todas as matrizes de compensação que podem ser utilizadas conforme a necessidade do esquema de proteção (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Figura 15 – Matrizes de compensação de conexão interna de enrolamento

$$\begin{aligned}
 [CTC(0)] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & [CTC(1)] &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & [CTC(2)] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 [CTC(3)] &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} & [CTC(4)] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} & [CTC(5)] &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \\
 [CTC(6)] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} & [CTC(7)] &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & [CTC(8)] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \\
 [CTC(9)] &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} & [CTC(10)] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} & [CTC(11)] &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\
 [CTC(12)] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (2010).

3.5 Cálculo da corrente base

Internamente o relé trabalha com valores de corrente por unidade (pu), mas para isso, é necessário fornecer ao relé os valores nominais de tensão de linha do primário e secundário do equipamento que se deseja proteger, bem como sua potência nominal, para que o relé possa calcular a corrente base do sistema. A faixa de ajuste de tensão de linha varia entre 1 e 1000 KV enquanto os valores de potência variam entre 0,2 e 5000 MVA (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Se por algum motivo não for inserido o valor de potência nominal do equipamento que se deseja proteger, não será realizado automaticamente o cálculo do valor de corrente base, entretanto, é possível inserir no relé o valor da corrente

base de maneira direta. Devem ser inseridos dois valores de corrente base, um referente ao primário e outro referente ao secundário do equipamento que se deseja proteger. Os cálculos das correntes bases devem ser obtidos a partir da seguinte equação:

$$I_{bn} = \frac{MVA * 1000 * C}{V_n * CTR_n * \sqrt{3}}$$

Onde,

$n = 1$, se estiver calculando a corrente base do primário;

$n = 2$, se estiver calculando a corrente base do secundário;

I_{bn} = corrente base;

MVA = Potência máxima do equipamento protegido;

$C = 1$, se as ligações dos TC's forem estrela;

$C = \sqrt{3}$, se as ligações do TC's forem delta;

V_n = Tensão de linha;

CTR_n = Relação de transformação dos TC's.

Encontrados os valores de correntes nominais, basta inseri-los diretamente nas configurações do relé. Vale ressaltar que em alguns casos, como por exemplo, na proteção de um barramento, os valores de correntes base (I_{b1} e I_{b2}) podem ser iguais.

Para o relé SEL – 387A a razão entre o maior valor de corrente nominal e o menor valor de corrente nominal não deve ultrapassar 7,5, ou seja, se $I_{n2} > I_{n1}$, $I_{n2}/I_{n1} \leq 7,5$, além disso, a o valor das correntes base tanto do primário quanto do secundário devem estar dentro da faixa $0,1 \times I_N$ e $31 \times I_N$, onde I_N é a corrente nominal do sistema (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

3.6 Corrente diferencial de atuação do relé

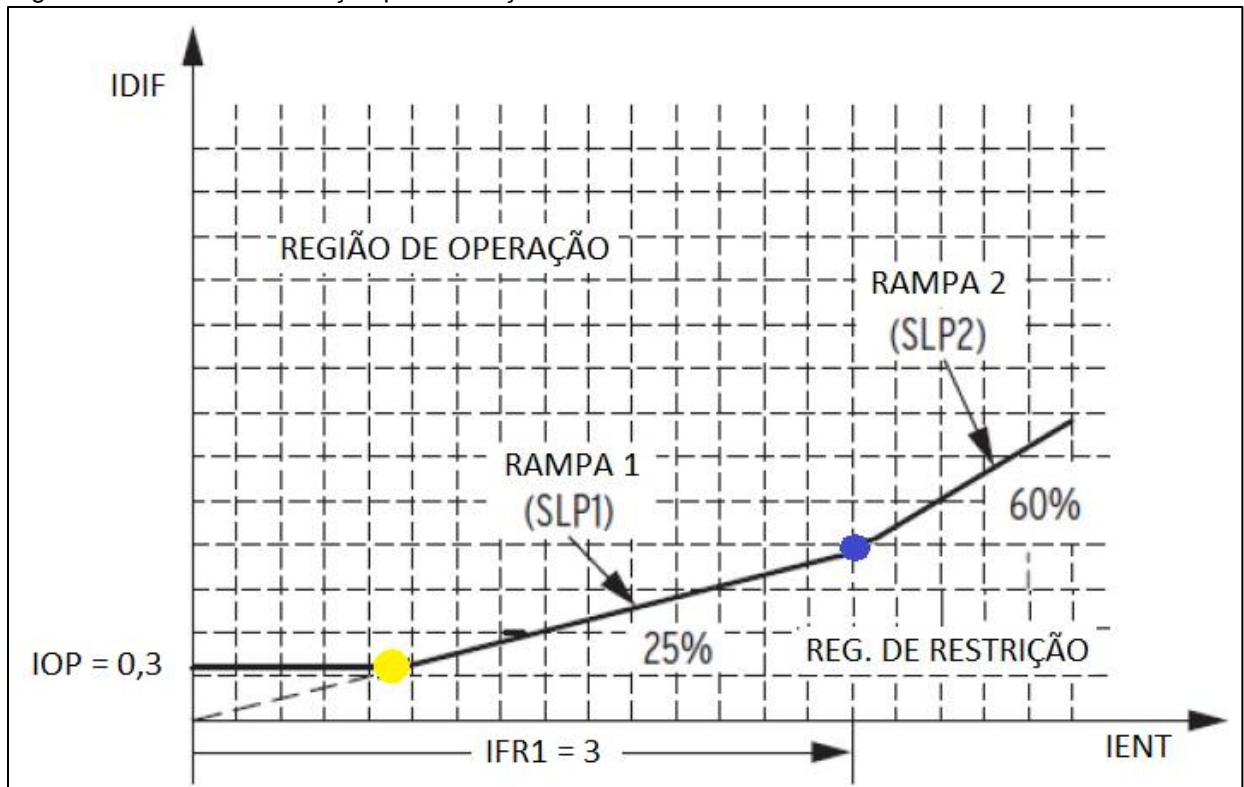
Este ajuste define a corrente diferencial de operação (IOP) de trip do relé SEL – 387A. O valor de corrente é inserido em múltiplos da corrente base (I_b), por exemplo, sendo o ajuste de corrente diferencial $IOP=0,3$ a corrente de atuação do relé para a função diferencial será $0,3 \times I_b$, que corresponde a 30% da corrente base,

ou seja, se a diferença entre a corrente do primário e a corrente do secundário do equipamento que está sendo protegido chegar a 30% da corrente base, o relé atuará abrindo o circuito (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Para evitar operações indevidas pelo relé SEL – 387A causados por erros de leitura em TC's, quando estes estão submetidos a baixas correntes, foi estabelecido o critério de que a corrente operacional deve se maior ou igual a $0,1 \times I_N$, ou seja, $IOP \times IB \geq 01 \times I_N$, trazendo mais confiabilidade nas operações deste relé (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Além do ajuste da corrente de operação (IOP), também existem mais dois ajustes percentuais de operação, que buscam aperfeiçoar a atuação do relé. Esses elementos percentuais usam as grandezas de operação calculadas a partir das correntes de entrada do sistema que está sendo protegido, ou seja, ocorrerá trip quando a corrente diferencial ultrapassar um determinado valor percentual calculado sobre a corrente de entrada daquele instante. O melhor entendimento dos ajustes percentuais se dará a partir da interpretação da figura a seguir.

Figura 16 – Gráfico de atuação para a função 87



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (2010).

O gráfico mostra no eixo horizontal a corrente de entrada (IENT) do equipamento que se deseja proteger, enquanto o eixo vertical mostra a corrente diferencial (IDIF). A linha contínua delimita a região de restrição (onde a função diferencial não atuará) e a região de operação (onde a função diferencial atuará). Cada quadrado no gráfico é equivalente a 0,2 A, visto a partir do secundário dos TC's. A corrente diferencial de operação (IOP) está ajustada em 0,3.

Analisando a Rampa 1 a partir da origem do gráfico, podemos acompanhá-la em linha tracejada até o ponto amarelo. A linha tracejada indica que a Rampa 1 não está sendo utilizada como parâmetro diferencial, pelo fato de que para estas correntes de entrada (IENT) a corrente diferencial calculada pela Rampa 1 (IOP') será menor que a corrente diferencial de operação (IOP) ajustada. Tendo em vista que a corrente IOP' é obtida através da seguinte equação:

$$IOP' = \frac{25}{100} * IENT$$

Por exemplo, para uma corrente de entrada IENT = 0,8 A, a corrente de operação calculada pela rampa 1 será:

$$IOP' = \frac{25}{100} * 0,8 = 0,2 \text{ A} \leq IOP = 0,3 \text{ A}$$

Desta forma prevalecendo o valor de IOP.

Já analisando a Rampa 1 a partir do ponto amarelo, podemos acompanhá-la em linha contínua, que indica que a Rampa 1 está sendo utilizada como parâmetro diferencial, pelo fato de que para estas correntes de entrada (IENT) a corrente diferencial calculada pela Rampa 1 (IOP'), será maior que a corrente diferencial de operação (IOP) ajustada. Realizando novamente um exemplo numérico, para uma corrente de entrada IENT = 1,6 A, a corrente de operação calculada pela rampa 1 será:

$$IOP' = \frac{25}{100} * 1,6 = 0,4 \text{ A} \geq IOP = 0,3 \text{ A}$$

Desta forma prevalecendo o valor de IOP'.

Logo, para o exemplo mostrado no gráfico para qualquer corrente de entrada IENT até 1,2 A prevalecerá o ajuste IOP, a partir de 1,2 A prevalecerá o valor de IOP'.

O ponto azul na linha contínua indica a intercessão entre o final da Rampa 1 e o início da Rampa 2, este ponto é definido através da corrente final da Rampa 1 (IFR1), neste caso o ajuste configurado para IFR1 foi 3 A, isso quer dizer que quando a corrente de entrada (IENT) for superior a 3A, a Rampa 2 será utilizada para o calculo da corrente de operação IOP'', o calculo da corrente de operação a partir da Rampa 2 se dá de maneira análoga ao da Rampa 1:

$$IOP'' = \frac{60}{100} * IENT$$

Desta forma, podemos resumir que para o exemplo mostrado no gráfico, as correntes de operação serão definidas da seguinte maneira:

- a) Se $IENT \leq 1,2 \text{ A}$, $IOP=0,3$;
- b) Se $1,2 \text{ A} < IENT \leq 3 \text{ A}$, $IOP' = \frac{25}{100} * IENT$;
- c) Se $3 \text{ A} < IENT$, $IOP'' = \frac{60}{100} * IENT$.

O objetivo das rampas na função diferencial é evitar que o relé atue de maneira indevida. A Rampa 1 considera as correntes diferenciais resultantes dos erros dos TCs, já que as perdas neste sistema aumentam a medida que há o aumento de corrente, além disso, a Rampa 1 também considera alterações de tap em caso de transformadores com recurso LTC (Load TAP Change). A Rampa 2 evita a operação indesejada do relé devido à saturação dos TCs quando há faltas externas de alta intensidade, já que nesta caso as funções que deverão atuar as funções de sobrecorrente, que serão discutidas mais adiante.

3.7 Corrente diferencial sem restrição

Este ajuste define um valor de corrente diferencial sem restrição (IOPU) para que o relé SEL – 387A atue pela função diferencial independente de qualquer

outro parâmetro do sistema. Este ajuste é normalmente definido como 10xIb, para que o sistema seja protegido contra faltas internas muito elevadas.

Por exemplo, tomando como base o gráfico anterior, onde IOP=0,3; Rampa1=25%; Rampa2=60%; IFR1=3; e sendo, por definição, o ajuste da corrente diferencial sem restrição IOPU = 5 A, temos que para uma corrente de entrada IENT= 10 A, a corrente diferencial de operação será:

$$IOP'' = \frac{60}{100} * IENT = \frac{60}{100} * 10 = 6 A$$

Desta forma, se a corrente diferencial atingir um valor de 5 A, a função diferencial atuará pelo ajuste de corrente diferencial sem restrição IOPU.

3.8 Bloqueio da função diferencial por segunda, quarta e quinta harmônica

Além da restrição percentual explanada anteriormente (Rampa1 e Rampa 2), utilizam-se como parâmetros restritivos para operação da função diferencial as harmônicas presentes na corrente de magnetização durante a energização de transformadores, reatores, motores, e assim por diante. O objetivo é bloquear a operação diferencial ou elevar o valor da corrente de operação, tornando viável o ajuste da corrente de baixo valor e tempos de retardo reduzidos, já que o bloqueio harmônico é mais uma garantia que a função 87 não atuará de maneira indevida (GAUER, 2014; SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

As elevadas porcentagens de componentes harmônicas presentes na corrente de magnetização faz com que seja possível identifica-las como não sendo correntes resultantes de defeitos (GAUER, 2014). Assim, nos relés diferenciais com restrição percentual por correntes harmônicas, como é o caso do relé SEL – 387A, existem filtros capazes de separar as componentes harmônicas da onda fundamental (GAUER, 2014; SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

Desta forma a função de bloqueio por harmônicos opera de maneira que é estabelecido um valor percentual de harmônico limite para operação da função diferencial, em outras palavras, se o percentual de harmônico presente na corrente do sistema superar um determinado valor pré-estabelecido, a função diferencial não

poderá atuar, pois entende-se que neste caso trata-se de situações como por exemplo, energização de transformador, sobre-excitação do sistema, saturação dos TC's por faltas externas e assim por diante. Por outro lado, se o percentual harmônico permanecer dentro do limite pré-estabelecido, a função diferencial atuará normalmente (GAUER, 2014; SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016).

A restrição da 2ª e 4ª harmônica bloqueia a atuação da função diferencial de corrente em situações como a energização do transformador, já a restrição da 5ª harmônica é empregada para bloquear a função diferencial de corrente em situações como a sobre-excitação do transformador (Quando submetido a uma carga de elevado efeito capacitivo, por exemplo) (GAUER, 2014).

No relé SEL – 387A os valores limites da segunda, quarta e quinta harmônicas são ajustados independentemente.

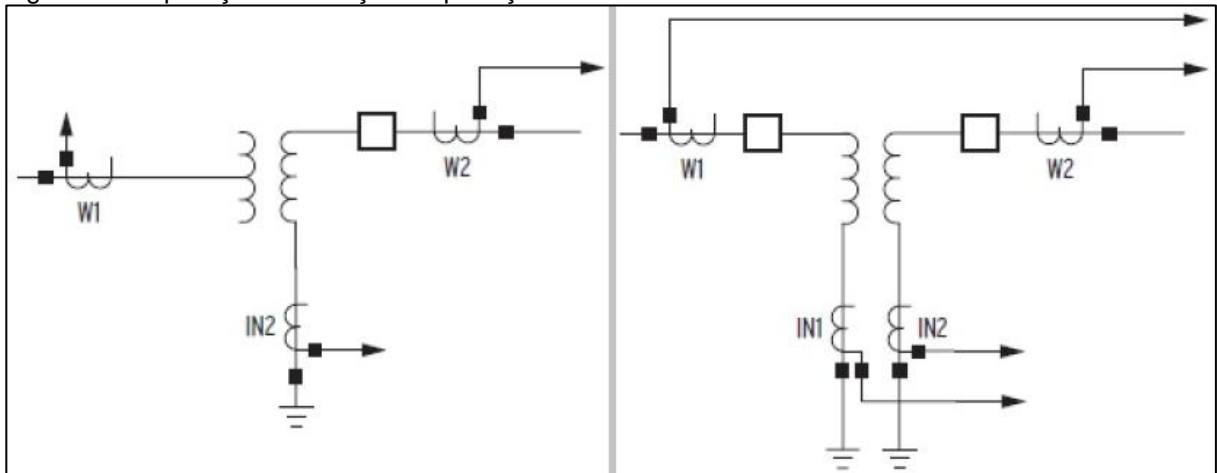
3.9 Proteção de falta à terra restrita – REF (*Restrict Earth Fault*)

A função diferencial de corrente (função 87) apresenta certa limitação quando aplicada a proteção de transformadores ou autotransformadores aterrados, pois não é capaz de perceber faltas à terra envolvendo espiras próximas ao aterramento do transformador, já que durante estas faltas as correntes de fase são pequenas enquanto a corrente de neutro é alta. Para detectar faltas à terra envolvendo espiras próximas ao aterramento do transformador, é utilizada a proteção de falta à terra restrita (REF), que funciona como um complemento da função diferencial. A proteção de falta à terra restrita atua comparando a corrente de neutro medida com a corrente de neutro calculada através das componentes de sequência zero (PERES; SILVA, 2016).

O relé SEL – 387A é contemplado com dois elementos REF independentes, que permitem estabelecer essa proteção para o enrolamento primário e secundário em casos que o transformador é aterrado em ambos os enrolamentos (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010; 2016). A figura 7 mostra duas aplicações da função REF, à esquerda mostra um transformador delta-estrela aterrado, onde só foi possível estabelecer a função REF no secundário do transformador, já que só este enrolamento está aterrado, já à direita, é apresentado um esquema onde ambos os enrolamentos do transformador

estão protegidos com a função REF, pois se trata de um transformador estrela aterrado-estrela aterrado.

Figura 17 – Aplicações da função de proteção de falta à terra restrita.



Fonte: Adaptado de Schweitzer Engineering Laboratories (2010).

O limite de sensibilidade para atuação da função REF no relé SEL – 387A é ajustado seguindo dois critérios.

Critério 1: A corrente limite para atuação da função REF deve ser maior que qualquer desequilíbrio natural causado por condições de carga. Considerando o sistema com 10% de desequilíbrio a corrente de ajuste deve ser maior que $0,1 * I_n = 0,1 * 5 A = 0,5 A$.

Critério 2: A corrente limite para atuação da função REF deve ser maior que um valor mínimo, determinado a partir dos valores da relação de transformação dos TC's utilizados no enrolamento protegido. Este valor é determinado através da seguinte equação:

$$I(REF) \geq 0,05 * I_n * \frac{CTR}{CTR_n}$$

Onde,

I_n = Corrente nominal;

CTR = Relação de transformação dos TC's de fase;

CTR_n = Relação de transformação do TC de neutro.

Além do limite de sensibilidade para atuação da função REF, também é ajustado no relé SEL – 387A um valor mínimo de corrente de sequência zero para que a função seja habilitada, este valor é percentual, calculado em cima do valor da corrente de sequência positiva, por exemplo, se para este ajuste for escolhido 10%, a função REF só estará habilitada a partir do momento em que o valor da corrente de sequência zero for pelo menos 10% do valor da corrente de sequência positiva (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

3.10 Sobrecorrente instantânea e temporizada

De uma forma geral, a função de sobrecorrente instantânea é caracterizada pelo monitoramento das correntes do equipamento ao qual o relé está ligado, e caso a corrente que está sendo monitorada ultrapasse o valor de referência especificado o relé enviará instantaneamente o comando de abertura para o disjuntor. É possível ajustar um tempo para retardo da função de sobrecorrente instantânea, caso seja necessário (GONZALEZ, 2007).

Já a função de sobrecorrente temporizada (ou de tempo inverso) não obedece a um valor fixo de referência, mas sim a uma curva de referência que é gerada a partir de uma dada equação que tem como entrada um tempo de delay ajustado pelo operador e a corrente medida no sistema. A curva fornece o tempo de atuação da função de sobrecorrente temporizada para cada valor de corrente medido (GONZALEZ, 2007).

As equações utilizadas para gerar as curvas de tempo inverso para operação da função de sobrecorrente temporizadas são fornecidas pelo padrão americano ou pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), e podem ser escolhidas conforme a necessidade da aplicação.

Tabela 1 – Padrão IEC de curvas de operação para função de sobrecorrente temporizada.

TIPO DE CURVA	TEMPO DE OPERAÇÃO	TEMPO DE RESET
U1(Moderadamente Inversa)	$T_p = TD \cdot \left(0.0226 + \frac{0.0104}{M^{0.02} - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{1.08}{1 - M^2} \right)$
U2 (Inversa)	$T_p = TD \cdot \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{5.95}{1 - M^2} \right)$
U3 (Muito Inversa)	$T_p = TD \cdot \left(0.0963 + \frac{3.88}{M^2 - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{3.88}{1 - M^2} \right)$
U4 (Extremamente Inversa)	$T_p = TD \cdot \left(0.02434 + \frac{5.64}{M^2 - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{5.64}{1 - M^2} \right)$
U5 (Inversa de curto tempo)	$T_p = TD \cdot \left(0.00262 + \frac{0.00342}{M^{0.04} - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{0.323}{1 - M^2} \right)$

Fonte: Adaptado de Schweitzer Engineering Laboratories (2010).

Tabela 2 – Padrão americano de curvas de operação para função de sobrecorrente temporizada.

TIPO DE CURVA	TEMPO DE OPERAÇÃO	TEMPO DE RESET
C1 (Inversa)	$T_p = TD \cdot \left(\frac{0.14}{M^{0.02} - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{13.5}{1 - M^2} \right)$
C2 (Muito Inversa)	$T_p = TD \cdot \left(\frac{13.5}{M - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{47.3}{1 - M^2} \right)$
C3 (Extremamente Inversa)	$T_p = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{80}{1 - M^2} \right)$
C4 (Inversa de longo tempo)	$T_p = TD \cdot \left(\frac{120}{M - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{120}{1 - M} \right)$
C5 (Inversa de curto tempo)	$T_p = TD \cdot \left(\frac{0.05}{M^{0.04} - 1} \right)$	$T_R = TD \cdot \left(\frac{4.85}{1 - M^2} \right)$

Fonte: Adaptado de Schweitzer Engineering Laboratories (2010).

