

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Rodrigo de Almeida Coelho

Elaboração de Experimentos Didáticos para o Laboratório de Proteção Digital

Campina Grande, Paraíba

Setembro de 2015

Rodrigo de Almeida Coelho

Elaboração de experimentos didáticos para o laboratório de proteção digital

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Orientadora:

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Setembro de 2015

Rodrigo de Almeida Coelho

Elaboração de experimentos didáticos para o laboratório de proteção digital

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora, UFCG

Campina Grande, Paraíba
Setembro de 2015

Este trabalho é dedicado aos meus Pais e à minha Tia Lourdes.

Agradecimentos

Agradeço:

A Deus pelas oportunidades proporcionadas durante toda a vida acadêmica, além de toda a força Nele encontrada durante esta difícil caminhada;

Aos meus pais Antonia e Ronaldo pelos incansáveis esforços e dedicação para me proporcionar condições de enfrentar todas as dificuldades encontradas durante esta trajetória;

Aos meus irmãos Fernando, Flávia, Fábio e Rubens pelo apoio, paciência e compreensão de sempre.

À minha família pelo cuidado e pela preocupação sempre presentes. Um agradecimento especial à minha Tia Lourdes pelo inestimável suporte durante todo o curso.

À minha noiva Nathália: pelas atitudes sempre presentes de incentivo, apoio e cuidado durante todas as adversidades; pela compreensão que teve durante todas as ausências motivadas pela vida acadêmica; pela preocupação e acompanhamento durante todos os momentos; por toda a confiança na força do amor que nos une.

À Professora Núbia pela disponibilidade, paciência e atenção durante a realização deste trabalho. Obrigado pela oportunidade.

Aos mestrandos Cecília Costa e Raphael Leite por todo o suporte, esclarecimentos prestados e palavras de apoio a mim direcionadas. Obrigado por possibilitarem a realização deste trabalho.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, especialmente ao pessoal do 09.2: Rafael de Melo, Eduardo Souza, Felipe Gomes, Felipe Fernandes, Victor Reginato, Pablo Fabrício, Beethoven Nóbrega, Cristovam André e Henrique Vanderlei. Obrigado pelas influências positivas, pelas ajudas e pelos momentos de alegria vividos em toda esta fase.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica pela formação acadêmica e pela contribuição na minha formação como ser humano.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, especialmente à Adail e Tchai, por todo o apoio e esclarecimentos prestados durante todo o curso.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram à sua maneira, na minha formação.

“No caminho da renúncia, só conta o primeiro passo. Os demais chegam por si mesmos”

São João Maria Vianney

Resumo

Este trabalho abrange o estudo da proteção de sistemas elétricos mediante a utilização de um relé digital, modelo SEL-311C e um simulador digital em tempo real: o RTDS™. A importância deste estudo é verificada a partir do entendimento dos avanços tecnológicos na área da proteção, onde os relés digitais cada vez ganham mais espaço. Neste contexto, surge o Laboratório de Proteção Digital (LabPro) na Universidade Federal de Campina Grande, que visa auxiliar e fomentar a mão-de-obra indispensável a este novo momento da proteção. A necessidade do aprendizado sobre as práticas de parametrização, configuração e utilização de relés digitais motivou este trabalho, cujo foco é a elaboração de experimentos didáticos de proteção digital. Este relatório contempla os fundamentos básicos da proteção de sistemas elétricos, a apresentação dos equipamentos disponíveis no LabPro, bem como o resultado deste trabalho: os guias didáticos.

Palavras chave: proteção digital, relé SEL-311C, RTDS™, experimentos didáticos.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Componentes do sistema de Proteção (GUERRA, 2011).....	4
Figura 2.2: Graduação tempo <i>versus</i> distância para os relés de distância (GUERRA, 2011)....	5
Figura 2.3: Características das zonas de operação (SATO, 2005).	6
Figura 2.4: Zonas de operação e lógica de contatos do relé de impedância (GUERRA, 2011).6	
Figura 2.5: Zonas de operação e lógica de contatos do relé mho (GUERRA, 2011).....	7
Figura 2.6: Zonas de operação e lógica de contatos do relé de reatância (GUERRA, 2011).....	8
Figura 2.7: Características poligonal e na forma de um losango (ALMEIDA, 2000).	8
Figura 2.8: Diagrama de blocos de um relé digital (ALMEIDA, 2000).	9
Figura 3.1: LabPro.	12
Figura 3.2: Relé SEL-311C	12
Figura 3.3: a) Cartão GTWIF; b) Cartão WIF; c) Cartão IRC.	16
Figura 3.4: <i>Global Bus Hub</i>	16
Figura 3.5: a) Cartão GPC; b) Cartão GTNET.	17
Figura 3.6: a) Cartão GTA0; b) Cartão GTDO.	18
Figura 3.7: a) Cartão GTAI; b) Cartão GTDI; c) Cartão GTFPI.	18
Figura 3.8: a) Painel de <i>interface</i> de entrada e saída digital de baixa tensão; b) Painel de alta tensão.	19
Figura 3.9: Relação entre os componentes do RSCAD.	19
Figura 3.10: Tela do <i>FileManager</i>	21
Figura 3.11: Tela do <i>Draft</i> (suas duas <i>interfaces</i>).	21
Figura 3.12: Tela do <i>RunTime</i>	21
Figura 3.13: Tela do <i>TLine</i>	22
Figura 3.14: Tela da biblioteca do sistema de potência.	23
Figura 3.15: Modelo do cartão GTA0 encontrado na biblioteca do RSCAD.	24
Figura 3.16: Janela de configuração do cartão GTA0.	24
Figura 3.17: Sistema elétrico a ser modelado.	25
Figura 3.18: Sistema modelado no RTDS™ - diagrama trifilar.	25
Figura 3.19: Sistema modelado no RTDS™ - diagrama unifilar	26
Figura 3.20: Correntes e tensões (falta BCT).	26
Figura 3.21: Correntes e tensões (falta CT).	27
Figura 3.22: Atuação da proteção.	28
Figura 3.23: Esquema de conexão entre o relé e o RTDS™ (COSTA <i>et al</i> , 2015).	28

Figura 3.24: Conexão das saídas do RTDS™ ao relé.	29
Figura 3.25: Detalhe da conexão das saídas do RTDS™ ao relé.	29
Figura 3.26: Conexão de seis canais do cartão GTA0 para externar os sinais de corrente e tensão oriundos do RTDS™.	29
Figura 3.27: Fonte de tensão utilizada (rótulo do fio laranja: relé → fonte. Rótulo do fio preto: fonte → RTDS™).	30
Figura 3.28: Conexão do relé com a fonte (fio laranja) e com o RTDS™ (fio branco: relé → RTDS™).	30
Figura 3.29: Conexão do RTDS™ (cartão GTDI) com a fonte de tensão (fio preto) e com o relé (fio branco).	31
Figura 3.30: Detalhe (rótulos dos fios) da conexão do RTDS™ com a fonte de tensão e com o relé.	31
Figura 3.31: Recepção do sinal de <i>trip</i> no RTDS™.	32
Figura 3.32: Atuação da proteção diante de uma falta fase b – fase c – terra (LED de <i>trip</i> aceso indica nível lógico um para este sinal; LED's B, de fase B, C, de fase C, e G, de <i>ground</i> – terra, em inglês – indicam a ocorrência deste tipo de falta).	32
Figura 3.33: Janela de eventos: falta BCT.	33
Figura 3.34: Gráficos de corrente e tensão: falta BCT.	33
Figura 3.35: Diagrama fasorial: falta BCT.	34
Figura 3.36: Janela de eventos: falta CT.	34
Figura 3.37: Gráficos de corrente e tensão: falta CT.	35
Figura 3.38: Diagrama fasorial: falta CT.	35

Sumário

1. Apresentação	1
2. Fundamentação Teórica.....	2
2.1. Fundamentos da Filosofia da Proteção	3
2.2. Um Sistema de Proteção Típico	3
2.3. Relés de Distância.....	4
2.3.1. Considerações Gerais.....	4
2.3.2. Características dos Relés de Distância	5
2.4. Introdução à Proteção Digital	8
2.4.1. Arquitetura do Relé Digital	9
3. O TCC	12
3.1. Relé SEL-311C	12
3.2. RTDS™	15
3.3. Experimentos Didáticos.....	25
3.3.1. Experimento 1: Modelagem de Sistemas no RTDS™	25
3.3.2. Experimento 2: Parametrização do Relé SEL-311C.....	27
3.3.3. Experimento 3: Conexão do relé SEL 311-C ao RTDS™	28
3.3.4. Experimento 4: Geração de Oscilografias	32
4. Conclusão	36
5. Referências	37
Anexos.....	39

1. Apresentação

Neste relatório estão descritas as atividades referentes ao Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), realizado nos Laboratórios de Referência em Controle e Automação (LARCA) e de Sistemas de Potência (LSP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), durante o período de setembro/2014 a julho/2015, sob a orientação da professora Núbia Silva Dantas Brito e supervisão dos alunos de pós-graduação Raphael Leite e Cecília Alves. O TCC teve como objetivo geral, a elaboração de experimentos didáticos para serem aplicados na disciplina Proteção de Sistemas Elétricos e como objetivos específicos, o estudo da proteção digital, do relé SEL-311C e do RTDS™.

A disciplina Proteção de Sistemas Elétricos integra o rol das disciplinas da ênfase Eletrotécnica do Curso de Engenharia Elétrica da UFCG. O objetivo geral dessa disciplina é introduzir os fundamentos da filosofia da proteção e os princípios gerais de funcionamento dos relés e demais dispositivos de proteção, a fim de capacitar os profissionais (engenheiros) para atuarem na área de proteção. Dentre as disciplinas do Curso de Engenharia Elétrica, Proteção de Sistemas Elétricos foi, sem dúvida, uma das que sofreu o maior impacto. O processo irreversível de substituição dos relés eletromecânicos pelos relés digitais aliados a integralização da proteção com outras áreas do setor elétrico, tais como supervisão e controle, provocou uma verdadeira revolução no mundo da proteção, inclusive na formação do engenheiro de proteção. Além disso, a questão da interdisciplinaridade ficou mais evidente, visto que as áreas de proteção, supervisão, controle e automação tornaram-se intimamente entrelaçadas. Como resultado, mudanças significativas no perfil do profissional de proteção estão ocorrendo (nem sempre bem assimiladas), tanto no ambiente acadêmico quanto empresarial.

Visando se adequar a essa nova realidade, o Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) vem envidando diversos esforços no sentido de modernizar essa disciplina. Com o apoio da Reitoria da UFCG, da CAPES e da FINEP, o GSE foi contemplado com o espaço físico para a construção do Laboratório de Proteção Digital (LabPro) e com a aquisição de diversos equipamentos, como por exemplo: simulador digital em tempo real (RTDS™), computadores, relés e acessórios. Para que o LabPro possa de fato ser utilizado no ensino de Proteção de Sistemas Elétricos, é necessário o desenvolvimento de experimentos didáticos, cujas primeiras propostas foram desenvolvidas neste TCC.

2. Fundamentação Teórica

Considerado o principal elemento de um sistema de proteção, o relé é o sensor e atuador da proteção. Cronologicamente, os relés eletromecânicos foram os primeiros dispositivos utilizados na proteção dos SEP, sendo o uso datado do início do século XX. A operação dos relés eletromecânicos se dá mediante a ação de torques eletromagnéticos que atuam em armaduras basculantes e rotores, sendo constituídos por várias bobinas, núcleos magnéticos, molas, alavancas e engrenagens, que proporcionam a aparência de um mecanismo de relojoaria (GUERRA, 2011).

O desenvolvimento das válvulas possibilitou o surgimento dos primeiros relés estáticos entre 1930 e 1940. Diz-se estático devido à ausência de partes móveis, como as contidas nos relés eletromecânicos. Embora pouco conhecidos, também foram desenvolvidos relés semi-estáticos, que continham componentes eletrônicos e eletromecânicos. Este tipo de relé teve uma *vida curta*, pois consumia muita energia, além das válvulas apresentarem um alto índice de falha, o que reduzia a confiabilidade dos sistemas de proteção.

Por volta de 1950, os transistores passaram a ser fabricados em escala industrial, substituindo as válvulas, o que resultou no desenvolvimento dos primeiros relés a estado sólido, os quais possuíam suas principais partes (detectores de nível, temporizadores comparadores de amplitude e fase) constituídas por componentes discretos como diodos comuns, diodos zener, além dos transistores. Esses dispositivos eram bastante complexos, pois requeriam elevado número de componentes, os quais provinham de diferentes fabricantes, o que resultou em um índice de confiabilidade aquém do desejado. Esse problema foi contornado com o desenvolvimento da tecnologia dos circuitos integrados, que resultou no desenvolvimento de relés estáticos de maior confiabilidade, menor consumo, tamanho e peso reduzidos. Além dessas vantagens, esses dispositivos são modulares, o que permite uma manutenção mais simples (GUERRA, 2011).

