

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

HARIME TAUCHERT MOKDESE

**ESTUDO E APLICAÇÃO DO RELÉ SEL-421 DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
EM LABORATÓRIO DA UTFPR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2012

HARIME TAUCHERT MOKDESE

**ESTUDO E APLICAÇÃO DO RELÉ SEL-421 DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
EM LABORATÓRIO DA UTFPR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Wanderley Szlichta, Msc.

CURITIBA
2012

Harime Tauchert Mokdese

Estudo e aplicação do relé SEL-421 de linhas de transmissão em laboratório da UTFPR

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 04 de outubro de 2012.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Wanderley Szlichta, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Wanderley Szlichta, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gilberto Manoel Alves, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eloi Rufato Junior, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por me proteger e dar forças nos momentos difíceis desta caminhada.

Aos meus queridos pais, Hermismar e Volnete, por serem minha fortaleza, me incentivarem e se dedicarem tanto a minha educação, desde a infância até a faculdade. Graças a vocês, esse sonho se tornou realidade.

Ao meu amado noivo Carlos Eduardo, meu grande companheiro, que sempre me ajudou, aconselhou, incentivou e lutou comigo nessa jornada. Agradeço você pela sua paciência, amor, carinho e compreensão.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos pela motivação e por torcerem para que tudo desse certo.

Agradeço também ao professor Wanderley Szlichta pela orientação e transmissão de conhecimento.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que participaram, ativamente ou não, da realização deste trabalho.

RESUMO

MOKDESE, Harime Tauchert. Estudo e aplicação do relé SEL-421 de linhas de transmissão em laboratório da UTFPR. 2012. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Este projeto de pesquisa tem como intento mostrar a parametrização das funções de sobrecorrente e de distância do relé de proteção de linhas de transmissão SEL-421 da Schweitzer Engineering Laboratories. A utilização de relés do tipo microprocessados é vantajosa em relação aos eletromecânicos ou eletrônicos, pois eles são multifuncionais, mais flexíveis, não possuem componentes móveis, ocupam menos espaço no lugar onde são instalados e sua interligação com sistemas de supervisão e controle é de relativa facilidade. O ensaio do relé é feito simulando uma situação de falta no sistema onde ele está conectado, através de mala de testes. O relé SEL-421 é programado via software AcSELerator®, o qual tem uma interface amigável quando comparada com outras interfaces de programação de relés microprocessados.

Palavras-chave: Proteção de linhas de transmissão. Relés microprocessados. Relé SEL-421.

ABSTRACT

MOKDESE, Harime Tauchert. Study and application of SEL-421 transmission lines relay in UTFPR laboratory. 2012. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

This research intends to show the Schweitzer Engineering Laboratories SEL-421 relay distance and overcurrent protections settings. The use of microprocessor-type relays have advantages when compared with electromechanical or electronic relays, because they are multifunction relays. They are more flexible, have non-moving parts, use less panel space and have easy digital supervisory and control systems integration. The SEL-421 test is done simulating a faulted line with relay test set equipment. The SEL-421 programming is done by AcSELeRator® software, which is a user-friendly parameterization software.

Palavras-chave: Transmission lines protection. Microprocessor relays. SEL-421 relay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Elétrico de Potência típico e respectivas zonas de proteção.....	12
Figura 2. Ajuste de seletividade de zonas de proteção de linhas de transmissão.....	13
Figura 3 - Proteção Principal e Proteção de Retaguada	15
Figura 4 - Relé Eletromecânico de Distância instalado em usina hidrelétrica	17
Figura 5 - Relé Estático de Distância	18
Figura 6 - Diagrama Funcional de Blocos - Proteção Digital.....	19
Figura 7 – Princípio de funcionamento de um relé de impedância.....	21
Figura 8 - Localização da Impedância Z no Plano R-X	22
Figura 9 - Característica do Relé Impedância	22
Figura 10 - Característica do Acoplamento de Relé de Distância tipo Impedância e do Relé Direcional.....	23
Figura 11 - Característica das três Zonas de Atuação do Relé.....	24
Figura 12 - Alcance das três Zonas de Atuação do Relé de Impedância.....	24
Figura 13 - Característica do Relé Mho.....	25
Figura 14 – Característica das três Zonas de Atuação do Relé Mho	26
Figura 15 - Caraterística do Relé de Reatância	27
Figura 16 - Relé Mho combinado com Relé de Reatância.....	28
Figura 17 - Característica das duas Zonas de Atuação do Relé de Reatância e a Unidade de Partida Mho.....	29
Figura 18 - Relé SEL-421	30
Figura 19 - Relé SEL-421 em operação na subestação Uberaba	30
Figura 20 - Diagrama Funcional do Relé SEL-421	32
Figura 21 – Mala de testes OMICRON CMC-356.	37
Figura 22 - Tela inicial do software AcSELerator®.....	38
Figura 23 - Settings Editor Selection.	39
Figura 24 - Device Part number.	40
Figura 25 - Communication Parameters.....	41
Figura 26 - General Global Settings.	42
Figura 27 - Line Configuration.	43
Figura 28 - Line Configuration.....	43
Figura 29 - Phase Distance Elements.	44

Figura 30 - Ground Distance Elements.	45
Figura 31 - Fator de Compensação de Sequência Zero.	46
Figura 32 - Trip Logic.	47
Figura 33 - Parâmetros de ensaio – função 21.	48
Figura 34 - Event Summary – atuação da função 21 – tela 1.	49
Figura 35 - Event Summary – atuação da função 21 – tela 2.	49
Figura 36 - Event Summary – atuação da função 21 – tela 3.	50
Figura 37 - Analytic Assistant – atuação da função 21.....	50
Figura 38 - Oscilografia da função 21.	51
Figura 39 - Função Switch-onto-fault.	52
Figura 40 - Phase Instantaneous Overcurrent.....	53
Figura 41 - Main Board Outputs.	54
Figura 42 - Parâmetros de ensaio - função 50.	55
Figura 43 - Event Summary - atuação da função 50 – tela 1.	56
Figura 44 - Event Summary - atuação da função 50 – tela 2.	56
Figura 45 - Event Summary - atuação da função 50 – tela 3.	57
Figura 46 - Analytic Assistant - atuação da função 50.	57
Figura 47 - Oscilografia da função 50.	58

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASC	American Standard Code
AT	Alta Tensão
CC	Corrente Contínua
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DCB	Directional Comparison Blocking
DCUB	Directional Comparison Unblocking
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor
DNP	Distributed Network Protocol
DTT	Direct Transfer Trip
EIA	Electronic Industries Association
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor
FL	Fault Locator
GPS	Global Positioning System
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IRIG-B	Inter Range Instrumentation Group
I/O	Input / Output
LAN	Local area network
LT	Linha de transmissão
LMD	Linguagem de Manipulação de Dados
ONS	Operador Nacional do Sistema
PLC	Programmable Logic Controller
PMU	Phasor Measurement Units
POTT	Permissive overreaching transfer trip
PUTT	Permissive underreaching transfer trip
RMS	Root Mean Square
RTD	Resistance Temperature Detector
SE	Subestação
SEL	Schweitzer Engineering Laboratories

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SER	Sequential Events Recorder
SOTF	Switch-onto-fault
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UCA	Unidade de Controle e Aquisição
UHE	Usina Hidrelétrica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WAN	Wide area network

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
1.1 TEMA	4
1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	5
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	6
1.3 OBJETIVOS	7
1.3.1 OBJETIVO GERAL	7
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.4 JUSTIFICATIVA	8
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	8
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1. PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	10
2.1.1. PROPRIEDADES BÁSICAS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO	10
2.1.2. ZONAS DE PROTEÇÃO	11
2.1.3. PROTEÇÃO PRINCIPAL, PROTEÇÃO DE RETAGUARDA E PROTEÇÃO ALTERNADA	13
2.1.3.1. PROTEÇÃO PRINCIPAL	13
2.1.3.2. PROTEÇÃO DE RETAGUARDA	14
2.1.3.3. PROTEÇÃO ALTERNADA	15
2.2. RELÉ DE PROTEÇÃO	16
2.2.1. RELÉ DE PROTEÇÃO	16
2.2.2. HISTÓRICO DOS RELÉS	16
2.3. RELÉ DE DISTÂNCIA	20
2.3.1. RELÉS DE IMPEDÂNCIA	21
2.3.1.1. PLANO R-X	21
2.3.1.2. ZONAS DE ATUAÇÃO - REGULAGEM E TEMPORIZAÇÃO	23
2.3.2. RELÉS DE ADMITÂNCIA OU MHO	24
2.3.2.1. PLANO R-X	25
2.3.2.2. ZONAS DE ATUAÇÃO – REGULAGEM E TEMPORIZAÇÃO	26
2.3.3. RELÉ DE REATÂNCIA	26
2.3.3.1. PLANO R-X	27
2.3.3.2. ZONAS DE ATUAÇÃO – REGULAGEM E TEMPORIZAÇÃO	28
3. RELÉ SEL-421	30
3.1. O EQUIPAMENTO	30
3.2. SOFTWARE DE AJUSTE - AcSELerator® Quickset	36

4. ENSAIOS E RESULTADOS	37
4.1. EQUIPAMENTOS	37
4.2. SOFTWARES	38
4.3. CONFIGURAÇÕES INICIAIS	38
4.4. FUNÇÃO 21	41
4.4.1. AJUSTES	41
4.4.2. ENSAIO.....	47
4.5. FUNÇÃO 50	53
4.5.1. AJUSTES	53
4.5.2. ENSAIO.....	54
5. CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A	64

1. INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A energia elétrica é um dos recursos fundamentais para o desenvolvimento econômico de um país, bem como, para promover a satisfação e o bem estar da sociedade. Dessa forma, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) devem garantir um alto grau de confiabilidade na continuidade do fornecimento de energia elétrica. Contudo, interrupções no fornecimento de energia podem ser provocadas pela ocorrência de diferentes tipos de fenômenos eletromagnéticos que podem afetar distintas classes de consumidores. Situações faltosas podem ocorrer nos diversos componentes de um SEP, dentre os quais podemos destacar as Linhas de Transmissão (LT's) como o elemento mais susceptível, especialmente se considerarmos suas dimensões físicas, complexidade funcional e o ambiente em que se encontram, apresentando uma maior dificuldade para manutenção e monitoramento (SILVA, 2005). A prática demonstra que entre 70% e 80% das faltas nas linhas de transmissão ocorrem entre um só condutor e a terra. Um menor número de faltas refere-se as que envolvem todas as três fases, em torno de 5% (AGGARWAL et al., 2003; STEVENSON Jr, 1986).

A função do sistema de proteção é detectar a ocorrência de faltas ou condições anormais ao sistema elétrico de potência, e removê-las o mais rápido possível. Tal sistema deve retirar de operação apenas o elemento sob falta, visando uma maior continuidade no fornecimento de energia elétrica. A interrupção no fornecimento deve então ser minimizada ou, se possível, evitada (MACEDO et al., 2003). Os equipamentos sensíveis a tais ocorrências de faltas são os relés de proteção, os quais desempenham um papel crítico na operação dos sistemas elétricos de potência, pois são designados para atuar quando condições anormais ocorrem no sistema. Essas condições anormais podem ser, por exemplo, curto-circuitos, sobrecarga e perda de sincronismo. Esquemas de proteção elaborados têm sido desenvolvidos para detectar essas diversas condições, e são tipicamente constituídos de componentes distintos tais como relés de sobrecorrente, relés de distância, relés auxiliares e relés de religamento (MOONEY).

Na proteção de linhas de transmissão são utilizadas diversas classes de relés. Os mais frequentemente empregados são os relés de distância, (MACEDO et

al., 2003) sendo que o mesmo pode ser do tipo eletromecânico, estático e, mais recentemente, microprocessado. Os relés eletromecânicos foram os pioneiros na tecnologia de proteção de sistemas elétricos e foram predominantes nesses sistemas até a introdução dos relés com tecnologia eletrônica, no final da década de 60 (ROCKEFELLER, 1969), e seu princípio de funcionamento é considerado complexo, pois faz a transmissão de sinal por meio de um circuito magnético com movimentação mecânica (bobina + armadura) (QUEIROS, 2010). Algumas décadas após o desenvolvimento dos relés eletromecânicos surgiram os primeiros relés estáticos, sendo que tais dispositivos eram constituídos por válvulas e tinham um número restrito de funções de proteção (comparação direcional e proteção de distância) (QUEIROZ, 2010). Porém, com os avanços da eletrônica e melhoria dos processadores quanto à imunidade a ruídos, aliados a novos algoritmos de filtros digitais de sinais e detecção de situações de falta em sistemas de potência, os relés do tipo eletromecânico vêm sendo gradativamente substituídos por relés microprocessados. Além de possuírem maior flexibilidade de aplicação, serem mais fáceis de conectar com sistemas de supervisão e controle, possuem manutenção reduzida quando comparados com os eletromecânicos e ocupar menor espaço em painéis, normalmente executam várias funções em um único dispositivo (MOONEY).

1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Existem várias funções de proteção que são utilizadas na proteção de sistemas elétricos, mas no caso das linhas de transmissão, o relé cuja função possui destaque é o de distância. Tal equipamento de proteção calcula a impedância aparente da linha entre a localização do relé e o ponto em que a falta ocorreu. Como a impedância por quilômetro da linha de transmissão pode ser considerada constante, através do cálculo da impedância aparente, o relé aponta a distância da falta na linha (MACEDO et al., 2003). A maioria dos relés de distância opera através de três grandezas elétricas: tensão, corrente e ângulo de fase. O uso desta terminologia serve para classificá-los quanto ao seu princípio de operação, em que a sua resposta à entrada é função da distância entre a localização em que ele se encontra e o ponto onde a falta ocorreu. Os sinais de entrada para o relé digital são os sinais de tensão e corrente, obtidos através de transdutores. Esses sinais, no instante da falta, são formados por ondas distorcidas devido à presença de ruídos

sob forma de componentes CC e harmônicos de alta frequência introduzidos pela falta (COURY).

Nos últimos anos, os relés eletromecânicos e estáticos vêm sendo substituídos pelos microprocessados, situação que pode ser estendida também para o relé de distância. Os relés microprocessados podem ser usados em todas as aplicações onde estão presentes os relés eletromecânicos e estáticos. Além disso, oferecem muitas vantagens sobre os esquemas que utilizam componentes distintos. O esquema total ocupa um menor espaço no painel, o número de componentes no painel em que o relé será instalado é reduzido, o projeto é mais simples, sendo relativamente fácil interconectá-lo com sistemas de supervisão e controle, a aplicação é menos dispendiosa, e relés microprocessados tipicamente possuem autodiagnóstico, registrador de sequência de eventos e oscilografia. Os relés microprocessados também oferecem outras funções, além das funções de proteção (MOONEY), como, por exemplo, funções de controle e intertravamentos de chaves em subestações. Além disso, os requisitos estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) determinam a necessidade do envio em tempo real das informações e atuações de proteções e dados de telesupervisão (medições das grandezas elétricas e estado de equipamentos de manobra), possíveis apenas através da tecnologia digital (QUEIROZ, 2010).

Dentro das possibilidades de aplicação de relés microprocessados, a Schweitzer Engineering Laboratories é um fabricante de grande notabilidade e aceitação de mercado. Sendo assim, este trabalho tem como intento ensaiar um relé microprocessado SEL-421 aplicado a uma linha de transmissão hipotética, o qual será instalado em laboratório para que se inicie o desenvolvimento de um laboratório de proteção a ser utilizado pelos alunos da UTFPR.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A principal objeção no estudo de relés digitais está na dificuldade de encontrar literatura especializada em aplicação desses relés. Apesar da teoria de proteção ser consolidada e algoritmos utilizados em relés microprocessados também possuírem essas características, as informações de interesse para programação de um relé microprocessado nem sempre norteiam esses temas, sendo esta última mais voltada para problemas de software e de comunicação entre o relé e o

computador. Os fabricantes normalmente disponibilizam folhas de dados, as quais nem sempre mostram com clareza como executar de forma correta esses procedimentos, tornando a tarefa de parametrização e programação do relé, às vezes, exaustiva.

Ademais, as dificuldades que serão encontradas serão as inerentes ao aprendizado de softwares para computador, no caso o AcSELerator®, aos procedimentos de ensaio, à montagem do relé no laboratório e a simulação das faltas, que norteiam basicamente cuidados na instalação e na análise dos dados obtidos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta proposta é estudar e simular uma situação de aplicação do relé SEL-421 em linhas de transmissão utilizando o software AcSELerator® para instalação em laboratório a ser criado na UTFPR.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar pesquisa bibliográfica a respeito de sistemas de proteção e relé de distância;
- Realizar pesquisa bibliográfica do princípio de funcionamento dos relés de distância e descrever o funcionamento do relé SEL-421 da Schweitzer Engineering Laboratories;
- Estudar o software AcSELerator®, com o intuito de utilizá-lo para programação do relé SEL-421;
- Programar no relé, através do software AcSELerator®, as funções de distância e sobrecorrente;
- Realizar ensaios no relé, utilizando uma mala de testes, e analisar os resultados de atuação das funções distância e de sobrecorrente no relé;
- Elaborar uma rotina de experiências com exercícios de aplicações específicas das funções de proteção ajustadas no relé, para serem utilizadas pelos discentes no laboratório de proteção da UTFPR.

1.4 JUSTIFICATIVA

As linhas de transmissão desempenham um papel fundamental em sistemas elétricos, uma vez que são elas que fazem a ligação da geração com os centros distribuidores de energia elétrica. Portanto, elas devem garantir que a energia produzida nos centros geradores seja adequadamente transportada por todo o sistema interligado. A qualidade da transmissão de energia está diretamente relacionada com o tempo em que a linha de transmissão é mantida operante, por isso, idealmente linhas nunca devem permanecer desligadas.

Devido a fatores que devem ser considerados em uma linha de transmissão, como distância percorrida, dimensões físicas, ambiente em que estão instaladas e sua complexidade funcional, as linhas são elementos bastante susceptíveis a situações de falta. Porém, as faltas são ocorrências indesejadas em um sistema, conseqüentemente o emprego de proteções se torna fundamental para que a quantidade de tempo no qual a linha permaneça operante seja o maior possível, que situações de falta sejam eliminadas com o menor número de circuitos desligados e que os danos causados por faltas em linhas de transmissão ao sistema e seus equipamentos seja o menor possível.

A proteção feita por relés eletromecânicos é eficiente do ponto de vista de sistemas elétricos, porém é pouco flexível em comparação com relés microprocessados, visto que quando se altera algum parâmetro dentro da região atendida pelo relé, deve se reajustá-lo dentro dos limites da sua própria curva de ajuste para que continue sendo eficaz. Já os relés microprocessados não têm uma curva característica específica, sendo possível ajustar qualquer curva que a zona de proteção necessite.

A escolha do relé da Schweitzer Engineering Laboratories foi ,principalmente, pelo fato da UTFPR possuir um exemplar do relé cedido pelo fabricante. Tal exemplar fará parte de um laboratório próprio para o estudo de proteção e, com isso, contribuirá para um melhor aprendizado.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Classifica-se o estudo proposto como de natureza científica aplicada, devido ao fato de existir um problema claro (falta de laboratório de proteção e relés preparados para ensaio na universidade) e uma proposta de solução

(parametrização de um relé disponível na universidade para ser utilizado em ensaios).

Para a execução do projeto proposto, foram realizados estudos sobre os relés microprocessados e sobre as vantagens da utilização destes em relação aos relés eletromecânicos. Após a pesquisa teórica, foi realizado um estudo sobre aplicação de relés de distância na proteção de linhas de transmissão.

Dando continuidade ao projeto, foi realizado um estudo do software AcSELerator® e a aplicação dele no relé SEL-421. Finalmente, foram realizados ensaios para validar os ajustes realizados e, com isso, foi possibilitada a análise das principais limitações e dificuldades de implantação.

Por fim, foi desenvolvido um manual com exercícios abrangendo as aplicações das funções ajustadas no equipamento, mostrando como pode ser feito o ensaio do relé.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho tem a seguinte estrutura:

Capítulo 1 – Capítulo Introdutório, onde é feita uma contextualização e a exposição do problema a ser resolvido;

Capítulo 2 – Neste capítulo é exposta toda a fundamentação teórica utilizada para a realização deste projeto;

Capítulo 3 – Capítulo dedicado à apresentação do relé SEL-421 e do software AcSELerator®;

Capítulo 4 – Procedimentos metodológicos, ajuste das funções no relé, descrição dos ensaios e materiais utilizados, bem como seus resultados;

Capítulo 5 – Considerações finais e conclusões.

E por último, elementos complementares como: referências, anexos e apêndices.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A função da proteção de um sistema elétrico é isolar e remover qualquer elemento de um sistema de potência que sofra curto circuito ou opere de forma perigosa, que possa acarretar em danos a um equipamento ou a operação efetiva do resto do sistema (MASON, 1956).

A proteção de um sistema elétrico de potência é feita por esquemas de proteção que, por sua vez, são basicamente comandados por relés. A função primordial desses relés é identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e alertar quem opera o sistema, promovendo o disparo de alarmes, sinalizações e também, dependendo do caso, promovendo a abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em operação normal, sem que o defeito prejudique sua normalidade (KINDERMANN, 1999). As principais funções de um sistema de proteção são: salvaguardar a integridade física de operadores, usuários do sistema e animais; evitar ou minimizar danos materiais; retirar de serviço um equipamento ou parte do sistema que se apresente defeituoso; melhorar a continuidade do serviço; diminuir despesas com manutenção corretiva e melhorar os índices DEC (duração de interrupção equivalente por consumidor) e FEC (frequência de interrupção equivalente por consumidor) (ALMEIDA, 2000).

2.1.1. PROPRIEDADES BÁSICAS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO

As principais propriedades são:

- **Seletividade:** o sistema de proteção que possui esta propriedade é capaz de reconhecer e selecionar as condições que deve operar, a fim de evitar operações desnecessárias (ALMEIDA, 2000), provendo a máxima continuidade de serviço do sistema protegido com um mínimo de desconexões para isolar uma falta no sistema (MAEZONO, 2007);
- **Confiabilidade:** probabilidade do sistema de proteção funcionar com segurança e corretamente, sob todas as circunstâncias (ALMEIDA, 2000), atuando quando necessário e evitando operações desnecessárias (MAEZONO, 2007);

- Velocidade: um sistema de proteção deve possibilitar o desligamento do trecho ou equipamento defeituoso no menor tempo possível (ALMEIDA, 2000), de forma a garantir o mínimo tempo de falha, para um mínimo de danos ou instabilidade no componente ou sistema protegido (MAEZONO, 2007);
- Sensibilidade: um sistema de proteção deve responder às anormalidades com menor margem possível de tolerância entre a operação e não operação dos equipamentos (ALMEIDA, 2000);
- Economia: propriedade de um sistema de proteção em ter a máxima proteção com um mínimo de custo possível (COPEL, 2006).

2.1.2. ZONAS DE PROTEÇÃO

A filosofia geral de proteção de um sistema elétrico é dividi-lo em “zonas de proteção” de modo que, quando ocorre uma anormalidade, haja o mínimo de desligamentos possível, preservando o máximo de continuidade dos serviços (MAEZONO, 2007). Uma zona de proteção é uma região definida por uma linha divisória imaginária, no diagrama unifilar do sistema de potência (BARBOSA, 2009).

Comumente um sistema de potência é dividido em quatro tipos de zonas de proteção: Gerador, Transformador, Barramento e Linhas de Transmissão (IEEE, 1999). A figura 1 mostra o diagrama unifilar de um sistema de potência onde são mostradas essas zonas de proteção, sendo:

- 1: Zona de proteção do Gerador;
- 2: Zona de proteção do Transformador;
- 3: Zona de proteção de Barras;
- 4: Zona de proteção de Linha de Transmissão.