Onde,

T_p = Tempo de operação, ou seja, o tempo que o relé levará para acionar a abertura do disjuntor de proteção;

T_r = Tempo de reset, ou seja, tempo que o relé zerará a contagem do tempo de operação;

TD = Multiplicador de tempo ajustado pelo operador;

M = Valor de corrente para cálculo de tempo de operação.

O relé SEL – 387A é contemplado com as funções de sobrecorrente instantânea e temporizado de fase (50/51), de neutro (residual) (50/51G) e de sequência negativa (50/51Q), que podem ser parametrizadas individualmente para as correntes de entrada e de saída.

3.11 Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada para o primário e secundário do transformador – 50/51

Essa função busca monitorar as correntes de fase. Para habilitar a função de sobrecorrente instantânea (50) é necessário inserir o valor da corrente de Pickup que é o valor do módulo da corrente no secundário do TC, a partir do qual o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor. Se necessário pode-se ajustar um tempo de retardo para atuação desta função (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

Para habilitar a função de sobrecorrente temporizada (51) é necessário escolher qual curva de tempo inversa será utilizada, e, se necessário, informar o tempo de delay, para ajustar melhor à curva a determinada aplicação. É possível escolher qualquer uma das curvas mostradas anteriormente (U1 a U5 e C1 a C5) (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

3.12 Sobrecorrente residual instantânea e temporizada para o primário e secundário do transformador – 50/51G

Essa função busca monitorar a corrente residual. Para habilitar a função de sobrecorrente residual instantânea (50G) é necessário inserir o valor da corrente de Pickup que é o valor do módulo da corrente no secundário do TC, a partir do qual o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor. Se necessário pode-se ajustar um tempo de retardo para atuação desta função (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

Para habilitar a função de sobrecorrente residual temporizada (51G) é necessário escolher qual curva de tempo inversa será utilizada, e, se necessário, informar o tempo de delay, para ajustar melhor à curva a determinada aplicação. É possível escolher qualquer uma das curvas mostradas anteriormente (U1 a U5 e C1 a C5) (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

A função de sobrecorrente residual difere da função de sobrecorrente de fase pelo fato que na função residual a corrente não é diretamente medida, mas sim calculada internamente no relé através do somatório das correntes de fase (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

3.13 Sobrecorrente instantânea e temporizada de sequência negativa para o primário e secundário do transformador – 50/51Q(46)

Através da componente de sequência negativa da corrente é possível monitorar se há ausência ou inversão de fases, ou mesmo quantificar a severidade do desequilíbrio no sistema a ser protegido.

Para habilitar a função de sobrecorrente instantânea de sequência negativa (51Q) é necessário inserir o valor da corrente de Pickup que é o valor do módulo da corrente no secundário do TC, a partir do qual o relé enviará sinal de abertura ao disjuntor. Se necessário pode-se ajustar um tempo de retardo para atuação desta função (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

Para habilitar a função de sobrecorrente temporizada de sequência negativa (51Q) é necessário escolher qual curva de tempo inversa será utilizada, e, se necessário, informar o tempo de delay, para ajustar melhor à curva a determinada aplicação. É possível escolher qualquer uma das curvas mostradas anteriormente (U1 a U5 e C1 a C5) (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

A função de sobrecorrente de sequência negativa, assim como a função de sobrecorrente residual, não tem a corrente diretamente medida, mas sim calculada através da decomposição das correntes de fase em suas componentes simétricas (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

3.14 Falha no disjuntor – 50BF

A falha no disjuntor ocorre quando o mesmo não obedece ao comando de abertura do circuito (trip) enviado pelo relé mediante a ocorrência de faltas no sistema, ou seja, quando o disjuntor permanece fechado mesmo após o comando de abertura (MARTINS, 2012).

A função de proteção de falha no disjuntor tem por objetivo minimizar os danos ao sistema e demais equipamentos, durante uma falta em que ocorra a falha de abertura do disjuntor que recebeu o comando de trip da proteção, tendo em vista que ao detectar a falha no disjuntor o relé deverá enviar um comando de abertura para o disjuntor a montante do disjuntor que falhou (MARTINS, 2012; SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

No relé SEL – 387A a função de proteção de falha no disjuntor funciona da seguinte maneira: Quando é detectada uma falta no sistema é enviado o comando de abertura do disjuntor, então o relé verifica se houve atuação do disjuntor durante certo período de tempo, caso o disjuntor não atue no período de tempo estimado, é dado o comando de retrip que envia novamente o comando de abertura deste disjuntor. Ao mesmo tempo em que é enviado o comando de retrip, também é ativada a função 50BF, que envia o comando de abertura para o disjuntor a montante do disjuntor que falhou (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

3.15 Proteção térmica (opcional através de RTD'S e Módulo SEL 2600A – 49T

Esta função proporciona a modelagem térmica do equipamento protegido, com capacidade de monitoração e proteção. O elemento térmico executa uma ação de controle e ativa um alarme ou aviso, quando o equipamento estiver com sobreaquecimento, ou quando estiver em perigo devido ao envelhecimento excessivo da isolação ou redução da vida útil (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

Para a aquisição de dados das temperaturas é necessário que esteja ligado em uma das portas seriais do relé SEL-387A um módulo de RTD SEL-2600 (“SEL-2600 RTD Module”). A partir daí é possível estabelecer valores limites para dar alarme quando de níveis elevados de temperatura que sejam inaceitáveis (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2010).

4 MALA DE TESTES SMC MENTOR 12

O SMC Mentor 12 é uma mala de testes trifásica portátil com computador integrado e controle via tela touch screen, desenvolvida para testes de relés de proteção em regime permanente e dinâmico, com simulação de faltas. Com o Mentor 12 é possível testar desde relés eletromecânicos até os modernos relés microprocessados, como é o caso do Relé Diferencial de Corrente SEL-387A (SMC MENTOR 12, 2015).

Figura 18 - Mala de testes SMC Mentor 12.

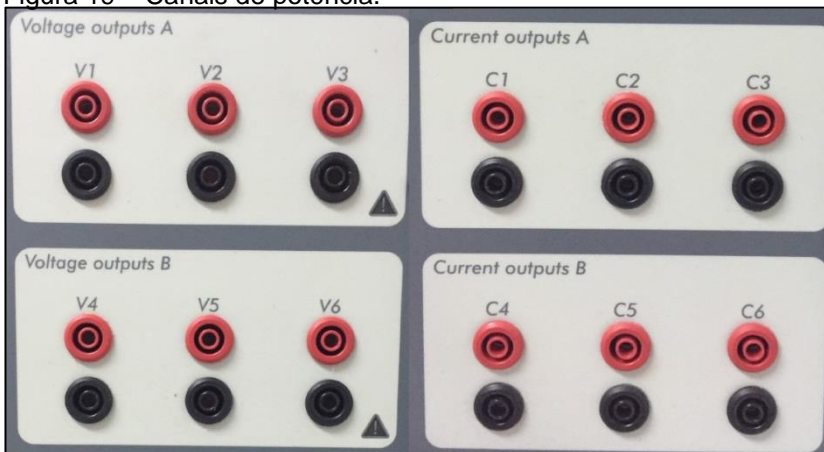


Fonte: SMC Mentor 12 (2015)

4.1 Características

- a) 12 saídas de potência, sendo 6 saídas de tensão e 6 saídas de corrente, com módulos, ângulos de fase e frequência ajustáveis, com potência de 100 VA por canal;

Figura 19 – Canais de potência.



Fonte: Próprio autor (2017).

b) 8 saídas lógicas para simulação de estados do sistema;

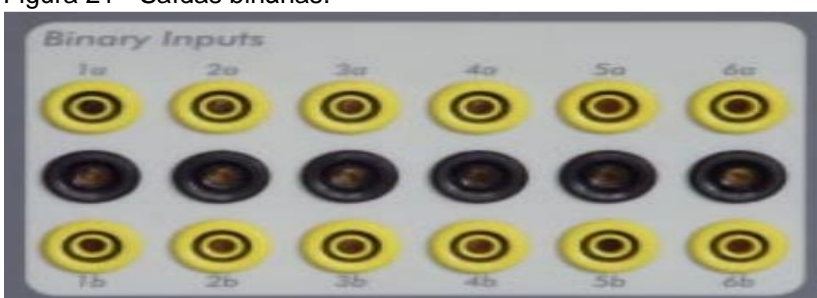
Figura 20 – Saídas binárias.



Fonte: SMC Mentor 12 (2015)

c) 12 entradas lógicas para monitoramento de estados de relés;

Figura 21 - Saídas binárias.



Fonte: SMC Mentor 12 (2015)

d) Simulador de bateria, com saídas de 250 V, com capacidade de 60 W.

Figura 22 - Saída de tensão contínua para simulação de baterias.



Fonte: SMC Mentor 12 (2015)

e) 1 entrada analógica de corrente ou tensão DC

Figura 23 - Entrada para medição de tensão ou corrente.



Fonte: SMC Mentor 12 (2015)

f) Comunicações RS-232, 2 x USB, Ethernet, Paralelo, PS2, VGA.

Figura 24 - Entradas para comunicação ou conexão de acessórios.



Fonte: SMC Mentor 12 (2015)

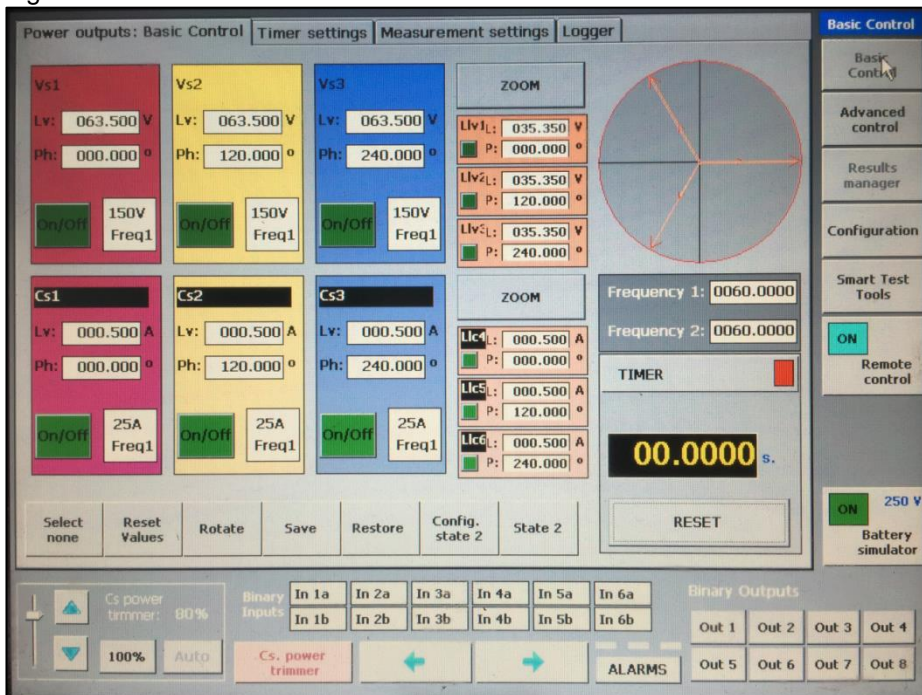
4.2 Funções de teste

4.2.1 Controle básico

No controle básico é possível selecionar e gerar sinal a partir de qualquer

saída do mentor 12 de maneira individual seja uma saída lógica ou de potência. Também é possível monitorar as respostas do relé em teste através das entradas binárias, além de controlar o cronômetro (SMC MENTOR 12, 2015). A figura 25 mostra a tela do controle direto.

Figura 25 – Tela de controle básico.



Fonte: Próprio autor (2017).

Na figura 25 pode-se observar uma coluna à direita composta pelas seguintes opções:

- Controle Básico (Basic Control), discutida no decorrer deste tópico;
- Controle Avançado (Advanced Control) e Gerenciador de Resultados (Results Manager), que serão discutidas no tópico seguinte;
- Configurações (Configuration), que não será abordado neste trabalho, pois se trata de configurações internas da mala de testes;
- Ferramenta de Teste Inteligente (Smart Test Tools), que para sua utilização é necessário aquisição de licença, logo também não será abordado neste trabalho;
- Controle Remoto (Remote Control), que permite que a mala de testes seja manipulada via PC, entretanto, para sua utilização é necessário aquisição do software EuroTEST RTS RELAY TEST AUTOMATION

SYSTEM, portanto também não será abordado neste trabalho.

O nome branco grifado em azul “Basic Control” no topo da coluna indica que a mala de testes está na função Controle Básico.

Abaixo da coluna mencionada pode-se observar o ícone de acionamento do simulador de bateria (Battery Simulator), com apenas um clique em cima desse ícone será gerado um sinal de tensão de 250 V DC para simular um banco de baterias. Para desligar, basta clicar novamente em cima do mesmo ícone (SMC MENTOR 12, 2015).

À esquerda da coluna mencionada anteriormente é possível observar o diagrama de fases composto pelas tensões e correntes de teste configuradas no Mentor 12.

Logo abaixo do diagrama de fases é possível observar os campos de frequência (Frequency 1 e Frequency 2), onde é configurado a frequência dos canais de saída da mala de testes. A mala gera frequência na faixa de 0,1 a 2000 HZ, com incremento mínimo de quatro casas decimais. Para alterar a magnitude da frequência basta clicar em cima do campo em branco e girar o botão de ajuste (SMC MENTOR 12, 2015).

As setas em azul apontando para a esquerda e direita, localizadas na parte inferior da tela servem para selecionar qual casa numérica de determinado ajuste será modificado. Quanto mais pra direita a casa numérica for selecionada, mais fino será o ajuste, quanto mais pra esquerda a casa numérica for selecionada, mais brusco será o ajuste (SMC MENTOR 12, 2015).

Logo abaixo do ajuste de frequência é possível observar o cronômetro (TIMER), que tem condições de partida e parada configuráveis, por exemplo, pode-se escolher como parâmetro de partida na contagem o sinal de uma entrada ou saída binária, ou mesmo a partida numa saída de potência, e escolher como parâmetro da parada da contagem o sinal de entrada ou saída binária (SMC MENTOR 12, 2015).

Logo abaixo do cronômetro é possível avistar o controle das saídas binárias (Binary Outputs), para acionar uma saída binária basta clicar em cima da saída desejada, para parar o sinal basta clicar novamente nesta saída (SMC MENTOR 12, 2015).

À esquerda das saídas binárias, têm-se as entradas binárias (Binary Inputs). Quando alguma dessas entradas recebe um sinal binário do relé que esta sendo submetido a testes, elas indicam a presença do sinal se iluminando na cor amarela (SMC MENTOR 12, 2015).

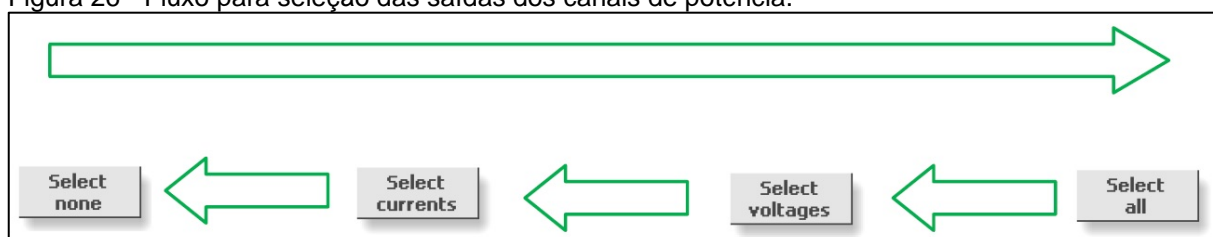
À esquerda das entradas binárias tem-se o controlador de potência da caixa de testes (Cs. power trimmer), onde faz-se o ajuste de potência, limitando a potência gerada pela mala de testes em percentual da sua potência nominal.

Na parte central da tela pode-se observar os canais de tensão (Vs1, Vs2, Vs3, Llv1, Llv2, Llv3) e corrente (Cs1, Cs2, Cs3, Llc4, Llc5, Llc6), cada canal pode ter seu módulo, fase e frequência ajustado individualmente, basta clicar no campo em branco e girar o botão de ajuste, para ligar e desligar o canal, basta clicar no Botão on/off. Quanto a frequência, pode-se alterar entre as frequências 1 ou 2, ou mesmo escolher o modo DC, clicando no campo da frequência. É importante ressaltar que todas essas grandezas mencionadas podem ser alteradas mesmo quando a saída já estiver ligada (SMC MENTOR 12, 2015).

Como já foi dito anteriormente, a mala de testes tem duas saídas trifásicas de tensão e duas saídas trifásicas de corrente, para alternar entre as configurações dessas saídas, basta clicar em “ZOOM”.

O fato dos canais de corrente estarem com a tarja preta, indica que todos os canais de corrente estão selecionados, desta forma, qualquer alteração que feita em um canal de corrente será replicado para os demais. Caso seja necessário alterar apenas os parâmetros de cada canal corrente por vez, basta clicar em “Select none”. Este ícone gera um ciclo como mostrado na figura 26, permitindo selecionar tensão e corrente em “Select all”, só tensão em “Select voltages”, só corrente em “Select currents”, ou cada saída individualmente em “Select none” (SMC MENTOR 12, 2015).

Figura 26 - Fluxo para seleção das saídas dos canais de potência.



Fonte: SMC Mentor 12 (2015)

Ao lado de “Select none” pode-se observar o ícone “Reset Values” que serve para restaurar os ajustes de tensão e corrente programados de fábrica. À direita de “Reset Values” tem-se o ícone “Rotate”, que serve para “girar” os ângulos de fase das tensões e corrente. “Save” e “Restore” servem, respectivamente salvar os ajustes configurados e reestabelecer um ajuste salvo (SMC MENTOR 12, 2015).

“Config. state 2” serve para configurar um segundo ajuste, independente do ajustado anteriormente, enquanto “State 2” serve para reestabelecer os ajustes configurados em “Config. state 2”. É importante ressaltar que esta pode ser uma ferramenta para simular faltas, por exemplo, se é acionada a saída do estado 1 configurado como uma condição normal de operação e em seguida acionado o estado 2 (clicando em “State 2”) configurado como uma condição de falta, então será possível observar a resposta do relé a essa condição de falta através das entradas binárias (SMC MENTOR 12, 2015).

Por fim, o ícone “ALARMS” localizado à esquerda das saídas binárias indica quando houver algum erro na execução de alguma simulação, como por exemplo, quando conectado uma impedância muito baixa na saída de tensão ou houver uma impedância muito elevada conectada na saída de corrente. Clicando em “ALARMS” é possível verificar com mais detalhes qual o erro cometido (SMC MENTOR 12, 2015).

4.2.2 Controle avançado

O controle avançado é contemplado com as seguintes funções de simulação de faltas: “Fault”, “RAMP”, “Pulse Ramp”, “Binary Search”, “State sequencer”, “Fault playback”. Estas funções são um excelente recurso quando é necessário testar a resposta de um relé ou qualquer outro dispositivo de medida diante de uma variação programada de um ou mais parâmetros elétricos (tensão, frequência e corrente) ou de um ou mais estados binários (SMC MENTOR 12, 2015).

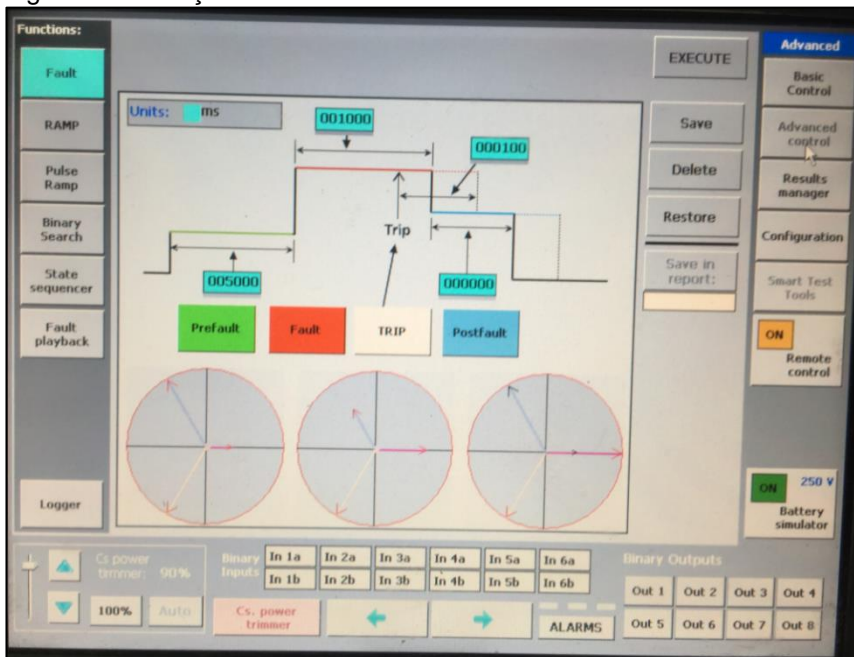
As funções de prova consistem, em geral, em definir os ajustes de tensão, corrente, frequência e saídas binárias para cada etapa do teste (pré-falta, falta e pós-falta), além de definir o tempo de duração de cada etapa. Também se devem habilitar quais entradas binárias deverão receber alguma resposta do relé (SMC MENTOR 12, 2015).

4.2.2.1 FAULT

A função Fault consiste em definir os parâmetros de corrente, tensão e frequência e ângulo de fase de maneira independente para cada etapa do teste (pré-falta, falta, pós-falta) (SMC MENTOR 12, 2015).

A figura 27 mostra a tela função “Fault” do controle avançado.