Tanto os relés eletromecânicos como os estáticos têm as características de um computador analógico: possuem grandezas de entradas que são processadas mecanicamente ou eletronicamente para desenvolver um conjugado ou uma lógica de saída representando uma quantidade do sistema; tomam decisões que resultam em um fechamento de contato ou em um sinal de saída (SATO, 2005).

O desenvolvimento dos microprocessadores de alto desempenho possibilitou a utilização de computadores digitais para desempenhar as mesmas funções que os relés eletromecânicos e estáticos. A partir da representação digital dos parâmetros dos relés (geralmente correntes e tensões do sistema de potência) é possível que o relé digital desempenhe as funções dos relés supracitados. Esta representação digital é feita a partir de amostragens dos sinais analógicos com a utilização de algoritmos computacionais apropriados para a digitalização conveniente dos sinais através de filtros digitais. A criação e o aperfeiçoamento dos microprocessadores permitiram a aplicação de sistemas de automação digitais em larga escala, onde o termo *relé* passou a ser substituído pelo acrônimo IED (*Intelligent Electronic Device*). Nesses dispositivos, além das funções de proteção, várias outras funções são realizadas, como localização de defeitos, oscilografia, controle e autodiagnóstico (GUERRA, 2011).

2.1. Fundamentos da Filosofia da Proteção

O principal objetivo de um sistema de proteção é assegurar que, na ocorrência de um curto-circuito e outras condições anormais de operação em componentes de um sistema elétrico, a parte defeituosa seja desconectada do sistema, facilitando a resolução do problema que a originou. Os seguintes requisitos básicos são necessários a um sistema de proteção (GUERRA, 2011):

Confiabilidade: O sistema de proteção sempre deve atuar em caso de defeito, e apenas neste caso;

Sensibilidade: A faixa de incerteza entre as condições de operação e de não operação deve ser a menor possível;

Velocidade: O sistema de proteção deve atuar da forma mais rápida possível, de modo a evitar danos aos componentes da rede elétrica ou perda de estabilidade do sistema;

Seletividade: O defeito deve ser eliminado desligando-se a menor parte possível da rede, de modo a ser mantido o máximo índice de continuidade de serviço;

Economia: O custo do sistema de proteção deve ser compatível com o custo do equipamento protegido e com a importância deste em relação ao funcionamento do resto do sistema.

Os equipamentos de proteção podem ser separados em três grupos, a saber (GUERRA, 2011):

Proteção primária ou principal: Constitui a primeira linha de defesa contra os defeitos no sistema elétrico, atuando em primeira instância;

Proteção secundária ou de retaguarda: Atua em caso de falha da proteção principal e substitui a proteção principal em caso de manutenção desta última. Pode ser local, caso se encontre próximo à proteção primária, e remota, instalada em um local distante da proteção primária;

Proteção alternada ou redundante: Consiste na duplicação de todo o instrumental da proteção a ser instalado em um determinado local do sistema.

2.2. Um Sistema de Proteção Típico

O diagrama esquemático de um sistema de proteção típico é mostrado na Figura 2.1. Os principais componentes dos sistemas de proteção são apresentados a seguir (GUERRA, 2011; COTOSCK, 2015).

Transformadores de Potencial (TP): Destinados a isolação e condicionamento dos sinais de tensão para valores compatíveis à alimentação dos instrumentos (geralmente 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V). Eles reproduzem proporcionalmente a tensão do circuito primário nos instrumentos de proteção.

Transformadores de Corrente (TC): Destinados a isolação e condicionamento dos sinais de corrente para valores compatíveis à alimentação dos instrumentos (geralmente 5 A e 1 A). Reproduzem proporcionalmente a corrente do circuito primário nos instrumentos de proteção.

Relés instalados no lado secundário dos TPs e/ou TCs: O relé é o elemento sensor e atuador. É o responsável pela detecção das condições anormais no circuito e pelo envio do sinal de atuação

para o disjuntor associado.

Disjuntores: Dispositivos de manobra capazes de conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, além de conduzir por tempo especificado e interromper correntes anormais especificadas. Os disjuntores podem ser comandados por relés e também podem receber comando manual para abertura e fechamento.

Circuito de comando e controle da proteção, em corrente contínua: Possui autonomia de fornecimento de energia, conferida por um conjunto de baterias, cuja carga é mantida em nível máximo através de carregadores controlados, utilizando a energia fornecida pelo circuito principal.

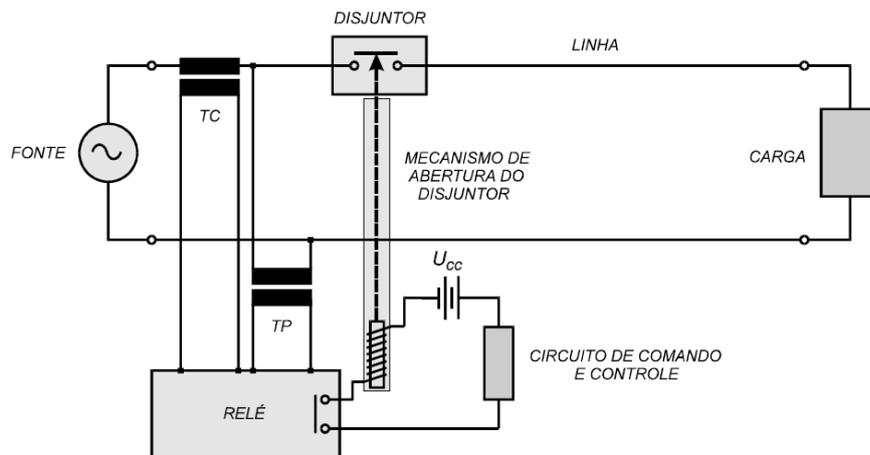


Figura 2.1: Componentes do sistema de Proteção (GUERRA, 2011).

2.3. Relés de Distância

Na prática, o sistema de potência está sujeito a modificações (adição de novas unidades consumidoras, manobras etc.), o que requer reconfiguração dos relés de proteção, os quais, entretanto, não devem atuar quando a linha protegida opera com sua capacidade nominal nem quando em situações de sobrecarga. Neste contexto, o relé de distância se destaca, visto que sua operação se baseia na comparação de grandezas em forma de impedância, admitância ou reatância. Além disso, o aumento da complexidade do sistema requer a combinação de duas características operativas em relés de proteção em linhas de transmissão: velocidade e seletividade. O relé de distância por apresentar essas características, constitui-se atualmente, no dispositivo mais adequado para a proteção de linhas de transmissão (SATO, 2005).

2.3.1. Considerações Gerais

Uma linha de transmissão (LT) composta por três seções é mostrada na Figura 2.2, onde em cada início de seção, está instalado um relé de distância.

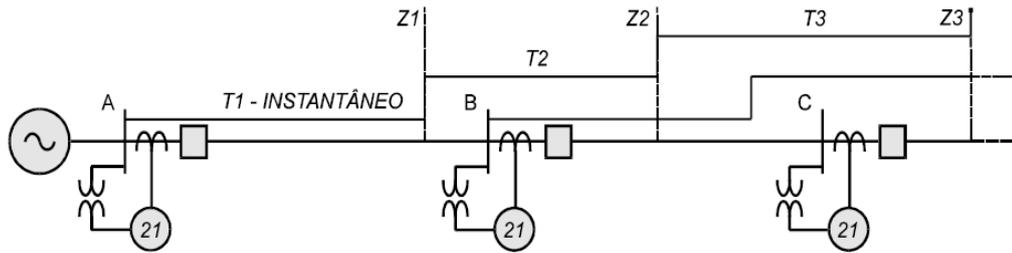


Figura 2.2: Graduação tempo *versus* distância para os relés de distância (GUERRA, 2011).

Os relés são compostos por três unidades correspondentes a zonas de diferentes alcances. Os ajustes do relé da barra A são descritos a seguir (GUERRA, 2011):

Zona 1:

- Ajuste de impedância ($Z1$): 80% a 90% do trecho AB;
- Ajuste de tempo ($T1$): instantâneo.

Zona 2:

- Ajuste de impedância ($Z2$): 100% do trecho AB mais 50% do trecho subsequente BC;
- Ajuste de tempo ($T2$): entre 0,25s e 0,5s.

Zona 3:

- Ajuste de impedância ($Z3$): 100% do trecho AB mais 120% do trecho subsequente BC;
- Ajuste de tempo ($T3$): 1s.

2.3.2. Características dos Relés de Distância

Os relés de distância podem ser classificados pelas características de suas zonas de operação. Quatro tipos de relés são conhecidos, de acordo com as características (SATO, 2005):

- i. Relé de impedância;
- ii. Relé de admitância (ou mho);
- iii. Relé de reatância;
- iv. Relé quadrilateral.

As características no diagrama $R-X$ são apresentadas na Figura 2.3. O relé de reatância tem uma zona de alcance delimitada por uma reta paralela ao eixo R . O relé de impedância tem uma característica circular centrada na origem do diagrama $R-X$. A característica quadrilateral é definida por quatro linhas retas. Esta última característica só é possível de se obter em relés estáticos e digitais (SATO, 2005). Embora a característica mho seja bastante popular, as características quadrilaterais cada vez mais tomam espaço no campo da aplicação em relés digitais.

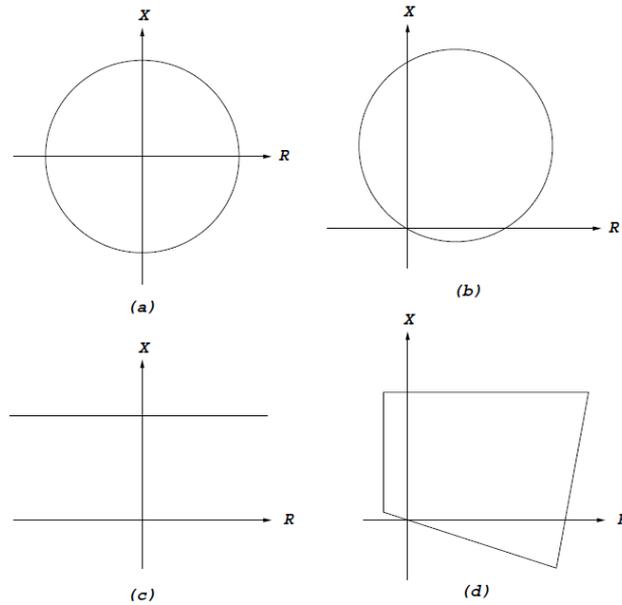


Figura 2.3: Características das zonas de operação (SATO, 2005).

Relé de Impedância

Esses relés possuem a seguinte composição (GUERRA, 2011):

- i. Uma unidade de partida, direcional (D);
- ii. Três unidades de impedância ($Z1$, $Z2$, $Z3$);
- iii. Uma unidade de temporização (T), que fornece retardos $T2$ e $T3$ para as zonas $Z2$ e $Z3$, sendo $T2 < T3$. A zona $Z1$ é instantânea.

A combinação dessas unidades no diagrama $R-X$, bem como o esquema da lógica de contatos, são apresentados na Figura 2.4. A utilização da unidade direcional D é justificada pelo fato de que as unidades de impedância são incapazes de discriminar se o efeito ocorre no ponto $P1$ ou no ponto $P2$ indicado na Figura (GUERRA, 2011).

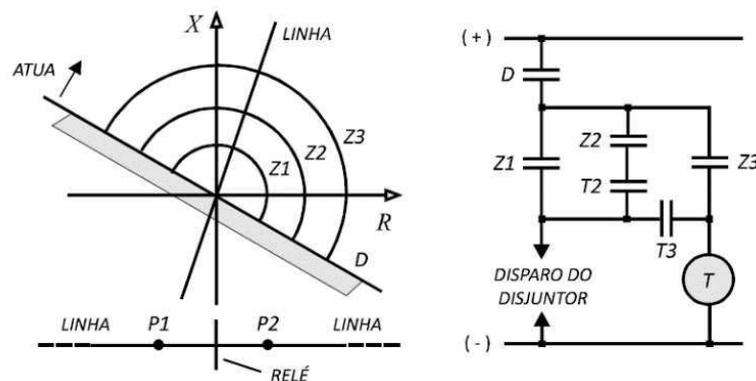


Figura 2.4: Zonas de operação e lógica de contatos do relé de impedância (GUERRA, 2011).