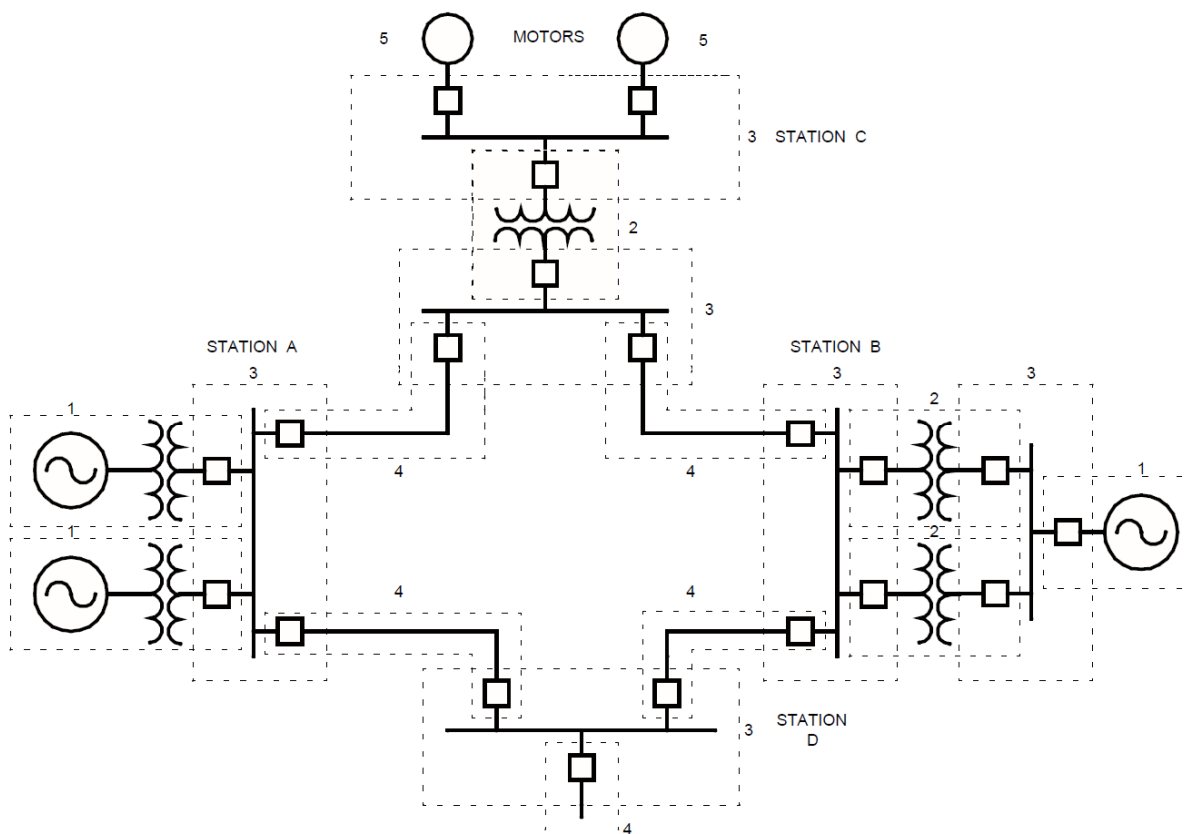


Figura 1. Sistema Elétrico de Potência típico e respectivas zonas de proteção.

Fonte: IEEE, 1999.

A separação das zonas se dá, usualmente, através da localização de disjuntores e transformadores de corrente (TC's) que fornecem imagem da corrente aos relés de proteção (MAEZONO, 2007). Contudo, muitas práticas de proteção em linhas de transmissão têm zonas com início em um TC e extensão determinada por parâmetros medidos do sistema, que podem variar de acordo com a configuração do sistema e de valores de geração (IEEE, 1999). Este último caso é usualmente utilizado quando da proteção de linhas de transmissão através do relé de distância, onde o início da zona de atuação é no TC que envia imagem de corrente da linha para o relé e o fim da zona de atuação desse relé é delimitada pela impedância medida do sistema, através dos valores de corrente e tensão enviados ao relé.

A filosofia de separação em zonas de proteção é também utilizada na proteção de linhas de transmissão, onde são ajustados no relé valores de impedância que correspondem a um comprimento da linha de transmissão. A primeira zona de proteção de distância, onde não há temporização intencional, é normalmente ajustada para cobrir de 80% a 90% da linha (MASON, 1956). A segunda zona, que possui temporização intencional, é ajustada para 20% além da linha subsequente (ou 120% do comprimento da linha a ser protegida), como mostra

a figura 2, onde A_1 representa a primeira zona de atuação do relé de distância, A_2 representa a segunda zona, e os pontos na linha horizontal representam as barras do sistema exemplificado.

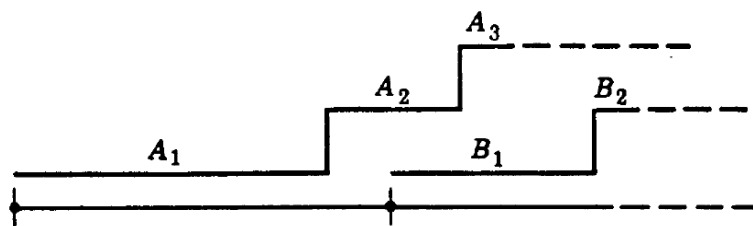


Figura 2. Ajuste de seletividade de zonas de proteção de linhas de transmissão.

Fonte: MASON, 1956.

2.1.3. PROTEÇÃO PRINCIPAL, PROTEÇÃO DE RETAGUARDA E PROTEÇÃO ALTERNADA

Para garantir a propriedade básica de confiabilidade para um sistema de proteção, há necessidade para maioria dos casos, da existência de uma segunda proteção, pelo menos, para detecção da mesma falha no componente ou região protegida (MAEZONO, 2007). A partir desse aspecto, surgem os conceitos de proteção principal, proteção de retaguarda e proteção alternada.

As análises de proteção principal, de retaguarda e alternada, neste trabalho, levarão em conta as definições utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que constam no módulo 20, submódulo 20.1 dos Procedimentos de Rede.

2.1.3.1. PROTEÇÃO PRINCIPAL

A proteção principal é definida como sendo um esquema de proteção composto por uma proteção unitária ou restrita, que tem como característica detectar e eliminar faltas seletivamente e sem retardo intencional de tempo no componente protegido, e outra gradativa ou irrestrita, que é caracterizada por detectar e eliminar faltas no componente protegido e oferecer proteção aos componentes adjacentes, essa por sua vez realizada tipicamente com retardos intencionais de tempo (ONS, 2009).

A proteção principal é a que deve atuar primeiro em caso de falta dentro da zona protegida (ALMEIDA, 2000). É ela que, por especificação de projeto, tem condição de detectar uma anormalidade para a qual foi ajustada, no componente protegido, obedecendo às propriedades seletividade, confiabilidade e velocidade (MAEZONO, 2007).

2.1.3.2. PROTEÇÃO DE RETAGUARDA

O esquema de proteção de retaguarda é o responsável por atuar no caso de falha eventual de outro sistema de proteção (ONS, 2009).

Por especificação de projeto, essa proteção deve detectar a mesma anormalidade que a proteção principal, porém, deve agir como sendo a segunda ou a terceira proteção de um sistema de potência. Para garantir a seletividade, a proteção de retaguarda utiliza temporização intencional para que se aguarde a atuação da proteção principal (MAEZONO, 2007).

Conforme o local em que a proteção de retaguarda estiver instalada em relação à proteção principal, pode-se classificá-la como retaguarda local e retaguarda remota.

- Retaguarda local: quando a proteção de retaguarda está instalada no mesmo local da proteção principal (ONS, 2009);
- Retaguarda remota: quando a proteção de retaguarda está instalada em local diferente daquele onde está o sistema de proteção a que se destina cobrir (ONS, 2009).

A figura 3, a seguir, mostra um exemplo de localização das proteções principal e de retaguarda.

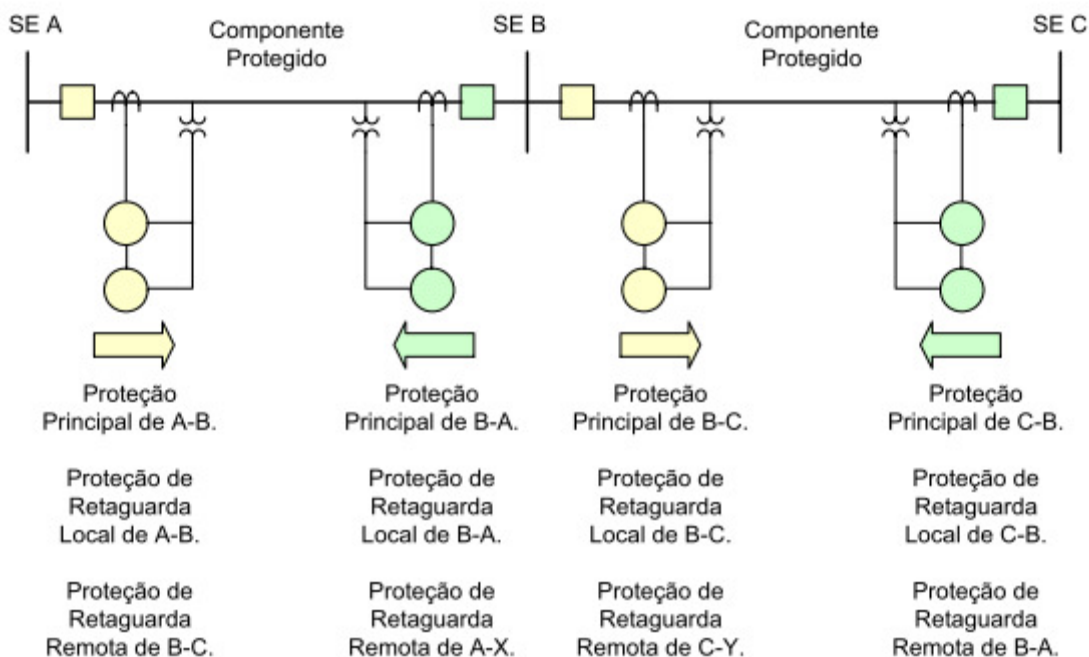


Figura 3 - Proteção Principal e Proteção de Retaguarda

Fonte: MAEZONO, 2007.

2.1.3.3. PROTEÇÃO ALTERNADA

A proteção alternada é definida da mesma forma como é definida a proteção principal: um esquema de proteção composto por uma proteção unitária ou restrita e outra gradativa ou irrestrita. A proteção alternada possui característica funcional idêntica à proteção principal, contudo é completamente independente a ela (ONS, 2009). Na prática, a proteção alternada pode ser entendida como um sistema de proteção idêntico ao sistema de proteção principal, com as mesmas funções e ajustes, porém com alimentação elétrica independente da proteção principal e medição de corrente e tensão em enrolamentos distintos dos enrolamentos de TC's e TP's utilizados para proteção principal.

2.2. RELÉ DE PROTEÇÃO

2.2.1. RELÉ DE PROTEÇÃO

O relé de proteção é definido pela ABNT como “dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado.” Para seu funcionamento e atuação adequados, um relé precisa estar constantemente recebendo informações sobre a situação elétrica do circuito que está protegendo, sob forma de corrente ou tensão, conforme o caso. Se a situação atual fugir as condições preestabelecidas ditadas por seus ajustes, dá-se a operação do relé da maneira que lhe for característica. A operação ocorre dentro de um tempo pré-ajustado, comandando a abertura dos disjuntores que correspondem ao isolamento da região com defeito. Além disso, os relés deixam alguma indicação de operação que servirá para identificá-lo pelo operador (COPEL, 2006).

2.2.2. HISTÓRICO DOS RELÉS

Os relés são considerados os elementos mais importantes do sistema de proteção. Eles são sensores que vigiam diuturnamente as condições de operação de um sistema elétrico (KINDERMANN, 1999). Por isso, esses equipamentos tiveram que passar por uma série de mudanças ao longo do tempo para conseguirem acompanhar a evolução das condições operacionais do sistema elétrico, de forma a garantir a confiabilidade, no que diz respeito ao seu funcionamento, e diminuir os danos causados por perturbações na rede elétrica.

Os primeiros relés conhecidos são os relés eletromecânicos. Eles são os relés tradicionais, os pioneiros da proteção, elaborados, projetados e construídos com predominância dos movimentos mecânicos provenientes dos acoplamentos elétricos e magnéticos. Os movimentos mecânicos acionam o relé, fechando os contatos correspondentes (KINDERMANN, 1999). Porém, esse relé traz como desvantagens a ausência de memória, o que dificulta a análise do tipo de falta,

horário de ocorrência e amplitudes da falta, e a insensibilidade a correntes e tensões de amplitudes pequenas.



Figura 4 - Relé Eletromecânico de Distância

Fonte: ABB, 2002.

Nos anos 70, foram introduzidos no sistema os relés estáticos (OLIVEIRA, 2004). Tais relés são construídos com dispositivos eletrônicos próprios e específicos aos objetivos da proteção. Nestes relés, não há nenhum dispositivo mecânico em movimento, todos os comandos e operações são feitos eletronicamente (KINDERMANN, 1999).

Os primeiros relés estáticos colocados em operação no sistema elétrico causaram muitos problemas, produzindo operações indevidas, sendo na época, em grande maioria, novamente substituídos pelos antigos eletromecânicos, por serem mais confiáveis. Estes problemas ocorreram principalmente porque os relés estáticos possuíam sensibilidade muito apurada, e, com o crescimento acentuado de cargas não lineares no sistema, e a larga utilização de equipamentos saturáveis, que são equipamentos elétricos produtores de distorção harmônica, os relés estáticos operavam indevidamente, comprometendo o sistema o qual o relé protege (RUFATO, 2006). Após a identificação dos problemas com os relés estáticos, com a

adequada colocação de filtros, estes problemas foram em parte resolvidos (KINDERMANN, 1999).



Figura 5 - Relé Estático de Distância

Fonte: ABB, 2005.

Porém, a era dos relés estáticos teve um fim bastante precoce devido ao rápido avanço da tecnologia. Foi aí que se tornou possível a utilização de relés digitais. A proteção digital surgiu quando vários pesquisadores desenvolveram diferentes algoritmos para relés de proteção (ALMEIDA, 2000).

Os relés microprocessados são relés eletrônicos gerenciados por microprocessadores, ou seja, não há necessidade de variação física dos parâmetros dos elementos do circuito (*hardware*), mas todos os comandos são efetuados pelo *software* (KINDERMANN, 1999). Esses relés trazem muitas vantagens em relação aos anteriores a ele, como por exemplo, automonitoramento (autodiagnóstico), detecção e diagnóstico de faltas, melhor exploração do potencial das funções de proteção, compartilhamento dados através de redes de comunicação, melhor interface homem x máquina e redução das interferências do meio ambiente nas condições operativas dos equipamentos. Porém, ele também tem algumas desvantagens, como vida útil reduzida (10 anos) quando comparado com um relé eletromecânico (mais de 30 anos) (RUFATO, 2006), *hardware* que avança rapidamente, o que os torna obsoletos, e suscetibilidade a interferência eletromagnética (ALMEIDA, 2000). O funcionamento desse tipo de relé está representado pelo diagrama de blocos mostrado na figura 6, a seguir:

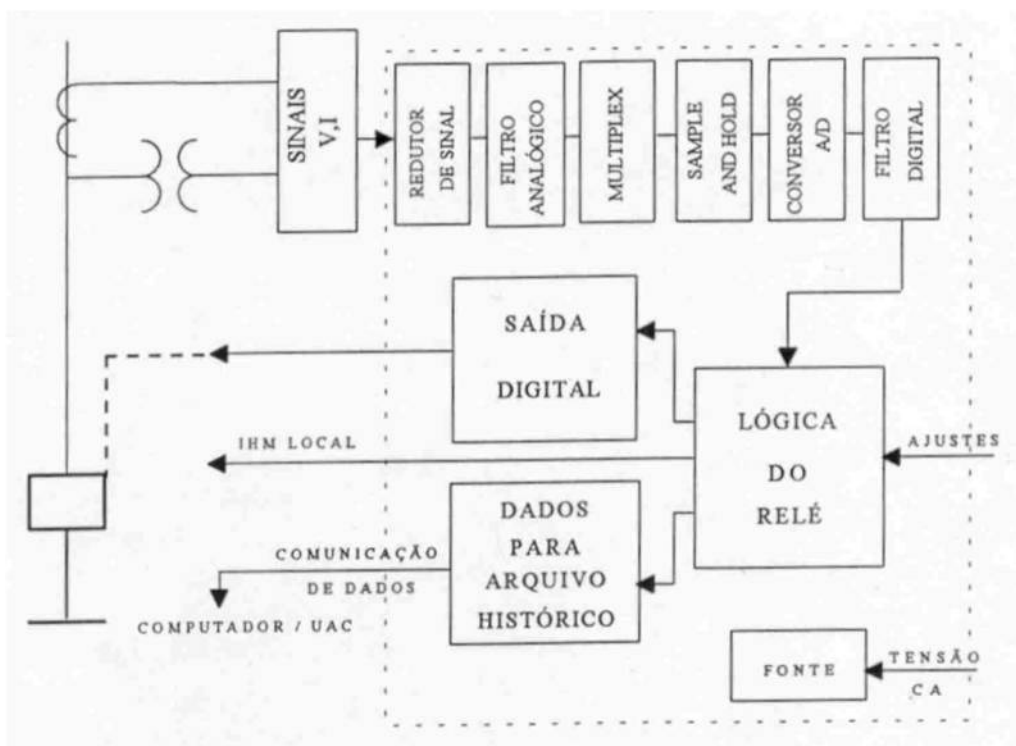


Figura 6 - Diagrama Funcional de Blocos - Proteção Digital

Fonte: COPEL, 2002.

No relé entram os sinais de correntes e tensões, um por fase, derivados de transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP). Estes transformadores sendo do tipo convencional fornecem corrente da ordem de vários Amperes e Tensão da ordem de 115V, valores estes incompatíveis com dispositivos eletrônicos. Segue-se pois que estes sinais precisam ser reduzidos para um nível da ordem de 20mA, 5V, por transformadores auxiliares que nessa função executam também o desacoplamento físico do circuito de campo com o circuito do relé. O sinal passa por filtros analógicos para eliminar frequências indesejáveis nos sinais para a aplicação. Os sinais filtrados passam então por um multiplexador que seleciona um canal por vez para o circuito "sample and hold" (amostragem e retenção) e para a conversão analógico-digital. Os blocos seguintes do relé são o filtro digital e a lógica do relé, sendo que o primeiro realiza a filtragem do sinal através de algoritmos específicos e o segundo realiza a combinação lógica dos sinais necessária para a execução da função de proteção programada.

Por último, deve ser notado que o resultado dos cálculos efetuados no relé, se expressa através de uma saída digital (contato que se fecha podendo ser usado

para abertura do disjuntor), e dados que são comunicados para o sistema digital, e para equipamentos de sinalização local no relé. Portanto, o relé digital consiste em um PLC dedicado para aquisição de sinais, processamento de um algoritmo digital com a função de proteção e atuação sobre os disjuntores. Graças à característica de poder ser programado, os relés digitais são muito mais versáteis e poderosos que os relés eletromecânicos ou eletrônicos convencionais (COPEL, 2002).

Neste trabalho será utilizado o mesmo critério utilizado em Rufato (2006), onde as denominações “relés digitais” e “relés microprocessados” são utilizadas para o mesmo tipo de equipamento.

Nota-se, a partir das explanações do histórico dos relés, que a função realizada tanto por relés eletromecânicos, eletrônicos ou digitais é a mesma, ou seja, um relé de impedância eletromecânico irá operar em condições muito semelhantes ao relé de impedância microprocessado. Desta forma, utilizar-se-á de exemplos de relés eletromecânicos para a explicação do funcionamento e atuação dos relés de distância.

2.3. RELÉ DE DISTÂNCIA

A utilização de relés de distância na proteção de linhas de transmissão é recomendada para sistemas de alta (115 kV a 230 kV) e extra alta tensão (345 kV a 765 kV) (BLACKBURN et al, 2007), quando se exige maior velocidade na eliminação de defeitos, para garantir a estabilidade do sistema. O desempenho destes relés praticamente não é afetado pelas variações dos níveis de curto-circuito, sendo portanto mais imunes as mudanças de configuração do sistema que os relés de sobrecorrente (COPEL, 2002).

A proteção de distância é realizada por uma família de relés de distância que são sensíveis a uma relação entre a tensão e a corrente, isto é, são sensíveis a impedância ou a uma de suas componentes. O nome “distância” se justifica, considerando que a impedância não deixa de ser uma medida da distância ao longo de uma linha de transmissão (STEMMER, 1977).

Os relés de distância, denominados pelo número 21 pela tabela ANSI, representam uma classe de relés que são conhecidos por:

- Relé de impedância;
- Relé de admitância ou Mho;

- Relé de reatância (ALMEIDA, 2000).

2.3.1. RELÉS DE IMPEDÂNCIA

De forma geral, o princípio de funcionamento de um relé de impedância pode ser representado pela figura 7, a seguir:

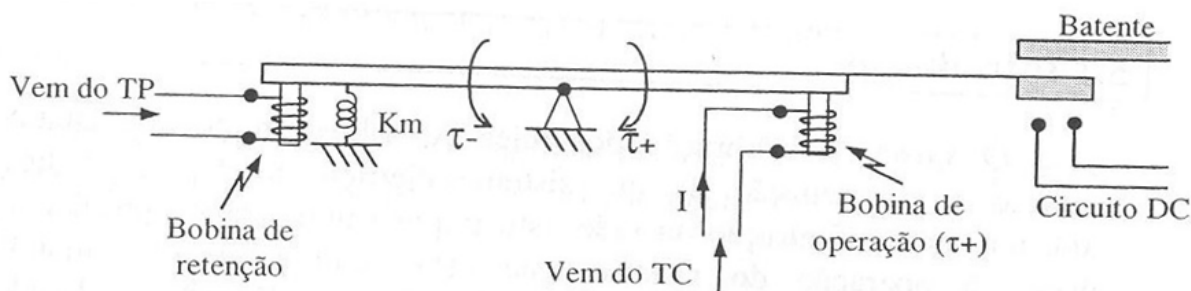


Figura 7 – Princípio de funcionamento de um relé de impedância

Fonte: KINDERMANN, 1999.

Neste esquema, as grandezas que agem no braço do relé são a tensão e a corrente. A tensão é considerada uma grandeza de restrição, pois produz torque negativo, isto é, torque contrário à ação de fechamento do relé. Já a corrente é o oposto. Ela é considerada uma grandeza de operação, pois produz torque positivo, o que é favorável ao fechamento do contato de relé (KINDERMANN, 1999). Graças a esse funcionamento, o relé de impedância é considerado um relé de sobrecorrente com retenção por tensão (MELLO, 1979).

2.3.1.1. PLANO R-X

As características de atuação dos relés de distância são representadas no plano R-X (plano de impedâncias), onde a resistência R é a abcissa e a reatância X é a ordenada (BLACKBURN et al, 2007). Isto é importante tendo em vista que mostram os valores uma impedância, facilitando, portanto, na hora em que se está se ajustando os alcances (zonas de atuação) dos mesmos.

Os ângulos das impedâncias medidas por esses relés dependem dos sentidos do fluxo de potências ativas e reativas nas linhas protegidas. Dessa forma,

as impedâncias medidas se apresentarão em um dos quadrantes do plano R-X representado na figura 8 (ALMEIDA, 2000).

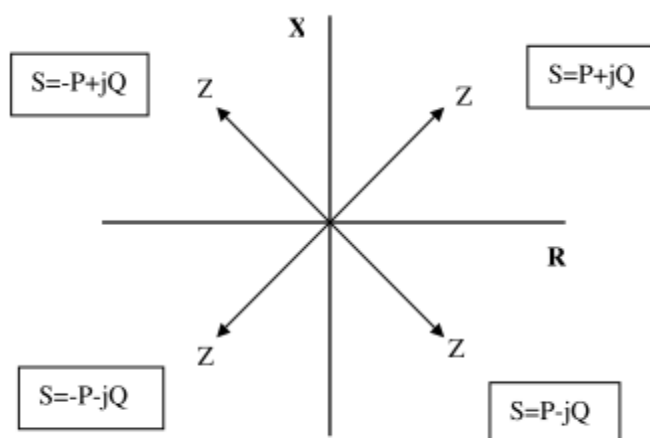


Figura 8 - Localização da Impedância Z no Plano R-X

Fonte: ALMEIDA, 2000.

A característica de atuação de um relé de distância do tipo impedância é representada por uma circunferência cuja origem coincide com o centro do sistema de eixos, conforme ilustra a figura 9 (ALMEIDA, 2000).

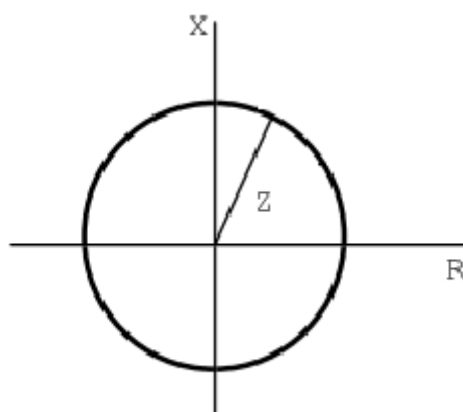


Figura 9 - Característica do Relé Impedância

Fonte: ALMEIDA, 2000.

Na região de fronteira da circunferência e fora dela é a região de não operação do relé. Dentro da circunferência é considerada a região de operação do relé. Ou seja, impedâncias menores que o raio da circunferência do plano R-X, que

é o módulo da impedância medida do sistema, são caracterizadas como faltas no sistema de potência, e farão com que o relé atue.

Porém, como pode ser observada na figura 9, a impedância de falta poderá estar localizada em qualquer quadrante do plano R-X, ou seja, o relé é não direcional. Para que se garanta que o relé atue apenas no caso de falta a sua jusante, deve-se utilizar um relé direcional (número ANSI 67) em conjunto com o relé de distância do tipo impedância, de forma que o plano R-X desta proteção passa a ser o mostrado na figura 10 (KINDERMANN, 1999).