Figura 27 – Função Fault.



Fonte: Próprio autor (2017).

Clicando em cada um dos ícones, verde, vermelho e azul, aparecerá uma tela similar a tela do controle básico, para que sejam inseridas as configurações de cada etapa do teste. O ícone branco (“TRIP”) serve para habilitar as entradas binárias que deverão receber alguma resposta do relé (SMC MENTOR 12, 2015).

Os campos em azul definem o tempo de duração em milissegundos de cada etapa do teste e o tempo de leitura do “TRIP”, ou seja, o tempo de monitoração das entradas binárias da mala para percepção dos sinais enviados pelo relé testado. Clicando em “EXECUTE” será iniciada a simulação de faltas (SMC MENTOR 12, 2015).

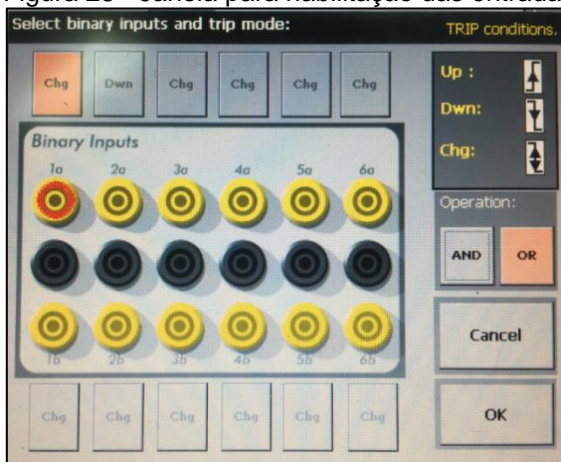
Os ícones “Save”, “Delete” e “Restore” servem, respectivamente, para salvar na memória interna da mala de testes as configurações ajustas para que posteriormente seja possível restabelece-la, deletar alguma configuração salva, e

restabelecer alguma configuração salva. Estas opções estão presentes em todas as funções de teste (SMC MENTOR 12, 2015).

O “Results Manager” tem a função de salvar as informações da simulação em uma memória USB, para que seja gerado um relatório do teste realizado. Essas informações serão salvas em arquivos com extensão “xml”. Para gerar o relatório em formatos como Excel, Arquivo de Texto, PDF e assim por diante, é necessário instalar o software Mentor Report Viewer no computador que irá gerar o relatório de ensaio. Esta também é uma ferramenta presente nas outras funções de simulação de faltas (SMC MENTOR 12, 2015).

A figura 28 mostra tela para habilitação das entradas binárias, onde se deve habilitar a entrada binária desejada e indicar se mala deve perceber a chegada de um sinal, perda de um sinal, ou mesmo a simples mudança de estado. Na figura 28 o destaque vermelho na entrada “1a” indica que esta entrada está habilitada, e o ícone “Chg” indica que a mala de testes deve perceber a qualquer mudança.

Figura 28 - Janela para habilitação das entradas binárias.

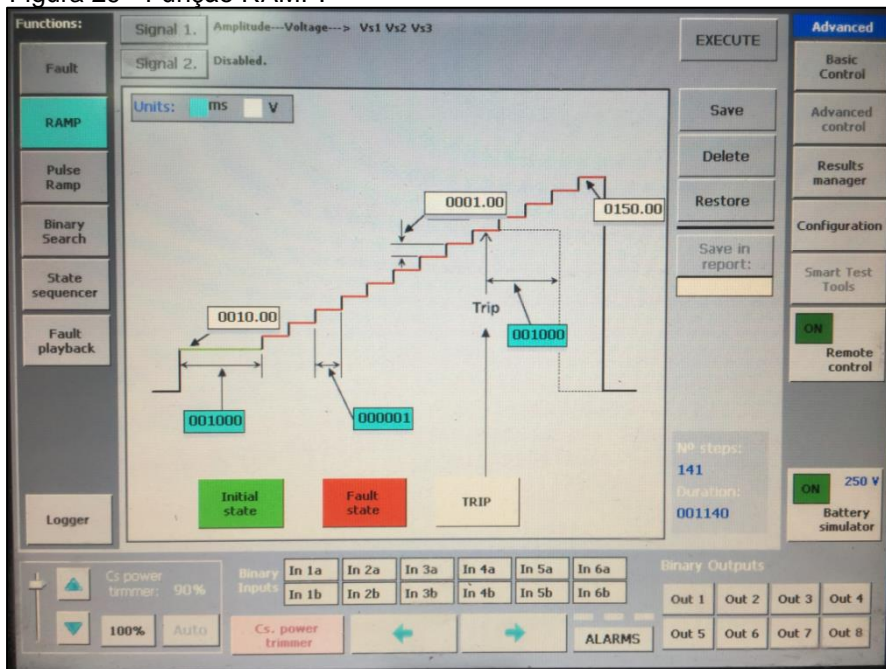


Fonte: Próprio autor (2017).

4.2.2.2 RAMP

A figura 29 mostra a tela de configuração para a função RAMP.

Figura 29 - Função RAMP.



Fonte: Próprio autor (2017).

A função RAMP consiste basicamente em definir um estado inicial de tensão, corrente e seus respectivos ângulos de fase e frequência, e então, fornecer um incremento para o parâmetro que se deseja modificar no teste (tensão ou corrente ou frequência ou ângulo de fase), e, por fim, definir o valor final do parâmetro que se está modificando no teste (SMC MENTOR 12, 2015).

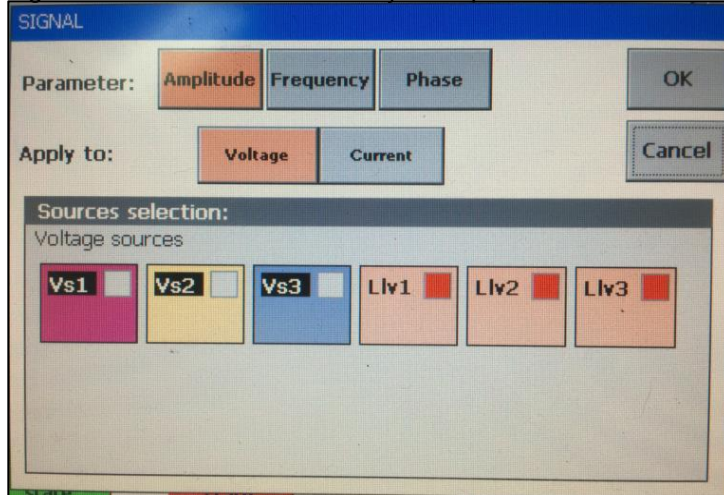
Clicando em “Initial state”, abrirá uma tela similar a tela do controle básico, onde serão inseridos todos os parâmetros do estado inicial. Os campos em azul (da esquerda para a direita) definem, respectivamente, ao tempo de duração do estado inicial, tempo de duração de um degrau da rampa e o tempo de duração da leitura de trip. Os campos em branco (da esquerda para a direita) definem, respectivamente o valor inicial do parâmetro que será modificado no teste (pode ser ajustado através de “Initial state”), o incremento do parâmetro que será modificado no teste e o valor final deste parâmetro (SMC MENTOR 12, 2015).

Clicando em “Fault State” serão definidos quais saídas binárias deverão atuar no momento em que se inicia a rampa. O ícone “TRIP” é empregado da mesma maneira que na função anterior (SMC MENTOR 12, 2015).

Vale ressaltar que a rampa só incrementa um dos parâmetros elétricos (tensão, corrente, frequência e ângulo de fase). Para escolher o parâmetro que se deseja variar é necessário clicar em “Signal 1.”, localizado no canto superior

esquerdo da tela, e então aparecerá a janela mostrada na figura 30.

Figura 30 - Janela de determinação do parâmetro modificado.



Fonte: Próprio autor (2017).

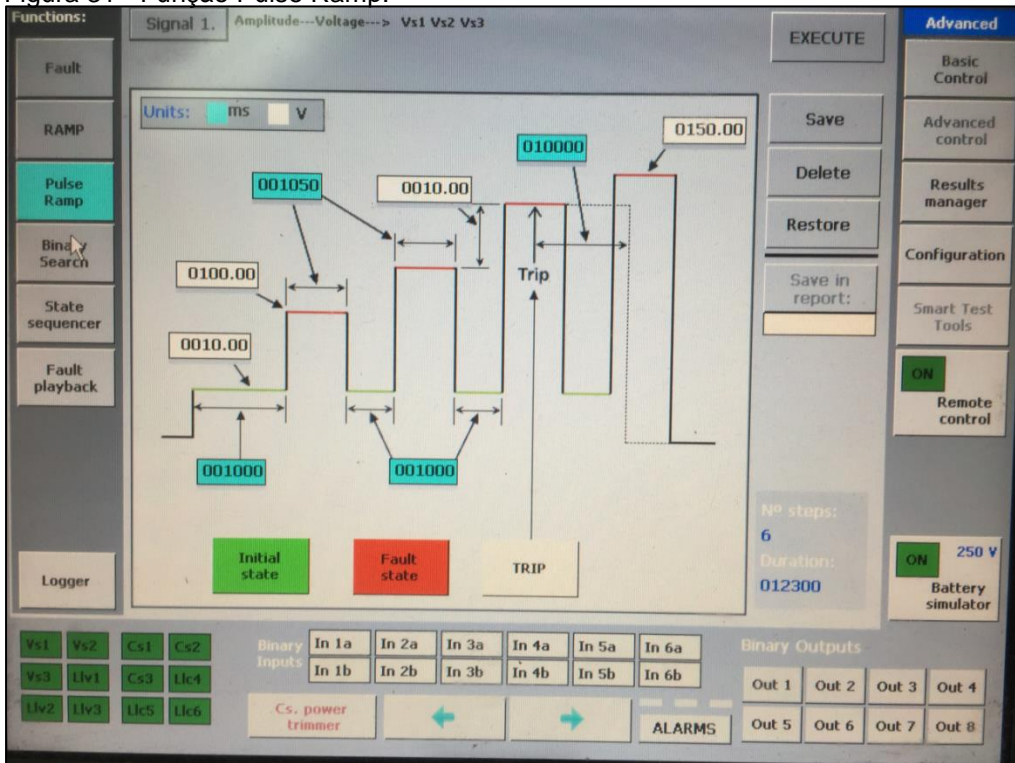
Caso seja necessário variar dois parâmetros simultaneamente, é possível habilitar uma segunda rampa em “Signal 2.”. A configuração da segunda rampa se dá da mesma maneira que da rampa 1 (SMC MENTOR 12, 2015).

Vale ressaltar que é possível realizar este ensaio com uma rampa decrescente, bastando apenas ajustar um valor inicial maior que o valor final do parâmetro que será modificado, além de inserir um incremento negativo (SMC MENTOR 12, 2015).

4.2.2.3 PULSE RAMP

O “Pulse Ramp” tem a forma de funcionamento muito parecida com a função “RAMP”, diferindo apenas por dois motivos, o primeiro motivo se dá pelo fato de que entre cada degrau de falta é inserido o valor do estado inicial “Initial state”. O segundo motivo se dá pelo fato de que o valor do primeiro degrau (neste caso ajustado em “Fault state”) independe do valor do estado inicial, e os valores dos demais degraus são incrementados a partir do valor do primeiro degrau (SMC MENTOR 12, 2015). A figura 31 mostra a janela da função “Pulse Ramp”.

Figura 31 - Função Pulse Ramp.

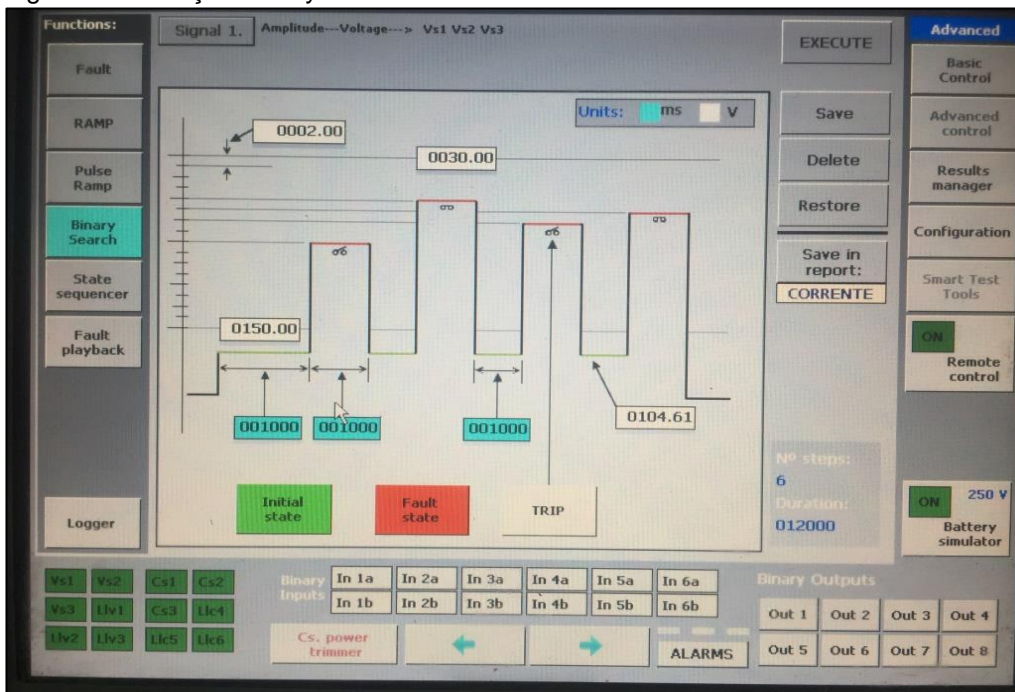


Fonte: Próprio autor (2017).

4.2.2.4 Binary Search

A figura 32 mostra a tela de configuração para a função Binary Search

Figura 32 – Função Binary Search.



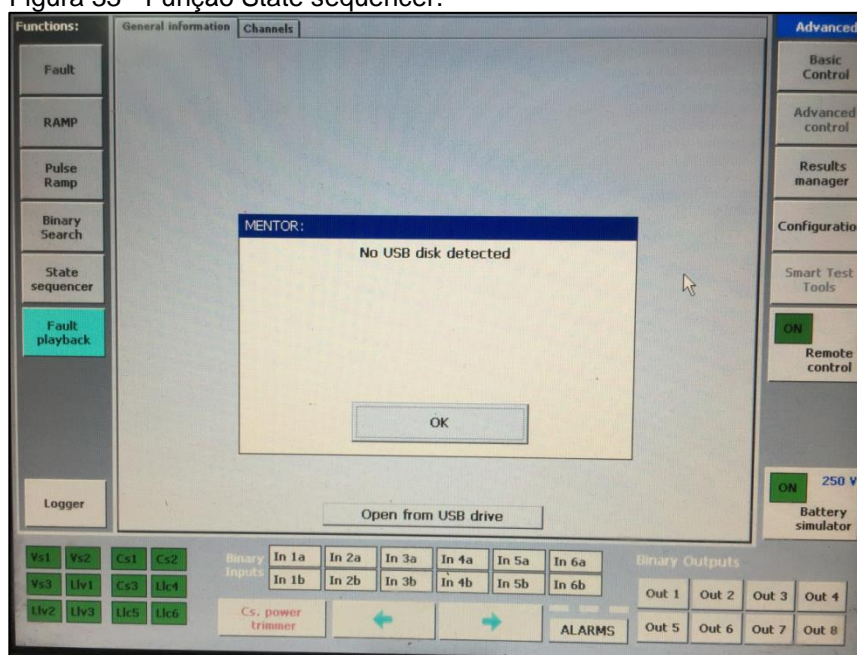
Fonte: Próprio autor (2017).

A função gera uma sequência de impulsos de tensão, intensidade, ângulo ou de frequência entre limites inferiores e superiores determinadas pelo operador. Uma vez detectado dois tiros, a mala determina os valores dos novos limites e o processo é repetido até que a faixa limite determinada pelo operador seja atingida. A programação desta função é simular a programação da função Pulse Ramp.

4.2.2.5 State Sequencer

A função “State sequencer” permite criar uma lista de estados para serem executados sequencialmente. Cada estado carrega todos os parâmetros de um sistema (tensão, corrente, frequência, etc.), e pode ser configurado de maneira independente uns dos outros. É possível criar quantos estados forem necessários para realizar um determinado teste (SMC MENTOR 12, 2015). A figura 33 mostra a janela da função “State sequencer”.

Figura 33 - Função State sequencer.



Fonte: Próprio autor (2017).

Nesta tela, a primeira, segunda, quinta e sexta setas apontando, respectivamente, para baixo, esquerda, direita e para cima servem de para navegação entre os estados da lista.

A terceira e quarta seta apontando para cima, servem para inserir novos estados. Tomando como exemplo a figura 34, seria inserido um novo estado entre

os estados 1 e 2 clicando na terceira seta, de maneira análoga seria inserido um novo estado entre os estados 2 e 3 clicando na quarta seta.

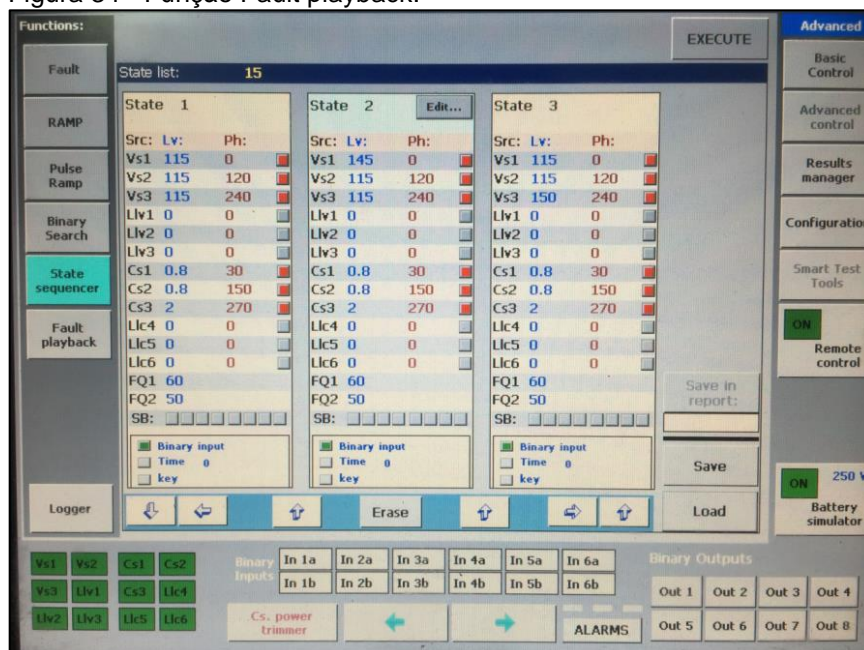
O ícone “ERASE” serve para apagar o estado que está imediatamente em cima deste ícone.

O ícone “Edit...”, sempre aparece sempre para o estado que está centralizado na tela. Clicando em “Edit...” aparecerá uma tela similar a tela de controle básico, onde é possível definir todos os ajustes para o estado selecionado.

4.2.2.6 Fault Playback

A função “Fault playback” serve para restabelecer as configurações de uma falta a partir de um dispositivo USB (SMC MENTOR 12, 2015). A figura 34 mostra a já janela da função “Fault playback”.

Figura 34 - Função Fault playback.



Fonte: Próprio autor (2017).

Para restabelecer as configurações de uma falta a partir de um dispositivo USB basta clicar em “Open from USB drive”. Caso não tenha nenhum dispositivo USB conectado a mala de testes aparecerá a mensagem “No USB disk detected”.

5 ENSAIOS E TESTES EM BANCADA

Foram realizados os ensaios com as funções de proteção diferencial de corrente de fase (87) e sobrecorrente temporizada de fase (51) contempladas no relé diferencial de corrente SEL-387A.

Os testes buscam concatenar a teoria das funções de proteção às funcionalidades oferecidas pelo relé de proteção diferencial de corrente SEL-387A e as funcionalidades oferecidas pela mala de testes SMC Mentor 12.

5.1 Equipamentos utilizados

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Relé de proteção diferencial de corrente SEL-387A;
- b) Mala de testes SMC Mentor 12;
- c) Notebook DELL Inspiron 15;
- d) Cabo de comunicação SEL-C662;
- e) Cabos de alimentação tipo banana com espera.

5.2 Esquemas de ligação

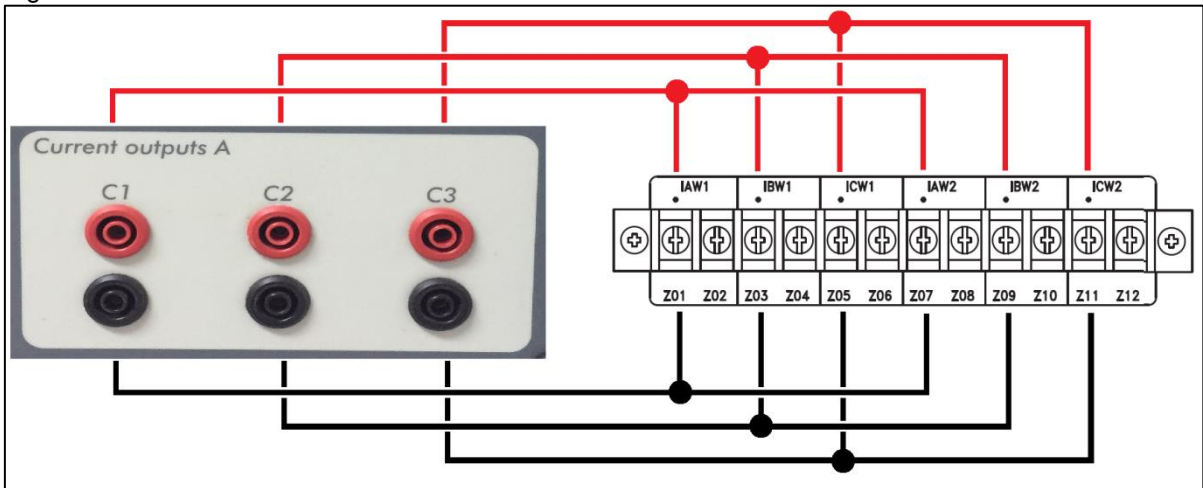
5.2.1 Alimentação elétrica dos equipamentos

Tanto o relé SEL-387A, quando a mala de testes SMC Mentor 12 foram alimentados pela rede elétrica local em 220 Vca através dos seus próprios cabos de força.