Relé mho

O esquema que utiliza unidades mho (Figura 2.5) consiste em (GUERRA, 2011):

- i. Três unidades mho ($M1$, $M2$, $M3$);
- ii. Uma unidade de temporização (T), que fornece retardos $T2$ e $T3$ para as zonas $M2$ e $M3$, sendo $T2 < T3$. A zona $M1$ é instantânea.

Unidades direcionais são dispensadas, pois a unidade mho já é direcional. A zona $M3$ é do tipo mho deslocada, a qual inclui a origem. Desta forma, ela proporciona proteção de retaguarda para defeitos na barra da subestação (GUERRA, 2011).

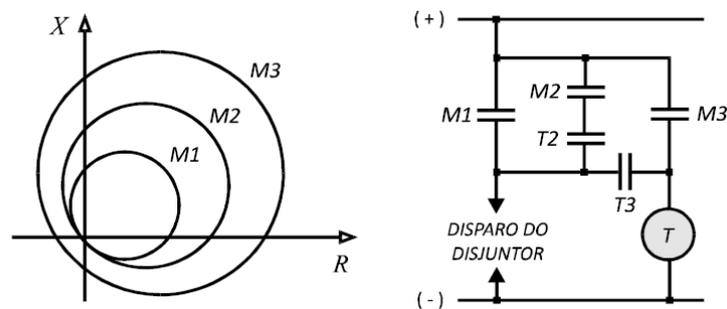


Figura 2.5: Zonas de operação e lógica de contatos do relé mho (GUERRA, 2011).

Relé de Reatância

As unidades de reatância apresentam característica aberta e, portanto, área ilimitada no plano $R-X$. Desta forma, são incapazes de distinguir se o defeito ocorre à frente ou atrás da subestação, além de atuarem indevidamente em condição de carga normal e em caso de oscilações eletromecânicas no sistema. Para limitar a área da característica $R-X$, bem como proporcionar direcionalidade ao relé, usa-se uma unidade mho como elemento de partida na 3ª zona. Esses esquemas são os mais utilizados em unidades do tipo eletromecânico. Na Figura 2.6, tem-se (GUERRA, 2011):

- i. Duas unidades de reatância ($X1$, $X2$) para as zonas 1 e 2;
- ii. Uma unidade de partida tipo mho (M) na zona 3;
- iii. Uma unidade de temporização (T), que fornece retardos $T2$ e $T3$ para as zonas $X2$ e M . A zona $X1$ é instantânea.

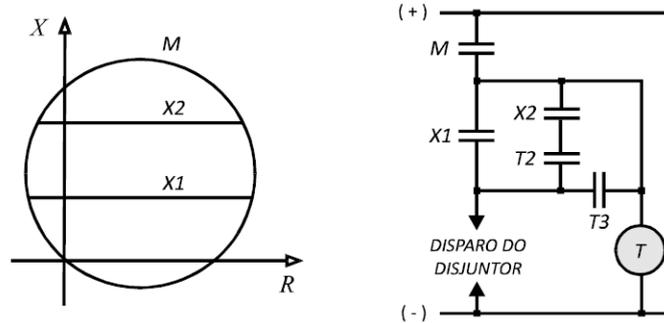


Figura 2.6: Zonas de operação e lógica de contatos do relé de reatância (GUERRA, 2011).

Relé Quadrilateral

A utilização de microprocessadores possibilitou que os relés de distância pudessem trabalhar com as mais diferentes características: losango, trapézio, retângulo etc. (Figura 2.7). O relé possui a característica que otimiza o seu desempenho de acordo com as características de operação de cada sistema elétrico (ALMEIDA, 2000).

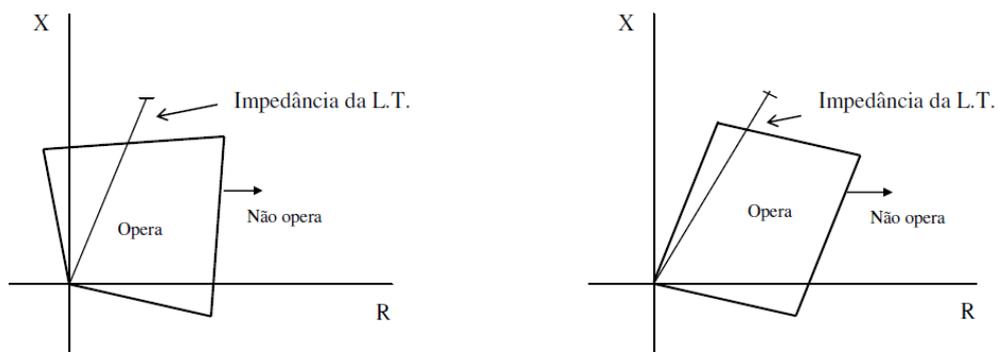


Figura 2.7: Características poligonal e na forma de um losango (ALMEIDA, 2000).

2.4. Introdução à Proteção Digital

A proteção digital dos SEP surgiu quando pesquisadores desenvolveram diferentes algoritmos para relés de distância para proteção de linhas de transmissão. Embora tenha surgido nas décadas de 1960 e 1970, a técnica de proteção digital é uma área de pesquisa contínua, visto que o desenvolvimento dos microprocessadores avança cada vez mais. Algumas vantagens dos relés digitais em relação aos convencionais são elencadas a seguir:

- i. Automonitoramento;
- ii. Detecção e diagnóstico de faltas;
- iii. Possibilidade de desenvolvimento de novas funções e métodos de proteção;
- iv. Compartilhamento de dados através de redes de comunicação;
- v. Melhor *interface* homem x máquina;
- vi. Redução das interferências do meio ambiente nas condições operativas dos equipamentos;
- vii. Possibilidade de emulação de qualquer relé eletromecânico;
- viii. Ajustes diferenciados para defeitos monofásicos, bifásicos e trifásicos;

ix. Possibilidade da utilização de mais de uma função de proteção em um único dispositivo.

As desvantagens são:

- i. Possui vida útil reduzida (10 a 15 anos), enquanto os relés convencionais possuem vida longa (acima de 30 anos);
- ii. O *hardware* avança rapidamente, o que os torna obsoletos;
- iii. Está sujeito à interferências eletromagnéticas.

Atualmente, os relés existentes nas subestações estão sendo trocados por relés digitais, o que se denomina de *retrofit*, que envolve também, a modernização da subestação como um todo.

2.4.1. Arquitetura do Relé Digital

Os relés digitais funcionam internamente associando várias lógicas de blocos. Um diagrama de blocos típico de um relé digital é apresentado na Figura 2.8. No relé são aplicados sinais analógicos provenientes dos transformadores de instrumentos (transdutores) primários de corrente e potencial, e sinais discretos, que trazem consigo a informação do estado de disjuntores, chaves e outros relés. Estes sinais são processados nos subsistemas correspondentes antes de sua aplicação ao microcomputador (elemento principal do relé). Antes de chegar na unidade central de processamento (CPU), os sinais analógicos passam por um conversor analógico/digital. Os sinais discretos de saída do relé recebem processamento no subsistema de saídas discretas. A função de sinalização da operação (bandeirolas) e do estado do relé é feita por dispositivos de sinalização visíveis no exterior do equipamento. A maioria dos relés digitais dispõe, ainda, de capacidade de comunicação com outros equipamentos digitais, mediante portas serial e/ou paralela.

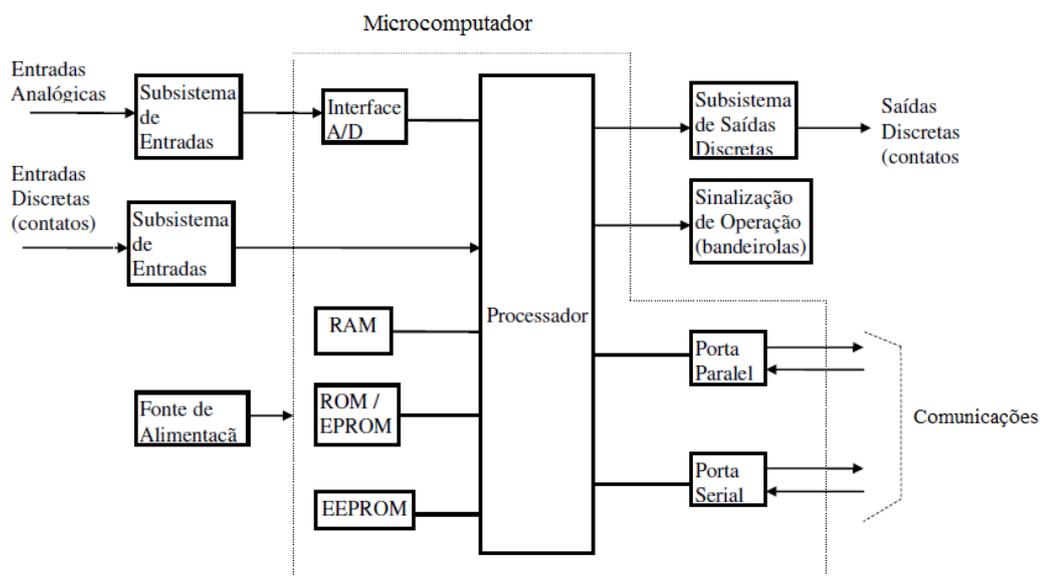


Figura 2.8: Diagrama de blocos de um relé digital (ALMEIDA, 2000).

Funções do subsistema de entradas analógicas:

- i. Condicionar os sinais de tensão e corrente, oriundos dos transformadores de instrumentos, a valores adequados para a conversão analógica/digital;
- ii. Proporcionar isolamento elétrico entre os circuitos eletrônicos do relé e os circuitos de entrada;
- iii. Prover proteção contra sobretensões transitórias ao relé;
- iv. Fazer a filtragem *anti-aliasing* dos sinais analógicos de entrada. Este procedimento se faz necessário pois limita o espectro de frequência desses sinais a uma frequência menor ou igual à metade da frequência de amostragem a ser utilizada no relé.

Funções do subsistema de entradas discretas:

- i. Condicionar os sinais para aplicá-los ao processador;
- ii. Isolar eletricamente as entradas e os circuitos eletrônicos e proteger o relé contra sobretensões transitórias.

Interface analógica/digital: local onde ocorrem os processos de amostragem e conversão analógica/digital dos sinais analógicos. São gerados pulsos de curta duração e de determinada frequência, que marcam os instantes de amostragem. Em cada instante é convertido o valor instantâneo do sinal analógico para uma palavra digital, que será aplicada ao processador. A técnica mais utilizada para a amostragem de sinais analógicos nos relés digitais é a que consiste em tomar amostras com espaçamentos uniformes durante todo o ciclo do sinal. A frequência de amostragem é da ordem de 240 Hz a 2 kHz.

Processador digital: encarregado da execução dos programas de proteção, do controle de diversas funções de tempo e de realizar tarefas de autodiagnóstico e de comunicação com os periféricos, o processador digital possui três memórias:

- i. RAM (Memória de Acesso Aleatório): É responsável por armazenar temporariamente os valores das amostras de entrada (*buffer*). Além disso, também acumula resultados intermediários dos programas de proteção e armazena dados que serão posteriormente guardados em memória não volátil;
- ii. ROM (Memória Somente de Leitura, tipo não programável) ou PROM (Memória Somente de Leitura, tipo programável): Armazenam os programas do relé, os quais podem ser, excepcionalmente, executados nestas memórias ou carregados nas memórias RAM para execução posterior;
- iii. EPROM (PROM apagável) ou EEPROM (PROM apagável eletricamente): São responsáveis pelo armazenamento dos parâmetros de ajuste do relé e outros dados importantes que não variam frequentemente.

Portas seriais: possibilitam a troca de informações remotas, como ajustes dos parâmetros do relé à distância.

Portas paralelas: utilizadas para intercâmbio de informação em tempo real.

Subsistema de saídas discretas e sinalização de operação: responsável pelo processamento da palavra digital de uma porta paralela de saída do processador. Cada *bit* da palavra digital pode ser utilizado para definição do estado de um contato de saída do relé.

Fonte de alimentação: o relé deve possuir uma fonte de alimentação independente.

3. O TCC

Para o desenvolvimento do TCC foram utilizados como recursos didáticos os *softwares* AcSELeRator e RSCAD e executado conforme as atividades descritas a seguir.

- Estudo do funcionamento do relé SEL-311C e do RTDSTM disponíveis no LabPro (Figura 3.1).
- Elaboração e montagem dos experimentos didáticos.