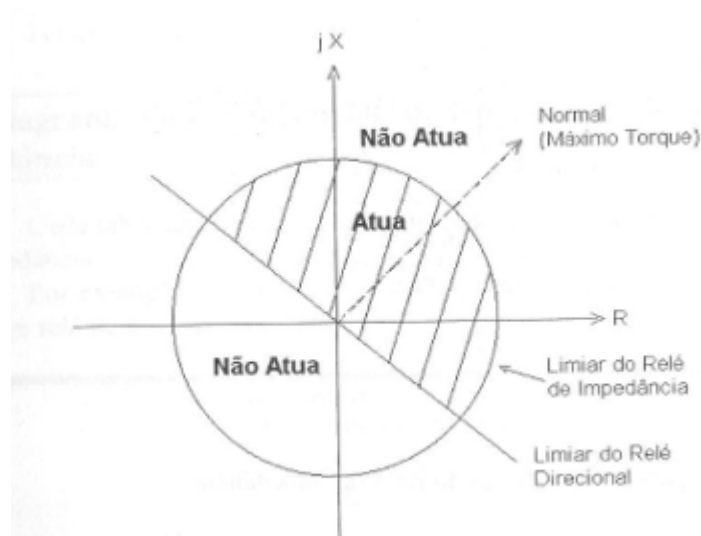


Figura 10 - Característica do Acoplamento de Relé de Distância tipo Impedância e do Relé Direcional

Fonte: KINDERMANN, 1999.

2.3.1.2. ZONAS DE ATUAÇÃO - REGULAGEM E TEMPORIZAÇÃO

Normalmente, os relés de distância possuem três zonas de atuação, sendo que cada zona possui uma temporização intencional, com exceção da primeira zona. Os itens a seguir mostram valores típicos de temporização e alcance de cada zona.

- **1ª zona:** alcance de cerca de 80% da linha de transmissão a jusante do relé. Temporização instantânea;
- **2ª zona:** alcance de 100% da linha de transmissão a jusante mais cerca de 50% da linha de transmissão seguinte. Temporização de 0,15 a 0,5 segundo;

- **3ª zona:** alcance de 100% da linha de transmissão a jusante mais 100% da linha de transmissão seguinte. Temporização de 0,4 a 1,0 segundo.

As figuras 11 e 12, a seguir, mostram, respectivamente, o plano R-X com as três zonas de proteção e o diagrama unifilar do sistema protegido, com indicação do alcance de cada zona de atuação.

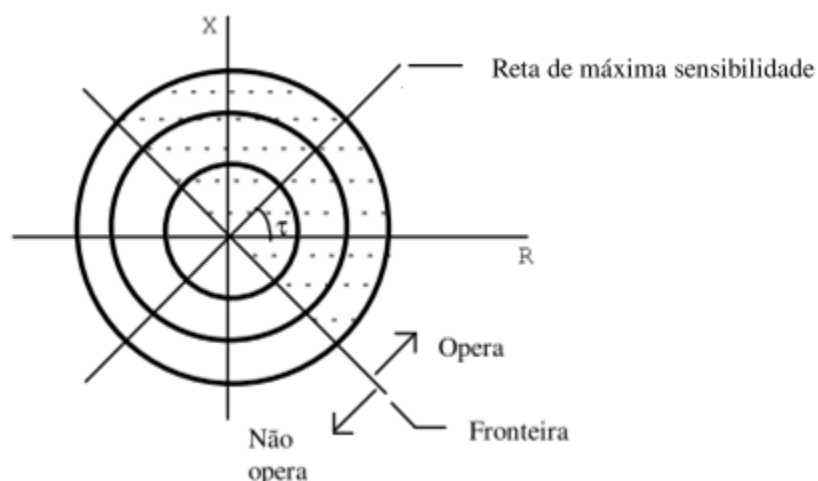


Figura 11 - Característica das três Zonas de Atuação do Relé

Fonte: ALMEIDA, 2000.

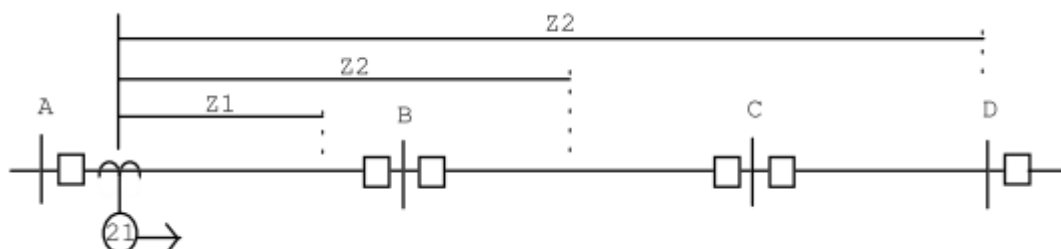


Figura 12 - Alcance das três Zonas de Atuação do Relé de Impedância

Fonte: ALMEIDA, 2000.

2.3.2. RELÉS DE ADMITÂNCIA OU MHO

Este tipo de relé de distância segue a mesma filosofia do relé de impedância. A grande diferença, e também vantagem, deste relé em relação ao mostrado no item anterior é a sua natureza direcional (KINDERMANN, 1999), o que permite afirmar que este relé é basicamente um relé direcional com retenção de tensão (MELLO,

1979). Novamente, a retenção de tensão significa que a tensão elétrica produz o torque de restrição (não operação), ao passo que a corrente provoca um torque de operação. O princípio de funcionamento do relé eletromecânico de admitância está baseado em um cilindro de indução, no qual atuam a corrente e a tensão provocando os efeitos citados anteriormente (KINDERMANN, 1979).

Outras características a serem destacadas são o fato de este relé poder ser utilizado em um sistema em anel devido a sua direcionalidade (KINDERMANN, 1999) e ser indicado para a proteção de linhas longas, atuando para faltas fase-fase (COPEL, 2002).

2.3.2.1. PLANO R-X

A representação da característica de atuação deste relé no plano R-X é uma circunferência que tangencia a origem do sistema de eixos, conforme ilustra a figura 13. Observando tal figura, pode-se notar a natureza direcional do relé Mho (ALMEIDA, 2000).

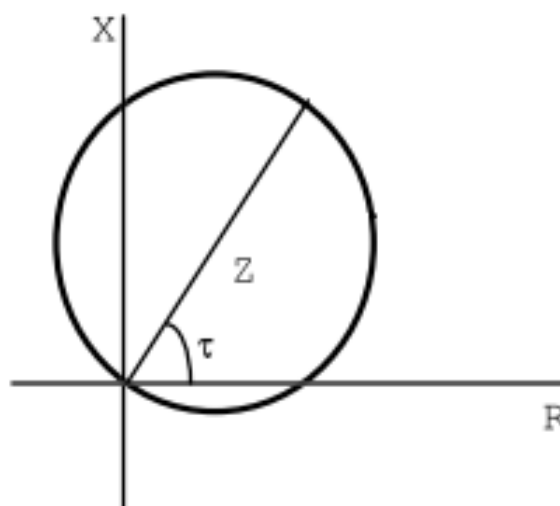


Figura 13 - Característica do Relé Mho.

Fonte: ALMEIDA, 2000.

Na região de fronteira da circunferência e em sua área externa se localiza a chamada região de não operação. Já na parte interna da circunferência está a região de operação do relé (ALMEIDA, 2000).

2.3.2.2. ZONAS DE ATUAÇÃO – REGULAGEM E TEMPORIZAÇÃO

De forma semelhante ao relé de impedância, o relé mho também possui, de forma geral, três zonas de atuação.

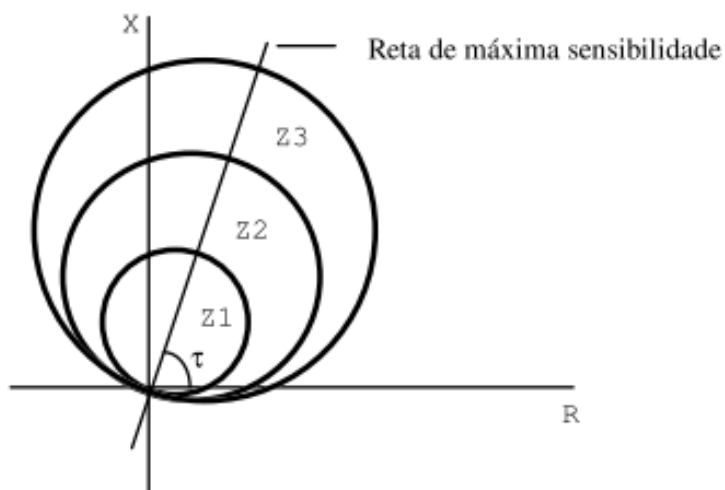


Figura 14 – Característica das três Zonas de Atuação do Relé Mho

Fonte: ALMEIDA, 2000.

Os parâmetros de ajuste de alcance e temporização de cada zona são feitos da mesma forma que o relé de impedância, não sendo necessário repeti-los nesta seção.

2.3.3. RELÉ DE REATÂNCIA

Este relé tem uma característica de operar somente com sensibilidade na reatância do sistema (KINDERMANN, 1999), sendo considerado um relé de sobrecorrente com retenção direcional (MELLO, 1979). Porém, a natureza direcional deste relé não é inerente a ele. Ela existe porque junto a ele é utilizada uma unidade mho, a qual é conhecida como unidade de partida do relé de reatância (STEMMER, 1977).

2.3.3.1. PLANO R-X

O plano R-X deste relé se caracteriza por uma reta paralela ao eixo R, conforma mostrado na figura 15.

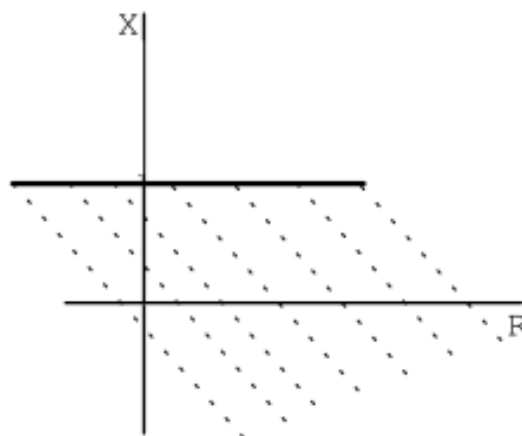


Figura 15 - Característica do Relé de Reatância

Fonte: ALMEIDA, 2000.

A região de fronteira da reta onde X é constante e acima dela é a região de não-operação do relé. De modo contrário, a região abaixo da reta é a região de operação do dispositivo. O fator significativo nesta característica é que a componente resistiva da impedância do sistema não possui efeito na operação do relé; o relé responde somente ao valor da reatância (MASON, 1956).

Conforme pode ser observado na figura 15, o relé de reatância não possui característica direcional. Além disso, relés do tipo reatância não possuem a facilidade do relé tipo impedância de utilizar uma unidade direcional simples (número ANSI 67), pois dessa forma o relé atuaria para situações normais perto ou igual ao fator de potência unitário (MASON, 1956). Relés de reatância requerem unidades direcionais com restrição de tensão, as quais são normalmente chamadas de “unidades de partida”. A unidade direcional utilizada para tal proposição é, de forma geral, uma unidade tipo mho (MASON, 1956).

Sendo assim, o emprego do relé de reatância em conjunto com o mho o torna direcional pelo fato de que o relé mho tem essa natureza e também é insensível à corrente de carga, o que não interfere na operação do relé de reatância. (MELLO,

1979). A figura 16 abaixo mostra o efeito do relé Mho no plano R-X do relé de reatância, deixando-o direcional.

Nota-se, de acordo com a figura 16, que o relé de reatância combinado com a unidade direcional mho possui como região de operação o segmento circular da circunferência que delimita os valores de impedância de atuação da unidade mho com a reta secante que é formada pelo valor de reatância do relé de reatância, mostradas pelas regiões T_1 e T_2 .

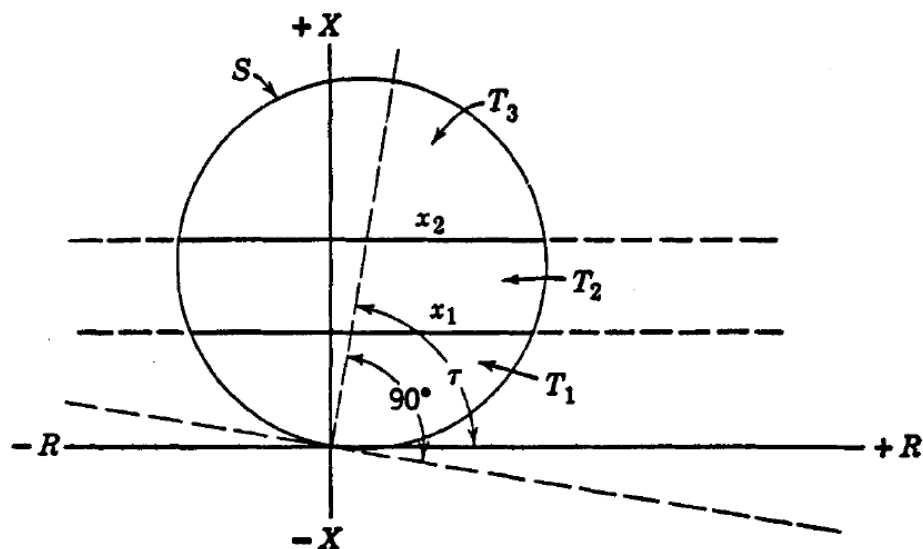


Figura 16 - Relé Mho combinado com Relé de Reatância.

Fonte: MASON, 1956.

2.3.3.2. ZONAS DE ATUAÇÃO – REGULAGEM E TEMPORIZAÇÃO

Observa-se, conforme a figura 16, que o relé mho possui duas funções quando utilizado em conjunto com o relé de reatância: proporciona direcionalidade e constitui na terceira zona de atuação do relé, inerentemente direcional. A figura 17 mostra as duas zonas de atuação do relé de reatância e a unidade de partida Mho, que por sua vez forma a terceira zona de atuação do relé.

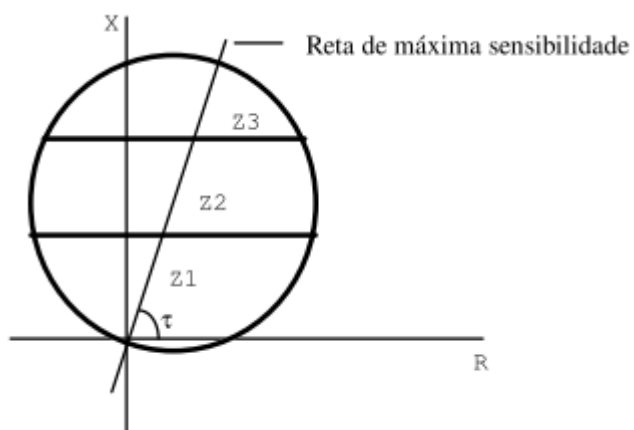


Figura 17 - Característica das duas Zonas de Atuação do Relé de Reatância e a Unidade de Partida Mho

Fonte: ALMEIDA, 2000.

Os valores de temporização e ajuste de alcance das zonas deste relé são semelhantes aos valores típicos adotados para o relé de impedância, não necessitando repeti-los nesta seção.

3. RELÉ SEL-421

3.1. O EQUIPAMENTO

O SEL-421 é um controlador de bay com sistema para proteção, automação e controle de linhas de transmissão de qualquer nível de tensão, compensadas ou não e para até dois disjuntores de uma mesma linha.



Figura 18 - Relé SEL-421

Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories, 2011



Figura 19 - Relé SEL-421 em operação na subestação Uberaba

Fonte: Autoria própria, 2011.

Ele possui as seguintes funções de proteção:

- 50/51 - Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G - Sobrecorrente residual instantânea e temporizada;
- 50/51Q (46) - Sobrecorrente instantânea e temporizada de seqüência negativa;
- 21 - Distância de fase, cinco zonas tipo Mho e cinco zonas tipo quadrilateral;
- 21G - Distância de neutro, cinco zonas tipo Mho e cinco zonas tipo quadrilateral;
- 67G - Sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente e tensão);
- 67Q - direcional de seqüência negativa (polarizado por tensão);
- 85 - Esquemas de controle ou teleproteção (PUTT, POTT, DCUB, DCB, DTT, etc ou lógica programável);
- 78/68 - Disparo e bloqueio por oscilação de potência;
- 79 – Religamento automático monopolar (2 tentativas) ou tripolar (quatro tentativas) para até dois disjuntores;
- 25 - Verificação de sincronismo para até dois disjuntores;
- 27/59 - Subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- 59G - Sobretensão de neutro;
- 59Q - Sobretensão de seqüência negativa;
- 50/62BF - Falha de disjuntor para até dois disjuntores;
- 60 - Perda de potencial;
- 81 - Sub/Sobrefreqüência, taxa de variação de freqüência df/dt ;
- 49 – sobrecarga por imagem térmica;
- 49T – Elemento térmico com medição de temperatura através de RTD's - SEL 2600A (opcional);
- 87V – diferencial de tensão para banco de capacitores de AT (por lógica).

A figura 20 mostra o diagrama funcional deste relé, com suas ligações em um sistema de transmissão.

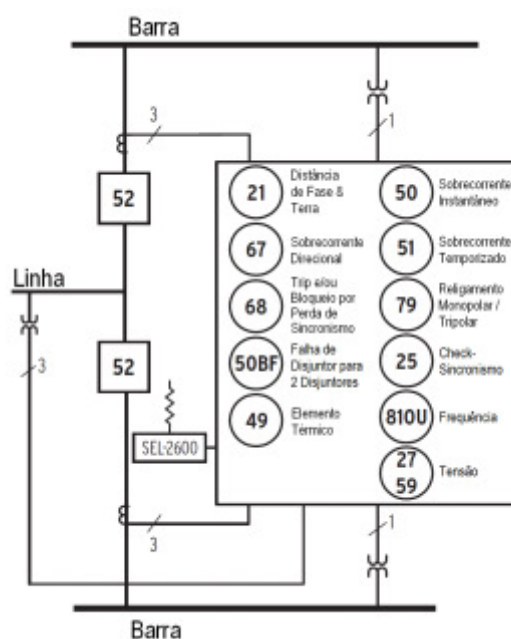


Figura 20 - Diagrama Funcional do Relé SEL-421

Fonte: Datasheet SEL-421, 200-.

Na sequência, são citadas as características básicas do relé em questão.

I. CONTROLADOR DE BAY

- Arranjos de bay pré-configurados;
- Controle local de até 2 disjuntores;
- Indicação de estado de até 3 disjuntores;
- Controle e indicação de estado de até 10 seccionadoras;
- Junto a tela do mímico pode ser configurado até 6 medições analógicas;
- Disjuntores, seccionadoras, barramento e o próprio bay podem receber nomes;
- Funções de controle protegidas por senha;
- Modo Local/Remoto;
- Solicitação de confirmação de comando;
- Alarme de operação para disjuntores e seccionadoras.

II. MEDIÇÃO

- Correntes de fase (I_a, I_b, I_c) para as 2 entradas de corrente (2 disjuntores) medidas separadamente ou combinadas, de neutro (I_g) e correntes de sequência (I_1, I_2, I_0);
- Tensões de fase (V_a, V_b, V_c) para as 2 entradas de tensão, tensões de sequência ($V_1, 3V_2, 3V_0$);
- Potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Fator de potência por fase e trifásico;
- Medição *true* RMS (valor eficaz) para corrente, tensão, potência ativa, potência aparente e fator de potência;
- Demanda de corrente de fase, de neutro e de sequência negativa;
- Demanda de potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Energia ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Registro de valores máximos e mínimos de grandezas analógicas;
- Medição sincronizada de fasores e possibilita a medição de grandezas fasoriais entre subestações com precisão de 0,25° na medição dos ângulos, substitui PMU's.

III. MONITORAMENTO

- Oscilografia com frequência de amostragem de 8 kHz (até 6 s), 4 kHz (até 9 s), 2 kHz (até 12 s) ou 1 kHz (até 15 s). Tamanho selecionável entre: 0,25 s, 0,5 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s ou 5 s (dependente da frequência de amostragem);
- Conexão da entrada IRIG-B ao receptor de GPS, garante que todos os relés estarão amostrando de forma sincronizada, permitindo uma análise sistêmica de ocorrências;
- Sequência de eventos, com capacidade de armazenar os últimos 1000 eventos;
- Localizador de faltas (FL), indicação em km ou %;
- Monitoramento do sistema de alimentação auxiliar CC (para 2 bancos de baterias), fornecendo alarme para sub ou sobretensão, falha a terra, oscilação de tensão (*ripple*);

- Monitoramento de desgaste dos contatos do disjuntor por pólo;
- Contador de operações;
- Monitoramento das bobinas do disjuntor;
- Monitoramento de discrepância de pólos, pólo Scatter, tempo de operação elétrico, tempo de operação mecânico, tempo de inatividade, tempo de operação do motor, corrente interrompida, com programação de valores limites para propósitos de alarme;
- Monitoramento térmico de linhas de transmissão.

IV. CONTROLE

- Número de entradas binárias e contatos de saída:
 - STANDARD: 7 entradas e 8 saídas digitais sendo 3 de alta capacidade de interrupção de corrente;
 - Possibilidade de expansão com uma ou duas placas de I/O adicionais conforme item 8; (opcional)
- 8 botões frontais exclusivos para programação de funções para controle, tais como: abrir/fechar o disjuntor e/ou seccionadoras, local/remoto, habilita / desabilita religamento / teleproteção / disparo monopolar, etc.
- Duas regiões para programação de lógicas (SELogic), região de proteção e região de automação;
- Programação através de equações lógicas (SELogic), região de proteção:
 - 64 relés auxiliares, 48 temporizadores, 32 biestáveis, 32 contadores, 64 equações matemáticas.
- Programação através de equações lógicas (SELogic), região de automação:
 - 256 relés auxiliares, 32 temporizadores, 32 biestáveis, 32 contadores, 256 equações matemáticas.
- Todas as variáveis analógicas estão disponíveis para elaboração de lógicas com a utilização de comparadores e operadores matemáticos, desta forma pode-se criar novas funções de proteção/controle ou adequar as existentes, o que permite a utilização do relé em sistemas com requisitos complexos, tais como funções de verificação de sincronismo e religamento em que se exige extrema flexibilidade e precisão.
- Programação de até 32 mensagens para serem exibidas no display;

- 6 grupos de ajustes;
- Controle de torque das funções de sobrecorrente;
- 30 – Anunciador;
- 69 – Inibição de fechamento;
- 86 – Retenção de sinal de disparo;

V. INTEGRAÇÃO

- 1 porta serial EIA-232 frontal, 3 portas seriais EIA-232 traseiras e 1 cartão Ethernet SEL-2701(opcional);
- Sincronização horária por IRIG-B, sinal de 1 kPPS garante precisão horária de 5 microsegundos;
- Protocolos DNP3.0, ASCII, Compressed ASCII, Fast Meter, Fast SER, Fast Operate e LMD, com cartão Ethernet opcional SEL-2701 UCA2, IEC61850 e DNP3 LAN/WAN;
- Conexão de RTD's através do módulo com 12 RTD's - SEL 2600A (opcional).

VI. DEMAIS CARACTERÍSTICAS

- 6 entradas de corrente e 6 entradas de tensão;
- Software amigável para parametrização (AcSELeator®);
- Software de alarme de oscilografia, com a possibilidade de abrir múltiplas oscilografias, sincronizadas no tempo, na mesma tela;
- Contatos Standard: capacidade de condução contínua 6A, capacidade de estabelecimento de condução 30A, capacidade de interrupção 0,3A (125Vcc, L/R = 40ms);
- Contatos de alta capacidade de interrupção (10A, 125Vcc, L/R=40ms);
- Contatos de alta capacidade de interrupção e alta velocidade (10A, 125Vcc, L/R=40ms, tempo de operação = 10 microsegundos)
- Tensão auxiliar: 24/48 Vcc, 48/125 Vcc ou 120 Vca, 125/250 Vcc ou 120/230 Vca;

- Possibilidade de expansão do número de I/O's, com a instalação (no campo) de novas placas I/O's, permitindo ampliações futuras, desde que o relé tenha sido adquirido com slots extras para instalação de placas extras;
- Temperatura de operação -40° a $+85^{\circ}$ C.

3.2. SOFTWARE DE AJUSTE - AcSELerator® Quickset

O software AcSELerator® Quickset – SEL-5030 é uma ferramenta utilizada para parametrizar os ajustes de todos os relés da SEL, portanto, não é um software exclusivo para ajuste do relé SEL-421, podendo ser utilizado em outros relés.

O AcSELerator® Quickset pode ser utilizado para configurar as funções de proteção necessárias, analisar os registros de faltas através das respostas dos elementos do relé, visualizar os níveis de harmônicos e fasores em tempo real, monitorar o sistema de energia em que está instalado, executar comandos através de comunicação serial e desenvolver ajustes off-line.