5.2.2 Conexão dos canais de corrente

A conexão entre os canais de corrente da mala de testes e do relé de proteção se deu da forma como ilustrado na figura 35.

Figura 35 – Conexão entre os canais de corrente da mala de testes e do relé diferencial.



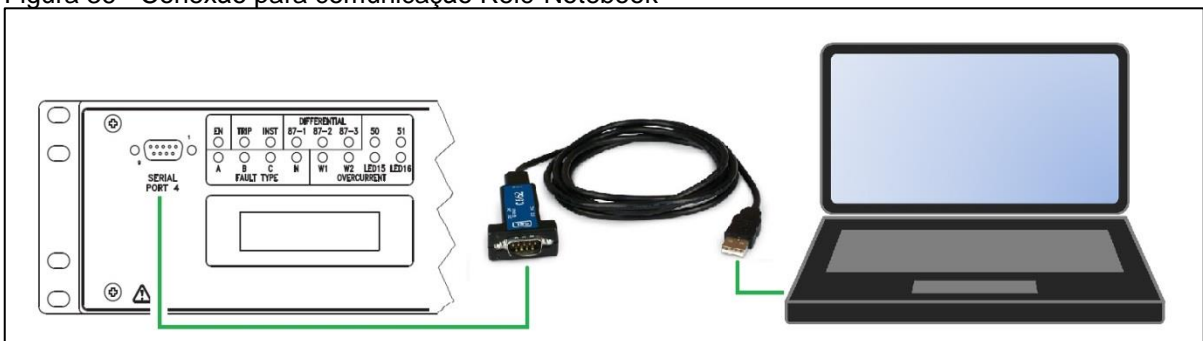
Fonte: Próprio autor (2017).

Foi utilizado um circuito divisor de corrente para alimentar as entradas primárias e secundárias do relé SEL-378A apenas com a saída de corrente A (Currente outputs A) da mala de testes. Os cabos utilizados para essa ligação foram do tipo banana com espera, o que permitiu estabelecer um arranjo de circuito divisor de corrente.

5.2.3 Conexão de comunicação

Para estabelecer a comunicação entre o relé e o notebook foi utilizado o cabo SEL-C662, que converte a entrada serial em USB. A conexão se deu da forma como ilustrado na figura 36, onde a ponta serial do cabo foi conectada na porta frontal do relé (serial port 4) e a ponta USB do cabo foi conectada ao notebook.

Figura 36 - Conexão para comunicação Relé-Notebook



Fonte: Próprio autor (2017).

5.3 Ensaios

Os ensaios foram realizados com as funções de proteção Diferencial de Tensão de Fase (87) e Sobrecorrente Temporizada de Fase (51), que são as principais funções de proteção do relé SEL-387A.

5.3.1 Ensaio da função diferencial (87)

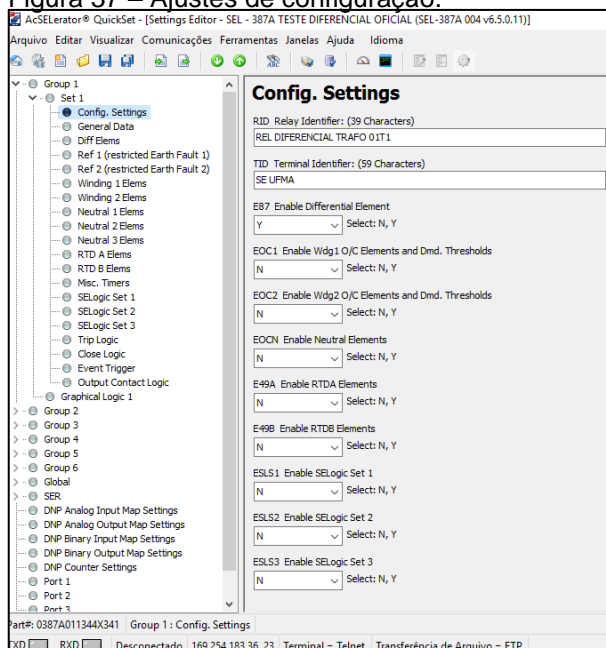
Para melhor ilustrar a aplicação desta função, decidiu-se realizar os ensaios baseados na proteção de um Transformador Y-Y, com tensões nominais 138/13,8 kV e potência 40 MVA.

5.3.1.1 Parametrização do relé

A figura 37 mostra a primeira etapa para a parametrização do relé SEL-387A (Config. Settings), onde são definidas as funções de proteção que estarão habilitadas.

Neste caso, o “Y” em “E87 Enable Differential Element” indica que a função diferencial está habilitada, e o “N” nas demais funções indica que as mesmas estão desabilitadas.

Figura 37 – Ajustes de configuração.



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 38 mostra a segunda etapa para parametrização do relé SEL-387A (General Data), onde são inseridas as informações gerais do sistema protegido.

Figura 38 - Informações gerais.

The screenshot shows the 'General Data' configuration window in the AcSElerator QuickSet software. The window title is 'AcSElerator® QuickSet - [Settings Editor - SEL - 387A TESTE DIFERENCIAL OFICIAL (SEL-387A 004 v6.5.0.11)]'. The left sidebar shows a tree view with 'Set 1' expanded, and 'General Data' selected. The main area contains the following configuration options:

Parameter	Value	Range/Options
W1CT Wdg 1 CT Connection	Y	Select: D, Y
W2CT Wdg 2 CT Connection	Y	Select: D, Y
MVA Maximum Power Xfmr Capacity	40,0	OFF, 0.2-5000.0 MVA
ICOM Define Internal CT Connection Compensation	N	Select: N, Y
W1CTC Wdg 1 CT Conn. Compensation	11	Select: 0-12
W2CTC Wdg 2 CT Conn. Compensation	11	Select: 0-12
CTR1 Wdg 1 CT Ratio	40	1-50000
CTR2 Wdg 2 CT Ratio	200	1-50000
CTRN1 Neutral 1 CT Ratio	120	1-50000
CTRN2 Neutral 2 CT Ratio	240	1-50000
CTRN3 Neutral 3 CT Ratio	240	1-50000
VWDG1 Wdg 1 Line-to-Line Voltage	138,00	1.00-1000.00 kV
VWDG2 Wdg 2 Line-to-Line Voltage	13,80	1.00-1000.00 kV

Fonte: Próprio autor (2017).

Neste caso “W1CT” e “W2CT” definidos como “Y” indicam que os TC’s utilizados tanto no primário quanto no secundário do transformador estão arranjados em Y.

As tensões do enrolamento primário e secundário do transformador são inseridas em “VWDG1” e “VWDG2”, neste caso definidas como 138 e 13,8 kV, enquanto a potência do transformador é inserida em “MVA” e foi ajustada em 40 MVA.

Em “ICOM” é definido se há necessidade de compensação angular, por conta da configuração dos enrolamentos do transformador. Caso haja necessidade esse capo deve ser preenchido com “Y”, e em seguida informar quais das 12 matrizes de compensação serão utilizadas no enrolamento primário (W1CTC) e

secundário (W2CTC).

Em seguida é possível inserir a relação de transformação dos TC's utilizados no lado de alta tensão (CTR1) e no lado de baixa tensão (CTR2).

O valor de CTR1 foi definido a partir do valor da corrente nominal do sistema visto pelo do lado de alta tensão. O valor da corrente nominal do lado de alta tensão foi obtido a partir da seguinte equação:

$$I_{n_{AT}} = \frac{S_{\text{TRAFO}}}{\sqrt{3} * V_{AT}} = \frac{40 * 10^6}{\sqrt{3} * 138 * 10^3} = 167,35 \text{ A}$$

Onde,

- a) $I_{n(AT)}$ = Corrente nominal do lado de alta tensão;
- b) STRAFO = Potência nominal do transformador;
- c) VAT = Tensão nominal do lado de alta tensão.

Sendo 167,35 A a corrente nominal do lado de alta tensão, coube utilizar um TC com relação de transformação $200/5 = 40/1$, logo o ajuste definido para CTR1 foi 40 A.

Conforme explanado no capítulo 3, a correta determinação da relação de transformação dos TC's instalados no lado de baixa tensão deve ser obtida multiplicando o valor do tap do transformador pela relação de transformação dos TC's escolhidos para o lado de alta tensão, desta forma, a correta relação de transformação dos TC's do lado de baixa é 400 A, tendo em vista que:

$$\frac{138 \text{ kV}}{13,8 \text{ kV}} * 40 = 400 \text{ A}$$

Entretanto a escolha correta da relação de transformação dos TC's do lado de baixa tensão não proporcionaria o surgimento de uma corrente diferencial, já que foi aproveitada a mesma fonte de corrente para alimentação das entradas primárias e secundárias do relé, tornando inviável o teste da função diferencial.

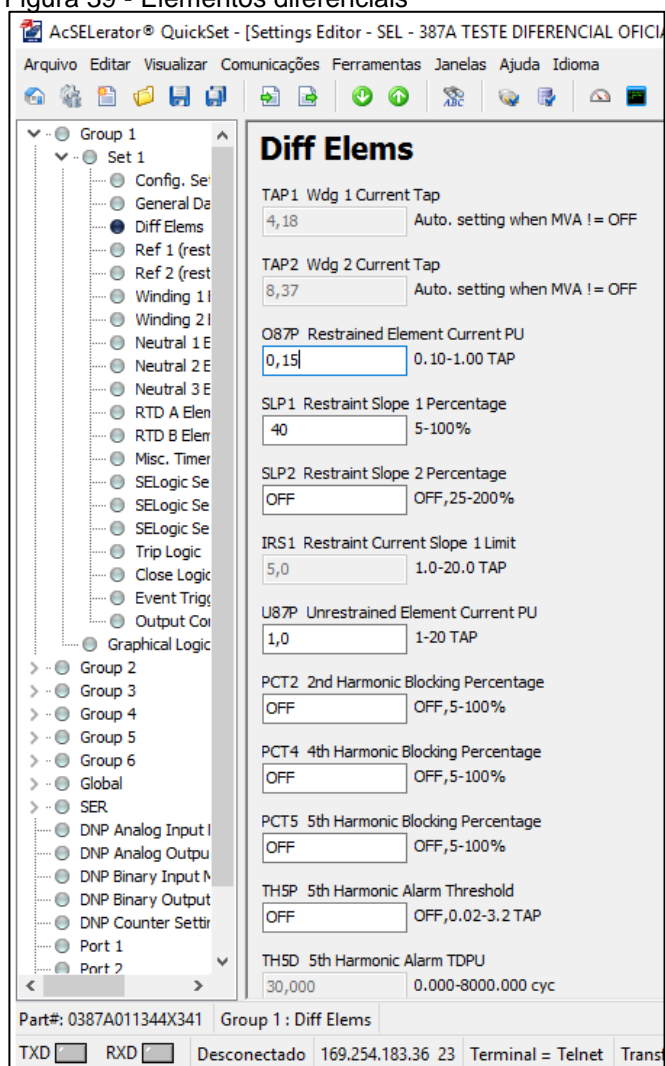
Para contornar este problema, foi inserido um valor arbitrário de 200 A para a relação de transformação do TC's utilizados no lado de baixa tensão. O que

proporciona o surgimento de corrente diferencial, tornando viável o teste da função diferencial do relé.

Os demais campos de ajuste apresentados na figura 39 referem-se às relações de transformação dos TC's utilizados em condutores de neutro, como as funções de proteção referentes a esses condutores estão desativadas, os valores inseridos nesses campos exercerão influência sobre os testes.

A figura 39 mostra a terceira etapa para parametrização do relé SEL-387A (Diff Elems), onde são inseridos os ajustes relacionados à proteção diferencial.

Figura 39 - Elementos diferenciais



Fonte: Próprio autor (2017).

Os campos "TAP1" e "TAP2" referem-se às correntes base vistas pelo enrolamento secundário dos TC's. Essas correntes foram calculadas automaticamente, já que foi fornecido o valor da potência máxima do equipamento

protegido, conforme explanado no capítulo 3. O calculo dessa corrente serve para que o relé trabalhe internamente com valores por unidade (pu). Para chegar a estes valores, basta dividir o valor da corrente nominal do enrolamento pelo valor de relação de tensão do TC utilizado, por exemplo:

$$\frac{167,35}{40} = 4,18$$

O ajuste “O87” define o valor da corrente diferencial para que o relé atue pela função diferencial, este ajuste é definido em múltiplos da menor entre as correntes base calculadas. Neste caso, o ajuste 0,15 indica que se a corrente diferencial atingir 15% ou mais do valor da corrente base (4,18 A) o relé deverá atuar pela função diferencial.

O ajuste “SLP1” refere-se a primeira rampa mencionada no capítulo 3. Neste caso o ajuste 40 indica que se a corrente diferencial atingir 40% ou mais do valor da corrente de entrada do sistema o relé deverá atuar pela função diferencial.

O campo “SLP2” refere-se ao valor percentual no qual o relé deve atuar em substituição do valor de “SLP1” a partir de um específico valor de corrente de entrada, conforme explanado no capítulo 3.

O ajuste “OFF” em “SLP2” indica que esta função está desabilitada, e, portanto, que o relé só tem como parâmetro o valor de “SLP1”. Desta forma, também não é necessário inserir um valor “IRS1”, tendo em vista que este parâmetro indica a partir de qual valor de corrente de entrada a rampa “SLP2” começa a atuar em substituição a “SLP1”.

“U87P” é o campo no qual é inserido o valor de corrente diferencial sem restrição, ou seja, o valor para o qual o relé deve atuar em qualquer circunstância. Assim como o ajuste “O87”, este ajuste é definido em múltiplos da menor entre as correntes base calculadas. Neste caso, o ajuste a indica que se a corrente diferencial atingir 100% ou mais do valor da corrente base (4,18 A) o relé deverá atuar pela função diferencial sem restrição, conforme explanado no capítulo 3.

Os demais campos referem-se ao bloqueio da função diferencial pela ocorrência de componentes harmônicos na onda fundamental da corrente. Como a mala de teste não gera componentes harmônicas, estas função foram desabilitadas.

5.3.1.2 Resultados esperados

A partir dos parâmetros ajustados, é possível estabelecer um padrão de atuação do relé, tendo em vista que o único fator que provoca o surgimento de uma corrente diferencial é o ajuste de 200 A para a relação de transformação dos TC's do lado secundário do transformador.

A tabela 3 mostra o mapeamento da atuação do relé, dados os valores das correntes de entrada e os ajustes parametrizados, onde a coluna:

- a) **I** – Aponta o módulo da corrente gerada pela mala de testes;
- b) **W1 e W2** – Apontam respectivamente as correntes injetadas nas entradas primárias e secundárias do relé (simulando a corrente de obtida a partir dos TC's);
- c) **W1r e W2r** – Apontam as correntes W1 e W2 em valores reais. W1r e W2r são obtidas multiplicando os valores de W1 e W2 pela relação de transformação dos TC's aos quais estão ligados;
- d) **DIF** – Aponta os valores das correntes diferenciais referidos ao lado de alta tensão do transformador, sendo obtidas pela subtração simples entre W1r e W2r, quando W2r está referido ao lado de alta tensão;
- e) **IOP** – Aponta o valor de atuação da corrente diferencial ajustada no relé ($0,15 \cdot 40 = 6$ A), onde 40 é a relação de transformação do TC's do lado de alta tensão;
- f) **RAMPA** – Aponta o valor de atuação da corrente diferencial em percentual da corrente de entrada, conforme ajuste de parâmetros (40% da corrente de entrada);
- g) **IOPU** – Aponta o valor da corrente de operação sem restrição, conforme ajuste de parâmetros ($1 \cdot 40 = 40$ A).

Tabela 3 – Atuação do relé.

I	W1	W2	W1r	W2r	DIF	IOP	RAMPA	IOPU
0,1	0,05	0,05	2,000	10,000	1,000	6,0	0,80	40,00
0,2	0,1	0,1	4,000	20,000	2,000	6,0	1,60	40,00
0,3	0,15	0,15	6,000	30,000	3,000	6,0	2,40	40,00
0,4	0,2	0,2	8,000	40,000	4,000	6,0	3,20	40,00
0,5	0,25	0,25	10,000	50,000	5,000	6,0	4,00	40,00
0,6	0,3	0,3	12,000	60,000	6,000	6,0	4,80	40,00
0,7	0,35	0,35	14,000	70,000	7,000	6,0	5,60	40,00
0,8	0,4	0,4	16,000	80,000	8,000	6,0	6,40	40,00
0,9	0,45	0,45	18,000	90,000	9,000	6,0	7,20	40,00
1	0,5	0,5	20,000	100,000	10,000	6,0	8,00	40,00
1,1	0,55	0,55	22,000	110,000	11,000	6,0	8,80	40,00
1,2	0,6	0,6	24,000	120,000	12,000	6,0	9,60	40,00
1,3	0,65	0,65	26,000	130,000	13,000	6,0	10,40	40,00
1,4	0,7	0,7	28,000	140,000	14,000	6,0	11,20	40,00
1,5	0,75	0,75	30,000	150,000	15,000	6,0	12,00	40,00
1,6	0,8	0,8	32,000	160,000	16,000	6,0	12,80	40,00
1,7	0,85	0,85	34,000	170,000	17,000	6,0	13,60	40,00
1,8	0,9	0,9	36,000	180,000	18,000	6,0	14,40	40,00
1,9	0,95	0,95	38,000	190,000	19,000	6,0	15,20	40,00
2	1	1	40,000	200,000	20,000	6,0	16,00	40,00
3	1,5	1,5	60,000	300,000	30,000	6,0	24,00	40,00
4	2	2	80,000	400,000	40,000	6,0	32,00	40,00

Fonte: Próprio autor (2017).

As células pintadas em vermelho indicam o ponto no qual o relé deve atuar pela função diferencial.

Nota-se facilmente que a partir do momento que a mala de testes gerar correntes com módulos maior ou igual a 0,7 A, o valor da corrente diferencial será maior que o valor da corrente de proteção parametrizada no relé, e, por tanto, espera-se que o relé atue pela função diferencial de forma instantânea, já que para esta função de proteção não há elementos de temporização.

De uma forma mais detalhada pode-se escrever que para:

- a) $I < 0,7$, a função diferencial não deverá atuar, já que a corrente a corrente diferencial neste intervalo não ultrapassa os parâmetros estabelecidos;
- b) $0,7 \leq I < 0,8$, A função diferencial deve atuar pelo ajuste da corrente diferencial (IOP), já que neste intervalo a corrente diferencial ultrapassa

os parâmetros estabelecidos e $IOP > RAMPA$;

- c) $0,8 \leq I$, A função diferencial deve atuar pelo ajuste da RAMPA, já que neste intervalo a corrente diferencial ultrapassa os parâmetros estabelecidos e $RAMPA > IOP$;
- d) $4 < I$, A função diferencial também será afirmada pela corrente diferencial sem restrição, já que a partir desse valor, a corrente diferencial ultrapassará o valor de 40 A.

5.3.1.3 Resultados obtidos

5.3.1.3.1 Ensaio com corrente diferencial na fase “B”

Para a realização deste ensaio foi utilizada a função Fault do Controle Avançado da mala de testes SMC Mentor 12.

Os ajustes de pré-falta, falta e pós-falta se deram como mostrado na tabela 4.

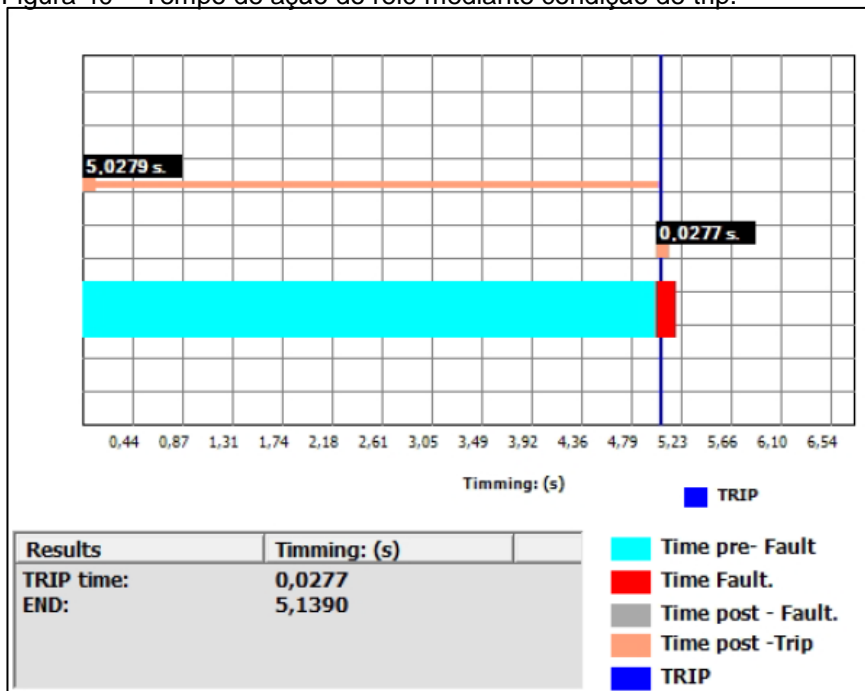
Tabela 4 – Ajustes para o teste de corrente diferencial na fase “B”.