Figura 3.1: LabPro.

3.1. Relé SEL-311C

O relé SEL-311C é produzido pela *Schweitzer Engineering Laboratories Comercial Ltd.* (SEL) e possui várias funções, dentre as quais destaca-se a função de proteção de distância de linhas de transmissão aéreas e de cabos subterrâneos (Figura 3.2). Um resumo de suas principais funcionalidades é apresentado a seguir (SEL, 2014; SILVA, 2011, 2012; FREITAS, 2010).



Figura 3.2: Relé SEL-311C

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 sequência negativa;
- 21: Distância de fase, quatro zonas tipo mho;

- 21G: Distância de neutro, quatro zonas tipo mho e quatro zonas tipo quadrilateral;
- 67G: Sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente ou tensão);
- 67Q: Direcional de sequência negativa;
- 85: Esquema de controle ou teleproteção;
- 78/68: Disparo e bloqueio por oscilação de potência;
- 79: Religamento automático monopolar ou tripolar, até quatro tentativas;
- 25: Verificação de sincronismo;
- 27/59: Subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- 59G: Sobrecorrente de neutro;
- 59Q: Sobretensão de sequência negativa;
- 50/62BF: Falha de disjuntor;
- 60: Perda de potencial;
- 81: Sub/Sobrefrequência e taxa de variação de frequência.

Funções de medição:

- Correntes de fase (I_A, I_B, I_C) e de neutro (I_G), correntes de sequência (I_1, I_2, I_0);
- Tensões de fase (V_A, V_B, V_C) e de sincronismo (V_S), tensões de sequência (V_1, V_2, V_3);
- Potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Fator de potência por fase e trifásico;
- 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 (IEEE C37.118).

Funções de monitoramento:

- Oscilografia, armazena até 12s de dados;
- Sequência de eventos, armazena os últimos 1024 eventos;
- Localizador de faltas, indicação em km ou %;
- Monitoramento do sistema de alimentação auxiliar CC (banco de baterias), fornecendo alarme para sub ou sobretensão;
- Monitoramento de desgaste dos contatos do disjuntor por polo;
- Contador de operações;
- Monitoramento das bobinas do disjuntor (através de programação lógica);
- *Web-server* integrado: permite a leitura e verificação de configurações, medições e ajustes através de servidor web integrados ao relé de proteção.

Funções de controle:

- Número de entradas binárias e contatos de saída:
 - *Standard*: 6 entradas e 8 contatos de saída digitais;
 - Com uma placa adicional: 14 entradas e 20 saídas digitais (opcional);
- Comando de abrir/fechar o disjuntor e/ou seccionadoras, local e remoto;
- Programação através de equações lógicas (SELogic):
 - 16 relés auxiliares/temporizadores, 16 biestáveis, 16 chaves de controle local e remoto.
- Programação de até 16 mensagens para serem exibidas no display;
- 10 *pushbuttons* configuráveis sinalizados por LED pré-programados com funções de controle mais comuns (opcional);
- 2 *pushbuttons* auxiliares sinalizados por LED para abertura/fechamento do disjuntor, independentes eletricamente do relé. Podem ser acionados mesmo com o relé desligado (opcional);
- Seletividade lógica;
- 6 grupos de ajustes;
- Controle de torque das funções de Sobrecorrente;
- 30 – Anunciador;
- 69 – Inibição de fechamento;
- 86 – Retenção de sinal de disparo.

Lógicas adicionais:

- Função 21N quadrilateral com unidade de medição resistiva que evita sobrealcances devido à condição pré-falta e unidade de medição reativa que evita sobrealcance devido à não-homogeneidade do sistema;
- Função 21 de fase compensada, para utilização quando da existência de transformadores Δ -Y entre o ponto de instalação do relé e a linha protegida (relé instalado do lado Δ do transformador);
- Detecção de transitórios em TPC;
- Compensação do tempo de fechamento do disjuntor na lógica de sincronismo;
- Trecho morto (*stub bus*);
- Energização sob falta (*switch onto fault*);
- Invasão de carga (*load encroachment*);
- Compensação de sequência zero independente para zona 1 e demais;
- Protocolo *Mirrored Bits* para a comunicação direta relé-a-relé, controle ou teleproteção sem a necessidade do equipamento teleproteção.

Integração:

- 1 porta serial EIA-232 frontal;
- 2 portas seriais EIA-232 traseiras;
- 1 porta USB frontal (opcional);
- 1 porta *ethernet* traseira 10/100Base-T – conector RJ45;
- 1 porta serial EIA-485 traseira (opcional).
- 1 porta *ethernet* traseira 100BASE-FC – conector LC (opcional).
- 1 porta *ethernet* traseira 10/100BASE-T – conector RJ45 (opcional);

- 2 portas *ethernet* traseiras 100BASE-FX – conector LC (opcional);
- 2 portas *ethernet* traseiras 10/100BASE-T – conector RJ45 (opcional);
- Sincronização horária por IRIG-B de alta precisão (conector BNC);
- Sincronização horária por SNTP;
- Protocolos:
 - Serial: ASCII, Modbus® RTU, DNP3.0 Serial, SEL Fast Meter, SEL Fast Operate, SEL Fast SER, SEL Fast Message, IEC 61850 (opcional);
 - Ethernet: Modbus® TCP, DNP3.0 LAN/WAN, Telnet, FTP.

Outras características:

- *Software* amigável para parametrização (AcSELeator);
- Servidor Web: permite aos usuários a visualização de ajustes, sequencial de eventos, estados e medições de eventos via rede *Ethernet*, com verificação de senha de acesso;
- 3 contatos de alta capacidade de interrupção: capacidade de condução contínua 6A, capacidade de estabelecimento de condução 30 A, capacidade de interrupção 10A (125V_{CC}, L/R = 40ms);
- 5 contatos *Standard*: capacidade de condução contínua 6A, capacidade de estabelecimento de condução 30A, capacidade de interrupção 0,3 (125V_{CC}, L/R = 40ms);
- Tensão auxiliar: 24/48V_{CC} ou V_{CA}, 48/125V_{CC} ou V_{CA}, 125/250V_{CC} ou V_{CA};
- Temperatura de operação: -40 a +85°C.

3.2. RTDS™

O RTDS™ é um sistema de simulação digital para realização de testes em SEP com capacidade de operação contínua, em tempo real e em malha fechada com equipamentos de proteção e controle. O RTDS™ compõe-se de estruturas modulares denominadas de *racks*, que simulam sistemas com um número limitado de barras e equipamentos. A utilização de diversos *racks* funcionando em conjunto possibilita a simulação de sistemas mais complexos, de forma que o sistema original é particionado em subsistemas processados por *racks* distintos. A comunicação entre os subsistemas é realizada através de cartões. Cada *rack* de processamento possui mais de 30 processadores em paralelo, o que garante um alto desempenho para o equipamento. Existem diversos tamanhos de RTDS™ disponíveis no mercado, inclusive portátil (RTDS, 2007, 2015).

O *hardware* utilizado no RTDS™ baseia-se no uso de DSP (*Digital Signal Processors*), alocados em *racks*, que são acomodados em módulos, o que provê flexibilidade para expansões futuras. Para facilitar a troca de informações, um painel traseiro de comunicação liga todas as placas de um *rack*. O RTDS™ é formado por diversos componentes que, interligados entre si, garantem o funcionamento e a eficiência da simulação. Um resumo das características dos seus principais componentes é apresentado a seguir (COSTA, 2014a,b,c).

Cartão GTWIF (*Giga Transceiver Workstation Interface Card*):

Cada *rack* do RTDS™ possui um cartão GTWIF (Figura 3.3a), responsável por efetuar a comunicação entre o simulador e o computador que o controla (feita através da conexão *Ethernet*10BaseT ou 100BaseTX), a sincronização entre dois ou mais *racks* juntamente com o *Global Bus Hub*, a comunicação com o *software* RSCAD e a geração do passo de tempo

de 50 μ s para a coordenação de todas as transferências durante a simulação.

Cartão WIF (*Workstation Interface Card*)

Componente que desempenha muitas das funções da placa GTWIF (Figura 3.3b), sendo responsável por diversas funções: comunicação entre o *rack* do RTDS™ e o computador que está utilizando o RSCAD; sincronização entre o *rack* no caso de uma simulação *multi-rack*; coordenação dos dados entre os processadores localizados na parte posterior do *rack*; e diagnóstico do *rack*.

Cartão IRC (*InterRack Communication Card*)

Componente que realiza a comunicação entre um *rack* e até seis outros *racks* (Figura 3.3c). Cada *rack* comporta duas placas IRC, o que permite a formação de um RTDS™ com 13 *racks* interconectados.

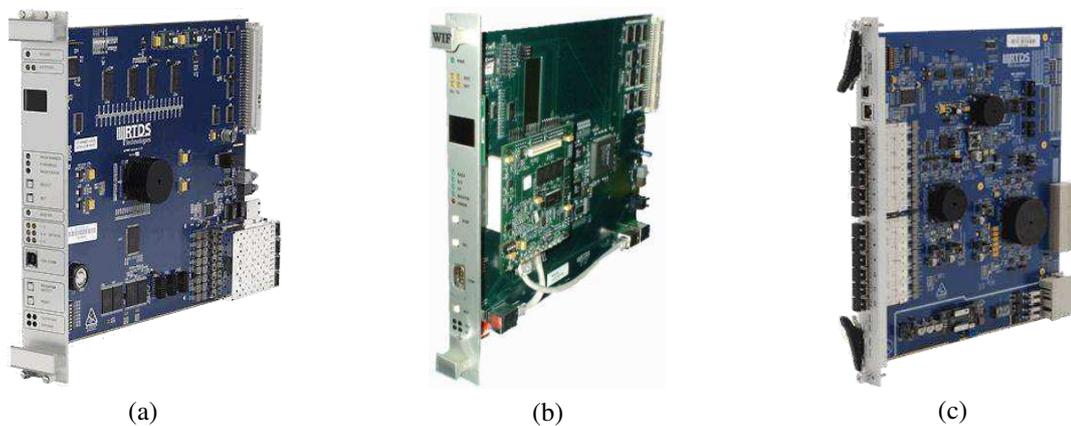


Figura 3.3: a) Cartão GTWIF; b) Cartão WIF; c) Cartão IRC.

Global Bus Hub (GBH)

Simuladores com três ou mais *racks*, necessitam utilizar o componente GBH para realizar a transferência de sinais entre as placas GTWIF (Figura 3.4), nas quais são ligados por meio de um cabo de fibra ótica. O *Global Bus Hub* assegura que as informações de *racks* distintos retornadas para o RSCAD/*RunTime* sejam sincronizadas.



Figura 3.4: *Global Bus Hub*.

Cartão GPC (*Giga Processor Card*)

Componente responsável por resolver as equações que representam o sistema de potência e do sistema de controle (Figura 3.5a). Conecta, através de fibra ótica, vários tipos de cartões de entrada/saída. Na prática, um *rack* de um simulador possui entre duas e seis placas GPC, sendo uma placa utilizada na solução da rede e as outras na solução dos modelos dos componentes.

Cartão GTNET (*Gigabit Transceiver Network Interface System Card*)

Componente que serve de *interface* entre diferentes protocolos de rede e o RTDS™ (Figura 3.5b). A comunicação com o simulador é feita pelo acesso Ethernet. Este cartão é utilizado em conjunto com quatro diferentes *firmwares*: GSE, SV, *Playback* e DNP (permite que o GTNET se comunique com outro DNP e acomode a capacidade máxima de comunicação utilizando o protocolo DNP).



Figura 3.5: a) Cartão GPC; b) Cartão GTNET.

Cartões GT-I/O (*Gigabit Transceiver – Input/Output*)

A família de cartões GT-I/O permite a realização de testes com dispositivos de controle e proteção. Estes cartões são utilizados em conjunto com o GPC, com o qual se conectam através de um cabo de fibra ótica com largura de banda de 2 Gbit/s, estando localizados na parte de trás do simulador. Esta ligação possibilita que os cartões GT-I/O se distanciem até 50 metros do RTDS™. A especificação destes cartões é apresentada a seguir.

Cartão GTA0 (*Gigabit Transceiver Analog Output*)

Componente usado para produzir sinais analógicos que exigem um intervalo amplo (Figura 3.6a). Contém 12 canais de saída analógica de 16 bits, fornecendo sinais com valores de pico de até $\pm 10V$. Também realiza o processo de *oversampling* no qual a saída é fornecida a cada $1\mu s$. Assim como todos os cartões GT-I/O, o cartão GTA0 localiza-se na parte traseira do RTDS™ e é alimentado por uma fonte de 24V.