4. ENSAIOS E RESULTADOS

Neste capítulo serão mostrados os ajustes feitos no relé para cada função ensaiada, equipamentos utilizados e resultados obtidos através das oscilografias.

4.1. EQUIPAMENTOS

O ensaio foi realizado utilizando uma mala de teste do modelo CMC-356 do fabricante OMICRON.



Figura 21 – Mala de testes OMICRON CMC-356.

Fonte: OMICRON, 2012.

Conforme mencionado no capítulo anterior, o relé utilizado é o SEL 421, com chassis 4U para montagem em painel.

Ambos os equipamentos, relé e mala de testes, podem ser alimentados com tensão de 127/220 V. Nos ensaios realizados, eles foram alimentados com tensão de 220 V.

É importante ressaltar que a Universidade não dispõe da mala de testes citada, portanto, os ensaios tiveram que ser realizados em um laboratório da COPEL.

4.2. SOFTWARES

Os softwares utilizados foram o OMICRON Quick CMC e o AcSELErator® QuickSet. O primeiro é o software da mala de testes e é utilizado no ensaio das funções ajustadas no relé, ou seja, é através dele que são enviados os sinais analógicos de tensão e corrente para teste do relé. O segundo é o software da Schweitzer e é utilizado para configurar o relé, estabelecendo uma comunicação entre o computador e o relé e enviando a ele os ajustes feitos pelo operador.

4.3. CONFIGURAÇÕES INICIAIS

Os ajustes das funções são feitos no software AcSELErator® QuickSet, disponível no site da Schweitzer Engineering Laboratories, e para isso não é necessária a comunicação entre o relé e o computador. Esta comunicação é utilizada para envio de dados do computador para o relé e vice versa, portanto, podem-se fazer os ajustes no software, salvar as alterações e somente depois estabelecer comunicação com o relé para envio dos ajustes.

Ao abrir o programa, a tela inicial mostra várias opções para configuração e ajuste de funções.

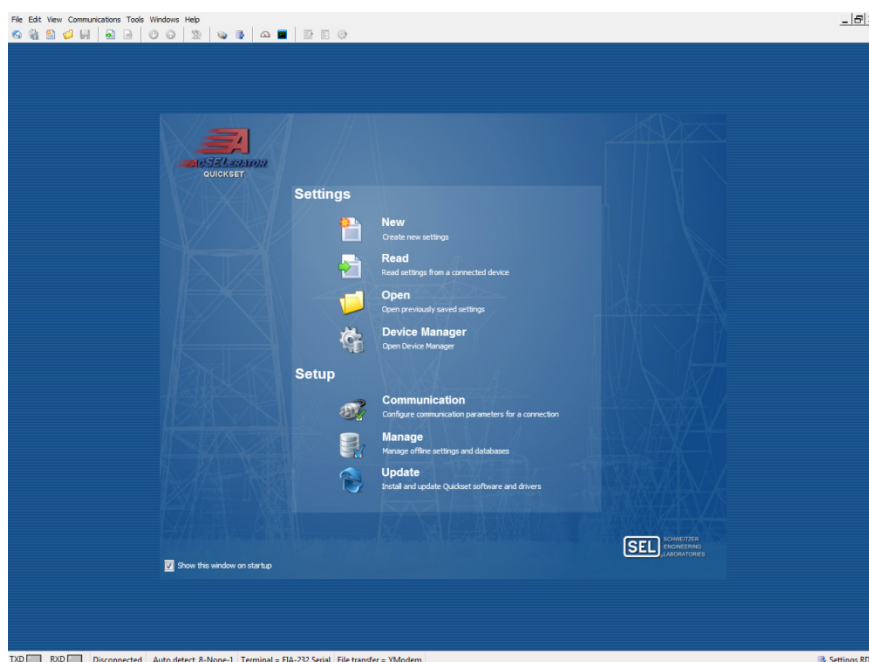


Figura 22 - Tela inicial do software AcSELErator®.

Fonte: Autoria própria.

Para iniciar uma nova parametrização, deve-se clicar em *New* e então o programa abrirá uma janela com opções de relés com seus modelos e versões, denominada “*Settings Editor Selection*”. Basta selecionar o relé desejado e clicar em *ok*.

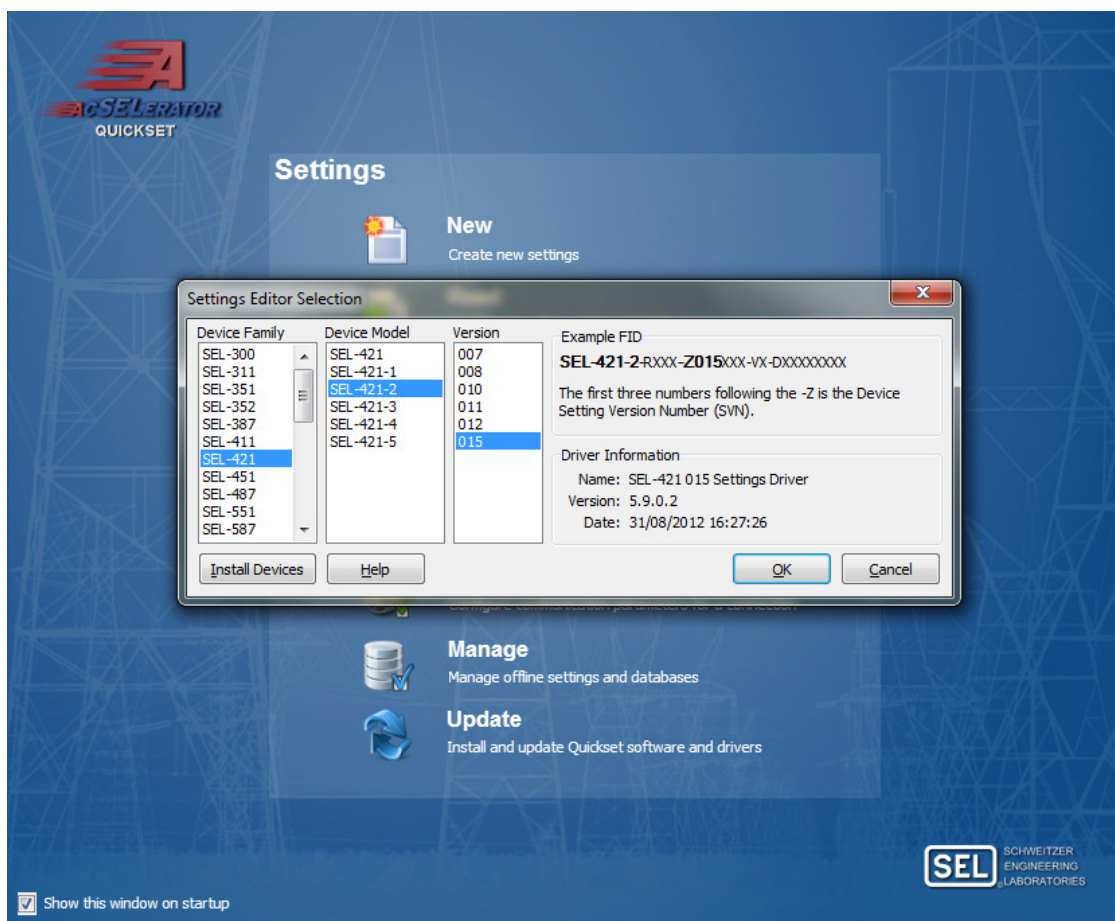


Figura 23 - Settings Editor Selection.

Fonte: Autoria Própria.

A seguir, é mostrada uma nova janela, intitulada “*Device Part Number*”, na qual deve ser colocado o *Part Number* (P/N) do relé. Esse número é encontrado na parte traseira do relé ou em *display* no menu *Relay Configuration*. No caso do relé em estudo, o P/N é 042126152XXAXH66X6XXX.

Device Part Number

Part Number: 0421 2 6 1 5 2 X X A X H 6 6 X 6 X * *

Firmware
2 = Standard

Power Supply
6 = 125/250 Vdc or 120/240 Vac

Connector Type
1 = Screw Terminal Block

Secondary Inputs
5 = 300V Phase - Neutral Maximum (Wye), 5 Amp Phase

Serial Communications Protocols
2 = DNP3 Level 2 Slave Plus Dial-out and Virtual Terminal (plu:)

Ethernet Communications Protocols
X = None

Ethernet Connection Options
N/A

Mainboard I/O Configuration
A = Standard, With 2 High-Current Interrupting Outputs, 3 Stan

Mainboard Input Voltage
N/A

Mounting
H = Horizontal Rack Mount

Chassis
6 = 5U, Up To Two Additional I/O Boards

Interface Board # 1 for 4U or 5U Chassis
6 = 8 Independent Inputs, 13 High-Current Interrupting Fom A,

Interface Board # 1 Input Voltage
N/A

Interface Board # 2 for 5U Chassis Only
6 = 8 Independent Inputs, 13 High-Current Interrupting Fom A,

Interface Board # 2 Input Voltage
N/A

OK

Figura 24 - Device Part number.

Fonte: Autoria Própria.

A partir dessa etapa começa o processo de ajuste das funções desejadas. Caso os ajustes já tenham sido feitos e deseja-se abri-los novamente, deve-se clicar em *Open* no menu inicial do programa. Fazendo isso, aparece uma nova janela chamada “*Select settings to open*” com uma lista dos ajustes feitos e salvos anteriormente, os quais podem ser abertos selecionando o ajuste desejado e clicando em *ok*.

A comunicação com o relé é feita ao clicar em *Communication* na tela inicial. Com isso, é aberta uma janela denominada “*Communication Parameters*” onde é possível selecionar o tipo de comunicação (serial, network ou modem), e vários outros parâmetros, como, por exemplo, a velocidade de envio e recebimento de dados. O dispositivo utilizado, neste caso, foi um cabo conversor USB-Serial.

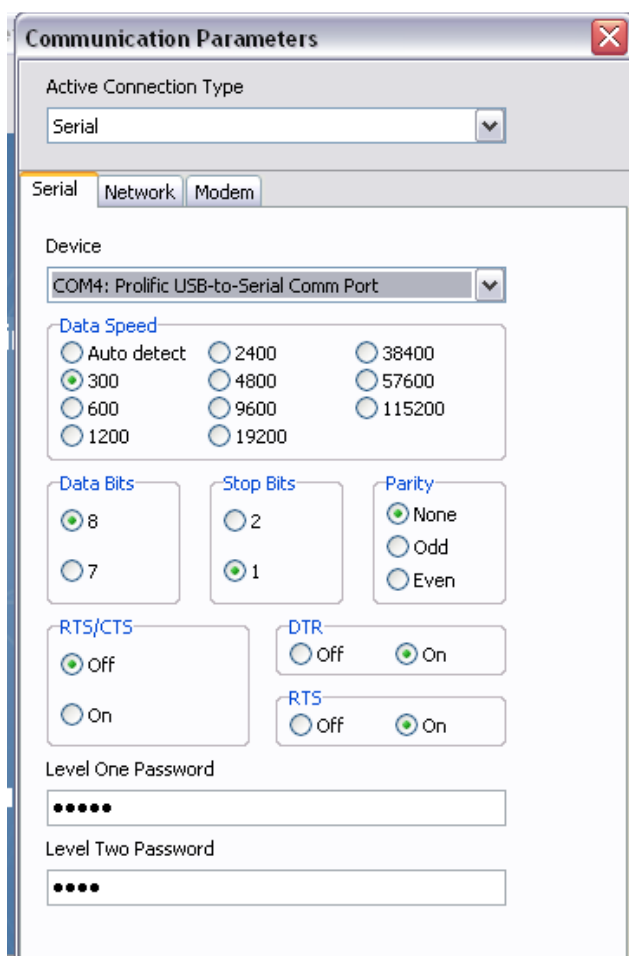


Figura 25 - Communication Parameters

Fonte: Autoria Própria.

4.4. FUNÇÃO 21

4.4.1. AJUSTES

Inicialmente, o programa mostra uma lista de configurações que podem ser feitas no relé, as quais serão feitas apenas em algumas funções. A primeira configuração é feita em “*General Global Settings*”, onde são estabelecidas, principalmente, a sequência de fases, a frequência e as condições de falta, conforme mostrado a seguir.

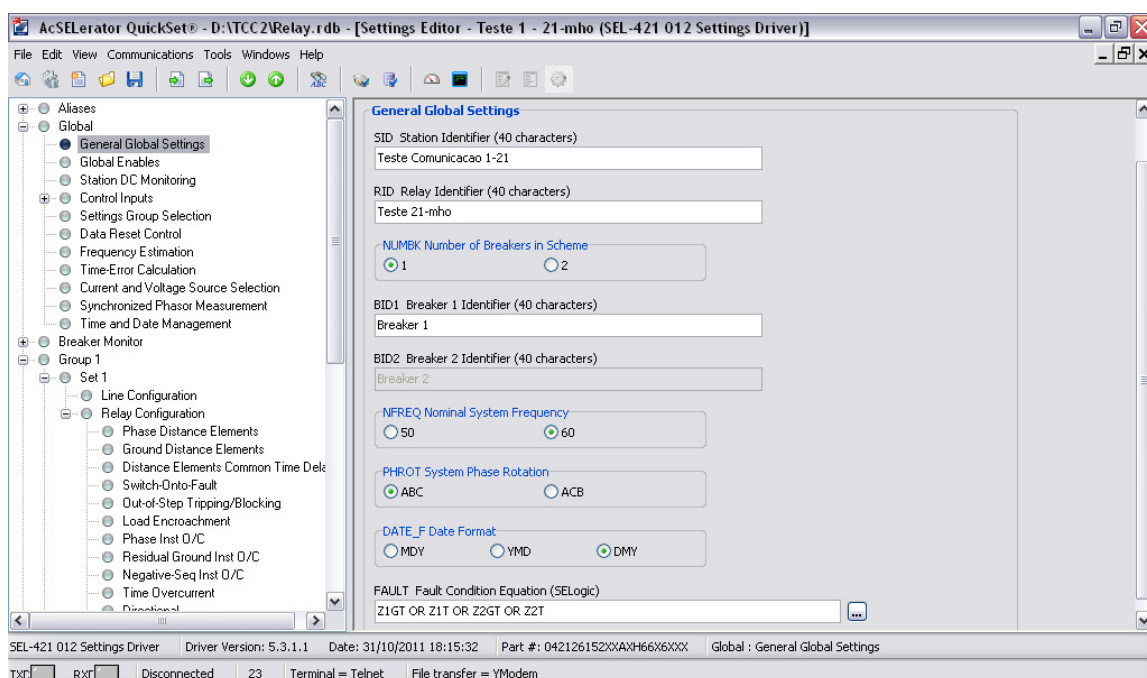


Figura 26 - General Global Settings.

Fonte: Autoria Própria.

Em “*Line Configuration*”, são ajustadas as relações de transformação dos TC’s e TP’s e as magnitudes e ângulos das impedâncias de linha de sequência positiva e zero, conforme mostram as figuras abaixo. Para o teste proposto neste trabalho, foram escolhidos valores que servem apenas de exemplo, para completar a parametrização do relé e permitir a realização do ensaio.

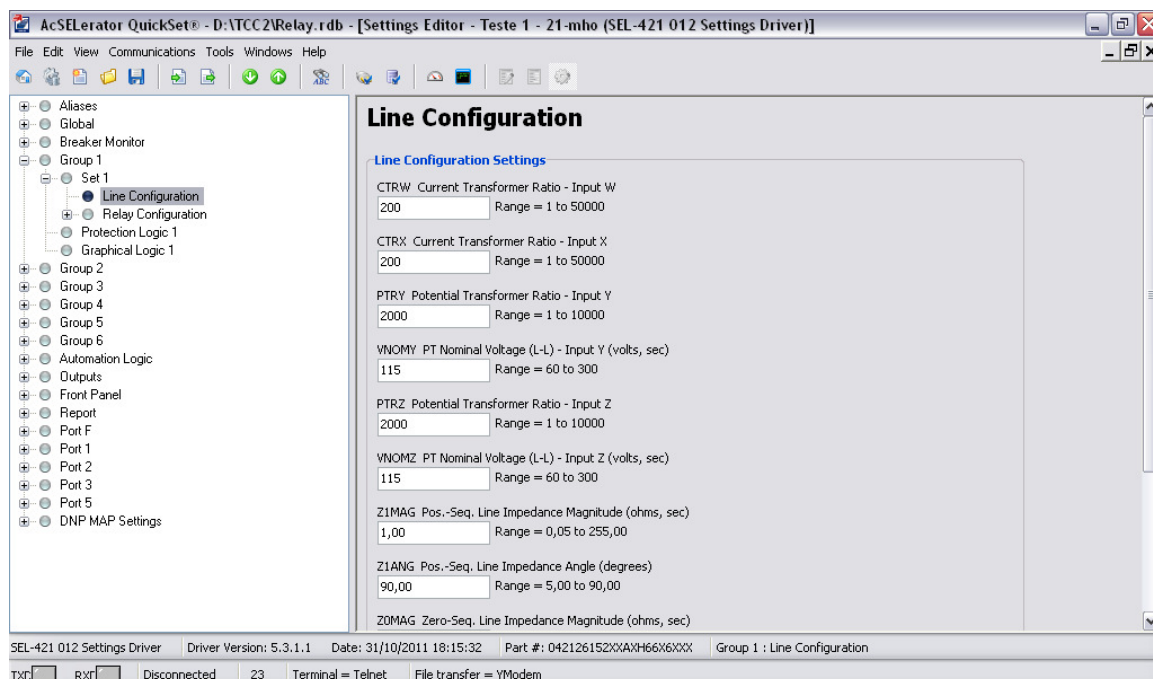


Figura 27 - Line Configuration.

Fonte: Aatoria Própria.

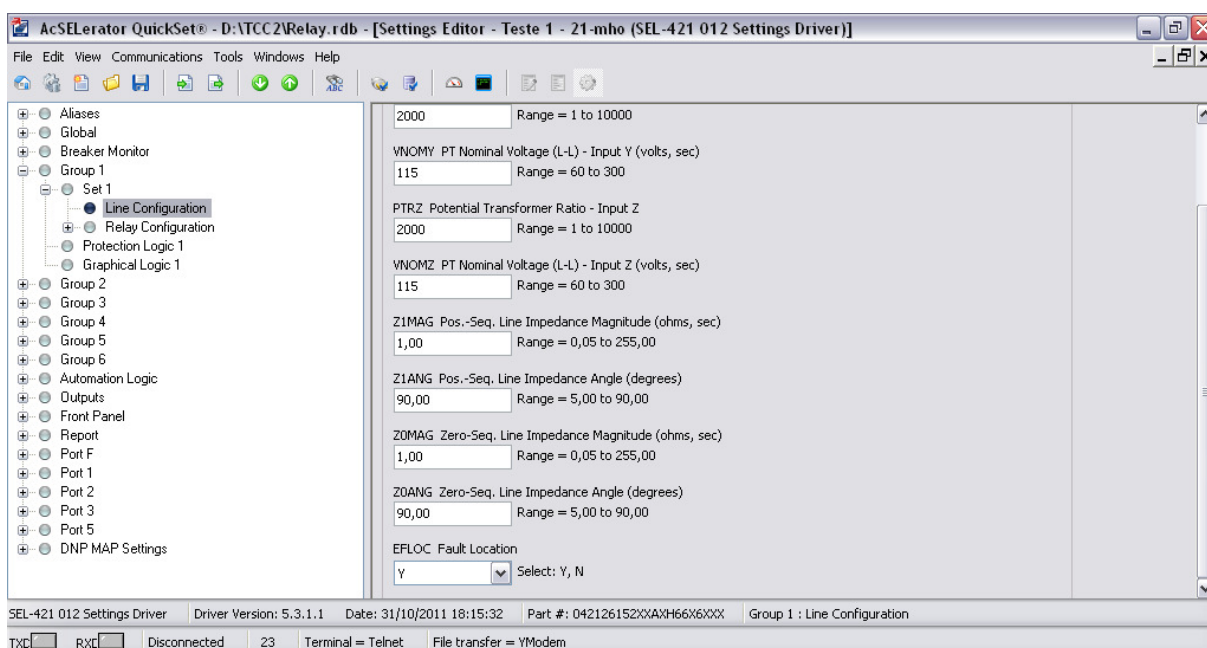


Figura 28 - Line Configuration.

Fonte: Aatoria Própria.

O relé possui duas entradas de corrente W e X e duas entradas de tensão Y e Z. As relações de transformação de corrente dos TC's são mostradas nos campos CTRW e CTRX e foram ajustadas em 200, ou seja, a corrente no primário do transformador é 200 vezes maior que no secundário. Já as relações de

transformação de tensão dos TP's podem ser visualizadas nos campos PTRY e PTRZ, ambos ajustados em 2000, ou seja, a tensão no primário é 2000 vezes maior que no secundário do transformador. A tensão nominal dos TP's é de 115 V, conforme pode ser conferido nos campos VNOMY e VNOMZ.

Além disso, foram ajustadas as magnitudes e ângulos das impedâncias de linha de sequência positiva e zero, sendo definidas em 1Ω e 90° , respectivamente.

Para que o relé possa determinar a distância da falta, deve-se deixar o campo EFLOC com um Y (yes) e determinar o comprimento da linha. Tais dados são necessários, pois o localizador de faltas utiliza os valores de LL, Z1MAG, Z1ANG, Z0MAG e Z0ANG para fornecer a distância em que se encontra a falta.

Em "Relay Configuration", definem-se quais funções estarão ativas ou não. Expandindo as opções de "Relay Configuration", clicando no sinal de "+", notam-se uma série de funções que podem ser configuradas se estiverem ativas.

A opção "Phase Distance Elements" permite determinar quantas zonas terão a função 21, qual a distância que cada uma alcança em ohms (Ω) e quantos ciclos são necessários para que cada uma atue. Neste caso, a zona 1 tem um alcance de 5Ω e 3 ciclos (50 ms) e a zona 2, 8Ω e 12 ciclos (200 ms).

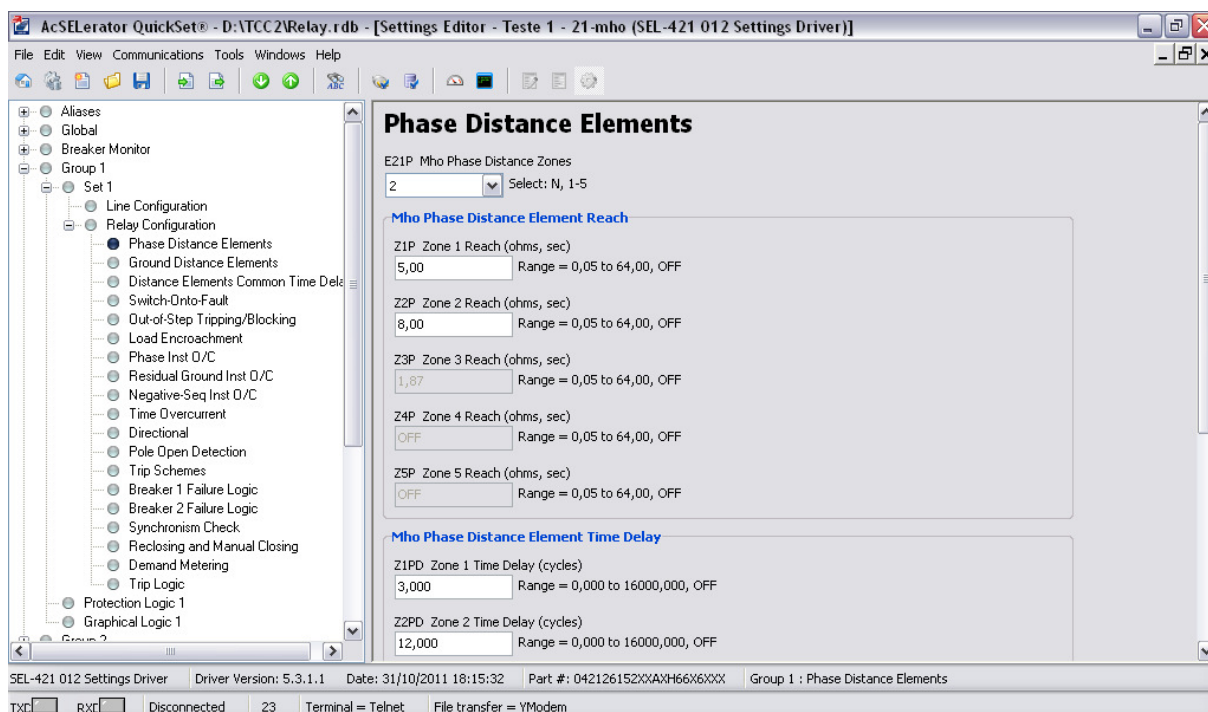


Figura 29 - Phase Distance Elements.

Fonte: Autoria Própria.