PRÉ-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
Ia	0,4	0	60	5 segundos
Ib	0,4	120	60	
Ic	0,4	240	60	
FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
Ia	0,4	0	60	1 segundos
Ib	0,9	120	60	
Ic	0,4	240	60	
PÓS-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
Ia	0	0	60	0 segundos
Ib	0	120	60	
Ic	0	240	60	

Fonte: Próprio autor (2017).

O resultado obtido está apresentado na figura 40, extraída do relatório elaborado pela mala de testes SMC Mentor 12 para este ensaio.

Figura 40 – Tempo de ação do relé mediante condição de trip.

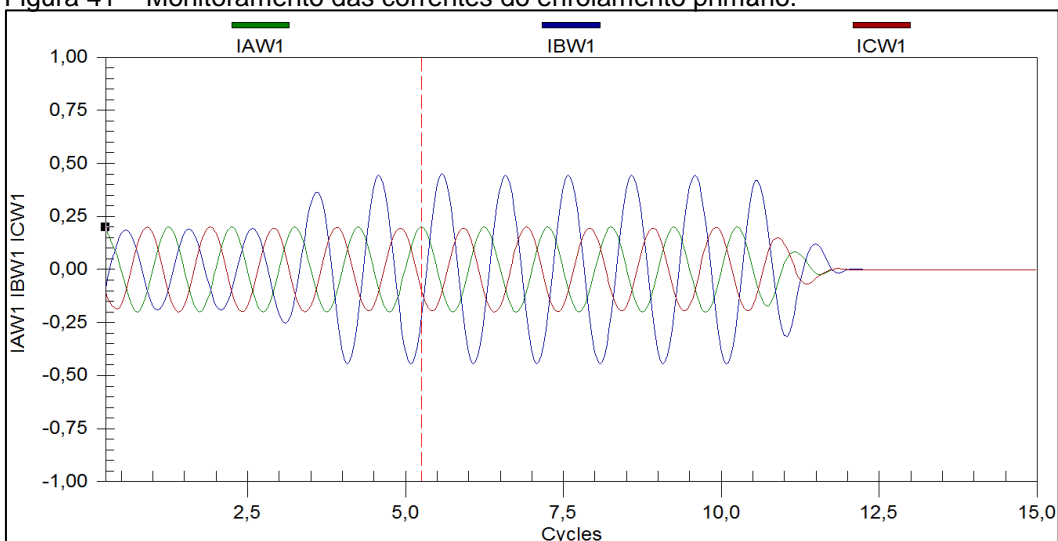


Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 40 mostra que o relé respondeu a condição de falta por corrente diferencial estabelecida pela mala de testes, conforme esperado, em um tempo de 0,0277s.

A figura 41 mostra o gráfico de monitoramento das correntes extraído do relé. É possível notar claramente o aumento na amplitude da corrente da fase B. A linha vermelha tracejada aponta o momento de trip do relé, em concordância com as informações já fornecidas pela mala de testes.

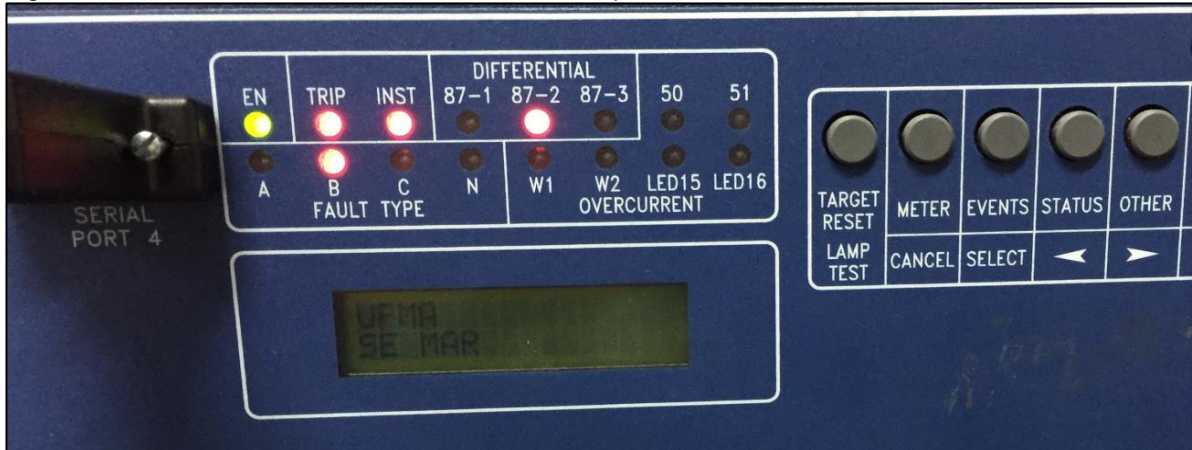
Figura 41 – Monitoramento das correntes do enrolamento primário.



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 42 mostra o painel frontal do relé SEL-387A no momento de trip, os LED's indicam que houve falta por corrente diferencial de característica instantânea ocorrida na fase B, conforme o esperado.

Figura 42 – Painel frontal do relé no momento de trip.



Fonte: Próprio autor (2017).

5.3.1.3.2 Ensaio com corrente diferencial nas fases "A" E "C"

Para a realização deste ensaio foi utilizada a função Fault do Controle Avançado da mala de testes SMC Mentor 12.

Os ajustes de pré-falta, falta e pós-falta se deram como mostrado na tabela 5.

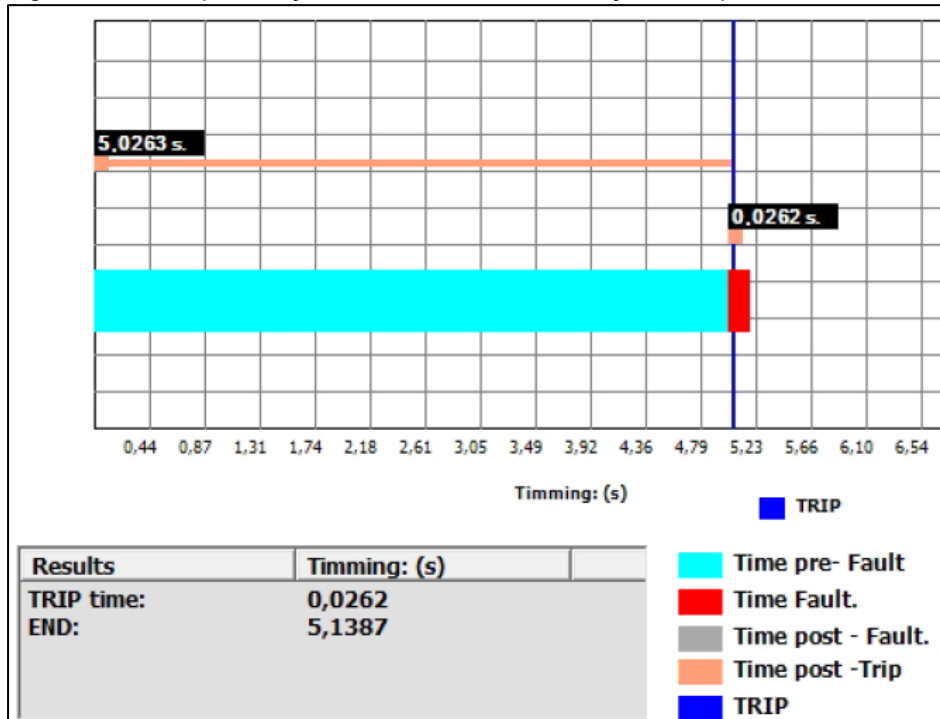
Tabela 5 – Ajustes para o teste de corrente diferencial nas fases "A" e "C".

PRÉ-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0,4	0	60	5 segundos
lb	0,4	120	60	
lc	0,4	240	60	
FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0,9	0	60	1 segundos
lb	0,4	120	60	
lc	0,9	240	60	
PÓS-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0	0	60	0 segundos
lb	0	120	60	
lc	0	240	60	

Fonte: Próprio autor (2017).

O resultado obtido está apresentado na figura 43, extraída do relatório elaborado pela mala de testes SMC Mentor 12 para este ensaio.

Figura 43 – Tempo de ação do relé mediante condição de trip.

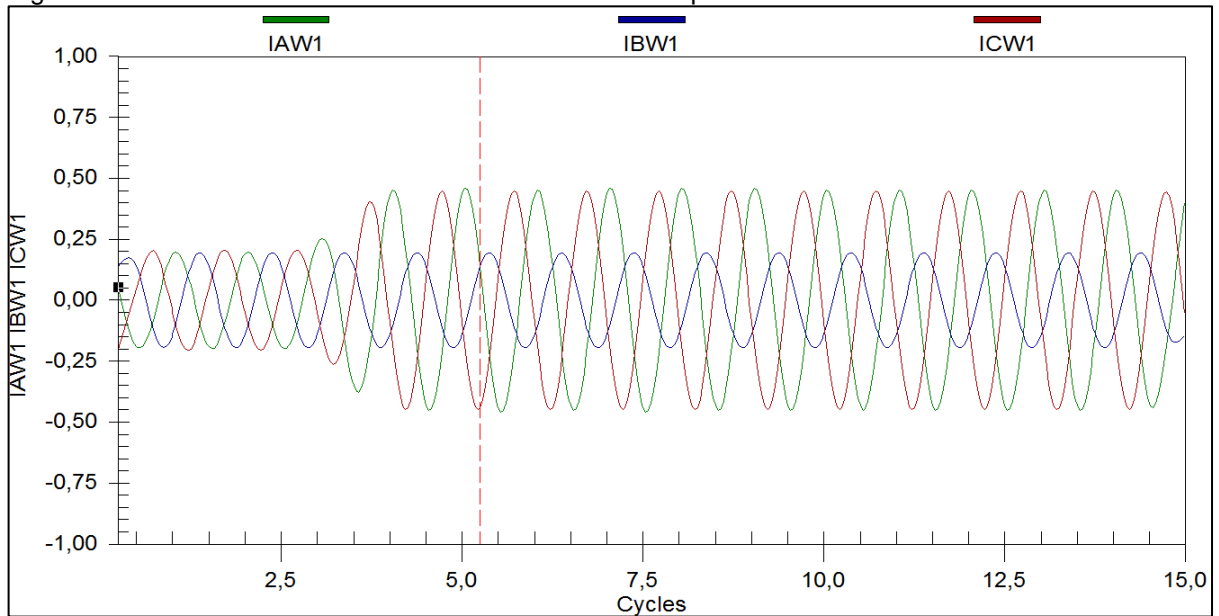


Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 43 mostra que o relé respondeu a condição de falta por corrente diferencial estabelecida pela mala de testes, conforme esperado, em um tempo de 0,0262s.

A figura 44 mostra o gráfico de monitoramento das correntes extraído do relé. É possível notar claramente o aumento na amplitude da corrente das fases A e C. A linha vermelha tracejada aponta o momento de trip do relé, em concordância com as informações já fornecidas pela mala de testes.

Figura 44 - Monitoramento das correntes do enrolamento primário.



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 45 mostra o painel frontal do relé SEL-387A no momento de trip, os LED's indicam que houve falta por corrente diferencial de característica instantânea ocorrida nas fases A e C, conforme o esperado.

Figura 45 - Painel frontal do relé no momento de trip.



Fonte: Próprio autor (2017).

5.3.1.3.3 Ensaio com corrente diferencial nas fases "A", "B" E "C"

Para a realização deste ensaio foi utilizada a função Fault do Controle Avançado da mala de testes SMC Mentor 12.

Os ajustes de pré-falta, falta e pós-falta se deram como mostrado na tabela 6.

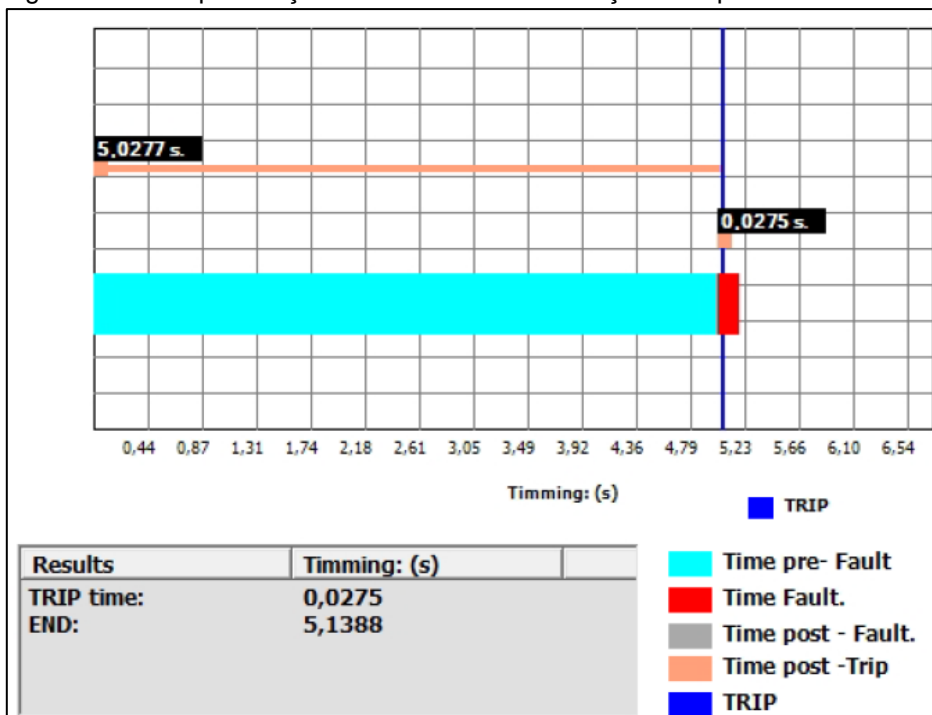
Tabela 6 – Ajustes para o teste de corrente diferencial nas fases "A", "B" e "C"

PRÉ-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0,4	0	60	5 segundos
lb	0,4	120	60	
lc	0,4	240	60	
FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0,9	0	60	1 segundos
lb	0,9	120	60	
lc	0,9	240	60	
PÓS-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0	0	60	0 segundos
lb	0	120	60	
lc	0	240	60	

Fonte: Próprio autor (2017).

O resultado obtido está apresentado na figura 46, extraída do relatório elaborado pela mala de testes SMC Mentor 12 para este ensaio.

Figura 46 – Tempo de ação do relé mediante condição de trip.

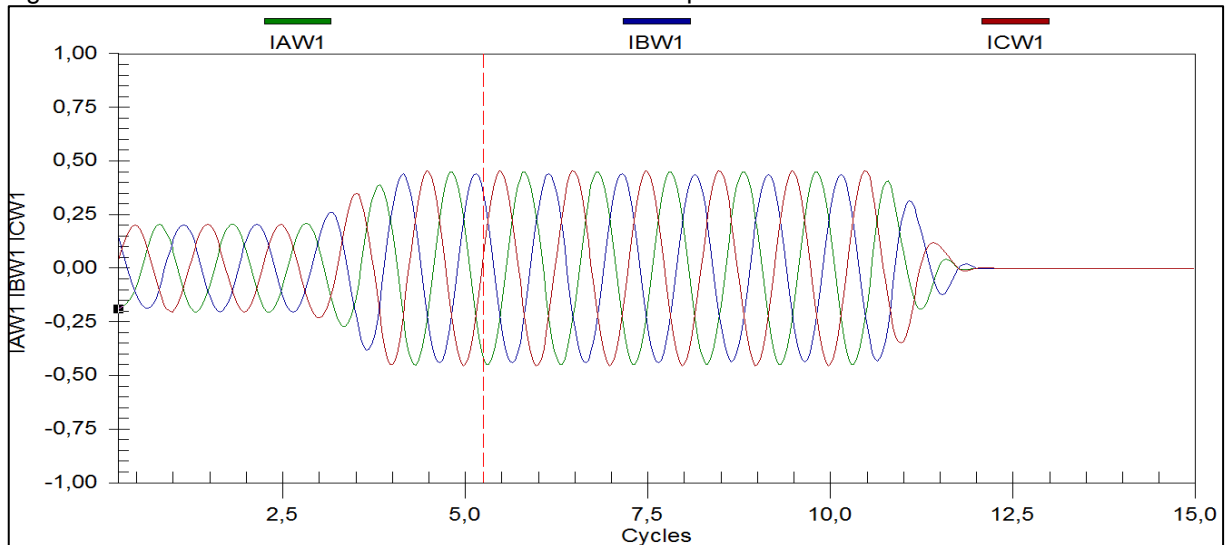


Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 46 mostra que o relé respondeu a condição de falta por corrente diferencial estabelecida pela mala de testes, conforme esperado, em um tempo de 0,0275s.

A figura 47 mostra o gráfico de monitoramento das correntes extraído do relé. É possível notar claramente o aumento na amplitude da corrente das fases A, B e C. A linha vermelha tracejada aponta o momento de trip do relé, em concordância com as informações já fornecidas pela mala de testes.

Figura 47 - Monitoramento das correntes do enrolamento primário.



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 48 mostra o painel frontal do relé SEL-387A no momento de trip, os LED's indicam que houve falta por corrente diferencial de característica instantânea ocorrida nas fases A, B e C, conforme o esperado.

Figura 48 - Painel frontal do relé no momento de trip.



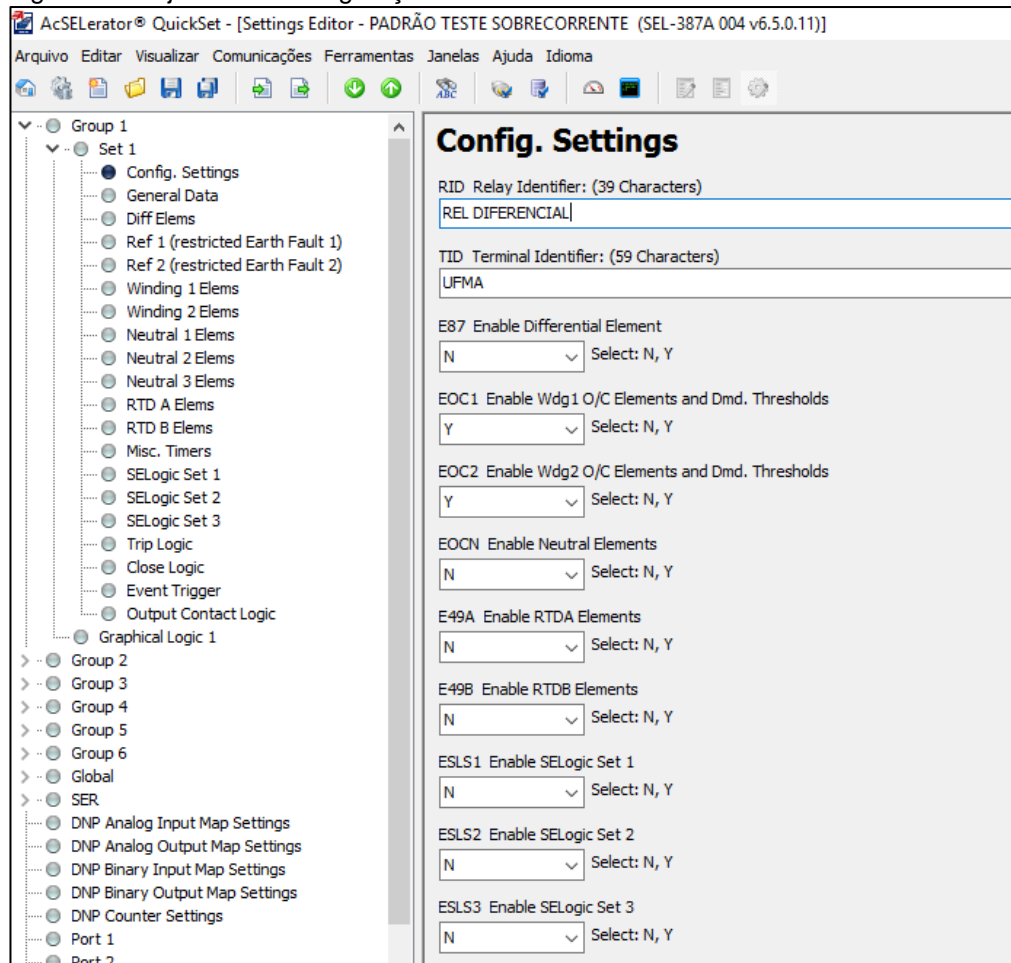
Fonte: Próprio autor (2017).

5.3.2 Ensaio da função de sobrecorrente temporizada (51)

5.3.2.1 Parametrização do relé

A figura 49 mostra os ajustes de configuração, onde “Y” em “EOC1” e “EOC2” indicam que as funções de sobrecorrente estão habilitadas, enquanto o “N” nas demais funções indicam que as mesmas estão desabilitadas.

Figura 49 – Ajustes de configuração



Fonte: Próprio autor (2017).