Cartão GTDO (*Gigabit Transceiver Digital Output*)

Componente usado para produzir sinais de saída digital de 7 a 24V (Figura 3.6b). Ele inclui 64 canais de saída digital e possui dois conectores óticos utilizados para conectá-lo ao GPC ou ao GT-I/O.



Figura 3.6: a) Cartão GTA0; b) Cartão GTDO.

Cartão GTAI (*Gigabit Transceiver Analog Input*)

Componente utilizado para entrada de sinais analógicos externos ao RTDS™ e inclui dois canais conversores A/D de sinais de 16 bits com seis entradas cada (Figura 3.7a). Cada canal é configurado como uma entrada diferencial de -10 a +10V de pico. Este componente provê atualizações para o cartão GPC com um intervalo mínimo de 6 μ s.

Cartão GTDI (*Gigabit Transceiver Digital Input*)

Componente que provê *interface* dos sinais digitais de equipamentos externos para o RTDS™ (Figura 3.7b). Este cartão possui 64 canais de entrada digital para serem utilizados em simulações com passo de tempo pequeno ou médio. Os sinais oriundos de equipamentos externos devem estar entre 0 e 5V. O cartão GTDI ainda pode ser utilizado para pulsos disparados por um controlador externo, como o cartão DITS.

Cartão GTFPI (*Gigabit Transceiver Front Panel Interface Card*)

Componente que serve de *interface* entre o cartão GPC e os painéis supracitados (Figura 3.7c). A conexão é feita através de um cabo de fibra ótica locado em um trilho DIN na parte traseira do RTDS™, alimentado por uma fonte de 5V.

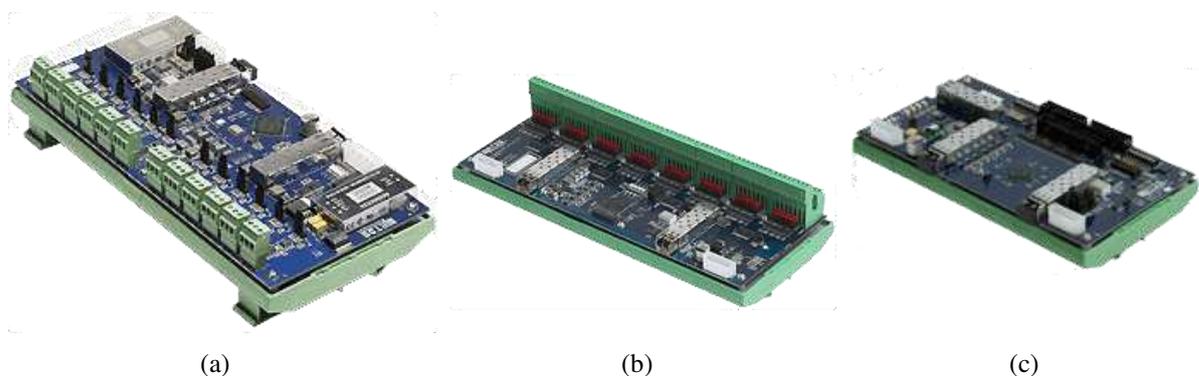


Figura 3.7: a) Cartão GTAI; b) Cartão GTDI; c) Cartão GTFPI.

Painéis de *interface*

Em cada módulo do RTDS™ existe um painel de *interface* de entrada e saída digital de

baixa tensão e um painel de interface digital de alta tensão. Além destes, cada módulo RTDS™ possui, no mínimo, um cartão de interface do painel frontal. A seguir cada um destes componentes será abordado detalhadamente.

Painel de *interface* de entrada e saída digital de baixa tensão

Fornece 16 entradas e saídas digitais no nível de tensão TTL supracitados (Figura 3.8a). As entradas digitais são apropriadas para contatos secos, como, por exemplo, equipamentos de proteção. Dependendo das variáveis de simulação os canais de saída podem variar de 0 a 5V.

Painel de alta tensão

Fornece sinais de até 250V_{dc} para os equipamentos externos ao RTDS™ supracitados (Figura 3.8b). Um exemplo é o teste de relés de proteção, que exige uma tensão DC de 110 ou 220V_{dc} para mostrarem o *status* do equipamento que está sendo controlado.

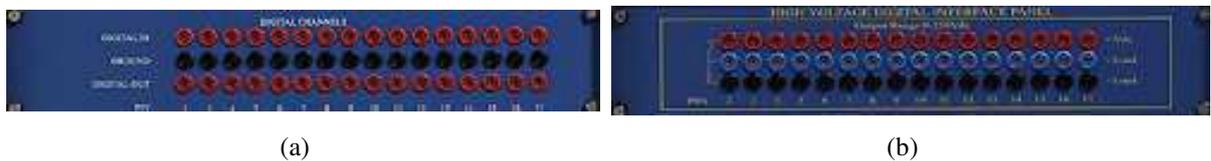


Figura 3.8: a) Painel de *interface* de entrada e saída digital de baixa tensão; b) Painel de alta tensão.

O *software* do RTDS™ é constituído de uma hierarquia com três níveis distintos: a GUI (*GraphicalUserInterface*), denominada de RSCAD, no nível mais alto; o compilador no nível médio; e no nível mais baixo, a biblioteca de modelos dos componentes.

RSCAD

Software desenvolvido para permitir interação entre o usuário e o RTDS™. A partir deste, o usuário tem a possibilidade de construir e elaborar circuitos e componentes do sistema, visualizá-los, analisar e armazenar os resultados das simulações. Portanto, através do RSCAD, o usuário realiza todas as etapas da simulação. A relação entre os diversos módulos que compõem o RSCAD é apresentada na Figura 3.9 e detalhado a seguir.

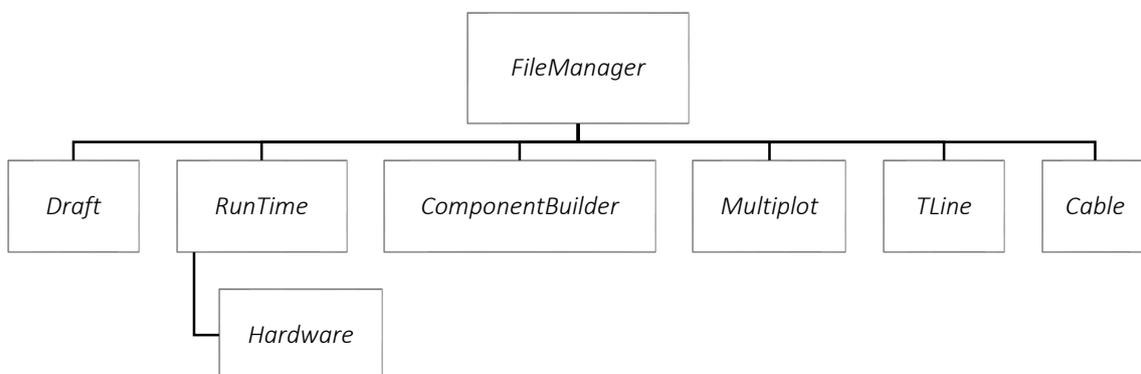


Figura 3.9: Relação entre os componentes do RSCAD.

FileManager

Janela inicial do RSCAD, que permite que todos os outros módulos sejam acessados a partir dele. Através deste módulo, o usuário organiza e compartilha projetos e casos de simulação e tem acesso aos documentos do RSCAD. Os casos de simulação podem ser acessados de qualquer lugar na LAN e usuários distintos podem acessar tanto os projetos, quanto os casos. A janela do *FileManager* (Figura 3.10) apresenta os ícones dos outros módulos e na área principal, estão: as pastas que contêm os casos de simulação e os arquivos associados, arquivos da documentação do RSCAD, entre outros.

Draft

Módulo no qual é realizada a modelagem do SEP a ser simulado. A janela do *Draft* (Figura 3.11) é composta de duas partes: bibliotecas de componentes do SEP e do sistema de controle à direita e um espaço para construção do circuito à esquerda. Na montagem de um circuito, os seus componentes devem ser copiados das bibliotecas para a área de projeto e, caso necessário, devem ser agrupados para um melhor arranjo. A partir da definição dos parâmetros dos componentes, o circuito pode ser salvo e compilado. É possível verificar se existe algum erro a partir da mensagem informada no processo de compilação.

RunTime

Conhecido como Console do Operador, este módulo permite que a simulação seja carregada, executada e controlada do computador do usuário. A sua tela possibilita uma interação com cada simulação (Figura 3.12). Os gráficos alusivos ao comportamento do sistema são constantemente atualizados durante as simulações e os resultados obtidos, podem ser salvos para uso com o *Multiplot*, impressos e salvos em *.pdf*, *.jpeg* ou formato *vector*.

TLine

Módulo utilizado para modelagem das linhas de transmissão, cujos dados serão empregados no *Draft* (Figura 3.13). Existem dois tipos de dados de entrada para esta modelagem: o primeiro consiste na informação das características físicas dos condutores e da geometria da linha; o segundo diz respeito à informação das impedâncias de sequência positiva e zero. Para as configurações iniciais da linha de transmissão, é necessário informar o tipo dos dados de entrada, o modelo utilizado para a representação (que pode ser o de Bergeron), o tipo de transposição (linha transposta ou não transposta), entre outros.

Cable

Responsável pelo cálculo das características das ondas viajantes dos cabos tendo como base os dados físicos. A representação do cabo pode ser feita de três maneiras: Bergeron; dependente da frequência; ou no domínio da fase.

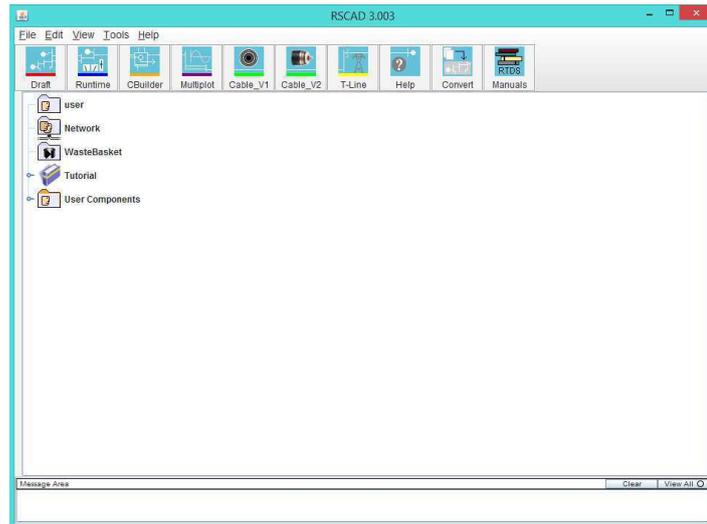


Figura 3.10: Tela do *FileManager*.

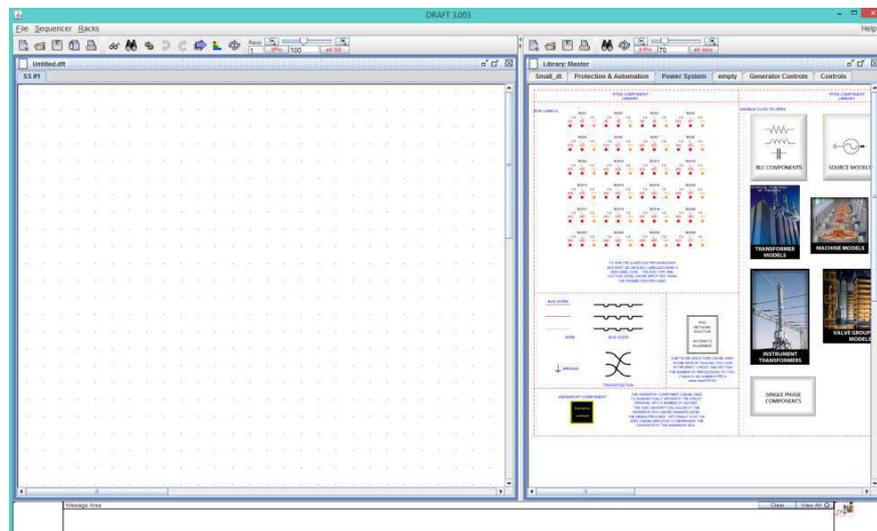


Figura 3.11: Tela do *Draft* (suas duas interfaces).