A relação entre o alcance da zona e os valores de tensão e corrente que incidem sobre a linha em caso de falta é a lei de Ohm:

$$Z = \frac{V}{A}$$

Com isso, no caso de um ensaio, entende-se que para que seja simulado uma falta na zona 2, a mala de teste deve enviar ao relé um sinal de tensão e corrente que o valor seja igual à impedância ajustada, neste caso de 8 Ω . Por exemplo, os valores de 20 V de tensão e 2,5 A de corrente podem ser utilizados para ensaiar essa zona de distância, pois a relação entre tensão e corrente satisfaz ao valor requerido pelo relé.

Os elementos de distância de terra mho são configurados na opção “*Ground Distance Elements*”, as quais tem alcance de 6 Ω e 9 Ω para as zonas 1 e 2, respectivamente, e tempo de atuação de 3 e 12 ciclos, respectivamente. Estes ajustes são mostrados nas figuras a seguir.

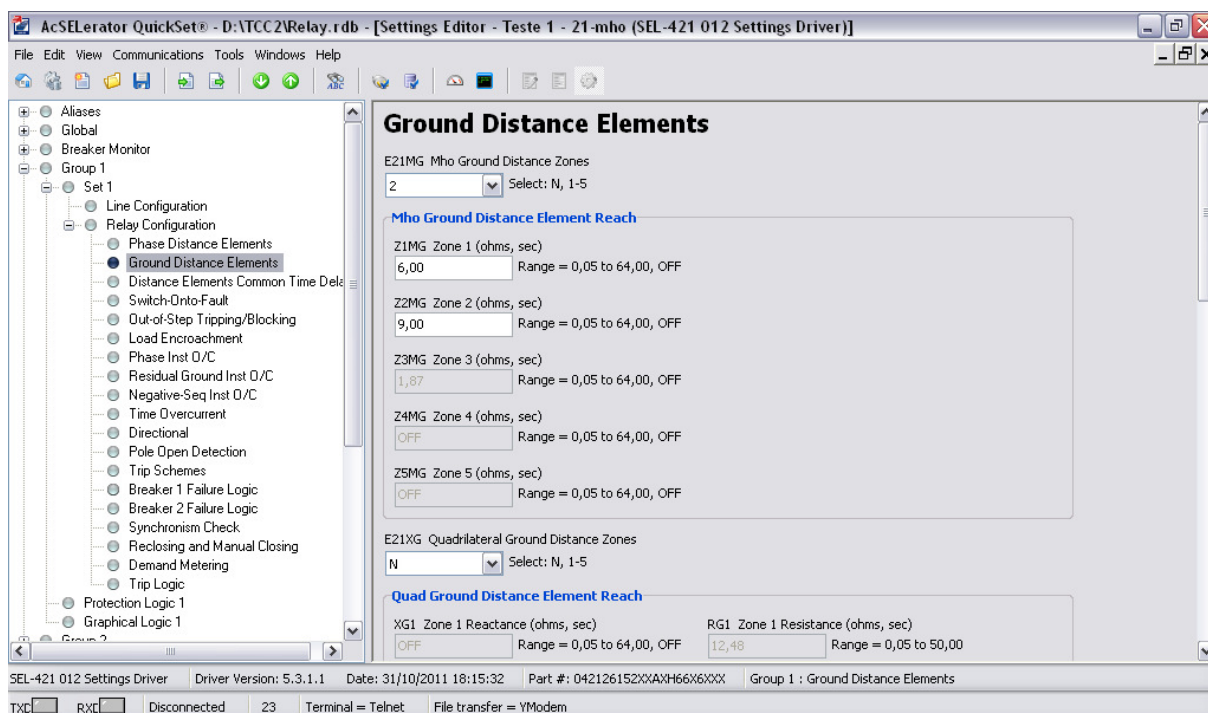


Figura 30 - Ground Distance Elements.

Fonte: Autoria Própria.

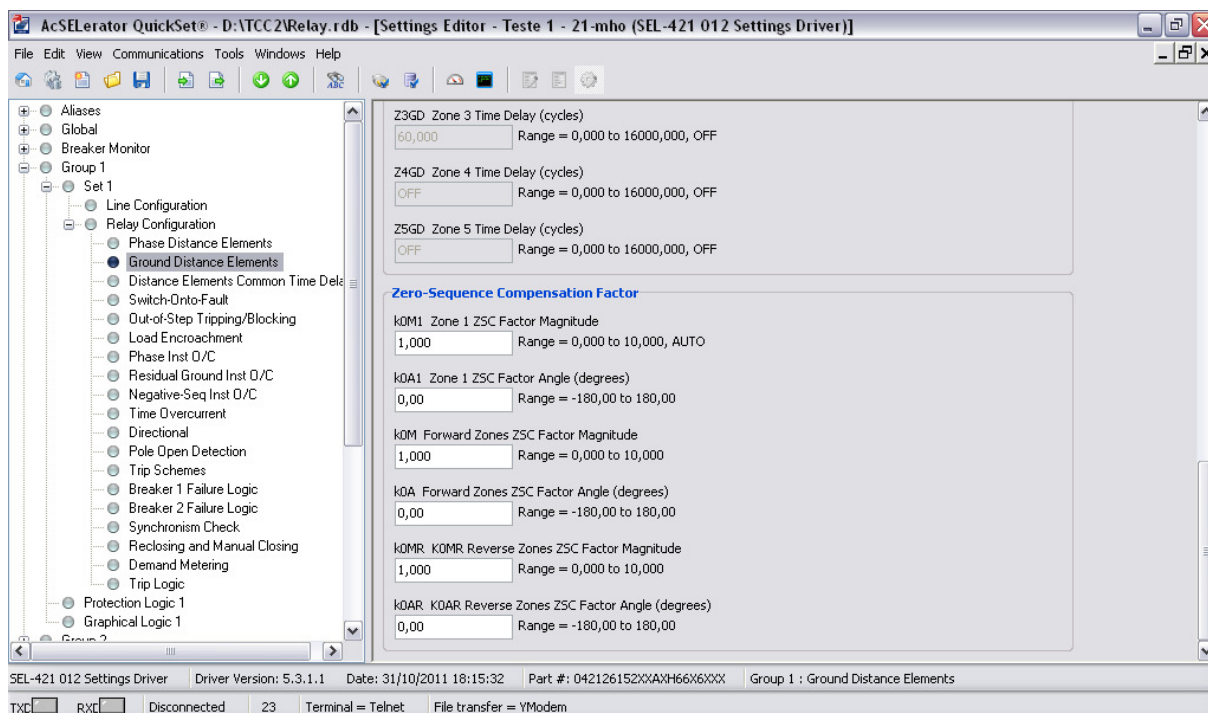


Figura 31 - Fator de Compensação de Sequência Zero.

Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que também foi ajustado o fator de compensação de sequência zero k_0 . Este fator é de extrema importância para evitar erros no cálculo da impedância até a falta. Ele compensa o fato de que, no caso de uma falta a terra, as correntes de sequência zero das fases envolvidas na falta também circularão nas fases não envolvidas, o que fornecerão dados errôneos para o relé e, conseqüentemente, o equipamento não fornecerá uma impedância de falta tão precisa (POLIKOFF, 2006).

Na opção "Trip Logic" são determinadas quais zonas atuarão. Neste caso, foram escolhidas as zonas 1 e 2 de fase e de terra.

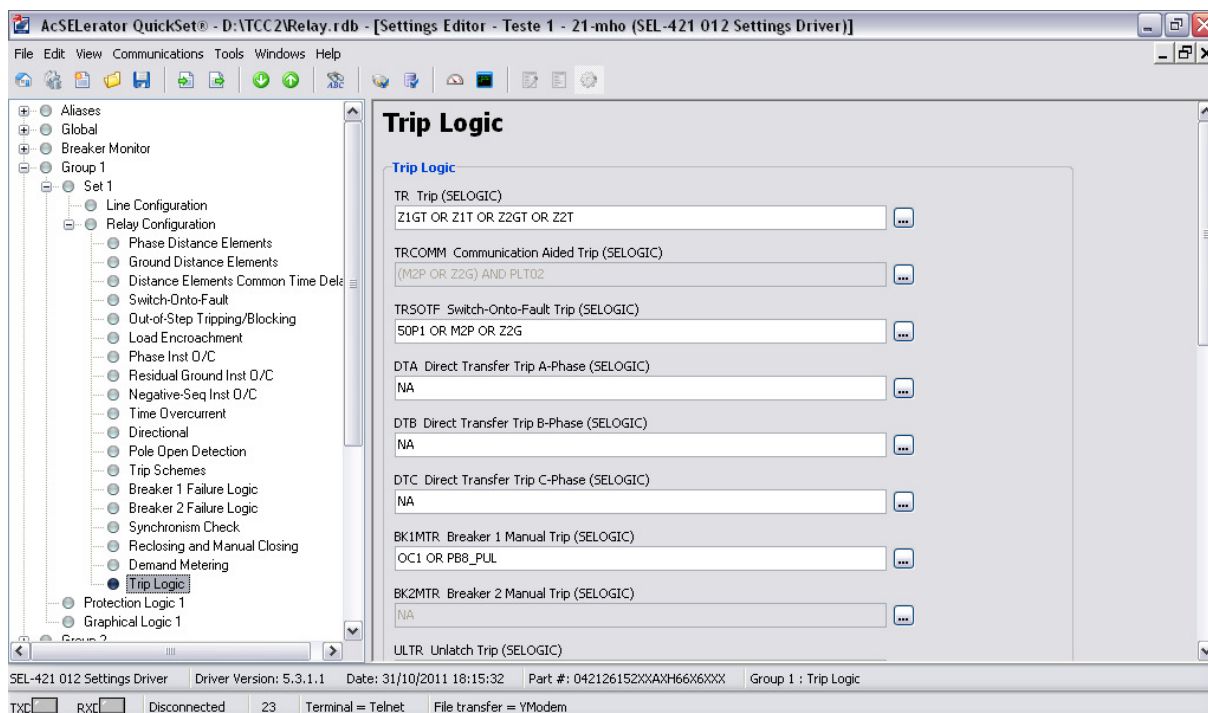


Figura 32 - Trip Logic.

Fonte: Autoria Própria.

4.4.2. ENSAIO

Após o envio dos ajustes ao relé, podem-se injetar nele sinais de corrente e tensão através da mala de testes. O valor escolhido para corrente, nas 3 fases, foi de 2,4 A, enquanto que para a tensão, foi de 20 V. Tais valores, se aplicados na relação mostrada anteriormente, resultam numa impedância de, aproximadamente, 8,334 Ω , o que caracteriza uma condição de falta na zona 2 para o relé. A figura 33 mostra os valores dos sinais de tensão (V L1-E, V L2-E e V L3-E) e corrente (I L1, I L2 e I I3) injetados no relé pela mala de testes.

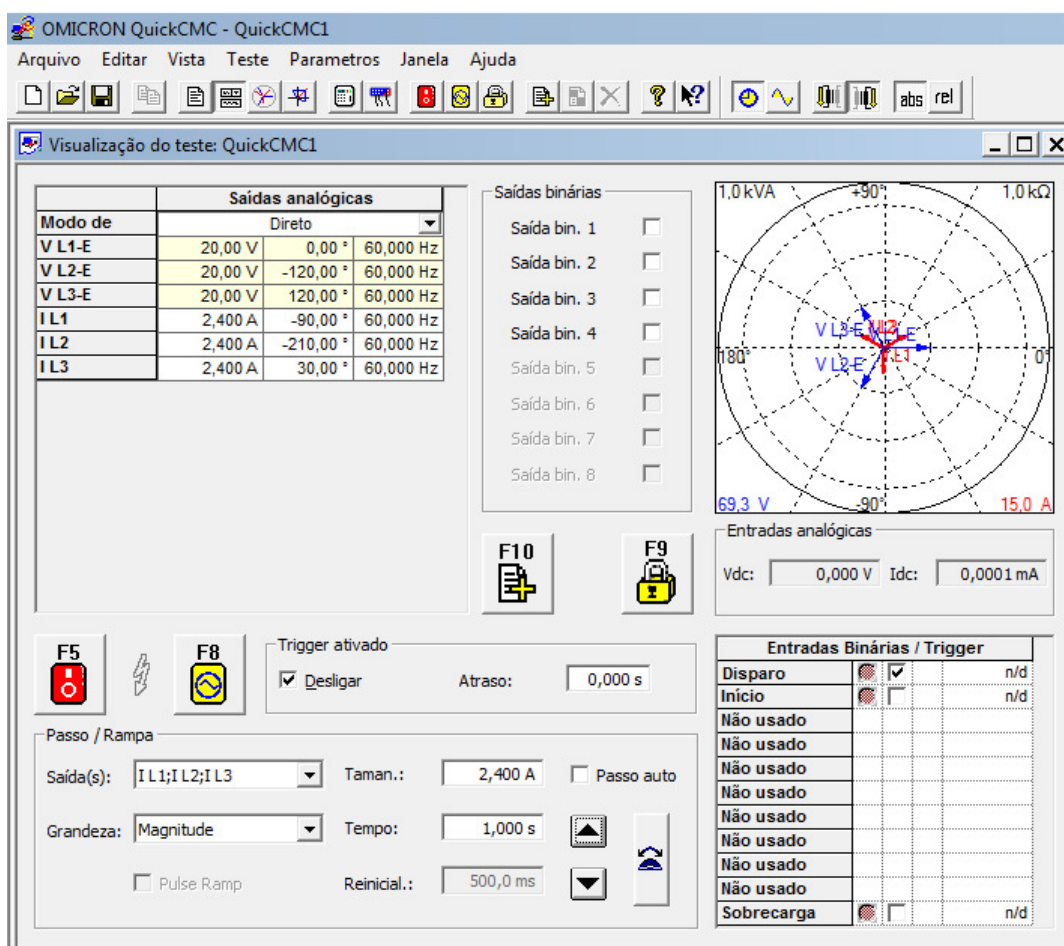


Figura 33 - Parâmetros de ensaio – função 21.

Fonte: Autoria Própria.

Conforme esperado, o relé atuou frente à injeção dos valores de tensão e corrente especificados. Neste momento, o relé mostra em seu *display* a opção “Events Menu” e, com isso, é possível navegar pelos eventos ocorridos e registrados na memória do equipamento, retirando dele relatórios e oscilografias. Além disso, no caso específico desta atuação, o relé também mostra a distância em que está a falta, pois foi programado para que calculasse esse parâmetro. As figuras a seguir mostram as informações fornecidas pelo relé referentes ao evento ocorrido.



Figura 34 - Event Summary – atuação da função 21 – tela 1.

Fonte: Autoria Própria.



Figura 35 - Event Summary – atuação da função 21 – tela 2.

Fonte: Autoria Própria.

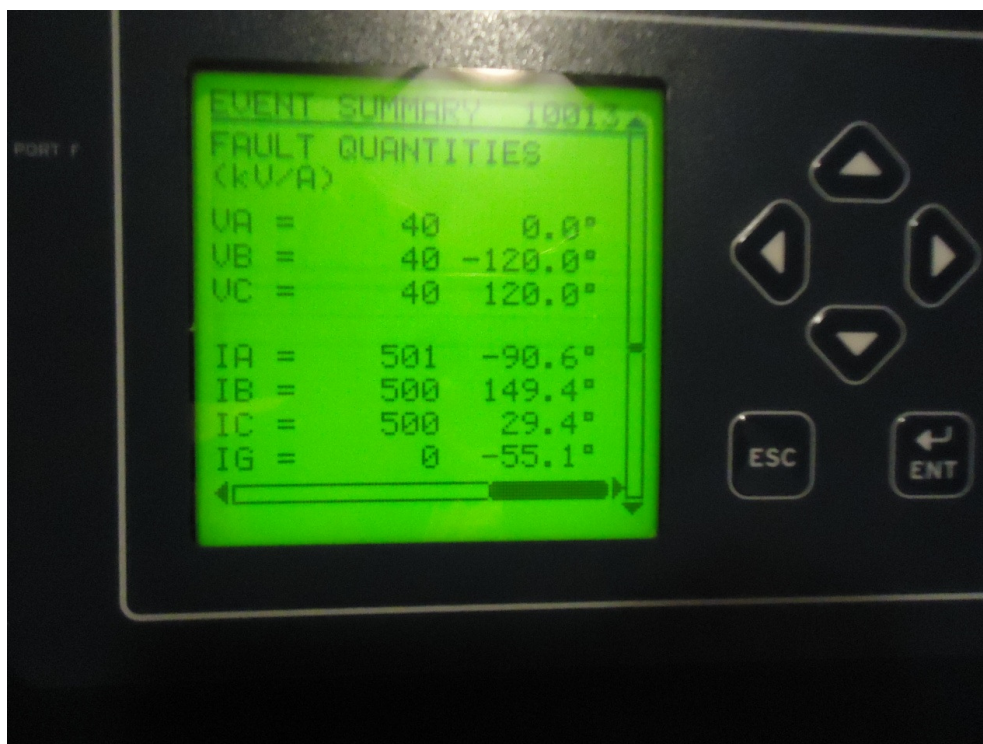


Figura 36 - Event Summary – atuação da função 21 – tela 3.

Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar que a falta abrangueu as três fases e foi do tipo fase-terra e que se localiza a 799,25 quilômetros do ponto de medição. O relé utiliza os parâmetros Z1MAG, Z1ANG, Z0MAG, Z0ANG, entre outros valores, para chegar a esse valor de distância, valores esses que foram parametrizados como exemplo somente para permitir o ensaio do relé, justificando assim o valor elevado de distância do ponto de falta. Outra forma de ver as informações sobre o evento é no *Analytic Assistant* do software AcSElerator®, conforme mostrado abaixo.

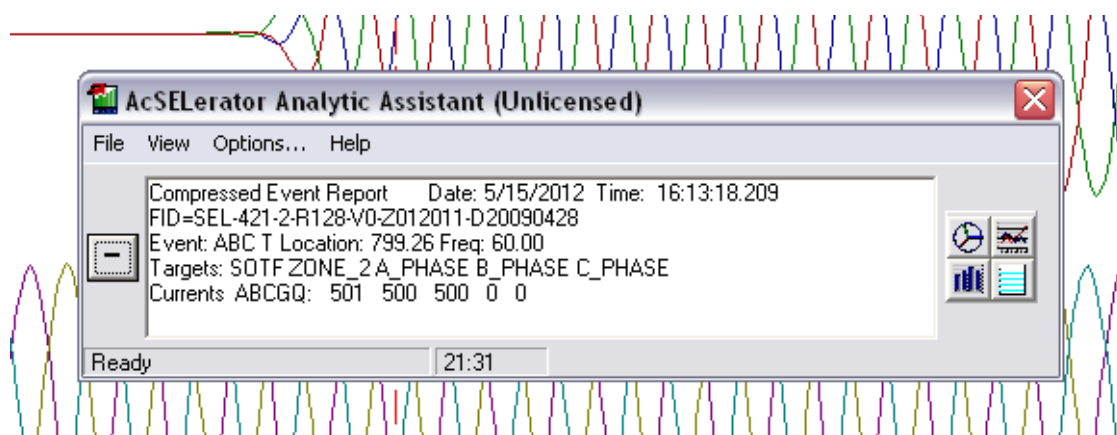


Figura 37 - Analytic Assistant – atuação da função 21.

Fonte: Autoria Própria.

O *Analytic Assistant* fornece informações mais precisas sobre o evento. Pode ser notado que ele informa a zona e a distância de localização da falta, as fases afetadas, a função atuada e os níveis de corrente de falta.

A seguir, é mostrada a oscilografia disponibilizada pelo relé.

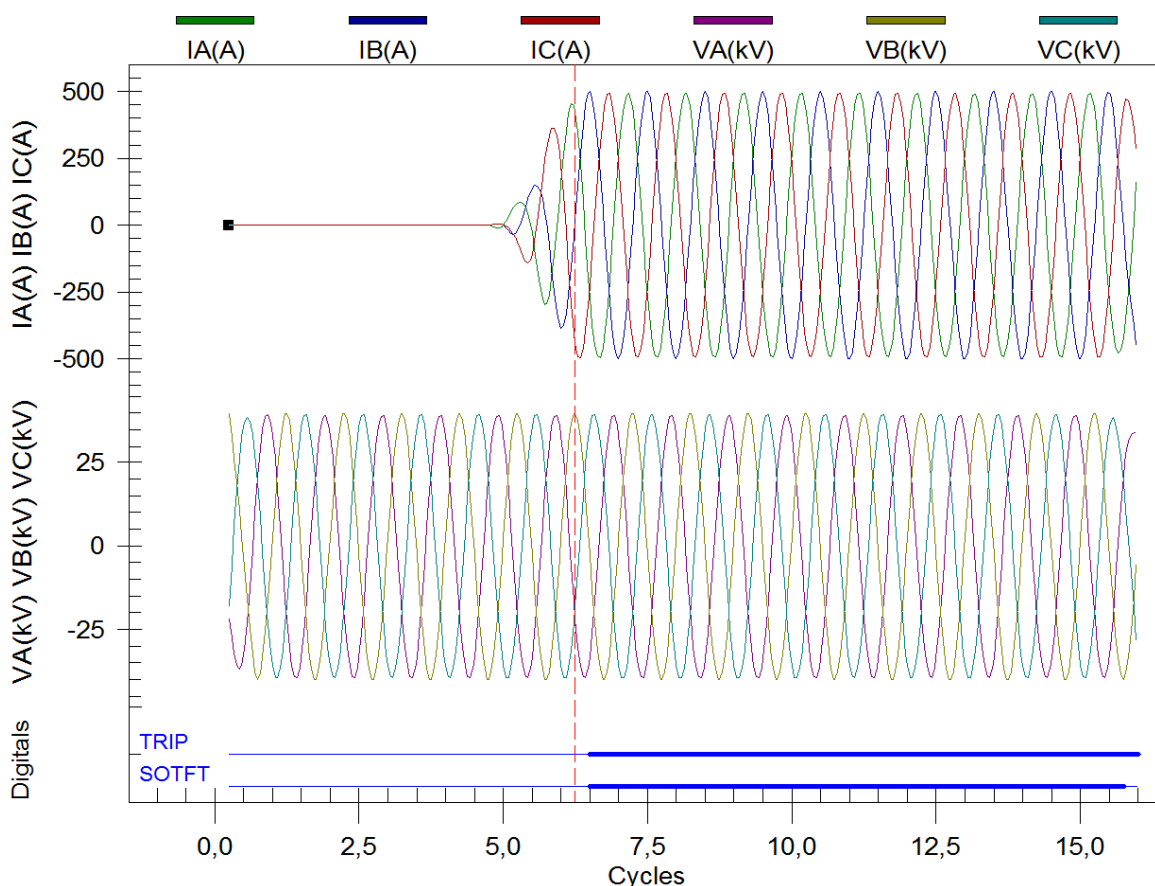


Figura 38 - Oscilografia da função 21.

Fonte: Autoria Própria.

No entanto, observa-se na oscilografia que atuou uma função chamada *Switch-onto-fault* (SOTF), ou energização sob falta, antes da função 21. Ela atua quando ocorre uma falta, mas a função que deveria atuar demora um tempo maior que o considerado seguro pela SOTF, a qual entende que o circuito que contém a falta continua energizado.

Os ajustes foram feitos com o intuito de fazer atuar a função 21 em sua segunda zona, porém, o relé traz em sua configuração original a função SOTF como *default*. Ou seja, ela já vem habilitada para atuar ao mesmo tempo, ou antes, que as funções ajustadas no relé, caso elas demorem a atuar.

Neste caso, o que aconteceu foi que a função SOTF possuiu sensibilidade maior que o ajuste da função 21 em sua segunda zona, e atuou antes dela. Assim, no relatório de saída do software não aparece como atuada a função 21, mas sim a SOTF, mesmo que tenha sido calculada a distância da falta, o que, normalmente, é característica da função 21. Se a função *Switch-onto-fault* não estivesse habilitada, o relatório de saída mencionaria apenas a função 21 como a que tivesse dado *trip*, visto que foi ela a programada para exercer tal função de proteção. Na parametrização realizada, a função SOTF não atuaria caso fosse simulada a atuação da primeira zona, não temporizada, do relé.

Por outro lado, o “AcSELerator® Analytic Assistant” mostra que a função 21 também atuou o *trip* do relé, através da zona 2, conforme pode-se ver na figura 37.

Caso não seja de interesse que a função SOTF atue, tem-se a opção de desabilitá-la em “Relay Configuration”, na opção “Switch-onto-fault”. Para isso, deve-se selecionar N (*no*) em ESOTF, conforme a figura 39.