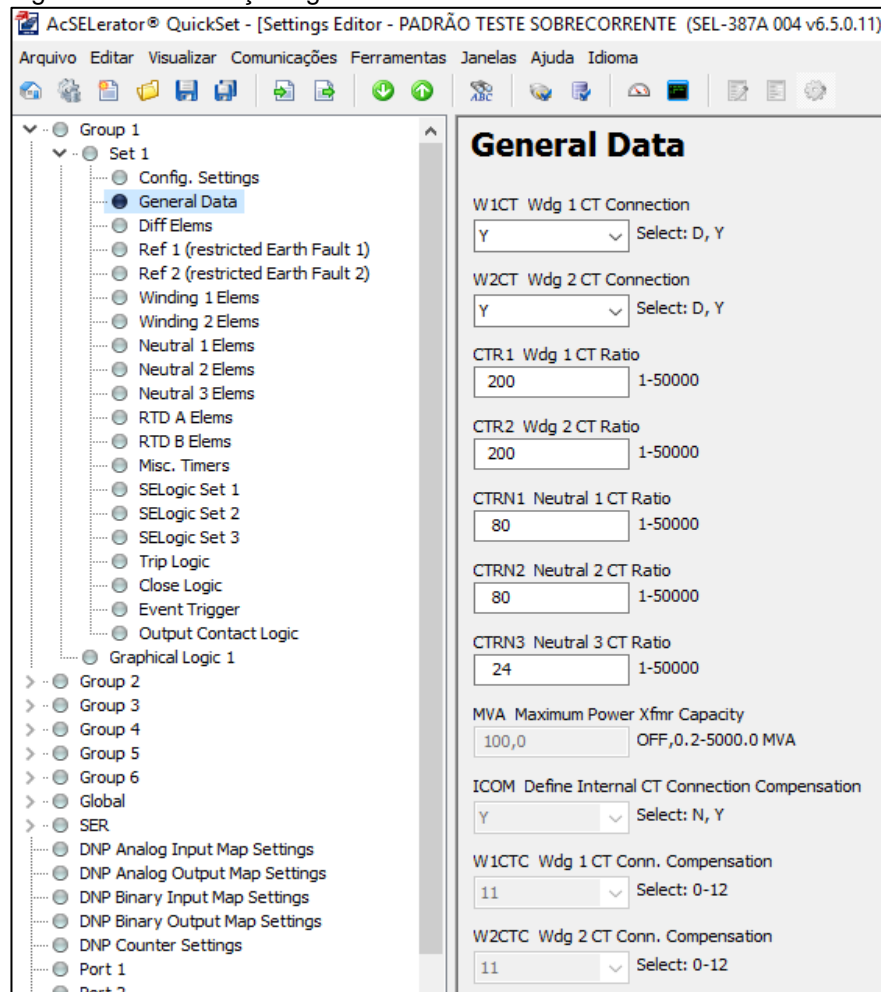
A figura 50 mostra os ajustes das Informações Gerais onde “W1CT” e “W2CT” definidos como “Y” indicam que os TC’s utilizados estão arranjados em Y.

Os valores da relação de transformação foram definidos empiricamente em 200A. A escolha do mesmo valor para os TC’s do enrolamento primário e secundário garante que não haja corrente diferencial, tendo em vista que a configuração dos equipamentos utilizada para os ensaios (circuito divisor de

corrente) só permite a injeção dos mesmos valores de corrente nos dois enrolamentos.

Os demais ajustes estão vinculados a funções que não estão habilitadas, logo não terão influência sobre os ensaios.

Figura 50 – Informações gerais.



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 51 mostram os ajustes de proteção para corrente temporizada (ou de tempo inverso), para o enrolamento 1 do equipamento protegido.

O campo “51P1P” indica a partir de qual valor de corrente de entrada a função de corrente temporizada passará a atuar, o ajuste de 4 A nesse campo indica que a função de sobrecorrente temporizada passará a atuar a partir desse valor de corrente de entrada no enrolamento 1.

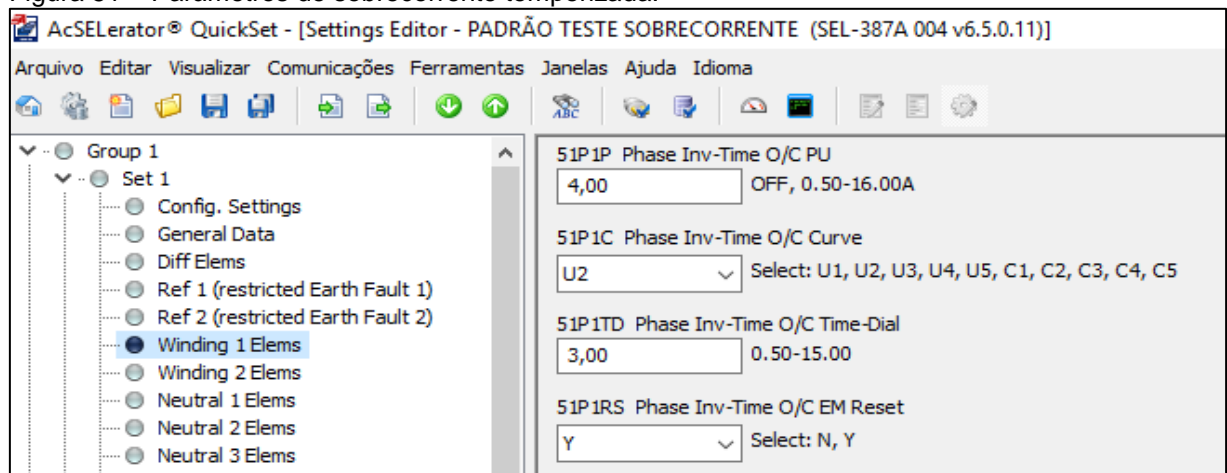
O campo “51P1C” indica qual curva de tempo inverso será utilizada nessa função. O ajuste “U2” indica que é utilizada a curva inversa do padrão IEC, conforme explanado no capítulo 3.

O campo “51P1TD” indica o multiplicador do tempo, serve para antecipar ou retardar a operação da função de sobrecorrente temporizada. O valor 3 ajustado significa que o tempo de atuação da função será multiplicado por 3.

O campo “51P1RS” indica se estará habilitado ou não o reset na contagem do tempo de atuação da função de sobrecorrente temporizado. O tempo de reset está associado a curva utilizada, conforme explanado no capítulo 3. O ajuste “Y” indica que este ajuste está habilitado.

Obs.: Os mesmo ajustes foram utilizados nos parâmetros do enrolamento 2.

Figura 51 – Parâmetros de sobrecorrente temporizada.



Fonte: Próprio autor (2017).

5.3.2.2 Resultados esperados

Dadas às equações,

$$T_p = TD * \left(0,180 + \frac{5,95}{M^2 - 1} \right)$$

E

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC * 51P1P}$$

Onde,

T_p = Tempo de operação, ou seja, o tempo que o relé levará para acionar a abertura do disjuntor de proteção (curva U2);

TD = Multiplicador de tempo ajustado pelo operador;

M = Valor de corrente para calculo de tempo de operação;

Icc = corrente de curto-circuito atuante;

RTC = Relação de transformação do TC;

51P1P = a grandeza de operação da unidade de sobrecorrente de fase de tempo inverso.

É possível determinar previamente o tempo de atuação da função de sobrecorrente temporizada.

A tabela 6 mostra o mapeamento da atuação do relé, dados os valores das correntes de entrada e os ajustes parametrizados, onde a coluna:

- a) **I** – Aponta o módulo da corrente gerada pela mala de testes;
- b) **W1** – Apontam a corrente injetada na entrada primária;
- c) **W1r** – Apontam a corrente W1 em valores reais;
- d) **RTC** – Aponta relação de transformação do TC utilizado;
- e) **51P1P** – Aponta a grandeza de operação da unidade de sobrecorrente de fase de tempo inverso;
- f) **TD** - Multiplicador de tempo ajustado pelo operador;
- g) **M** – Valor de corrente para calculo de tempo de operação;
- h) **TP** – Tempo de operação, ou seja, o tempo que o relé levará para acionar a abertura do disjuntor de proteção (curva U2) em segundos.

Tabela 7 – Tempo de atuação do relé.

I	W1	W1r	RTC	51P1P	TD	M	TP
15	7,5	1500,000	200	4	3,000	1,875	7,636
20	10	2000,000	200	4	3,000	2,500	3,940
25	12,5	2500,000	200	4	3,000	3,125	2,576

Fonte: Próprio autor (2017).

5.3.2.3 Resultados obtidos

5.3.2.3.1 Ensaio com curto-circuito de 1500 a (fases “A”, “B” E “C”)

Para a realização deste ensaio foi utilizada a função Fault do Controle Avançado da mala de testes SMC Mentor 12.

Os ajustes de pré-falta, falta e pós-falta se deram como mostrado na tabela 8.

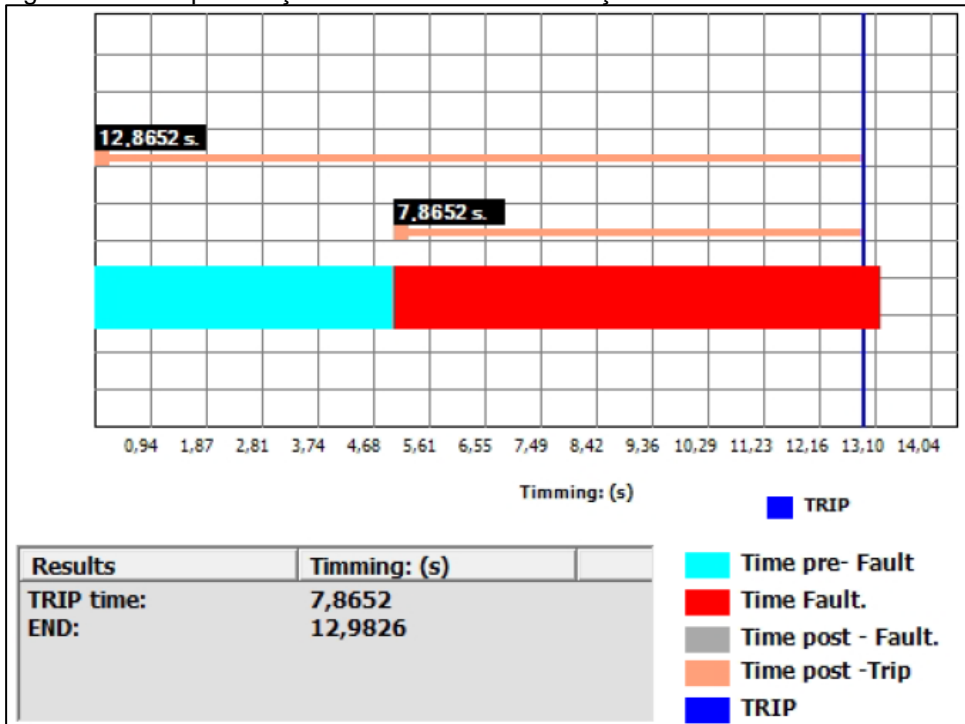
Tabela 8 – Ajustes para o teste de sobrecorrente temporizada (1500 A).

PRÉ-FALTA				
	módulo (A)	fase (º)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
Ia	2	0	60	5 segundos
Ib	2	120	60	
Ic	2	240	60	
FALTA				
	módulo (A)	fase (º)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
Ia	15	0	60	8 segundos
Ib	15	120	60	
Ic	15	240	60	
PÓS-FALTA				
	módulo (A)	fase (º)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
Ia	0	0	60	0 segundos
Ib	0	120	60	
Ic	0	240	60	

Fonte: Próprio autor (2017).

O resultado obtido está apresentado na figura 52, extraída do relatório elaborado pela mala de testes SMC Mentor 12 para este ensaio.

Figura 52 - Tempo de ação do relé mediante condição de sobrecorrente.

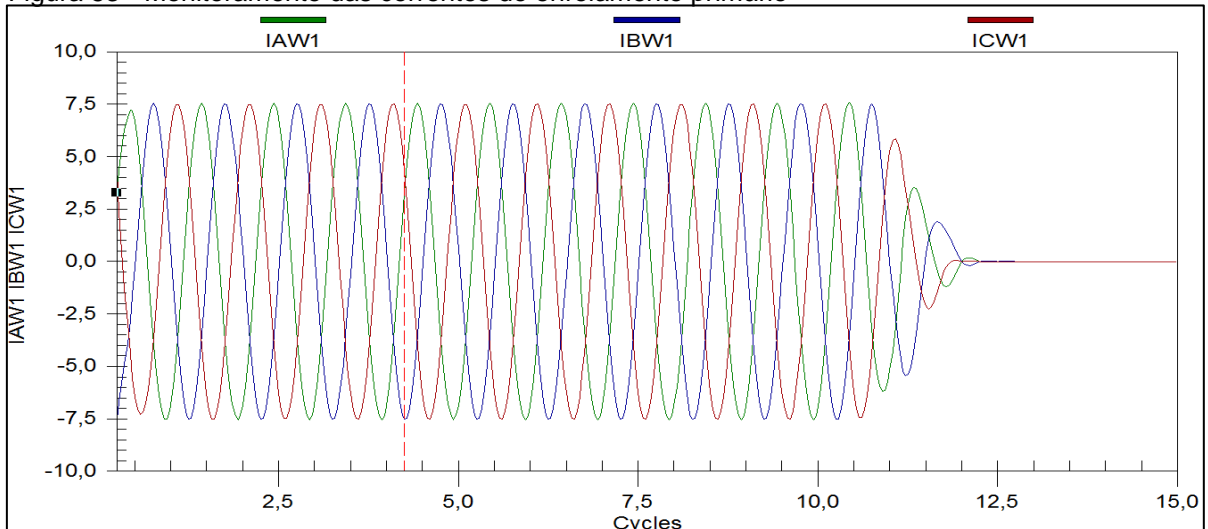


Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 52 mostra que o relé respondeu a condição de falta por sobrecorrente estabelecida pela mala de testes, conforme esperado, em um tempo de 7,865s, muito próximo do valor esperado, que era de 7,636s.

A figura 53 mostra o gráfico de monitoramento das correntes extraído do relé. A linha vermelha tracejada aponta o momento de trip do relé, em concordância com as informações já fornecidas pela mala de testes.

Figura 53 - Monitoramento das correntes do enrolamento primário



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 54 mostra o painel frontal do relé SEL-387A no momento de trip, os LED's indicam que houve falta por sobrecorrente temporizada (51) ocorrida nas fases A, B e C, conforme o esperado.

Figura 54 - Painel frontal do relé no momento de trip.



Fonte: Próprio autor (2017).

5.3.2.3.2 Ensaio com curto-circuito de 2000 A (fases "A" E "C")

Para a realização deste ensaio foi utilizada a função Fault do Controle Avançado da mala de testes SMC Mentor 12.

Os ajustes de pré-falta, falta e pós-falta se deram como mostrado na tabela 9.

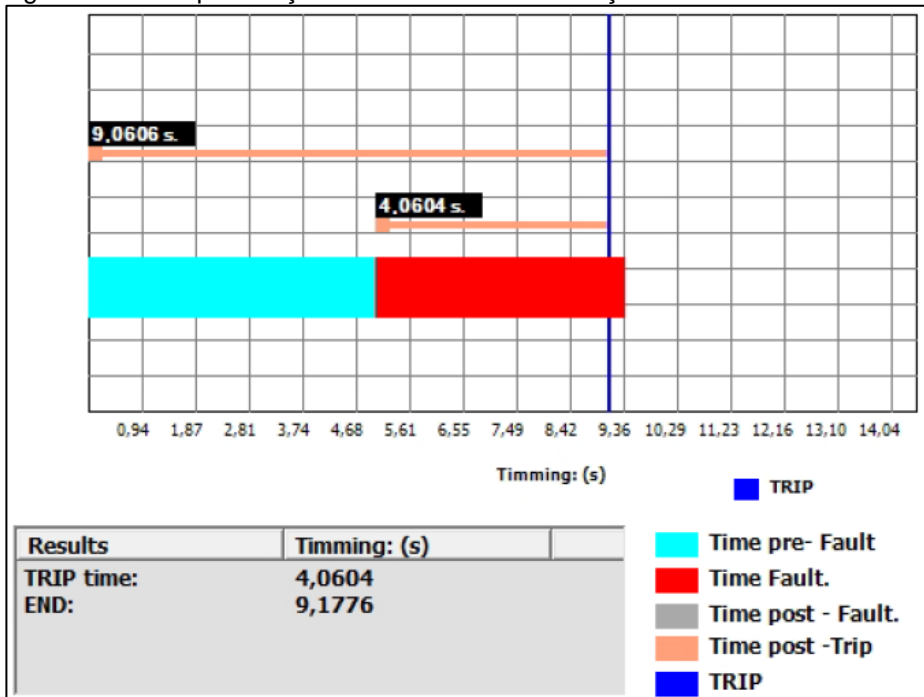
Tabela 9 - Ajustes para o teste de sobrecorrente temporizada (2000 A).

PRÉ-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	2	0	60	5 segundos
lb	2	120	60	
lc	2	240	60	
FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	20	0	60	8 segundos
lb	2	120	60	
lc	20	240	60	
PÓS-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0	0	60	0 segundos
lb	0	120	60	
lc	0	240	60	

Fonte: Próprio autor (2017).

O resultado obtido está apresentado na figura 55, extraída do relatório elaborado pela mala de testes SMC Mentor 12 para este ensaio.

Figura 55 – Tempo de ação do relé mediante condição de sobrecorrente.

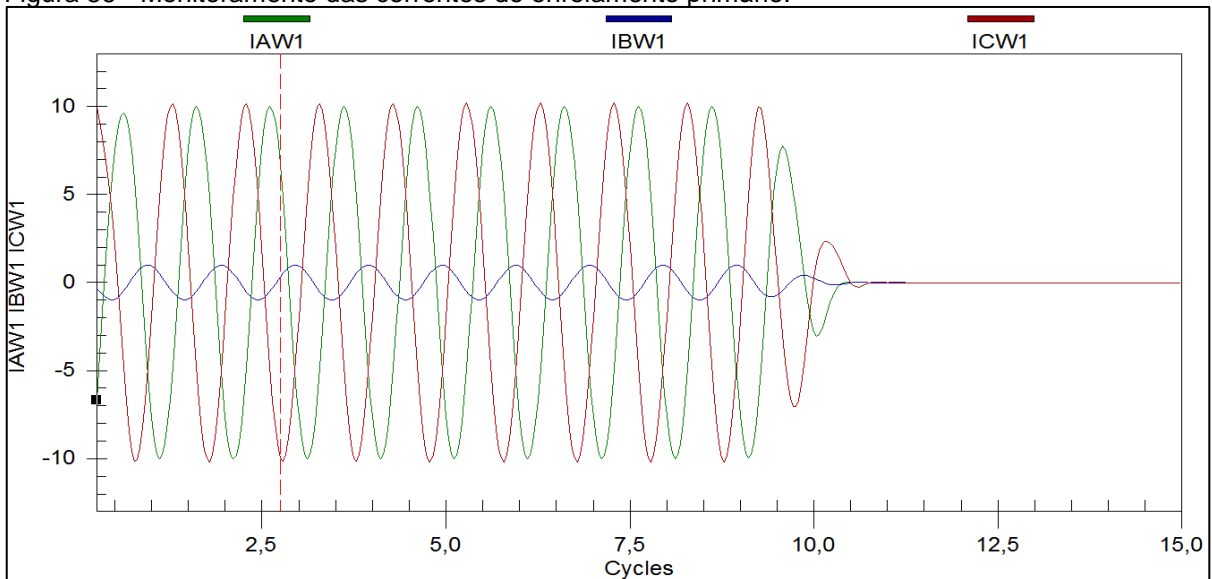


Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 55 mostra que o relé respondeu a condição de falta por sobrecorrente estabelecida pela mala de testes, conforme esperado, em um tempo de 4,060, muito próximo do valor esperado, que era de 3,940s.

A figura 56 mostra o gráfico de monitoramento das correntes extraído do relé. A linha vermelha tracejada aponta o momento de trip do relé, em concordância com as informações já fornecidas pela mala de testes. Também é possível observar que a amplitude das correntes das fases “A” e “C” é muito superior à amplitude da corrente da fase “B”.

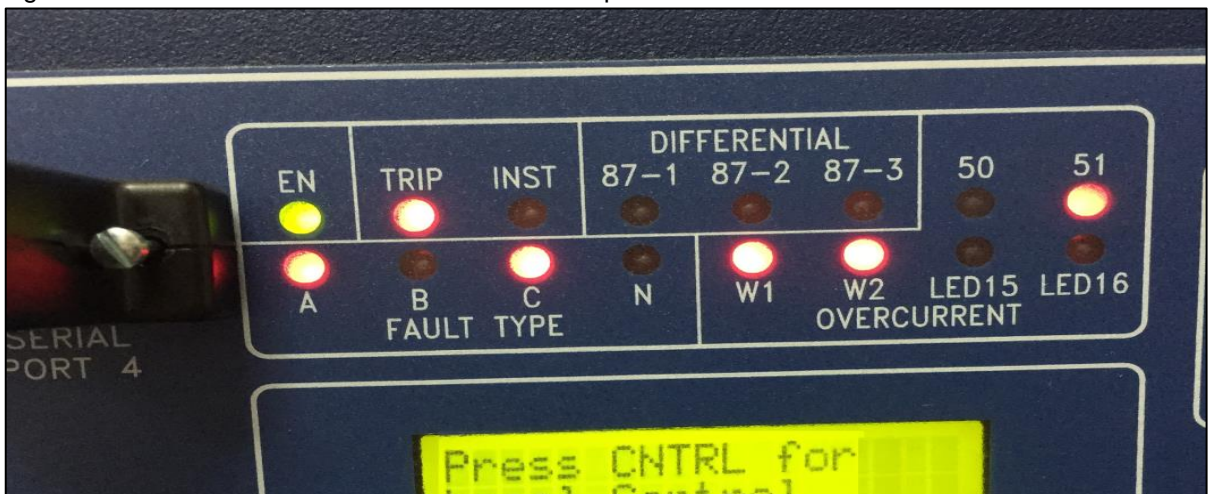
Figura 56 - Monitoramento das correntes do enrolamento primário.