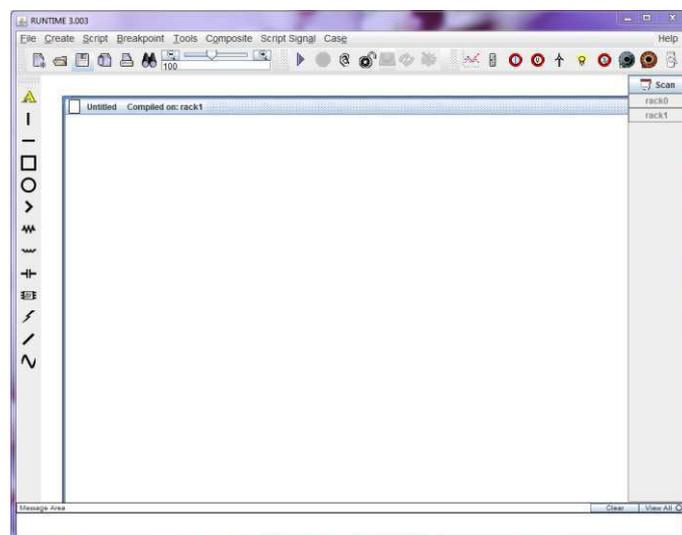


Figura 3.12: Tela do *RunTime*.

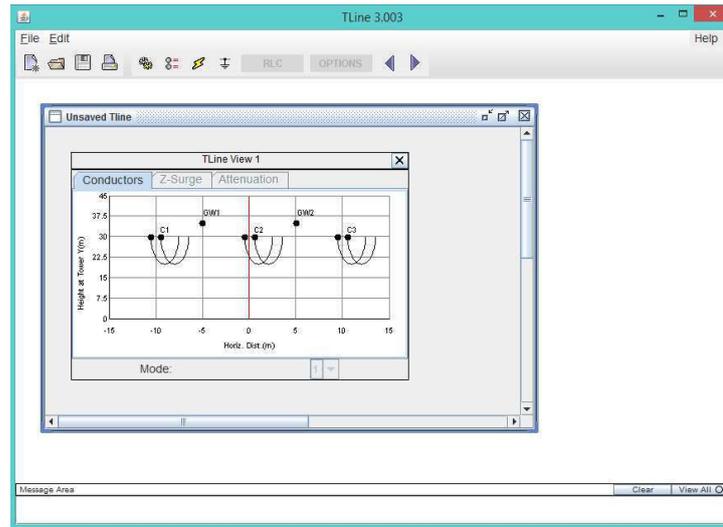


Figura 3.13: Tela do *TLine*.

ComponentBuilder

Ambiente utilizado para o desenvolvimento de novos componentes para serem utilizados no *Draft*. A linguagem C é a utilizada no código de simulação. Os componentes implementados neste módulo podem ser incorporados às simulações em tempo real, interagindo com os componentes já existentes no RTDS™. O usuário dispõe de um editor gráfico com diversas ferramentas de desenho para criar os ícones. Do lado esquerdo é apresentada a estrutura física do componente, enquanto que no lado direito é mostrada a configuração do componente, no qual se faz a programação do componente em linguagem C.

MultiPlot

Módulo responsável pela realização do pós-processamento, análise, construção do gráfico e impressão dos resultados obtidos nas simulações com o RTDS™. A partir deste módulo, o usuário tem a possibilidade de criar um arquivo ASCII com os dados da simulação que, por sua vez, podem ser importados para outro programa para uma análise futura.

Compilador

Situado no nível médio da hierarquia do *software*, o compilador conecta o *software* e o *hardware* do RTDS™, gerando códigos para cada simulação. O compilador coleta as informações do sistema de potência dadas pelo usuário no *Draft*. As saídas são os códigos de processamento em paralelo, a alocação de memória e os esquemas das transferências de comunicação dos dados. De acordo com o esquema do circuito e a disponibilidade do *hardware*, o compilador realiza a alocação do processador. Contudo, a tarefa que o processador realizará pode ser definida automaticamente pelo compilador ou informada pelo usuário. Esta ferramenta ainda produz um arquivo *.MAP*, que contém informações da alocação do processador, dos canais de entrada e saída, do dimensionamento do canal de saída analógica e das condições iniciais do sistema, sendo fundamental quando o RTDS™ é conectado a equipamentos externos.

Biblioteca de modelos de componentes

O *software* do RTDS™ possui uma grande variedade de modelos de componentes do sistema de potência e controle que são utilizados na criação do sistema a ser simulado. Estes modelos estão localizados em uma biblioteca que pode ser acessada no RSCAD. Entretanto, caso o usuário não localize o modelo do componente desejado, pode criá-lo através do *ComponentBuilder*. Cada biblioteca é apresentada detalhadamente a seguir.

Biblioteca de componentes do Sistema de Potência

Contém todos os elementos fundamentais de um sistema de potência representados de forma precisa (Figura 3.14). Dentre estes elementos, pode-se encontrar diversos modelos de fontes de tensão e corrente, de cabos e linhas de transmissão, de transformadores, de componentes de compensação, de resistores, capacitores e indutores, de para-raios, entre outros. Estes modelos estão disponíveis para sistemas trifásicos e monofásicos.

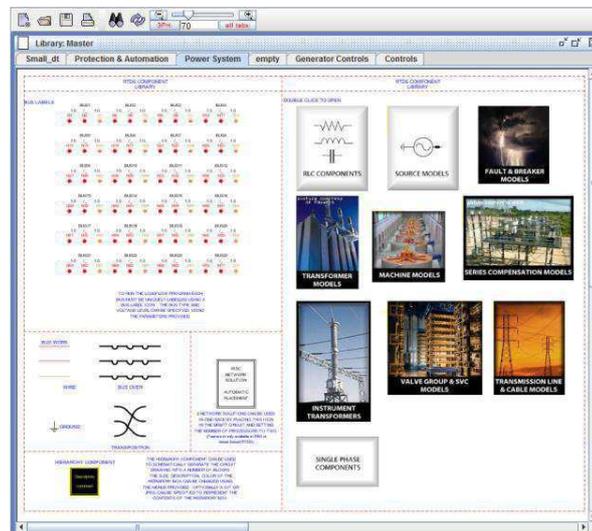


Figura 3.14: Tela da biblioteca do sistema de potência.

Biblioteca de componentes do Sistema de Controle

Permite que os sistemas de controle desenvolvidos interajam com os sistemas de potência e o exterior. Esta biblioteca possui funções matemáticas, conversores de unidades, portas lógicas, funções de sequência, geradores de sinais, funções trigonométricas, entre outros. Possui ainda, componentes destinados à proteção e automação, como os relés de proteção, os modelos do IEC 61850, componentes SCADA e medidores de impedância.

Análise dos sinais da saída analógica do RTDS™

O RTDS™ possibilita a conexão com outros equipamentos de controle e proteção para a realização de testes, o que é feito via cartões GT-I/O. Por exemplo, para conexão com um relé, utiliza-se o cartão GTA0 que converte os sinais digitais gerados pela simulação em analógicos, para que sejam utilizados como sinais de entrada do relé. Portanto, é importante a verificação destes sinais na saída do cartão, antes de conectar o RTDS™ a outro dispositivo. Desta forma, é preciso que o sistema simulado contenha o modelo do cartão GTA0 (Figura 3.15), encontrado na Biblioteca de Componentes do Sistema de

Controle, para indicar quais sinais serão gerados na saída do simulador. Na janela de configuração (Figura 3.16), o usuário informa, por exemplo, quantos e quais canais digitais-analógicos são habilitados e o valor, em kV, utilizado na escala para conversão do sinal. Por exemplo, para observar a saída analógica das tensões de uma linha de 230kV são habilitados apenas três canais do cartão (um para cada fase) e utiliza-se o valor de 187,79 para escala, ou seja, 187,79kV simulado corresponde a 5V na tensão de saída do cartão.

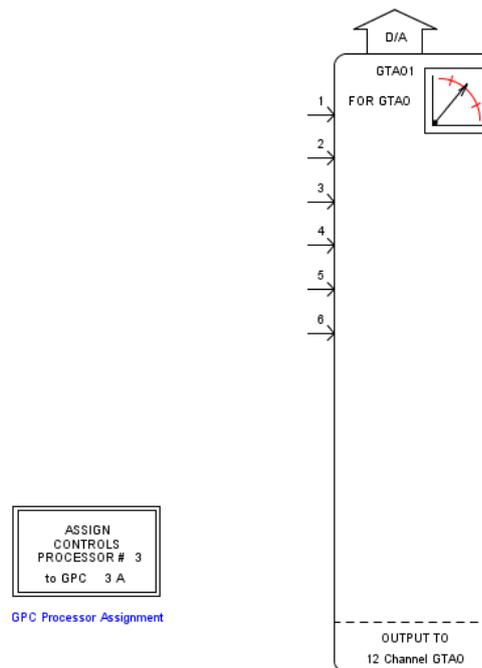


Figura 3.15: Modelo do cartão GTA0 encontrado na biblioteca do RSCAD.

rtds_risc_ctl_GTAOOUT					
OVERSAMPLING FACTORS		SIGNAL ALIGNMENT DELAY OPTION			
D/A OUTPUT SCALING			PROJECTION ADVANCE FACTORS		
CONFIGURATION			ENABLE D/A OUTPUT CHANNELS		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Name	GTAO Component Name	GTAOx			
Port	GTIO Fiber Port Number	1		1	8
Card	GTAO Card Number (refer to on-board 7 segment card# display)	1		1	8
Proc	Assigned Controls Processor	1		1	36
Pri	Priority Level	1		1	

Figura 3.16: Janela de configuração do cartão GTA0.

3.3. Experimentos Didáticos

Foram desenvolvidos 04 (quatro) experimentos didáticos, os quais são descritos brevemente a seguir e apresentados detalhadamente na seção de Anexos.

3.3.1. Experimento 1: Modelagem de Sistemas no RTDS™

O 1º Experimento instrui o aluno sobre o processo de modelagem de um SEP no módulo *Draft* do RTDS™. Para isso, utilizou-se como exemplo o sistema baseado no modelo proposto pelo IEEE para estudo de esquemas de proteção em linhas de transmissão (Figura 3.17) (IEEE, 2004). O resultado da modelagem do SEP no *Draft* é apresentado nas Figura 3.18 e 3.19.

A inserção de módulos de falta possibilitou a simulação de faltas. Nas Figuras 3.20 e 3.21 estão apresentados, respectivamente, o comportamento das correntes e tensões do sistema diante dos seguintes cenários de falta: bifásica – terra (BCT) e monofásica (CT).

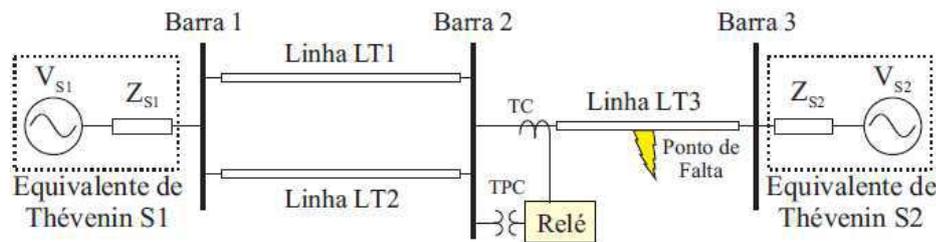


Figura 3.17: Sistema elétrico a ser modelado.