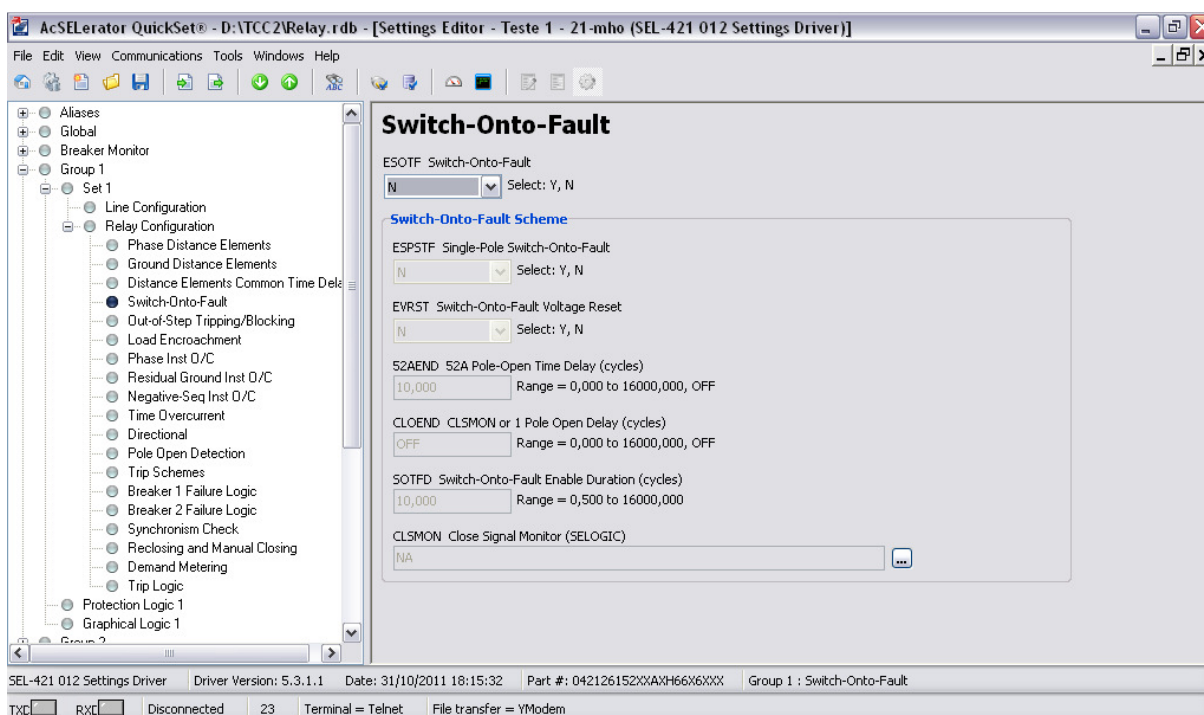


Figura 39 - Função Switch-onto-fault.

Fonte: Autoria Própria.

Após essa alteração, a função 21 deve atuar normalmente com base em seus próprios ajustes e ser mencionada no relatório de saída do software. Para este trabalho, não foi possível a realização de novo ensaio para mostrar o bloqueio do

SOTF devido à indisponibilidade de sala de testes na universidade para realização de um novo ensaio, e a também indisponibilidade do laboratório da COPEL, onde foram realizados os testes deste trabalho, para realização de novos testes.

4.5. FUNÇÃO 50

4.5.1. AJUSTES

Para configurar a função 50 para atuação no relé em caso de sobrecorrente, deve-se ajustar os valores de corrente de *pick-up* e tempo de atuação na opção “Phase Inst O/C”, na guia “Relay Configuration”.

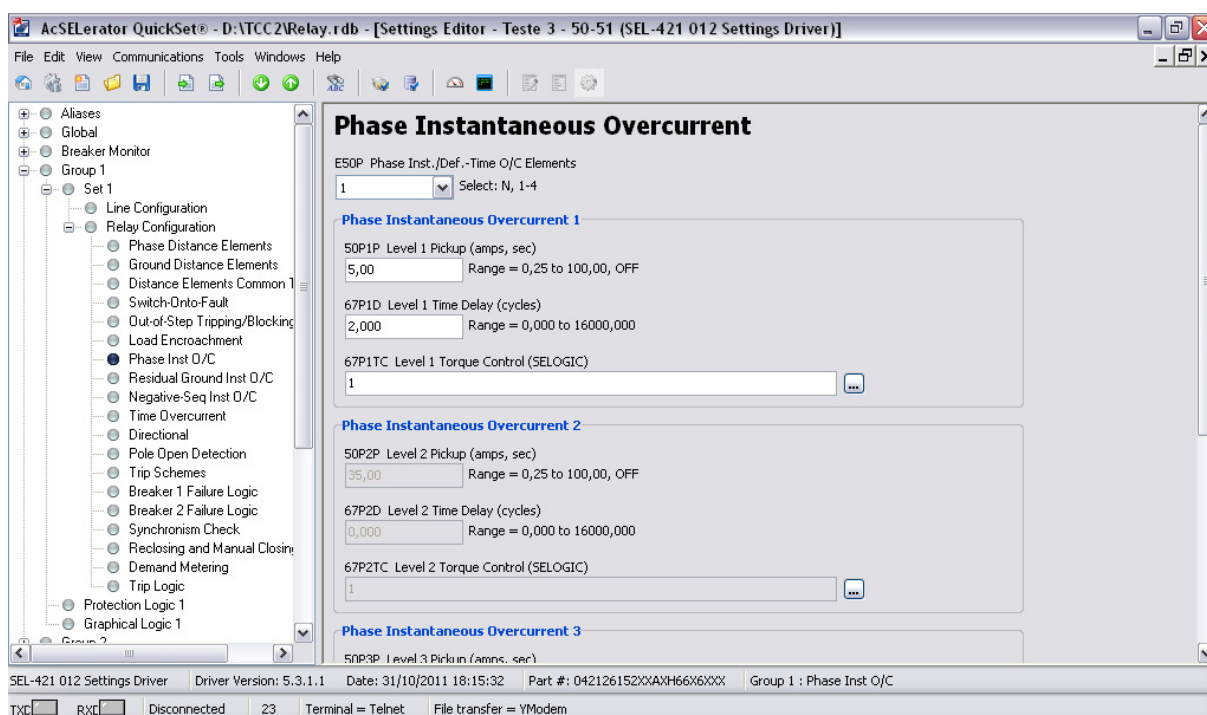


Figura 40 - Phase Instantaneous Overcurrent.

Fonte: Autoria Própria.

O valor de *pick-up* ajustado foi de 5 A e o tempo de atuação, 2 ciclos (33,333 ms).

Na opção “Main Board” na guia “Outputs” define-se quais serão os *trips* de cada função para cada saída.

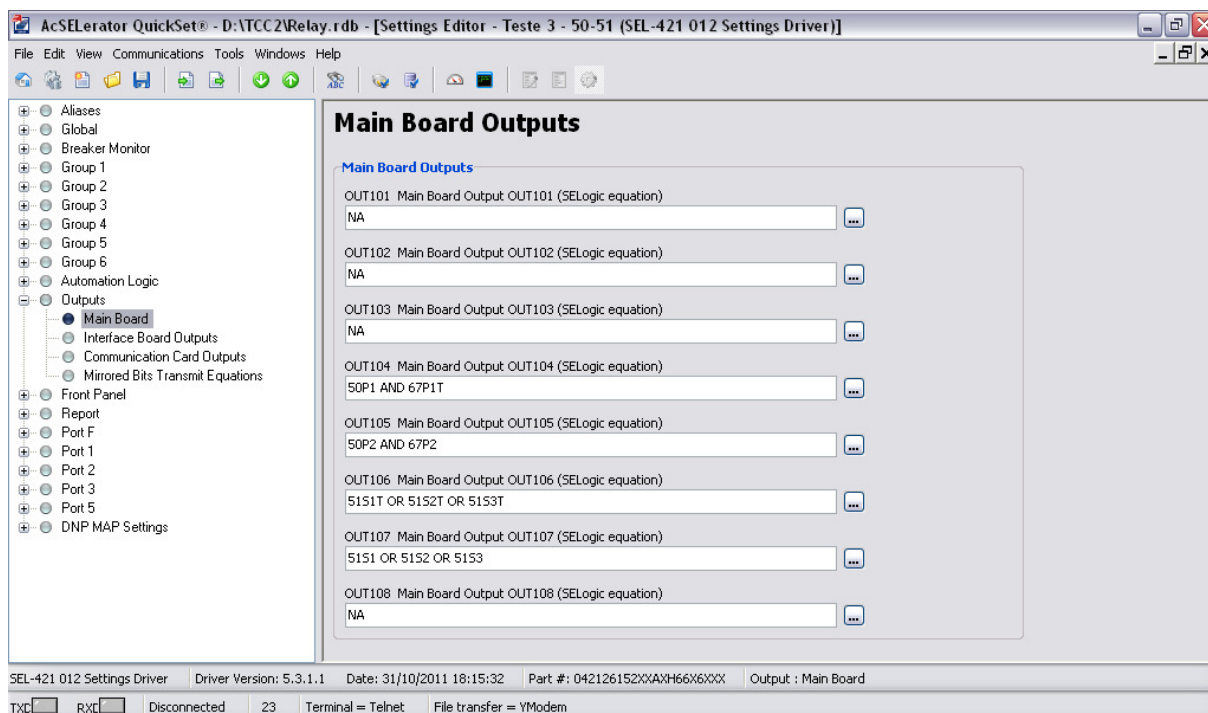


Figura 41 - Main Board Outputs.

Fonte: Autoria Própria.

4.5.2. ENSAIO

Estando os ajustes feitos, deve-se enviá-los ao relé e, então, definir no software da mala de testes os valores dos sinais de corrente a serem injetados no relé, a fim de fazer atuar a função 50.

Nas três fases foi injetada uma corrente de 5,2 A, que é maior que o valor de *pick-up* ajustado. A figura a seguir mostra os valores de corrente I L1, I L2 e I L3 enviados ao relé.

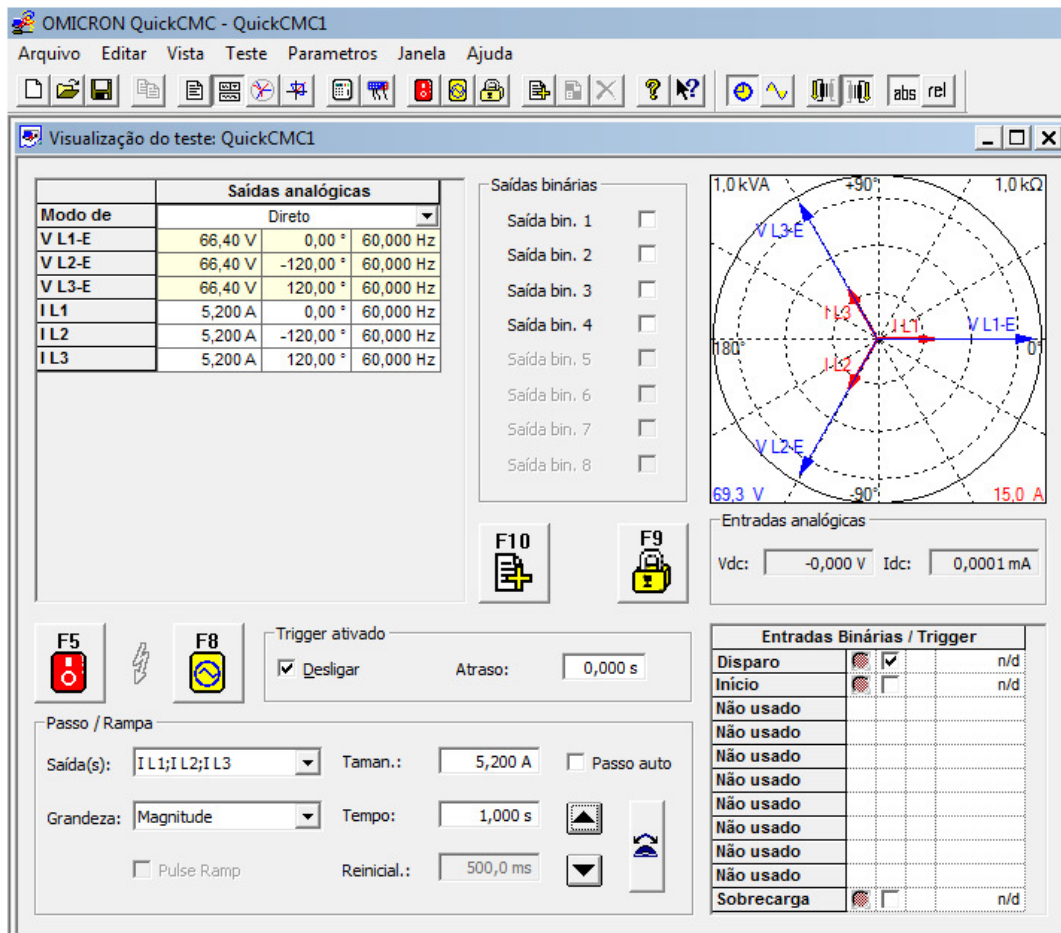


Figura 42 - Parâmetros de ensaio - função 50.

Fonte: Autoria Própria.

Aplicadas tais correntes, o relé mostra em seu *display* a confirmação de *trip*.



Figura 43 - Event Summary - atuação da função 50 – tela 1.

Fonte: Autoria Própria.



Figura 44 - Event Summary - atuação da função 50 – tela 2.

Fonte: Autoria Própria.

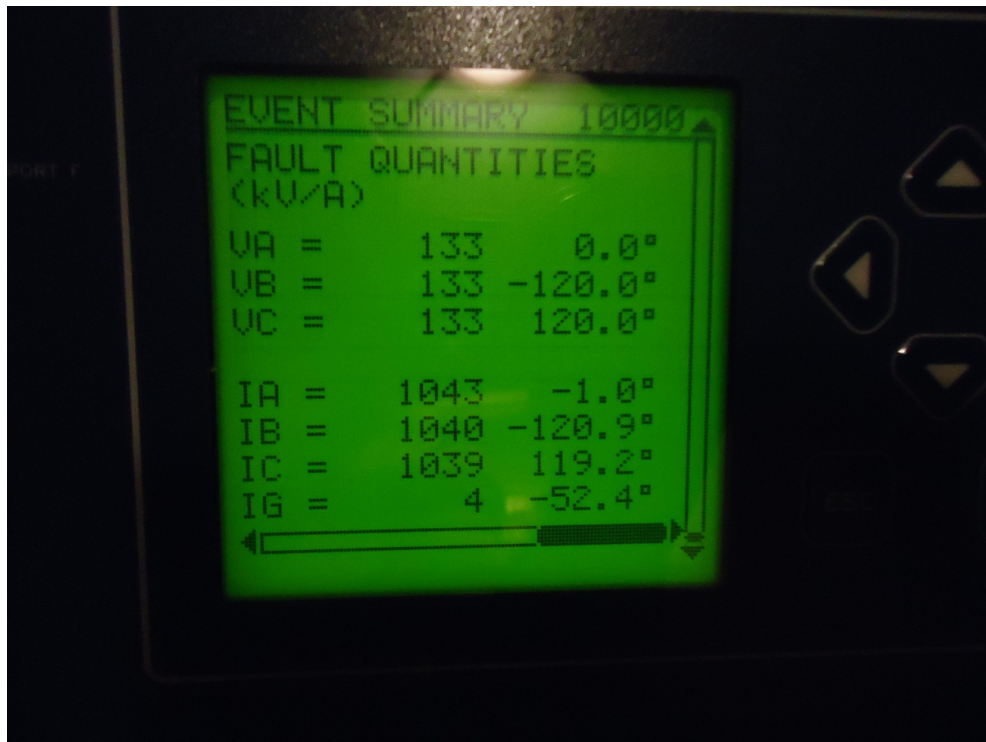


Figura 45 - Event Summary - atuação da função 50 – tela 3.

Fonte: Autoria Própria.

Além disso, o *Analytic Assistant* do AcSElerator® informa as fases afetadas e nível de corrente no momento de *trip*. Levando em consideração a relação de transformação dos TC's, definidas anteriormente, a corrente de falta girou em torno dos 1040 A.

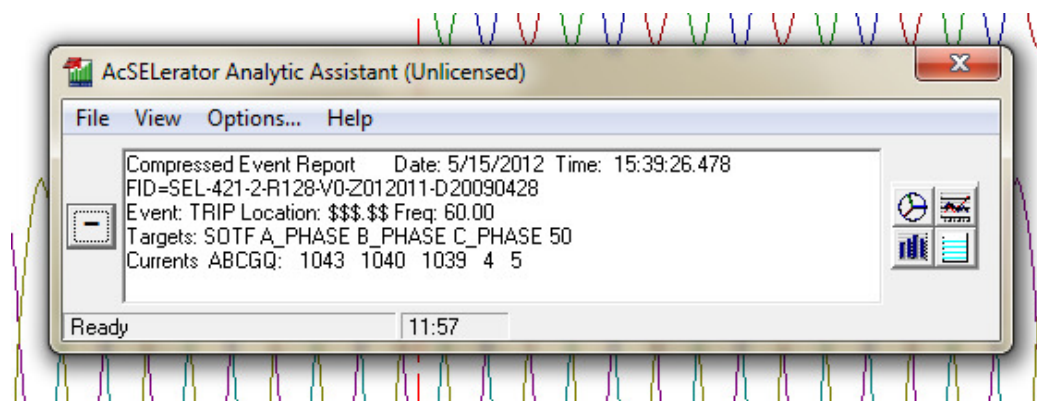


Figura 46 - Analytic Assistant - atuação da função 50.

Fonte: Autoria Própria.

A oscilografia mostra que o valor de atuação da função 50 foi aparentemente menor que os 1040 A de *pick-up* esperados, sendo registrado no gráfico como 1018 A.

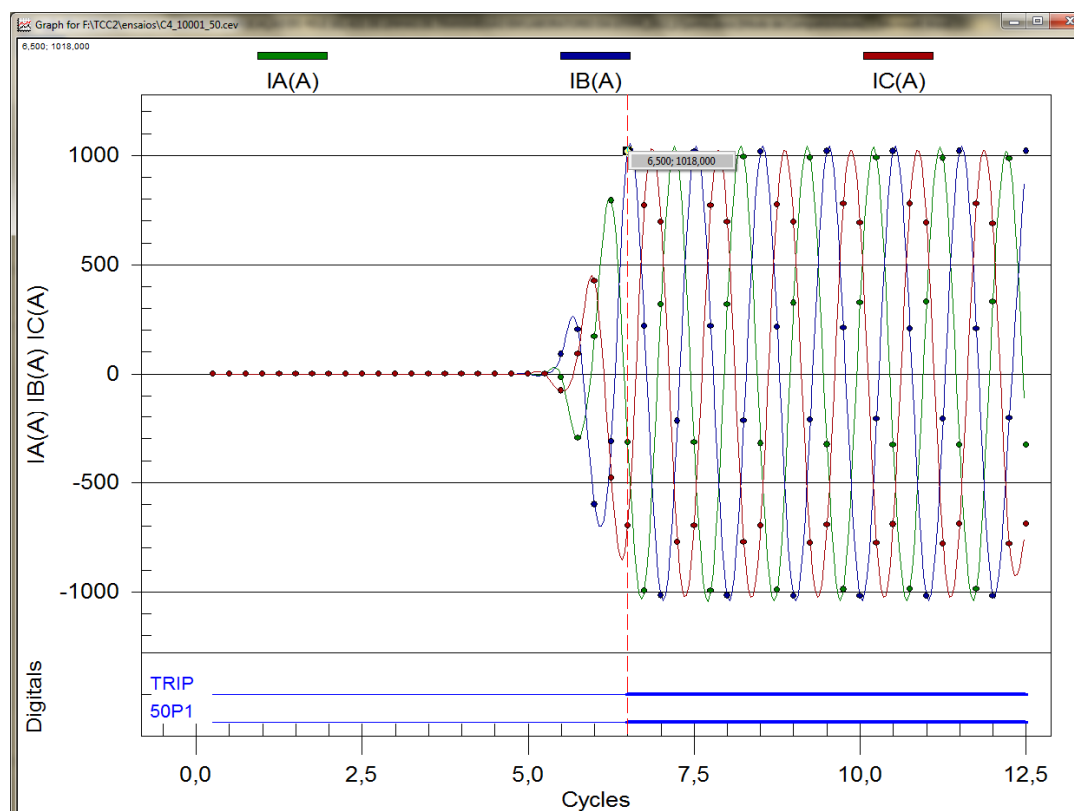


Figura 47 - Oscilografia da função 50.

Fonte: Autoria Própria.

Uma discussão importante que deve ser levada em consideração neste caso é a também atuação do SOTF, conforme se pode observar na figura 46. Entretanto, o *trip* gerado foi através do da função 50, e não do SOTF, conforme se pode observar na figura 47. Neste caso, como a função 50 não possui temporização intencional, o *trip* foi gerado por ela mesma, e não pela SOTF, esta última por sua vez possuindo temporização intencional.

5. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi parametrizar, testar e elaborar um manual didático de parametrização do relé SEL-421, utilizando mala de testes para simulação de situações de falta em linhas de transmissão, para disponibilizá-lo aos alunos.

Para tal, foi feita revisão bibliográfica da função de proteção de distância, com foco na teoria clássica de proteção com relés eletromecânicos, e foi apresentado o relé SEL-421, suas características, o *software* de parametrização AcSELeator®, os ensaios realizados e seus resultados. Com os resultados, foi possível verificar que o relé respondeu de maneira satisfatória para as funções parametrizadas.

A atuação inesperada do *Switch-onto-fault* (SOTF) possibilitou um enriquecimento na discussão das possibilidades de atuação do relé de proteção digital, permitindo assim que fosse visualizada uma vantagem prática de relés multifunção, onde a não atuação de uma função é supervisionada por outra no mesmo relé. Além disso, a atuação do SOTF permitiu um aprendizado maior do relé e suas funções.

Esse trabalho também mostra a importância do manuseio de relés para o aprendizado de seu funcionamento em sistemas de proteção, uma vez que a visualização da atuação nos parâmetros ajustados permite uma construção mais sólida do conhecimento na área, justificando assim essa prática com finalidades educacionais.

Nesta mesma temática, da importância do manuseio de relés para aprendizado, a elaboração de manuais práticos direcionados a alunos de engenharia elétrica nas disciplinas de proteção de sistemas elétricos se mostra importante. Desta forma, conclui-se que este trabalho cumpriu seu objetivo didático com a elaboração da descrição de parametrização e do manual em anexo.

Por fim, conclui-se que este trabalho atingiu seus objetivos, e suas conclusões e discussões são válidas para a utilização pelos alunos e professores das disciplinas que envolvam proteção de sistema elétrico, bem como pode ser utilizado como ponto de partida para a parametrização das funções testadas neste trabalho e outras funções que não foram incluídas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABB. **Excellence, safety and comfort – 100 years of relay protection in Sweden.** Västerås, Sweden, 2005. 16p.

AGGARWAL, R. K.; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V. **O emprego de redes neurais artificiais na detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão.** SBA – Sociedade Brasileira de Automática, 2003.

ALMEIDA, Marcos A. Dias de. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos.** Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: 2000.

BARBOSA, I. J. **Fundamentos de Proteção de Sistemas Elétricos.** São José da Barra, MG. 2009.

BLACKBURN, Lewis J., DOMIN, Thomas J. **Protective Relaying: Principles and Applications.** Boca Raton, FL. 2007.

COPEL. **Manual de Operação – UHE Salto Caxias.** Curitiba, 2002. 55p.

COPEL. **Manual de Operação e Manutenção – UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Neto.** Curitiba, 2006. 75p.

COURY, Denis Vinicius. **SEL 380 Introdução aos sistemas elétricos de potência.** São Carlos: Universidade de São Paulo.

COZZO, Reinaldo. **Relés eletromecânicos e de estado sólido**. O Setor Elétrico, 40 ed. 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE Guide for Relay Applications to Transmission Lines**. New York, 1999.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 1 ed. Florianópolis: UFSC, 1999.

MACÊDO, R. A.; COURRY, D. V. **Um esquema completo para proteção rápida de linhas de transmissão com o uso de equações diferenciais**. SBA – Sociedade Brasileira de Automática, 2003.

MAEZONO, Paulo Koiti. **Proteção de Sistemas Elétricos – Proteção de Linhas de Transmissão**. Rio de Janeiro: 2007.

MASON, C. R. **The art and Science of Protective Relaying**. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1956.

MELLO, F. P. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Santa Maria: UFSM, 1979.

MOONEY, J. **Aplicações de Relés Microprocessados em Linhas de Transmissão**. Schweitzer Engineering Laboratories, Brasil Ltda Disponível: http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/6014.pdf Acesso em: 16 abr. 2011.

OLIVEIRA, Arrhenius Vinicius da Costa. **Proposição de um Modelo para Análise de Fluxo de Carga, Curto-circuito e Simulação de Relés de Proteção**. 2004. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

OMICRON. Disponível em: <<http://www.omicron.at/en/products/pro/secondary-testing-calibration/cmc-356/>> Acesso em: 27 jun. 2012.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Procedimentos de rede**: Módulo 20, submódulo 20.1. Disponível em: <<http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/principalPRedeweb?openframeset>> Acesso em: 25 jun. 2012.

POLIKOFF, A. **Testes dos Elementos de Distância de Terra dos Relés de Distância SEL.**, Guia de aplicação SEL 2006-02, 2006.

QUEIROZ, Roberto Jefferson Nunes. **Implantação de um centro de operação em tempo real de um agente de transmissão do sistema interligado nacional**. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

ROCKEFELLER, G. D. **Fault Protection with a Digital Computer**. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1969.