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 57 mostra o painel frontal do relé SEL-387A no momento de trip, os LED's indicam que houve falta por sobrecorrente temporizada (51) ocorrida nas fases A e C, conforme o esperado.

Figura 57 - Painel frontal do relé no momento de trip.



Fonte: Próprio autor (2017).

5.3.2.3 Ensaio com curto-circuito de 2500 A (Fase B)

Para a realização deste ensaio foi utilizada a função Fault do Controle Avançado da mala de testes SMC Mentor 12.

Os ajustes de pré-falta, falta e pós-falta se deram como mostrado na tabela 10.

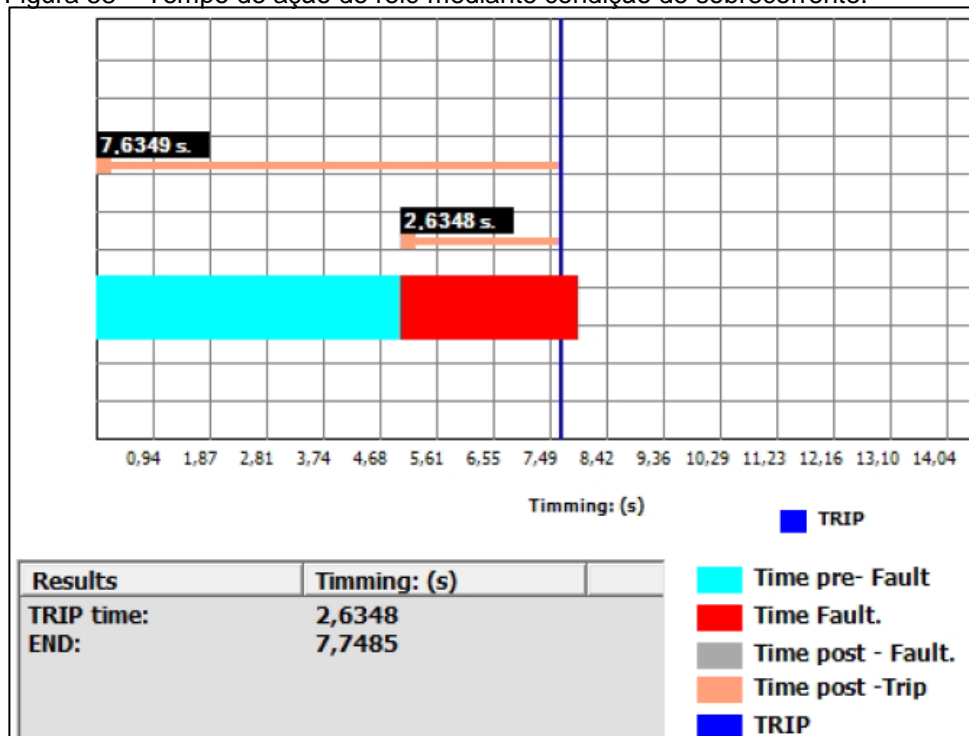
Tabela 10 - Ajustes para o teste de sobrecorrente temporizada (2500 A).

PRÉ-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	2	0	60	5 segundos
lb	2	120	60	
lc	2	240	60	
FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	2	0	60	8 segundos
lb	25	120	60	
lc	2	240	60	
PÓS-FALTA				
	módulo (A)	fase (°)	frequência (Hz)	DURAÇÃO
la	0	0	60	0 segundos
lb	0	120	60	
lc	0	240	60	

Fonte: Próprio autor (2017).

O resultado obtido está apresentado na figura 58, extraída do relatório elaborado pela mala de testes SMC Mentor 12 para este ensaio.

Figura 58 – Tempo de ação do relé mediante condição de sobrecorrente.



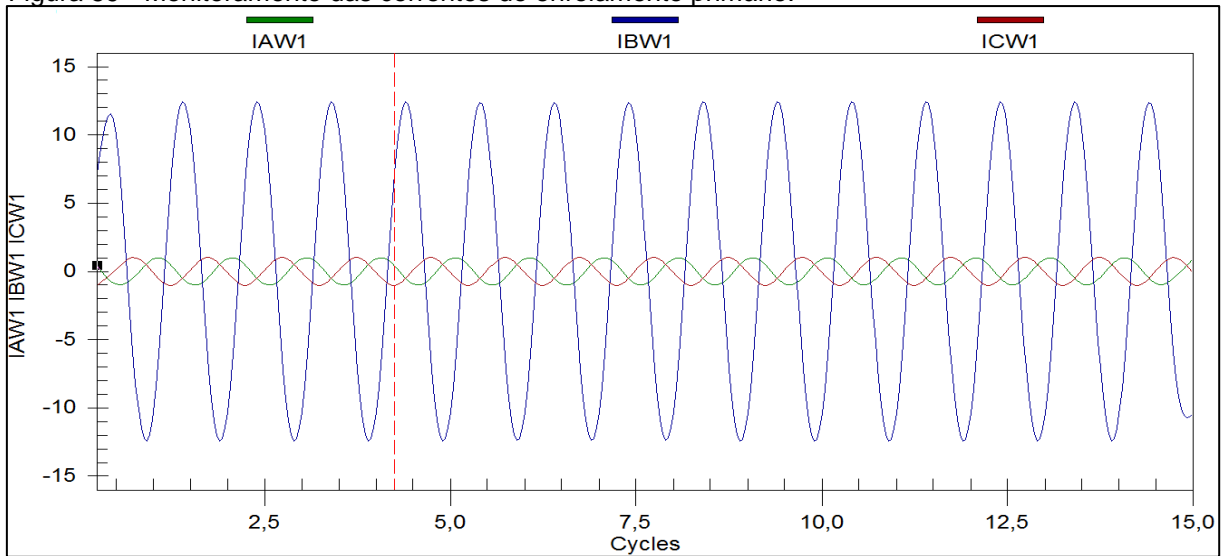
Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 58 mostra que o relé respondeu a condição de falta por sobrecorrente estabelecida pela mala de testes, conforme esperado, em um tempo

de 2,635s, muito próximo do valor esperado, que era de 2,576s.

A figura 59 mostra o gráfico de monitoramento das correntes extraído do relé. A linha vermelha tracejada aponta o momento de trip do relé, em concordância com as informações já fornecidas pela mala de testes. Também é possível observar que a amplitude da corrente da fase “B” é muito superior à amplitude das correntes das fases “A” e “C”.

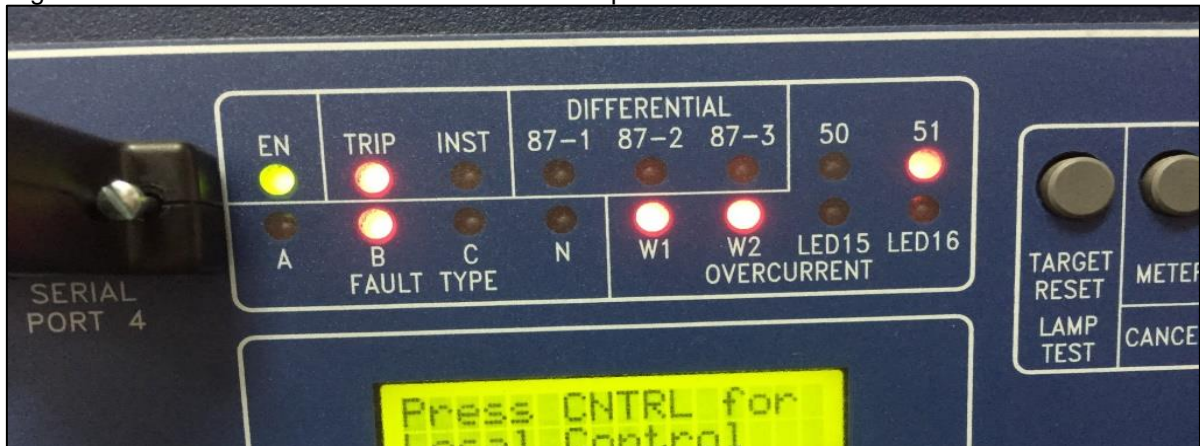
Figura 59 - Monitoramento das correntes do enrolamento primário.



Fonte: Próprio autor (2017).

A figura 60 mostra o painel frontal do relé SEL-387A no momento de trip, os LED's indicam que houve falta por sobrecorrente temporizada (51) ocorrida na fase B, conforme o esperado.

Figura 60 - Painel frontal do relé no momento de trip.



Fonte: Próprio autor (2017).

6 CONCLUSÃO

Os relés de proteção microprocessados são equipamentos amplamente utilizados em sistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição. A estes equipamentos é incumbida a missão de atuar de maneira rápida e efetiva, sem deixar de lado a coordenação e seletividade exigida pelo sistema ao qual está ligado, mediante situações de contingências.

Tendo em vista que os relés digitais ou relés microprocessados tem se consagrado cada vez mais importantes instrumentos para a proteção de sistemas elétricos de potência, dadas às inúmeras e eficientes possibilidades de atuação que estes equipamentos podem trazer, é imprescindível que se promovam o desenvolvimento de ferramentas de aprendizagem sobre estes relés.

O presente trabalho buscou promover conhecimentos sobre os relés de proteção, em especial o relé diferencial de corrente SEL-387A. Para tal, foi necessário realizar estudos sobre como este relé opera, sobre quais são as funções de seus botões e LED's, sobre como fazer devidamente as conexões elétricas para captação de dados e envios de comandos e sobre suas funções de proteção presentes no relé, como elas atuam e como é feita a parametrização dessas funções no relé.

Este trabalho apresentou de forma didática todas as funções de proteção presentes no relé SEL-387A, abordando tanto a teoria por trás de cada função quando a sua aplicação no relé, de maneira a reunir todas as informações básicas para que seja possível atingir o objetivo de difundir estes conhecimentos com as demais pessoas que se interessem pelo tema.

A mala de testes SMC Mentor 12 foi imprescindível para a realização dos ensaios, tendo em vista que ela era responsável por simular o sistema elétrico ao qual o relé estava ligado, bem como as contingências as quais o relé foi submetido, e por tanto, também foi alvo de estudo neste trabalho, sendo detalhado as suas funções de teste, modo de programação e canais disponíveis para teste.

Foi descrito o passo-a-passo da realização dos ensaios, sendo fornecidos os equipamentos utilizados, diagramas elétricos e de comunicação, dados ajustados na mala de testes para cada ensaio, além dos parâmetros ajustados no relé, para que se pudesse comprovar o embasamento teórico e prático apresentado anteriormente.

Ao todo foram realizados seis ensaios, sendo três ensaios com atuação da função diferencial (87) e três ensaios para atuação da função de sobrecorrente temporizada. Em todos os ensaios foi obtido sucesso, sendo alcançado o resultado esperado.

O primeiro ensaio da função diferencial foi realizado provocando correntes diferenciais na fase “B” do sistema, o segundo ensaio da função diferencial foi realizado provocando correntes diferenciais nas fases “A” e “C”, enquanto o terceiro ensaio da função diferencial foi realizado provocando correntes diferenciais nas três fases. Em todos os ensaios foi obtida a resposta instantânea do relé, indicando corretamente as fases envolvidas na falta, conforme esperado.

O primeiro ensaio da função de sobrecorrente temporizada foi realizado simulando uma corrente de curto circuito nas fases “A”, “B” e “C” no valor de 1500 A. O tempo de resposta esperado para essa função era de 7,636 s, enquanto o tempo obtido foi de 7,865 s.

O segundo ensaio da função de sobrecorrente temporizada foi realizado simulando uma corrente de curto circuito nas fases “A” e “C” no valor de 2000 A. O tempo de resposta esperado para essa função era de 3,940 s, enquanto o tempo obtido foi de 4,060 s.

O terceiro ensaio da função de sobrecorrente temporizada foi realizado simulando uma corrente de curto circuito na fase “B” no valor de 2000 A. O tempo de resposta esperado para essa função era de 2,576 s, enquanto o tempo obtido foi de 2,635 s.

Pode-se, então, afirmar que a atuação do relé SEL-387A mediante as situações simuladas foram extremamente satisfatórias, tendo em vista que os resultados obtidos foram bem próximos dos resultados esperados.

Diante de tudo o que foi exposto, é possível concluir que os objetivos de estudar, parametrizar, realizar ensaios e analisar de forma experimental o comportamento do relé diferencial de corrente SEL-387A através da mala de testes SMC Mentor 12, elaborando relatório sobre a atuação do relé diante das simulações realizadas, e fazer desta monografia um documento técnico que auxilie de forma didática os próximos alunos que se interessarem pelo tema, foram alcançados com louvor.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Existem ainda, no laboratório de redes inteligentes da UFMA, os relés de proteção SEL-487V e SEL-351A, logo sugere-se o desenvolvimento de um trabalho como este, aplicado a estes relés, para que se tenha domínio de todos os equipamentos presentes no laboratório.

Pode-se também, sugerir como trabalho futuro o desenvolvimento de um software SCADA, de forma que seja possível monitorar e atuar remotamente sobre os relés existentes no laboratório de redes inteligentes.

Durante a realização dos ensaios foi constatado que há problemas nas saídas de corrente e tensão B (“Voltage outputs B” e “Current outputs A”) da mala de testes SMC Mentor 12, logo sugere-se que seja providenciado a manutenção da mala, ou mesmo a aquisição de uma nova mala de testes.

Para a realização da parametrização do relé SEL-387A, foi utilizado o cabo de comunicação SEL-C662 emprestado por terceiros, já que os cabos de comunicação existentes no laboratório possuem nas duas pontas conexão serial, incompatibilizando com os computadores atuais, logo se sugere que seja adquirido um cabo SEL-C662 para o desenvolvimento dos próximos trabalhos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Marcos A. Dias de. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. Natal: [s.n.], 2000.
- ARAÚJO, Carlos André S.; et al. **Proteção de sistemas elétricos**. 2. ed. São Paulo: Ed. Interciência, 2005.
- COUTINHO, Samuel Paulo. Evolução dos Relés de Proteção. **Automação Industrial**, set. 2015. Disponível em: <<https://industriaautomatica.wordpress.com/2015/09/24/evolucao-dos-reles-de-protecao/>>. Acesso em: 01 jun. 2017.
- GAUER, Bárbara. **Relé diferencial de corrente (87)**. 2014. Disponível em: <<https://prezi.com/lfhoj0hp3tif/rele-diferencial-de-corrente-87/>>. Acesso em: 15 maio 2017.
- GONZALEZ, Juan Ignacio Patricio Rossi. **Representação de relés de proteção em programas de curto-circuito**. 2007. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- MARCELINO, Antônio; et al. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência aplicado na Subestação Carajás 225MVA**. 2009. Dissertação (Mestrado), Instituto Unificado de Ensino Superior Objetivo - IUESO, Goiânia, 2009.
- MARTINS, Diego Luz. **Estudo de Caso na Automação, Proteção e Supervisão de uma Subestação de Classe 69KV**. 2012. Monografia (Graduação), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2012.
- NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- PERES, Larissa M.; SILVA, Kleber M. Análise de sensibilidade Paramétrica da proteção diferencial de transformadores de potência. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 6., Rio Grande do Norte. **Anais...** Rio Grande do Norte: UFFR, 2016. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/eventos/AnaisSBSE2016/PDF/SBSE2016-0104_035004.pdf>. Acesso em: 15 maio 2017.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (SEL). **SEL-387A Current Differential and Overcurrent Protection Relay**. [2006?].
- _____. **Memória de cálculo para os ajustes do relé de proteção diferencial de corrente SEL-387^a**. Campinas: SEL, 2010.
- _____. **Guia prático para instalação e utilização do Software SEL-5030 AcSELerator® QuickSet**. [S.l.: s.n.], 2012.
- _____. **SEL-387A Relay Current Differential**: Instruction Manual. 2016.
- SMC MENTOR 12. **User Manual**. [S.l.: s.n.], 2015.

ANEXO A – Relatório de Ensaios elaborados pela mala de testes SMC MENTOR 12

ENSAIO COM CORRENTE DIFERENCIAL NA FASE “B”

EuroSMC



TEST REPORT

TEST GENERAL DATA:

Name:	Teste Diferencial Fase B
Date:	7/3/2017 2:42:12 PM
Description:	(EMPTY)
Type:	FAULT

TEST TIMES:

Pre-Fault (ms):	5000
Fault (ms):	1000
Post-Fault (ms):	0
Trip (ms):	100

TEST TRIP SETTINGS:

Selected inputs:	2A
Down trip inputs:	
Up trip inputs:	
Change trip inputs:	1A 1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A 6B
Selected operation:	OR

CHANNELS VALUES:

PRE-FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	0,400
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs2
Level:	0,400
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs3
Level:	0,400
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60

Frequency 2 (Hz): 60

FAULT:

INPUT BY: I controls

Name: Cs1
Level: 0,400
Phase: 0,000
ON/OFF: ON

Name: Cs2
Level: 0,900
Phase: 120,000
ON/OFF: ON

Name: Cs3
Level: 0,400
Phase: 240,000
ON/OFF: ON

POST-FAULT:

INPUT BY: I controls

Name: Cs1
Level: 10,200
Phase: 0,000
ON/OFF: OFF

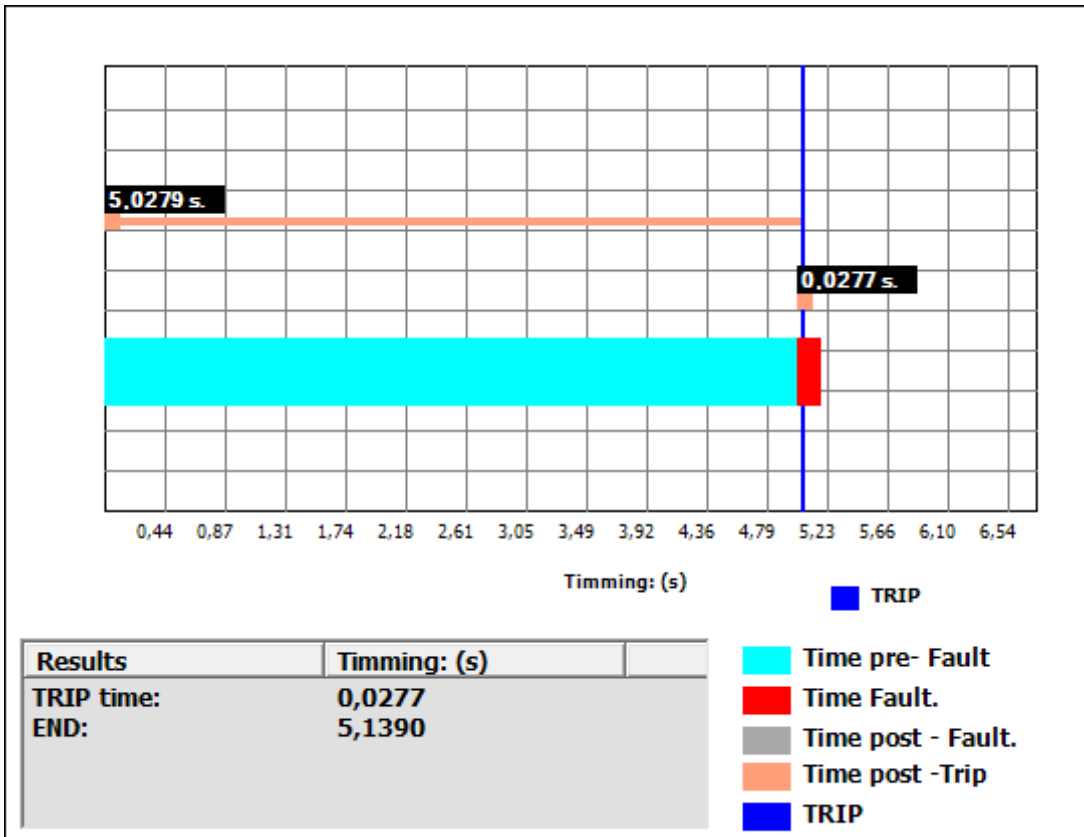
Name: Cs2
Level: 5,000
Phase: 120,000
ON/OFF: OFF

Name: Cs3
Level: 25,000
Phase: 240,000
ON/OFF: OFF

Binary outputs:
Frequency 1 (Hz): 50
Frequency 2 (Hz): 50

TEST RESULT VALUES

TEST GRAPHIC



TEST VALUES

EVENT	Event value/ Time(s)
Timing: Initial state	0.0000
Timing: start function.	5.0002
Event: EB_CHANGE	5.0279
Input In 2a	Closed
Timing: TRIP	5.0279
Timing: final state	5.1293
Timing: End function.	5.1390
Event: EB_CHANGE	5.1410
Input In 2a	Open

ENSAIO COM CORRENTE DIFERENCIAL NA FASE "A" E "C"

EuroSMC



TEST REPORT

TEST GENERAL DATA:

Name:	Teste diferencial fases A e C
Date:	7/3/2017 4:24:46 PM
Description:	(EMPTY)
Type:	FAULT

TEST TIMES:

Pre-Fault (ms):	5000
Fault (ms):	1000
Post-Fault (ms):	0
Trip (ms):	100

TEST TRIP SETTINGS:

Selected inputs:	2A
Down trip inputs:	
Up trip inputs:	
Change trip inputs:	1A 1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A 6B
Selected operation:	OR