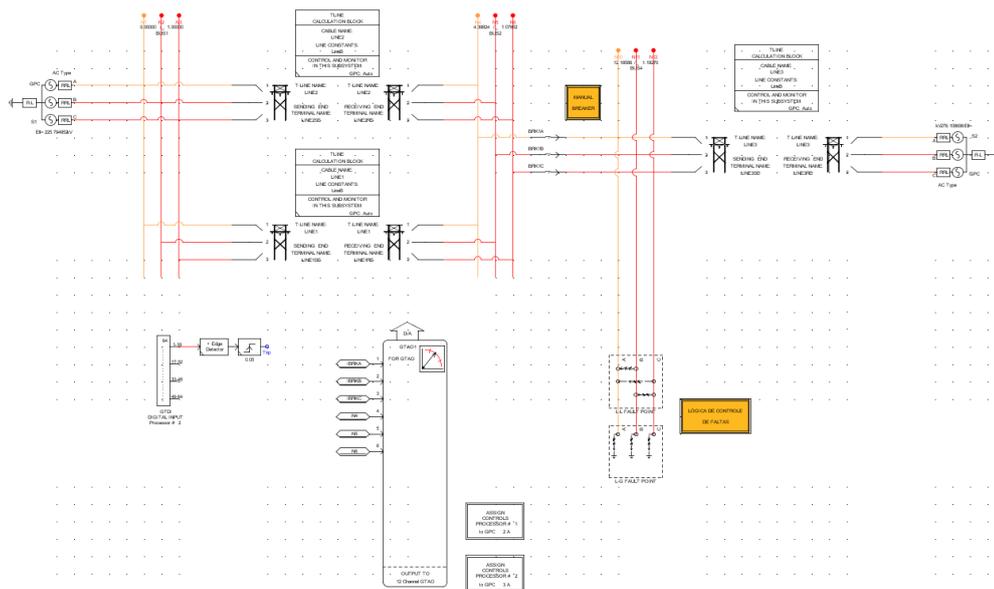


Figura 3.18: Sistema modelado no RTDS™ - diagrama trifilar

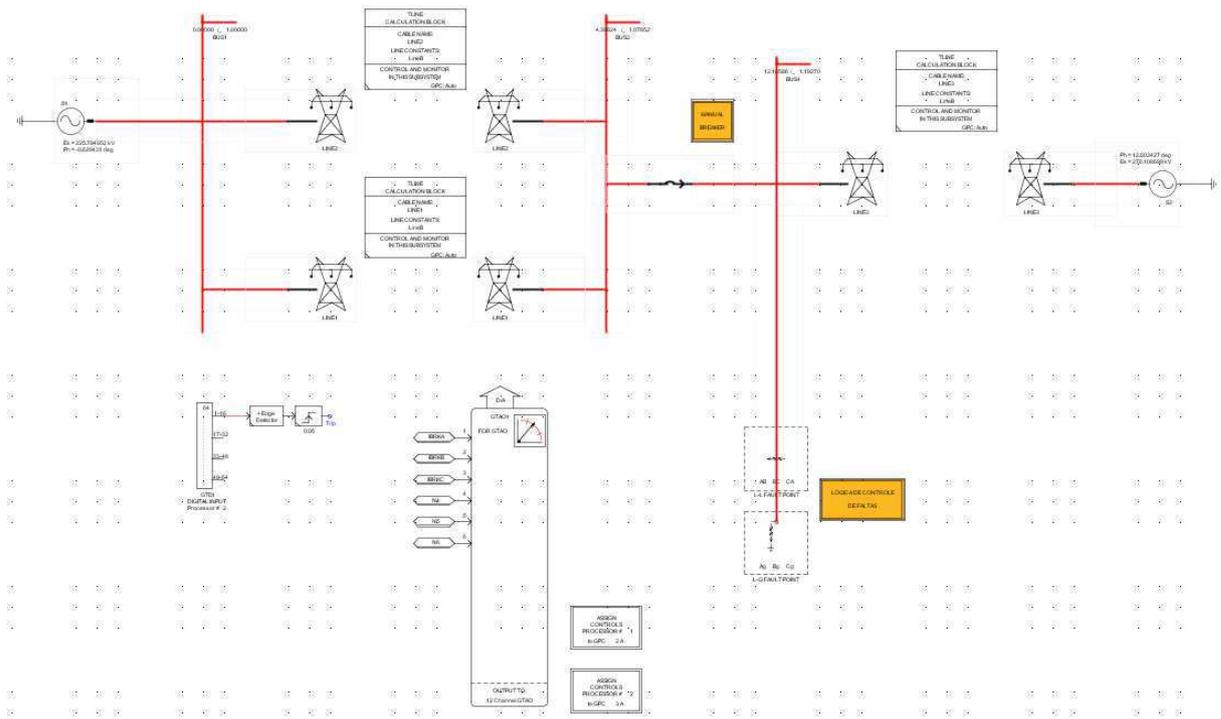


Figura 3.19: Sistema modelado no RTDS™ - diagrama unifilar

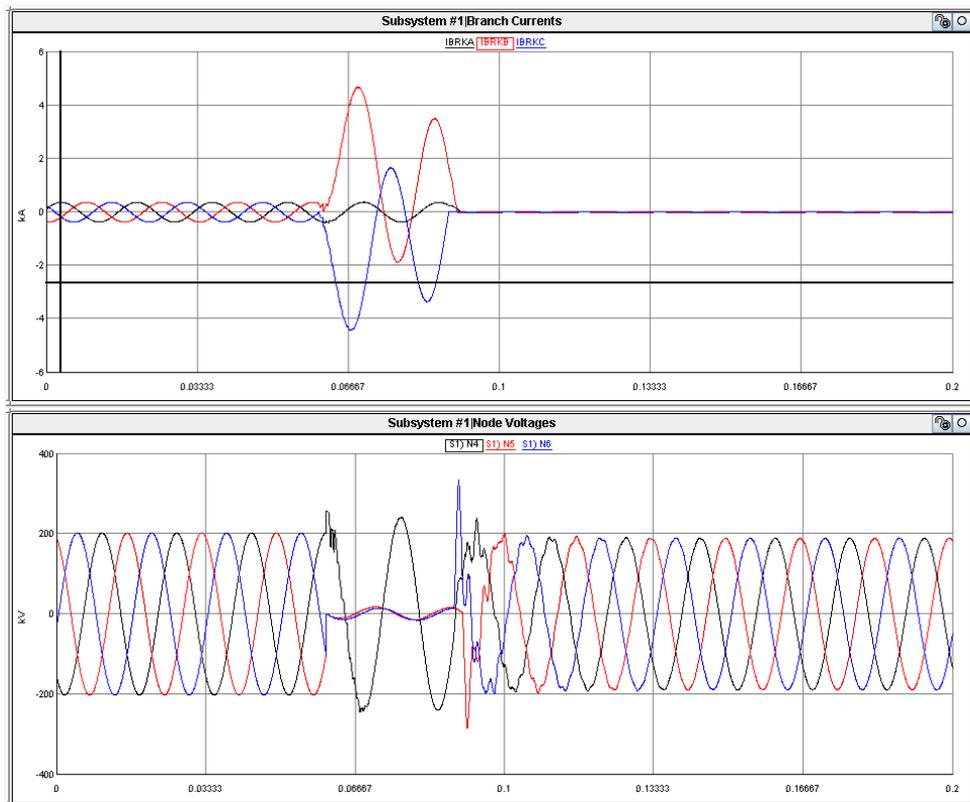


Figura 3.20: Correntes e tensões (falta BCT).

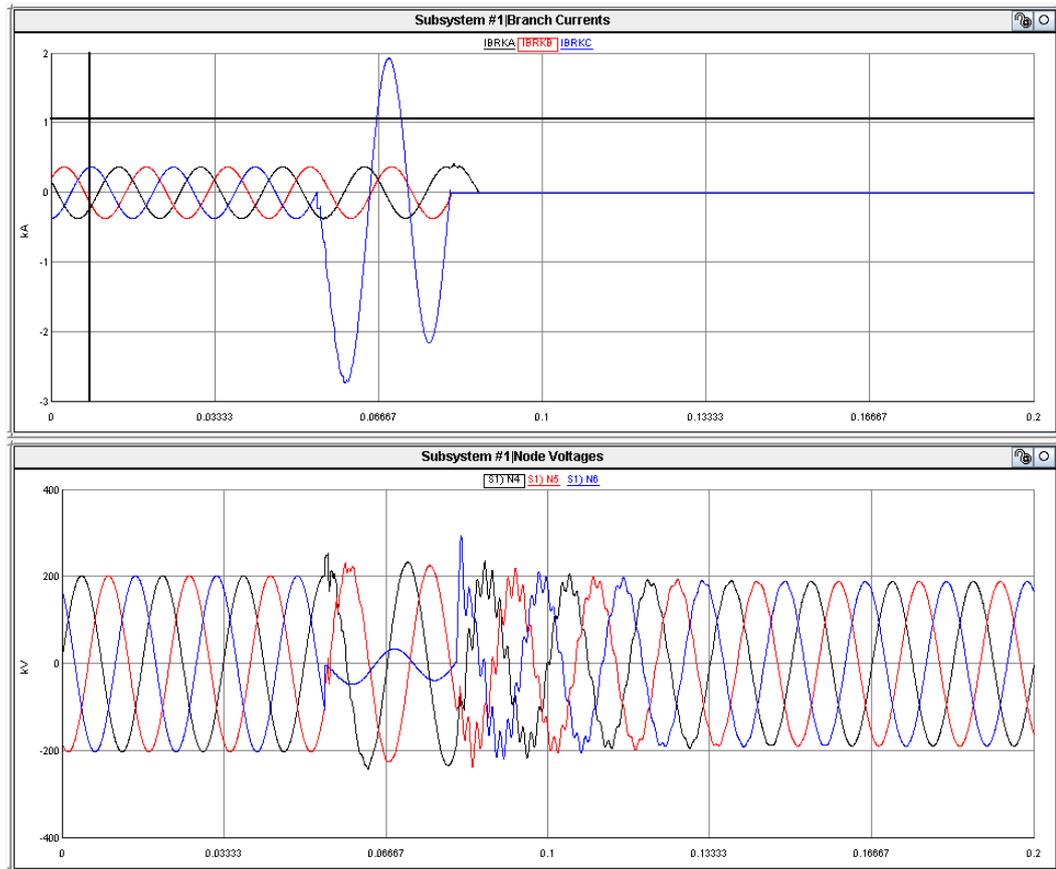


Figura 3.21: Correntes e tensões (falta CT).

3.3.2. Experimento 2: Parametrização do Relé SEL-311C

O processo de parametrização de um relé tem como objetivo inserir os ajustes de proteção definidos através do estudo de seletividade e de definição dos parâmetros dos relés. A inserção desses parâmetros de proteção pode ser realizada de duas formas: a) via frontal do relé, ou seja, inserindo manualmente; b) através de *softwares* específicos desenvolvidos pelos respectivos fabricantes. Além da parametrização, é necessário a realização de testes e calibração dos relés para se garantir a operação correta dos dispositivos de proteção.

O 2º Experimento instrui o aluno sobre o processo de parametrização de um relé. Para isso, considerou-se o relé SEL 311-C e o SEP do Experimento 1. Concluída a etapa de parametrização, aplicou-se uma falta ao SEP. O sucesso da parametrização foi constatado com a atuação da proteção: o sinal de *trip* enviado pelo relé ao RTDS™ (Figura 3.22).



Figura 3.22: Atuação da proteção.

3.3.3. Experimento 3: Conexão do relé SEL 311-C ao RTDS™

Para tornar possível a análise da atuação do relé em sistemas simulados no RTDS™ é necessário conectá-los: esse foi o objetivo do 3º Experimento. A comunicação entre o relé e o RTDS™ se dá a partir dos cartões GTA0 e GTDI, conforme o procedimento a seguir (Figura 3.23):

- O cartão GTA0 externa os sinais (tensão e corrente) do RTDS™ ao relé. Para isso, são conectados ao relé seis canais do cartão GTA0.
- O cartão GTDI recebe o sinal digital proveniente do relé (ou seja, o envio do sinal de *trip*). Para isso, uma das saídas do relé é conectada a um canal do cartão GTDI.
- É necessária a conexão de uma fonte externa de 5V_{dc} para alimentar os contatos do relé e de um canal do cartão GTDI.

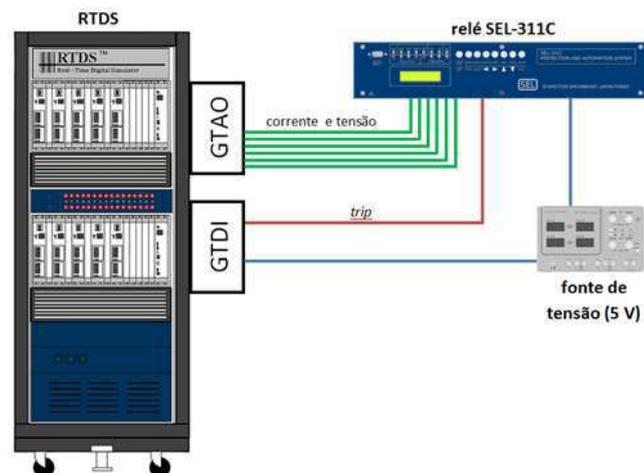


Figura 3.23: Esquema de conexão entre o relé e o RTDS™ (COSTA *et al*, 2015).

As figuras que seguem ilustram detalhes do processo de conexão.



Figura 3.24: Conexão das saídas do RTDS™ ao relé.