RUFATO JUNIOR, Eloi. **Viabilidade técnica e econômica da modernização do sistema de proteção da distribuição**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **Data Sheet SEL-421. DATA SHEET DA SEL.** 2011.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **SEL-421 Relay – Protection, Automation, and Control System – Instruction Manual.** Manual SEL. 2011.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **AcSELerator® QuickSet® Software.** Disponível em: <<http://www.selinc.com.br/Produtos/SEL-5030-AcSELerator.aspx>> Acesso em: 25 out. 2011.

SILVA, Murilo da; OLESKOVICZ, Mário; COURY, Denis V. **Uma nova ferramenta baseada na transformada Wavelet para localização digital de faltas.**, SBA – Sociedade Brasileira de Automática, 2005.

STEMMER, Fritz A., BASTOS, Antonio C. A. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Porto Alegre, RS. 1977.

STEVENSON Jr., W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência.** 2 ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill do Brasil, 1986.

APÊNDICE A**MANUAL COM AJUSTES DAS FUNÇÕES 21 E 50 NO
RELÉ SEL-421**

INTRODUÇÃO

O relé SEL-421 da Schweitzer Engineering Laboratories é um equipamento de proteção digital de linhas de transmissão que combina proteção direcional e de distância de alta velocidade e tem capacidade de controlar um bay de linha com até dois disjuntores.

O fabricante deste equipamento fornece um manual completo, porém ele é muito extenso, o que demanda um tempo considerável de leitura para que se possa compreender as informações necessárias para configuração e operação do relé.

Assim, este manual visa informar o usuário sobre as principais características do relé, e também mostrar como ajustá-lo com as funções de distância (21) e sobrecorrente instantâneo (50) através do software AcSELerator® QuickSet, de forma que o usuário conheça a interface do programa e possa futuramente programar outras funções no relé, além das propostas.

ESPECIFICAÇÕES DO RELÉ

ALIMENTAÇÃO

O relé pode ser alimentado com as seguintes tensões:

- 125/250Vdc ou 120/230Vac;
- 48/125Vdc ou 120Vac;
- 24/48Vdc.

FUNÇÕES BÁSICAS

As funções internas básicas do relé SEL-421 estão representadas na figura 1 a seguir, na qual também é mostrada as formas de utilização do equipamento.

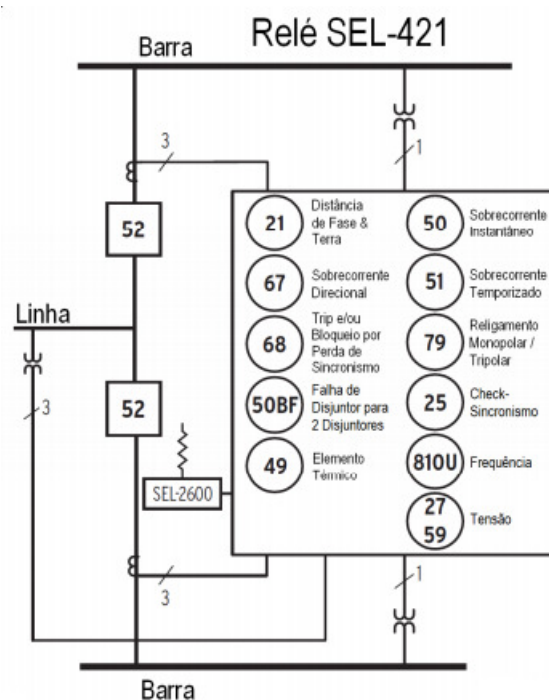


Figura 1 – Diagrama funcional

COMUNICAÇÃO

O relé SEL-421 possui quatro portas de comunicação serial do tipo EIA-232, três na parte traseira e uma na parte frontal.

Pode ser utilizado tanto um cabo serial quanto um cabo conversor serial-USB, em caso de computadores que não possuam entrada serial.

COMPONENTES DO PAINEL FRONTAL

O painel frontal do relé permite que o usuário tenha acesso a informações sobre eventos, medição, ajustes e ao autodiagnóstico do equipamento. Além disso, possui LEDs de sinalização de *trip* que indicam informações de sinalização do relé e botões para o controle do operador, conforme pode ser visto na figura 2.

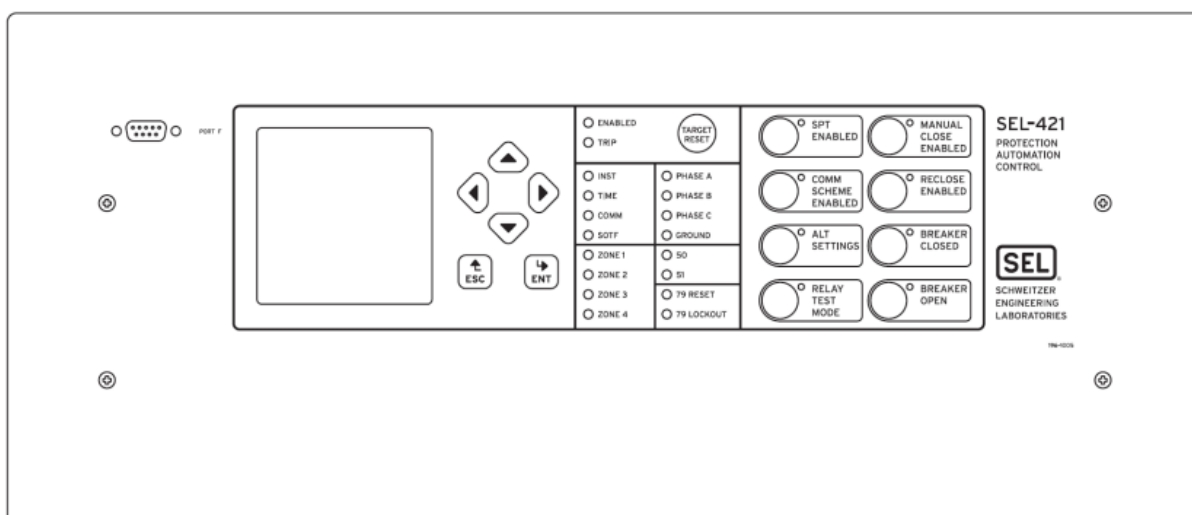


Figura 2 – Painel frontal 4U para montagem em painel.

CONFIGURAÇÕES INICIAIS

Os ajustes das funções são feitos no software AcSELerator® QuickSet, disponível no site da Schweitzer Engineering Laboratories, e para isso não é necessária a comunicação entre o relé e o computador. Esta comunicação é utilizada para envio de dados do computador para o relé e vice versa, portanto, podem-se fazer os ajustes no software, salvar as alterações e somente depois estabelecer comunicação com o relé para envio dos ajustes.

Ao abrir o programa, a tela inicial mostra várias opções para configuração e ajuste de funções.

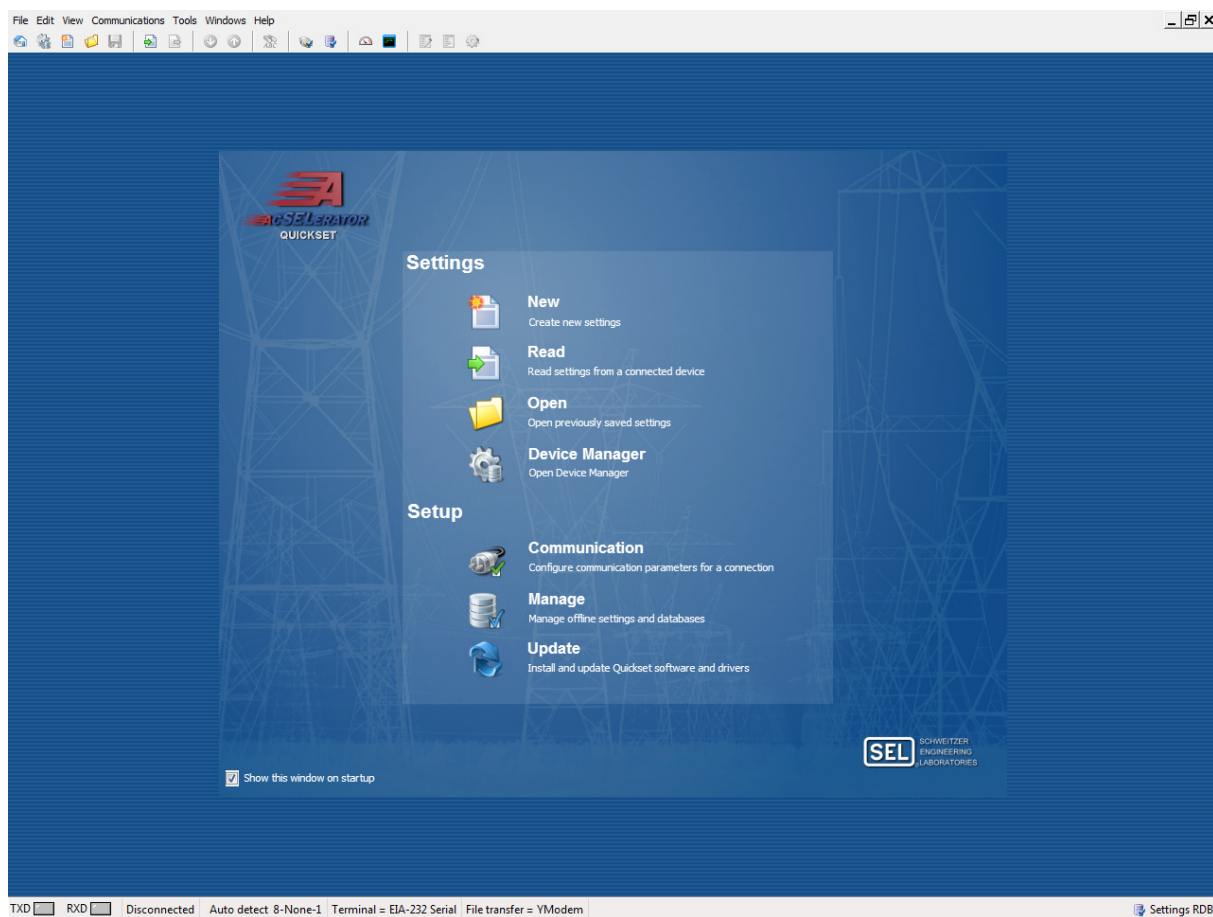


Figura 3 - Tela inicial do software AcSELerator®.

Para iniciar uma nova parametrização, deve-se clicar em *New* e então o programa abrirá uma janela com opções de relés com seus modelos e versões, denominada “*Settings Editor Selection*”. Basta selecionar o relé desejado e clicar em *ok*.

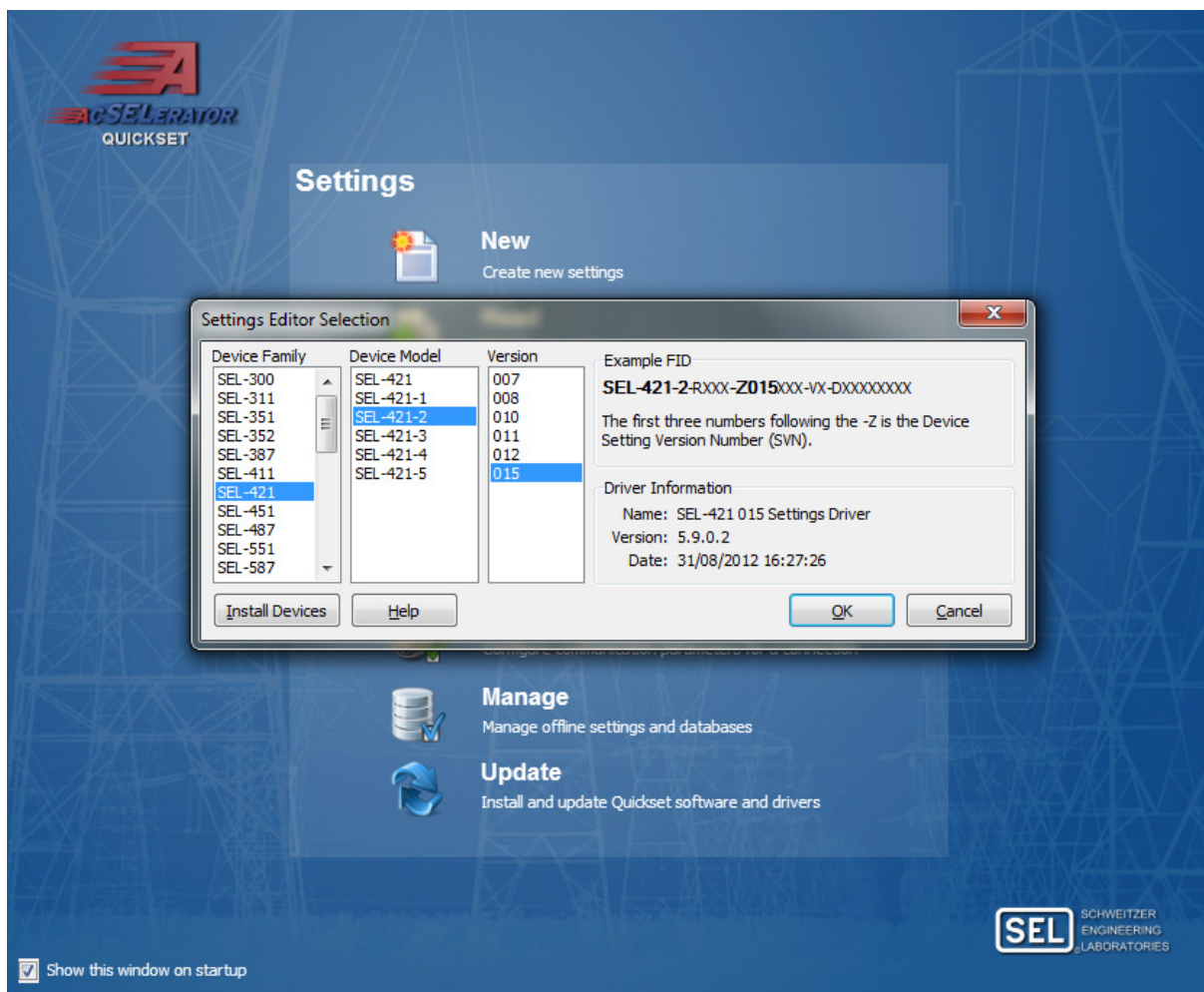


Figura 4 - Settings Editor Selection.

A seguir, é mostrada uma nova janela, intitulada “*Device Part Number*”, na qual deve ser colocado o *Part Number* (P/N) do relé. Esse número é encontrado na parte traseira do relé ou em seu *display*, no menu *Relay Configuration*. No caso do relé utilizado, o P/N é 042126152XXAXH66X6XXX.

Device Part Number

Part Number: 0421 2 6 1 5 2 X X A X H 6 6 X 6 X * *

Firmware
2 = Standard

Power Supply
6 = 125/250 Vdc or 120/240 Vac

Connector Type
1 = Screw Terminal Block

Secondary Inputs
5 = 300V Phase - Neutral Maximum (Wye), 5 Amp Phase

Serial Communications Protocols
2 = DNP3 Level 2 Slave Plus Dial-out and Virtual Terminal (plu)

Ethernet Communications Protocols
X = None

Ethernet Connection Options
N/A

Mainboard I/O Configuration
A = Standard, With 2 High-Current Interrupting Outputs, 3 Stan

Mainboard Input Voltage
N/A

Mounting
H = Horizontal Rack Mount

Chassis
6 = 5U, Up To Two Additional I/O Boards

Interface Board # 1 for 4U or 5U Chassis
6 = 8 Independent Inputs, 13 High-Current Interrupting Form A,

Interface Board # 1 Input Voltage
N/A

Interface Board # 2 for 5U Chassis Only
6 = 8 Independent Inputs, 13 High-Current Interrupting Form A,

Interface Board # 2 Input Voltage
N/A

OK

Figura 5 - Device Part number.

A partir dessa etapa começa o processo de ajuste das funções desejadas. Caso os ajustes já tenham sido feitos e deseja-se abri-los novamente, deve-se clicar em *Open* no menu inicial do programa. Fazendo isso, aparece uma nova janela chamada “*Select settings to open*” com uma lista dos ajustes feitos e salvos anteriormente, os quais podem ser abertos selecionando o ajuste desejado e clicando em *ok*.

A comunicação com o relé é feita ao clicar em *Communication* na tela inicial. Com isso, é aberta uma janela denominada “*Communication Parameters*” onde é possível selecionar o tipo de comunicação (serial, network ou modem), e vários outros parâmetros, como, por exemplo, a velocidade de envio e recebimento de

dados. Na figura 6, por exemplo, é mostrado um caso com utilização de um cabo conversor serial-USB.

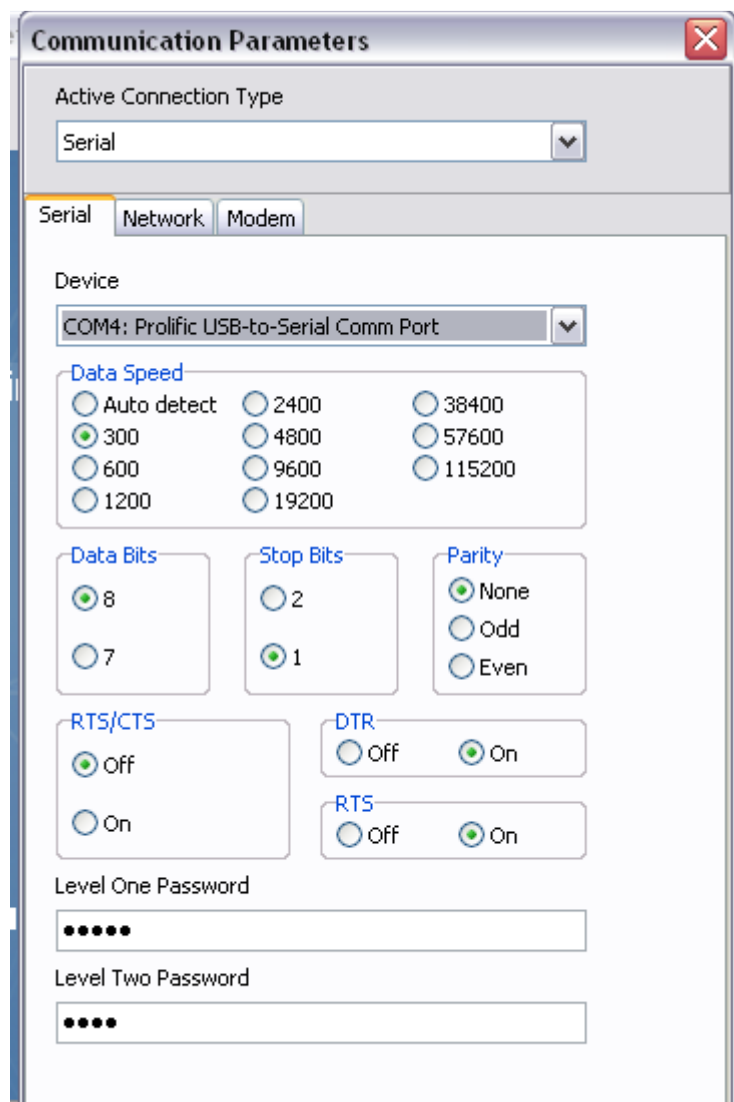


Figura 6 - General Global Settings.

AJUSTES DA FUNÇÃO 21

Inicialmente, o programa mostra uma lista de configurações que podem ser feitas no relé, as quais serão feitas apenas em algumas funções. A primeira configuração é feita em “*General Global Settings*”, onde devem ser estabelecidas, principalmente, a sequência de fases, a frequência e as condições de falta, conforme mostrado a seguir.

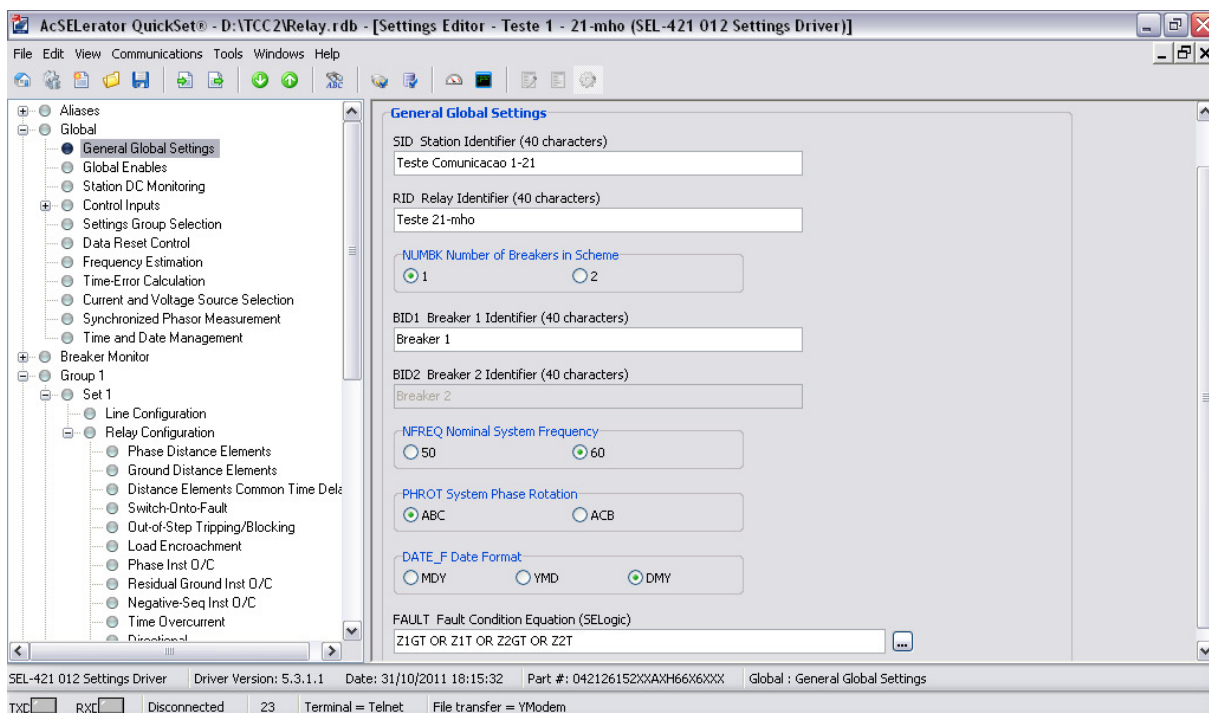


Figura 7 - General Global Settings.

Em “Line Configuration”, devem ser ajustadas as relações de transformação dos TC’s e TP’s, as magnitudes e ângulos das impedâncias de linha de sequência positiva e zero e o comprimento da linha, conforme mostram as figuras 7 e 8.

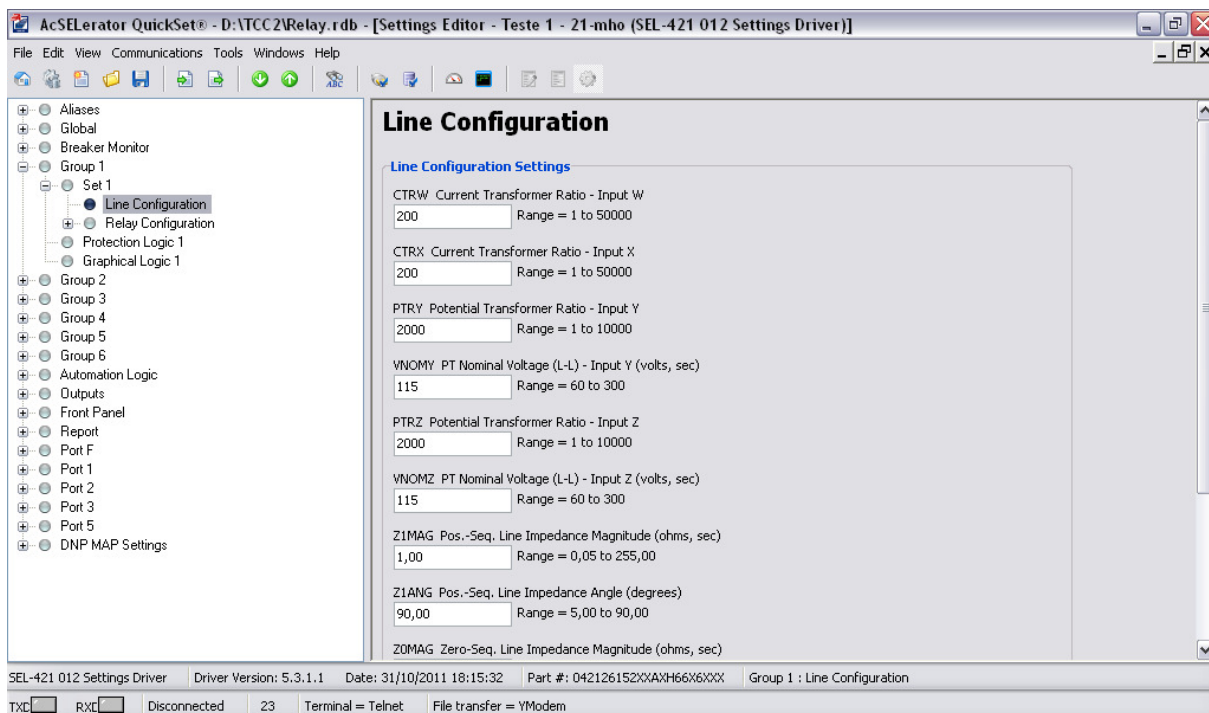


Figura 8 - Line Configuration.