CHANNELS VALUES:

PRE-FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	0,400
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs2
Level:	0,400
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs3
Level:	0,400
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	0,900
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs2
Level:	0,400
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs3
Level:	0,900
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

POST-FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	-------------------

Name:	Cs1
Level:	10,200
Phase:	0,000
ON/OFF:	OFF

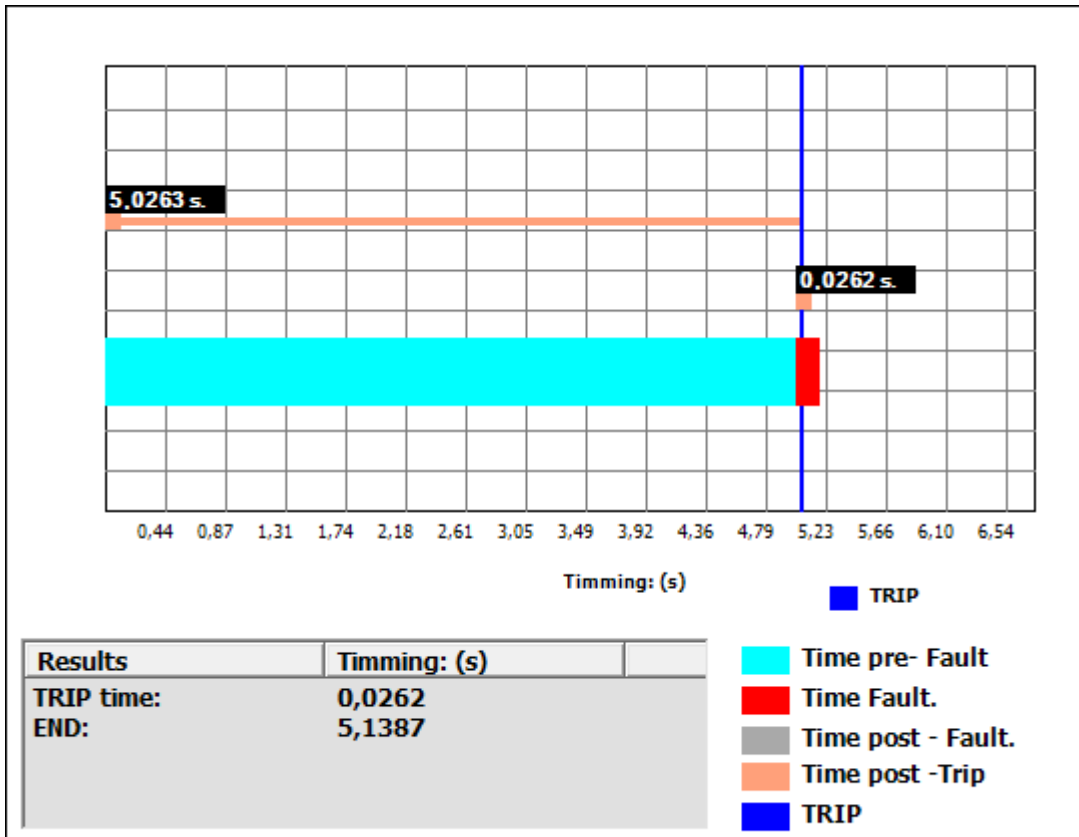
Name:	Cs2
Level:	5,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	OFF

Name:	Cs3
Level:	25,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	OFF

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	50
Frequency 2 (Hz):	50

TEST RESULT VALUES

TEST GRAPHIC



TEST VALUES

EVENT	Event value/ Time(s)
<i>Timing: Initial state</i>	0.0000
<i>Timing: start function.</i>	5.0001
<i>Event: EB_CHANGE</i>	5.0263
<i>Input In 2a</i>	Closed
<i>Timing: TRIP</i>	5.0263
<i>Timing: final state</i>	5.1289
<i>Timing: End function.</i>	5.1387
<i>Event: EB_CHANGE</i>	5.1404
<i>Input In 2a</i>	Open

ENSAIO COM CORRENTE DIFERENCIAL NA FASE “A”, “B” “C”

EuroSMC



TEST REPORT

TEST GENERAL DATA:

Name:	Teste diferencial fases A B e C
Date:	7/3/2017 5:11:02 PM
Description:	(EMPTY)
Type:	FAULT

TEST TIMES:

Pre-Fault (ms):	5000
Fault (ms):	1000
Post-Fault (ms):	0
Trip (ms):	100

TEST TRIP SETTINGS:

Selected inputs:	2A
Down trip inputs:	
Up trip inputs:	
Change trip inputs:	1A 1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A 6B
Selected operation:	OR

CHANNELS VALUES:

PRE-FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	0,400
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs2
Level:	0,400
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs3
Level:	0,400
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	0,900
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON
Name:	Cs2
Level:	0,900
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON
Name:	Cs3
Level:	0,900
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON
Name:	Llc4
Level:	1,000
Phase:	0,000
ON/OFF:	OFF
Name:	Llc5
Level:	1,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	OFF
Name:	Llc6
Level:	1,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	OFF
Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

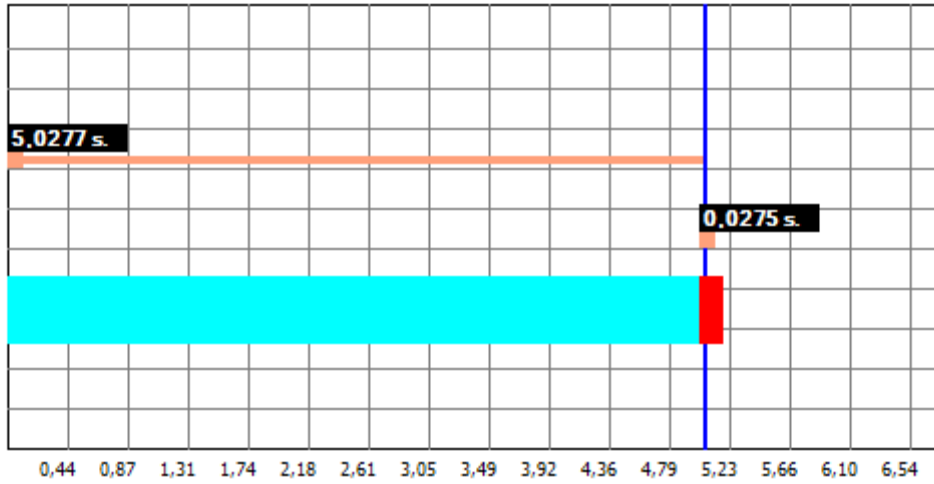
POST-FAULT:

INPUT BY:	I controls
Name:	Cs1
Level:	10,200
Phase:	0,000
ON/OFF:	OFF
Name:	Cs2
Level:	5,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	OFF
Name:	Cs3
Level:	25,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	OFF
Binary outputs:	

Frequency 1 (Hz): 50
 Frequency 2 (Hz): 50

TEST RESULT VALUES

TEST GRAPHIC



Timing: (s)

TRIP

Results	Timing: (s)
TRIP time:	0,0275
END:	5,1388

- Time pre- Fault
- Time Fault.
- Time post - Fault.
- Time post -Trip
- TRIP

ENSAIO DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADA NAS FASES "A", "B" E "C" (1500 A)

EuroSMC



TEST REPORT

TEST GENERAL DATA:

Name:	Ensaio de sobrecorrente temporizada (1500A)
Date:	7/5/2017 10:52:09 AM
Description:	(EMPTY)
Type:	FAULT

TEST TIMES:

Pre-Fault (ms):	5000
Fault (ms):	8000
Post-Fault (ms):	0
Trip (ms):	100

TEST TRIP SETTINGS:

Selected inputs:	2A
Down trip inputs:	
Up trip inputs:	
Change trip inputs:	1A 1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A 6B
Selected operation:	OR

CHANNELS VALUES:

PRE-FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	2,000
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs2
Level:	2,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs3
Level:	2,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

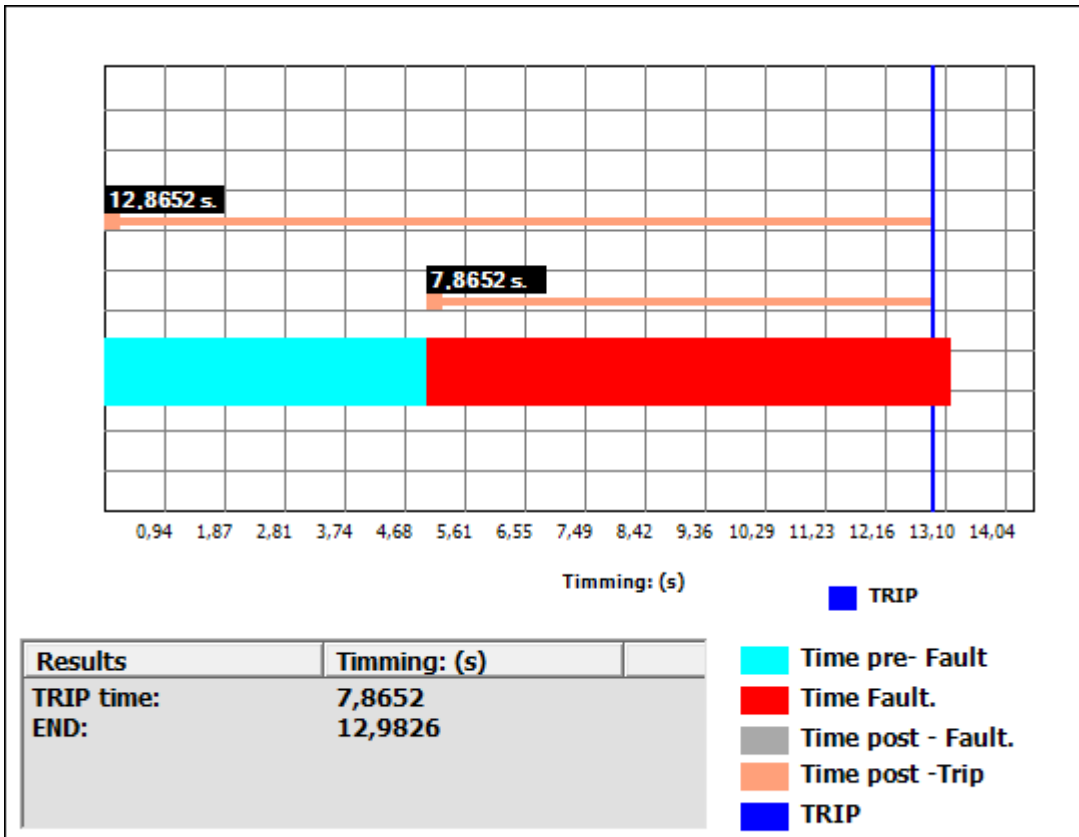
Name:	Cs1
Level:	15,000
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON
Name:	Cs2
Level:	15,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON
Name:	Cs3
Level:	15,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON
Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

POST-FAULT:

INPUT BY:	I controls
Name:	Cs1
Level:	10,200
Phase:	0,000
ON/OFF:	OFF
Name:	Cs2
Level:	5,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	OFF
Name:	Cs3
Level:	25,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	OFF
Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	50
Frequency 2 (Hz):	50

TEST RESULT VALUES

TEST GRAPHIC



TEST VALUES

EVENT	Event value/ Time(s)
Timing: Initial state	0.0000
Timing: start function.	5.0000
Event: EB_CHANGE	12.8652
Input In 2a	Closed
Timing: TRIP	12.8652
Timing: final state	12.9669
Timing: End function.	12.9826
Event: EB_CHANGE	13.0119
Input In 2a	Open

ENSAIO DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADA NAS FASES “A” E “C” (2000 A)

EuroSMC



TEST REPORT

TEST GENERAL DATA:

Name:	Ensaio de sobrecorrente temporizada (2000A)
Date:	7/5/2017 11:33:09 AM
Description:	(EMPTY)
Type:	FAULT

TEST TIMES:

Pre-Fault (ms):	5000
Fault (ms):	8000
Post-Fault (ms):	0
Trip (ms):	100

TEST TRIP SETTINGS:

Selected inputs:	2A
Down trip inputs:	
Up trip inputs:	
Change trip inputs:	1A 1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A 6B
Selected operation:	OR

CHANNELS VALUES:

PRE-FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	2,000
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs2
Level:	2,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs3
Level:	2,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name: Cs1
Level: 20,000
Phase: 0,000
ON/OFF: ON

Name: Cs2
Level: 2,000
Phase: 120,000
ON/OFF: ON

Name: Cs3
Level: 20,000
Phase: 240,000
ON/OFF: ON

Binary outputs:
Frequency 1 (Hz): 60
Frequency 2 (Hz): 60

POST-FAULT:

INPUT BY: I controls

Name: Cs1
Level: 10,200
Phase: 0,000
ON/OFF: OFF

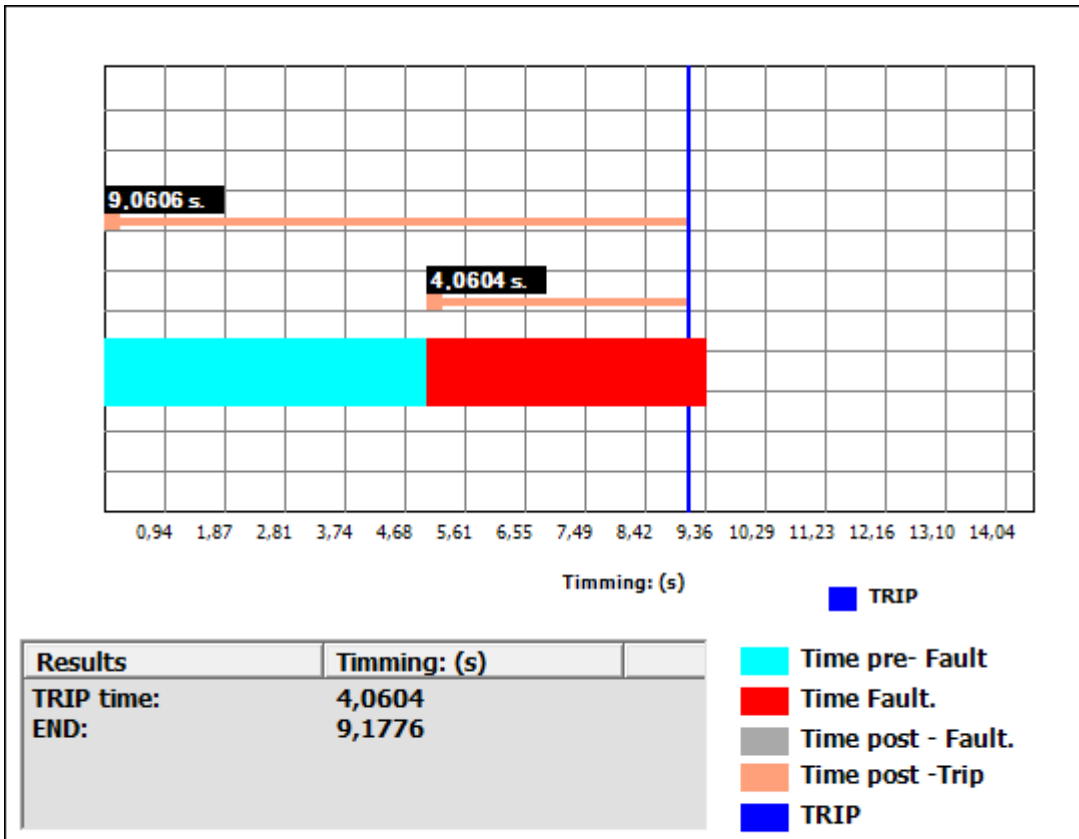
Name: Cs2
Level: 5,000
Phase: 120,000
ON/OFF: OFF

Name: Cs3
Level: 25,000
Phase: 240,000
ON/OFF: OFF

Binary outputs:
Frequency 1 (Hz): 50
Frequency 2 (Hz): 50

TEST RESULT VALUES

TEST GRAPHIC



TEST VALUES

EVENT	Event value/ Time(s)
Timing: Initial state	0.0000
Timing: start function.	5.0002
Event: EB_CHANGE	9.0606
Input In 2a	Closed
Timing: TRIP	9.0606
Timing: final state	9.1630
Timing: End function.	9.1776
Event: EB_CHANGE	9.2072
Input In 2a	Open

ENSAIO DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADA NA FASE "B" (2500 A)

EuroSMC



TEST REPORT

TEST GENERAL DATA:

Name:	Ensaio de sobrecorrente temporizada (2500A)
Date:	7/5/2017 12:01:28 PM
Description:	(EMPTY)
Type:	FAULT

TEST TIMES:

Pre-Fault (ms):	5000
Fault (ms):	8000
Post-Fault (ms):	0
Trip (ms):	100

TEST TRIP SETTINGS:

Selected inputs:	2A
Down trip inputs:	
Up trip inputs:	
Change trip inputs:	1A 1B 2A 2B 3A 3B 4A 4B 5A 5B 6A 6B
Selected operation:	OR

CHANNELS VALUES:

PRE-FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name:	Cs1
Level:	2,000
Phase:	0,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs2
Level:	2,000
Phase:	120,000
ON/OFF:	ON

Name:	Cs3
Level:	2,000
Phase:	240,000
ON/OFF:	ON

Binary outputs:	
Frequency 1 (Hz):	60
Frequency 2 (Hz):	60

FAULT:

INPUT BY:	I controls
------------------	------------

Name: Cs1
Level: 2,000
Phase: 0,000
ON/OFF: ON

Name: Cs2
Level: 25,000
Phase: 120,000
ON/OFF: ON

Name: Cs3
Level: 2,000
Phase: 240,000
ON/OFF: ON

Binary outputs:
Frequency 1 (Hz): 60
Frequency 2 (Hz): 60

POST-FAULT:

INPUT BY: I controls

Name: Cs1
Level: 10,200
Phase: 0,000
ON/OFF: OFF

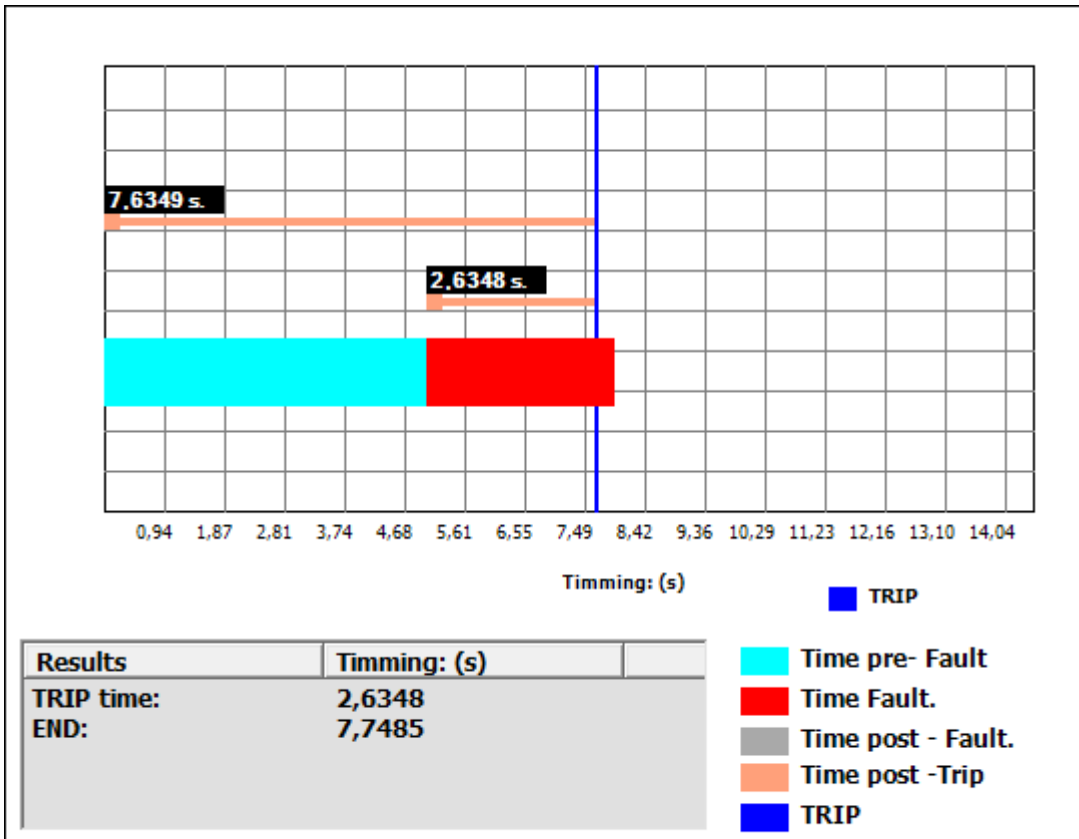
Name: Cs2
Level: 5,000
Phase: 120,000
ON/OFF: OFF

Name: Cs3
Level: 25,000
Phase: 240,000
ON/OFF: OFF

Binary outputs:
Frequency 1 (Hz): 50
Frequency 2 (Hz): 50

TEST RESULT VALUES

TEST GRAPHIC



TEST VALUES

EVENT	Event value/ Time(s)
<i>Timing: Initial state</i>	0.0000
<i>Timing: start function.</i>	5.0001
<i>Event: EB_CHANGE</i>	7.6349
<i>Input In 2a</i>	Closed
<i>Timing: TRIP</i>	7.6349
<i>Timing: final state</i>	7.7373
<i>Timing: End function.</i>	7.7485
<i>Event: EB_CHANGE</i>	7.7818
<i>Input In 2a</i>	Open