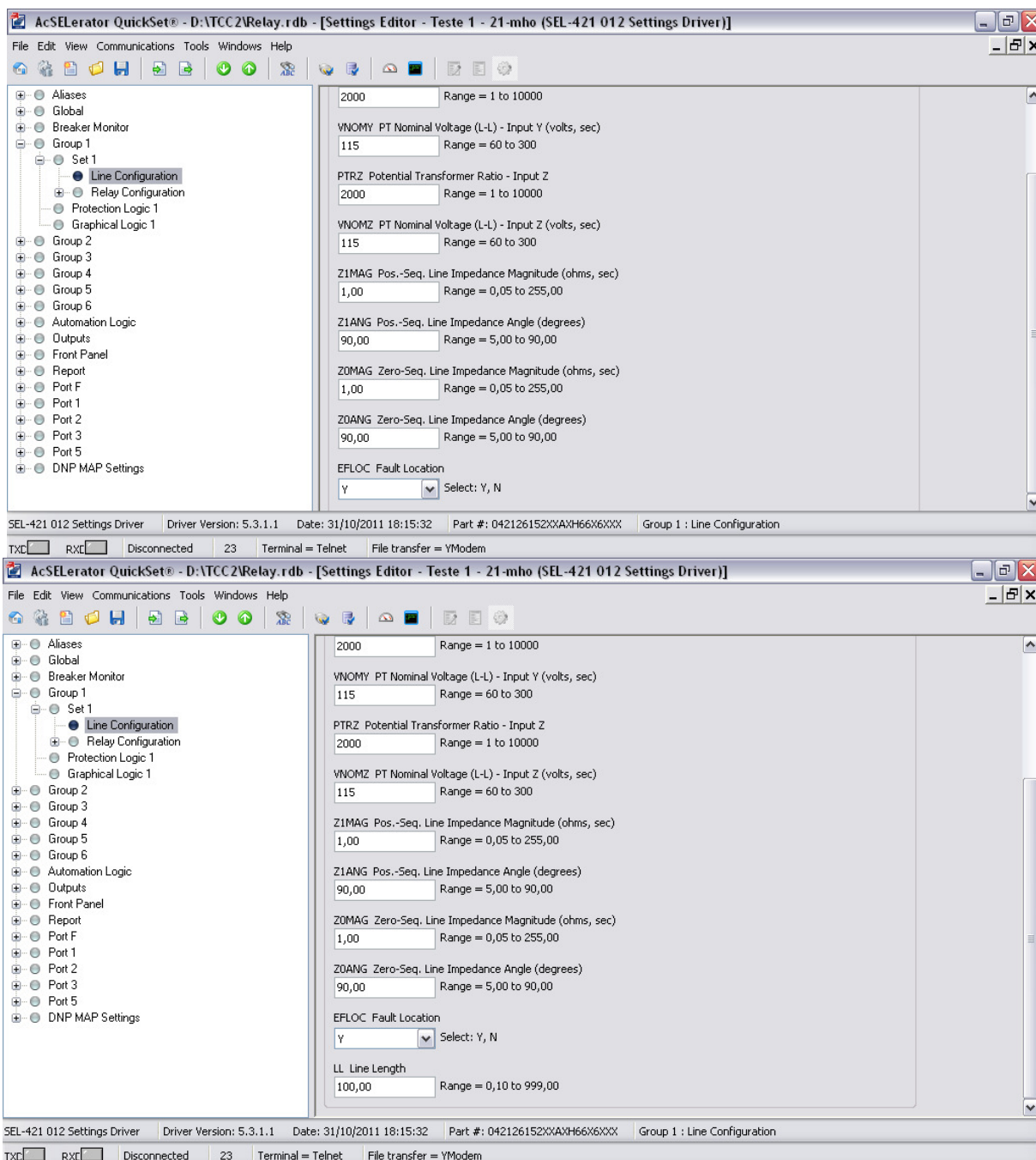


Figura 9 - Line Configuration.

O relé possui duas entradas de corrente W e X e duas entradas de tensão Y e Z. As relações de transformação de corrente dos TC's são mostradas nos campos CTRW e CTRX e devem ser ajustadas em 200, o que significa que a corrente no primário do transformador é 200 vezes maior que no secundário. Já as relações de transformação de tensão dos TP's podem ser visualizadas nos campos PTRY e PTRZ, ambos devem ser ajustados em 2000, ou seja, a tensão no primário é 2000 vezes maior que no secundário do transformador. A tensão nominal dos TP's deve ser 115 V, conforme pode ser conferido nos campos VNOMY e VNOMZ.

Além disso, devem ser ajustadas as magnitudes e ângulos das impedâncias de linha de sequência positiva e zero, sendo definidas em 1Ω e 90° , respectivamente.

Para que o relé possa determinar a distância da falta, deve-se deixar o campo EFLOC com um Y (yes) e determinar o comprimento da linha. Tais dados são necessários, pois o localizador de faltas utiliza os valores de LL, Z1MAG, Z1ANG, Z0MAG e Z0ANG para fornecer a distância em que se encontra a falta.

Em “Relay Configuration”, definem-se quais funções estarão ativas ou não. Expandindo as opções de “Relay Configuration”, clicando no sinal de “+”, notam-se uma série de funções que podem ser configuradas se estiverem ativas.

A opção “Phase Distance Elements” permite determinar quantas zonas terão a função 21, qual a distância que cada uma alcança em ohms (Ω) e quantos ciclos são necessários para que cada uma atue. Neste caso, a zona 1 tem um alcance de 5Ω e 3 ciclos (50 ms) e a zona 2, 8Ω e 12 ciclos (200 ms).

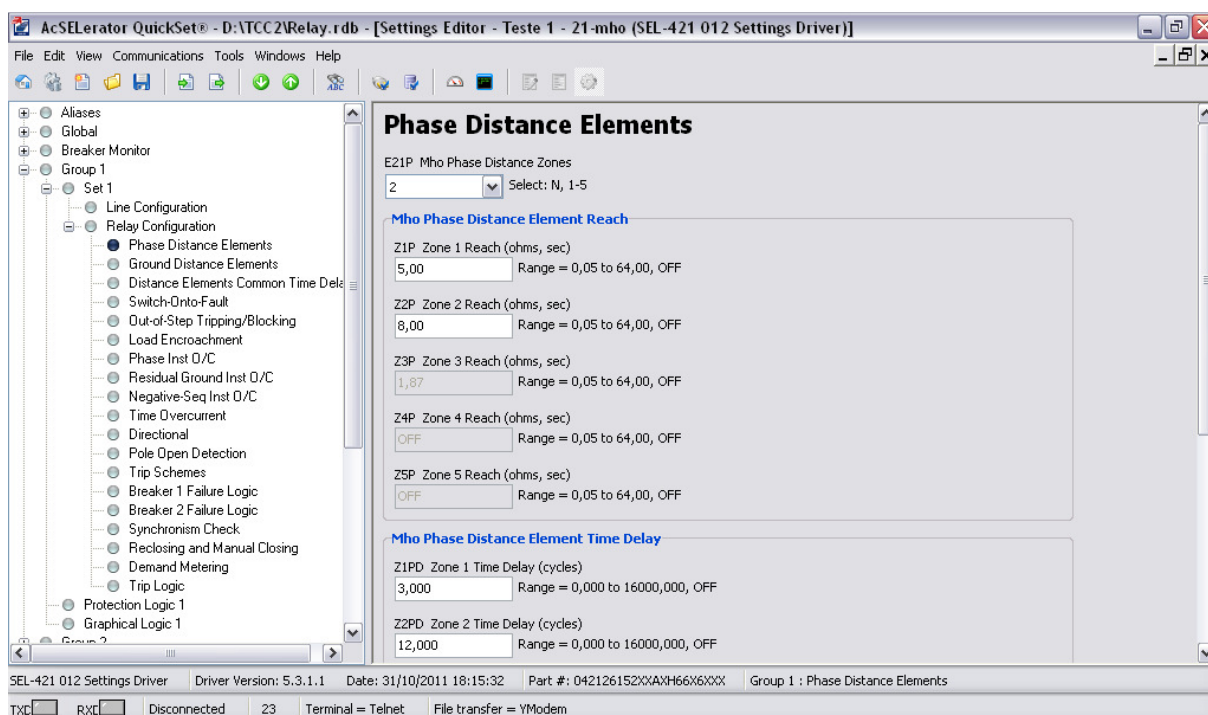


Figura 10 - Phase Distance Elements.

A relação entre o alcance da zona e os valores de tensão e corrente que incidem sobre a linha em caso de falta é a seguinte:

$$Z = \frac{V}{A}$$

Com isso, no caso de um ensaio, entende-se que para que seja simulado uma falta na zona 2, a mala de teste deve enviar ao relé um sinal de tensão de, pelo menos, 20 V e um sinal de corrente de 2,5 A, o que gera uma impedância de 8 Ω , compatível com o ajuste feito para a zona em questão.

Os elementos de distância de terra mho são configurados na opção “*Ground Distance Elements*”, as quais devem ter alcance de 6 Ω e 9 Ω para as zonas 1 e 2, respectivamente, e tempo de atuação de 3 e 12 ciclos, respectivamente. Estes ajustes são mostrados nas figuras a seguir.

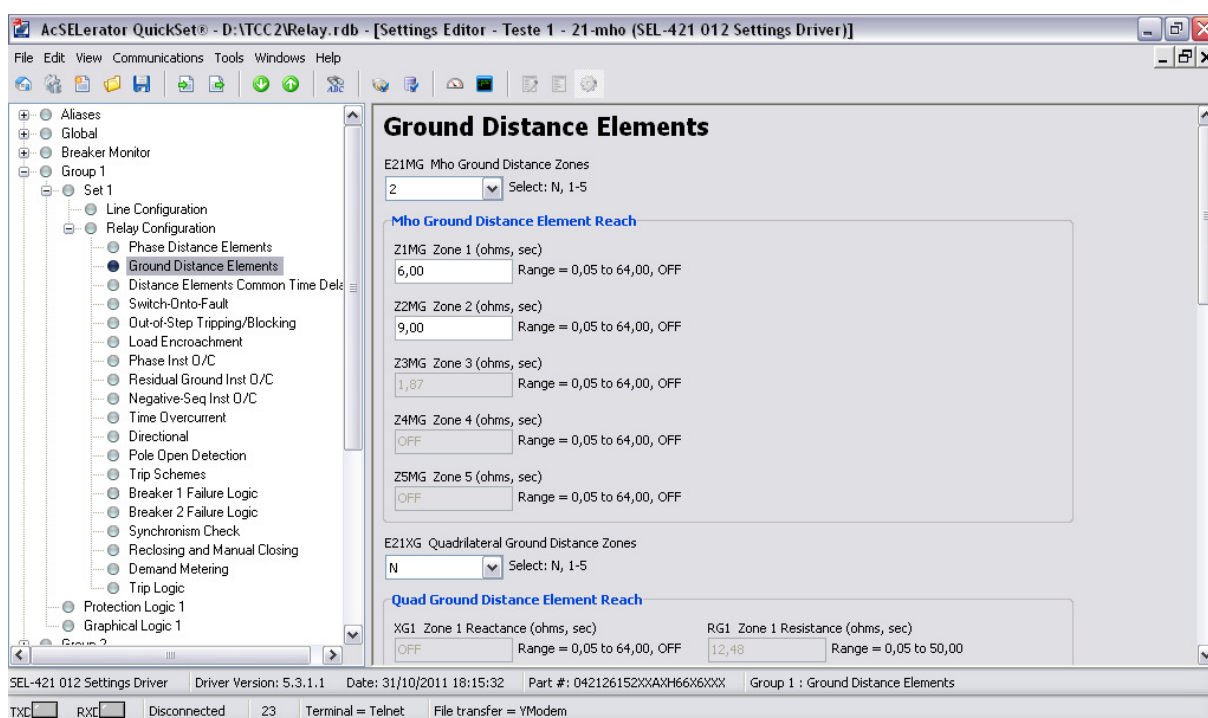


Figura 11 - Ground Distance Elements.

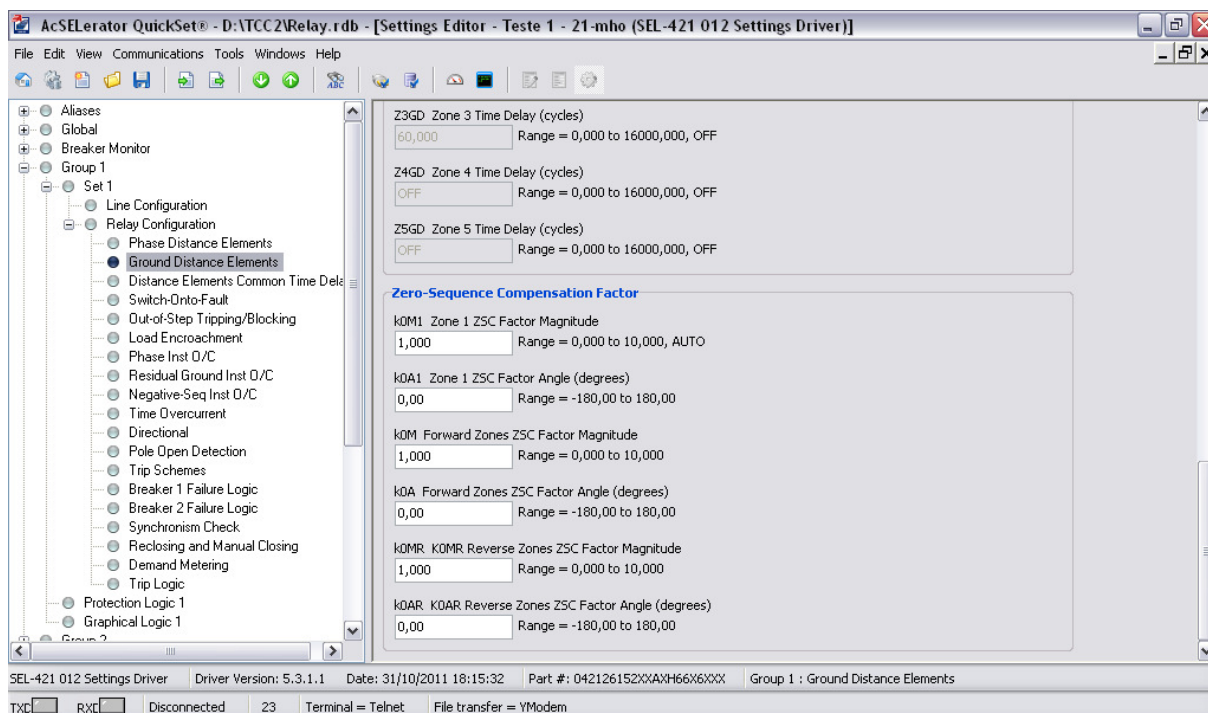


Figura 12 - Fator de Compensação de Sequência Zero.

Nota-se que também deve ser ajustado o fator de compensação de sequência zero k_0 . Este fator é de extrema importância para evitar erros no cálculo da impedância até a falta. Ele compensa o fato de que, no caso de uma falta a terra, as correntes de sequência zero das fases envolvidas na falta também circularão nas fases não envolvidas, o que fornecerão dados errôneos para o relé e, conseqüentemente, o equipamento não fornecerá uma impedância de falta tão precisa.

Na opção “*Trip Logic*” devem ser determinadas quais zonas atuarão. Neste caso, foram escolhidas as zonas 1 e 2 de fase e de terra.

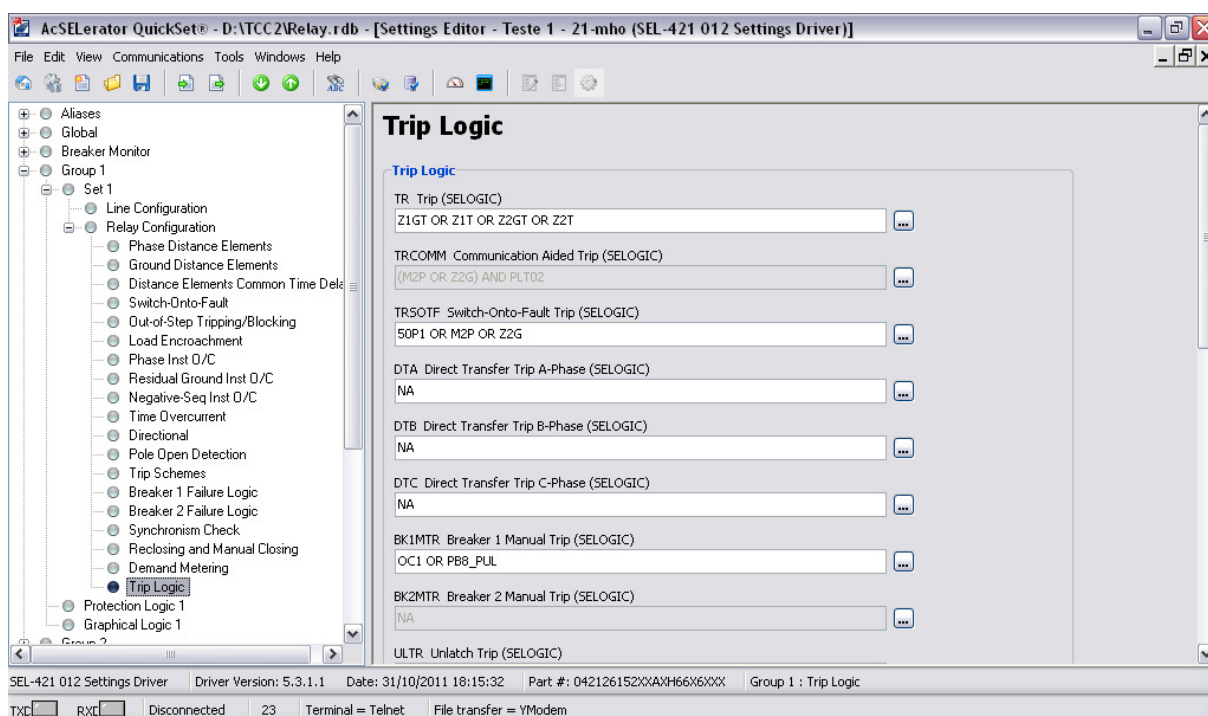


Figura 13 - Trip Logic.

AJUSTE DA FUNÇÃO 50

Para configurar a função 50 para atuação no relé em caso de sobrecorrente, deve-se ajustar os valores de corrente de *pick-up* e tempo de atuação na opção “Phase Inst O/C”, na guia “Relay Configuration”.

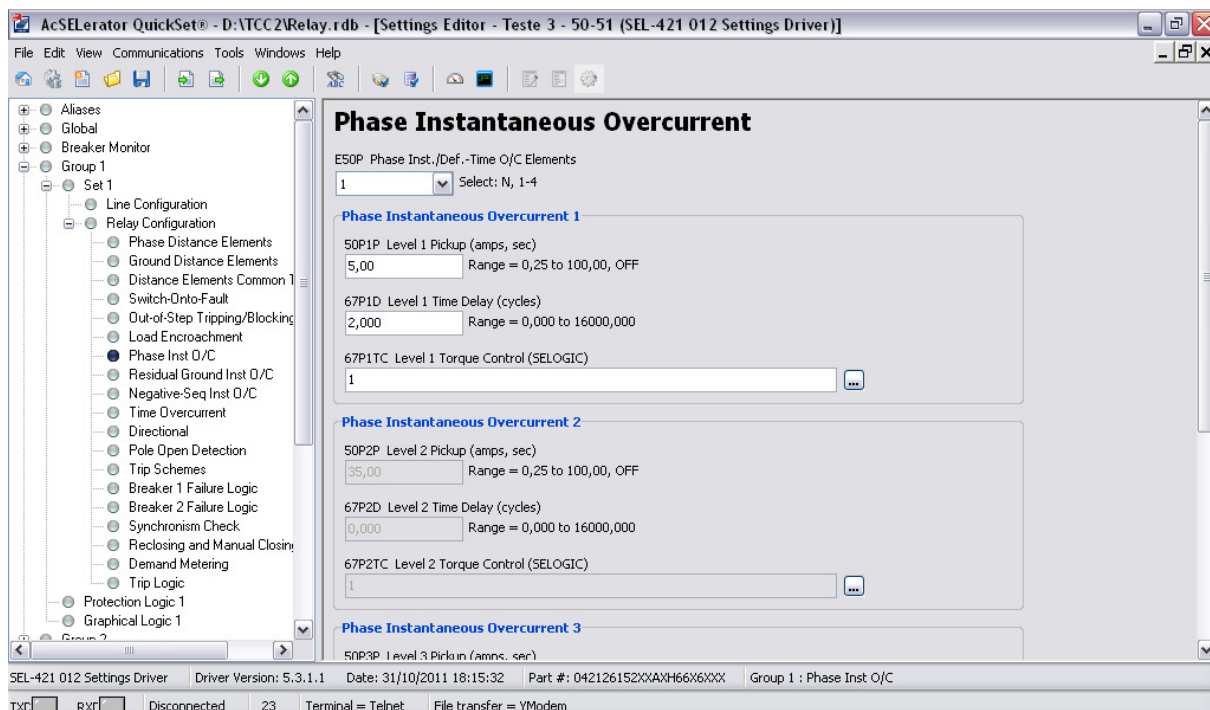


Figura 14 - Phase Instantaneous Overcurrent.

O valor de *pick-up* deve ser de 5 A e o tempo de atuação, 2 ciclos (33,333 ms).

Na opção “Main Board” na guia “Outputs” deve-se definir quais serão os *trips* de cada função para cada saída.

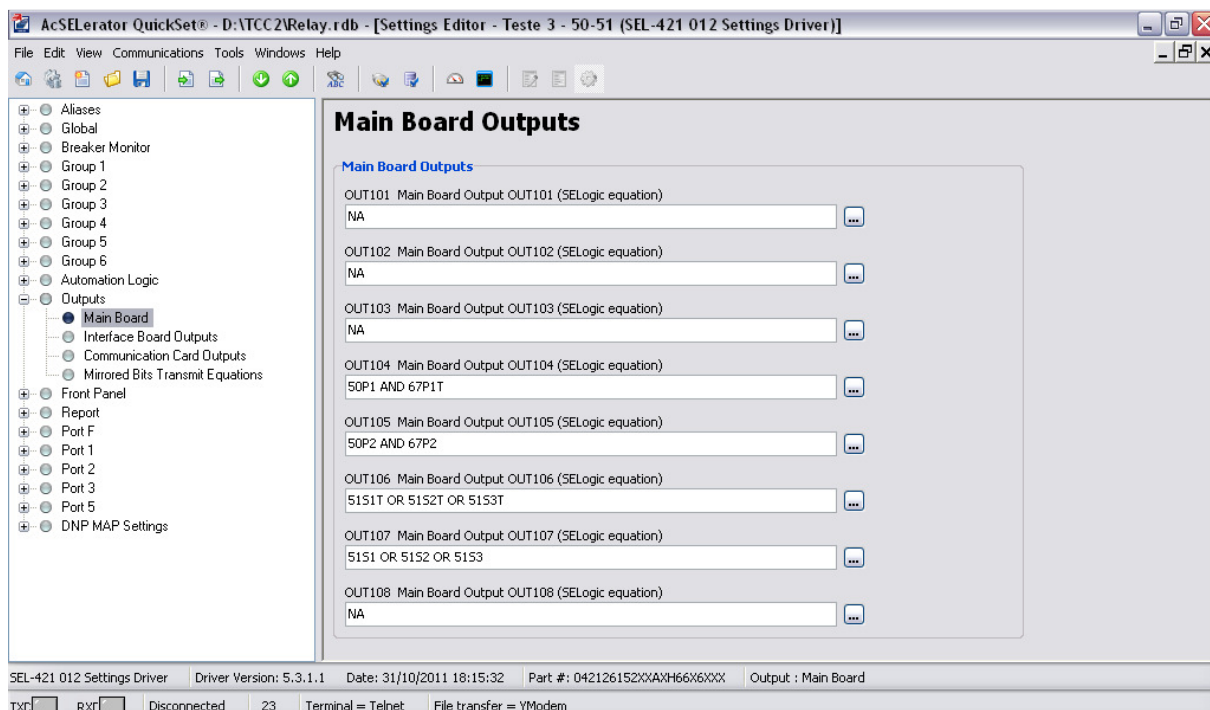


Figura 15 - Main Board Outputs.