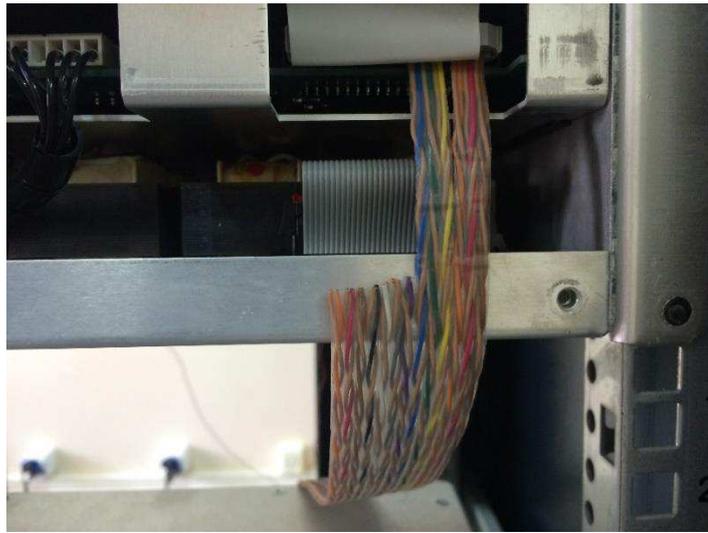


Figura 3.25: Detalhe da conexão das saídas do RTDS™ ao relé.



Figura 3.26: Conexão de seis canais do cartão GTA0 para externar os sinais de corrente e tensão oriundos do RTDS™.



Figura 3.27: Fonte de tensão utilizada (rótulo do fio laranja: relé → fonte. Rótulo do fio preto: fonte → RTDS™).

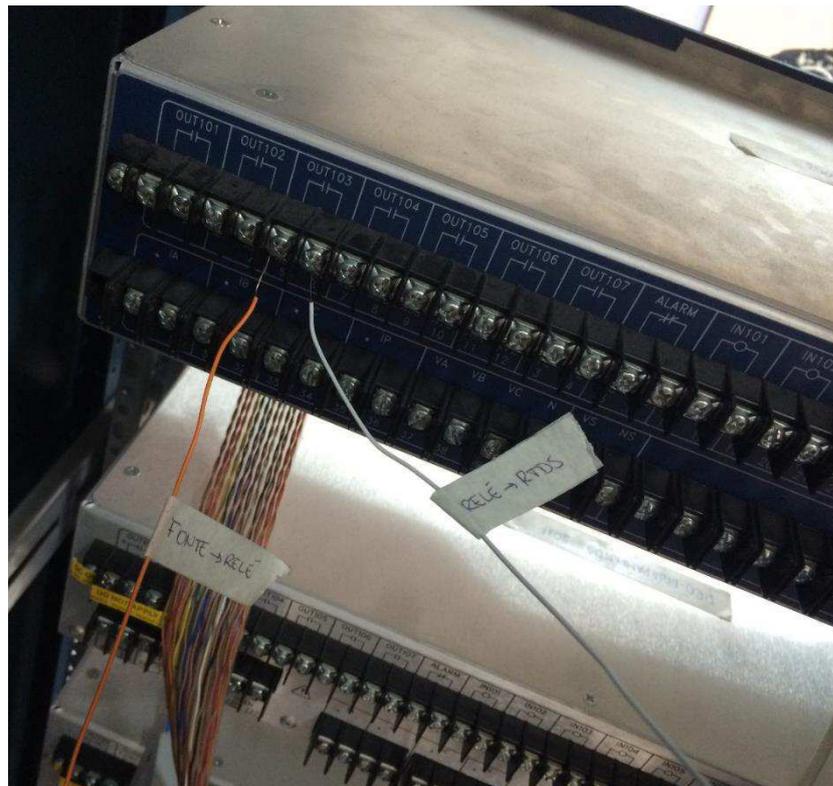


Figura 3.28: Conexão do relé com a fonte (fio laranja) e com o RTDS™ (fio branco: relé → RTDS™).

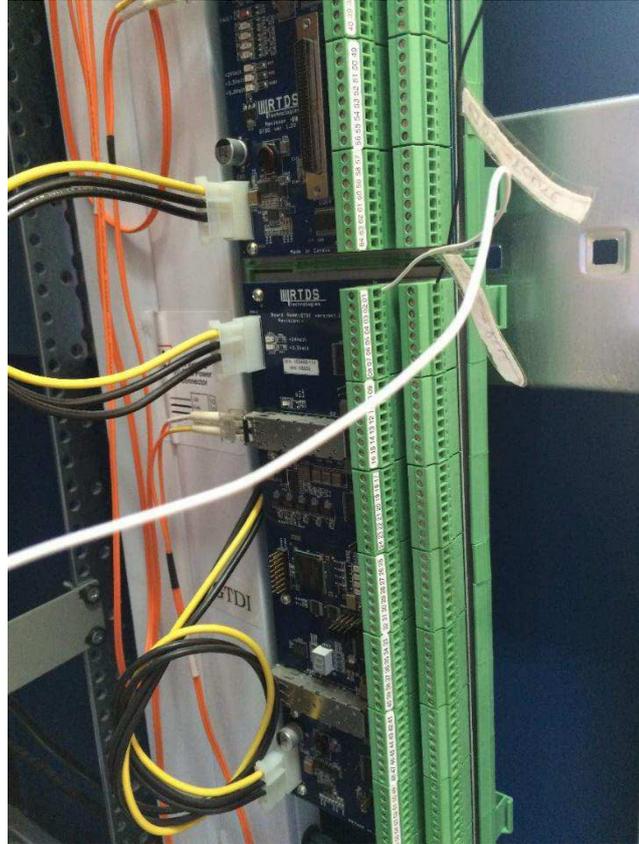


Figura 3.29: Conexão do RTDS™ (cartão GTDI) com a fonte de tensão (fio preto) e com o relé (fio branco).

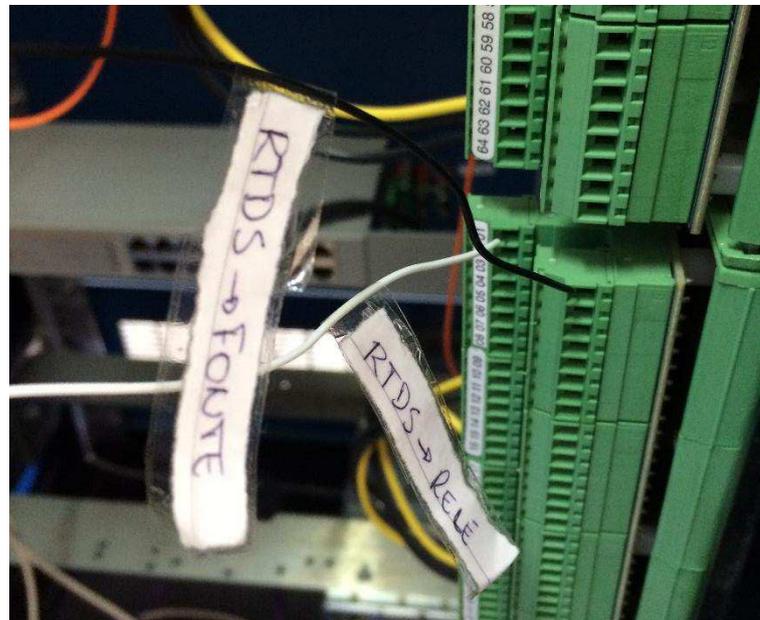


Figura 3.30: Detalhe (rótulos dos fios) da conexão do RTDS™ com a fonte de tensão e com o relé.

Para verificar a corretude do processo de conexão entre os dois equipamentos, aplicaram-se faltas no sistema modelado no RTDS™ e analisaram-se dois eventos: a atuação do relé e o envio do sinal de *trip* do relé ao RTDS™. A verificação da conexão dos equipamentos diante da ocorrência de uma falta BCT é mostrada nas Figuras 3.31 e 3.32.

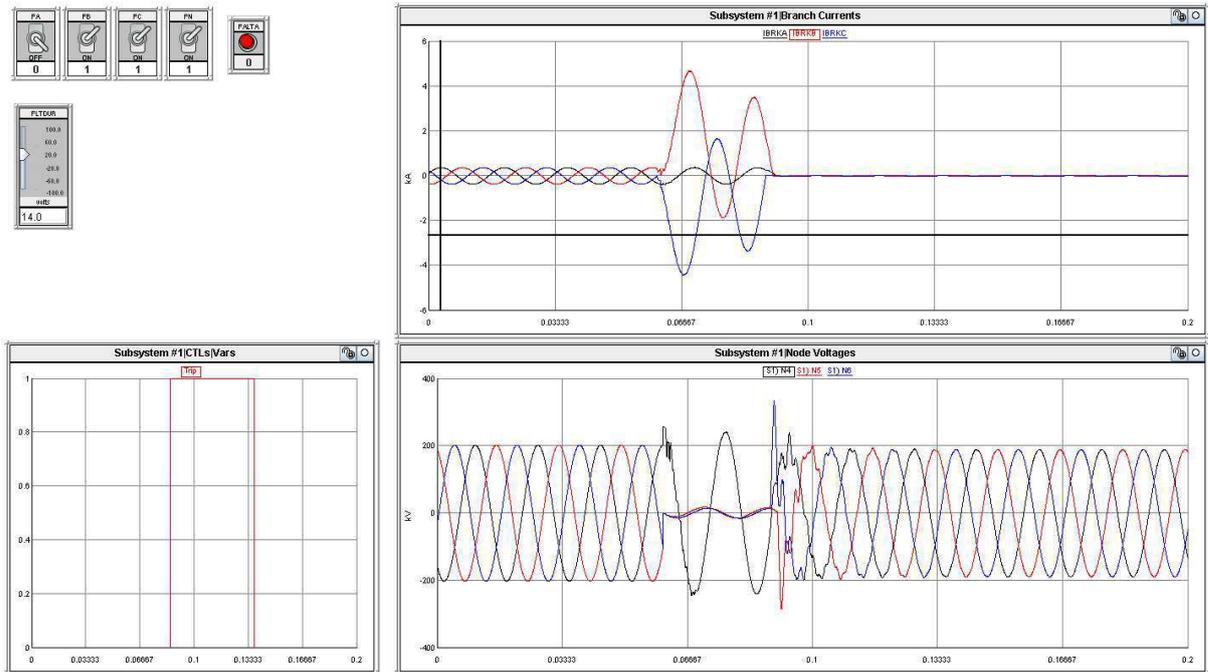


Figura 3.31: Recepção do sinal de *trip* no RTDSTM™



Figura 3.32: Atuação da proteção diante de uma falta fase b – fase c – terra (LED de *trip* aceso indica nível lógico um para este sinal; LED's B, de fase B, C, de fase C, e G, de *ground* – terra, em inglês – indicam a ocorrência deste tipo de falta)

3.3.4. Experimento 4: Geração de Oscilografias

O 4º e último Experimento instrui o aluno a gerar registros oscilográficos, que são os registros das grandezas elétricas analógicas e digitais do sistema de potência, armazenados de forma automática ou manual nos relés digitais de proteção (SEL, 2015). Para isso, utilizou-se o *software* AcSELERator do relé SEL 311-C.

Para uma falta BCT aplicada no SEP do Experimento, o *software* AcSELERator do relé SEL 311-C disponibiliza a janela principal dos eventos conforme mostrado na Figura 3.33. O gráfico das grandezas elétricas e o diagrama fasorial do SEP nas condições supracitadas, são apresentados, respectivamente, nas Figuras 3.34 e 3.35. Para uma falta CT, o *software* AcSELERator apresenta a janela de eventos e os gráficos nas Figuras 3.36, 3.37 e 3.38, respectivamente.

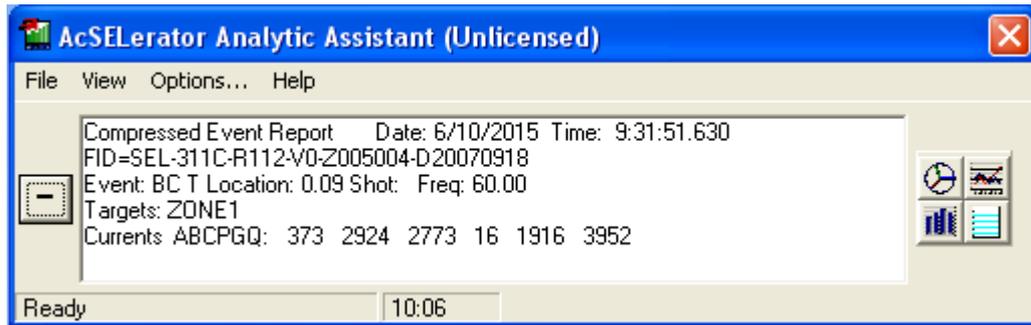


Figura 3.33: Janela de eventos: falta BCT.

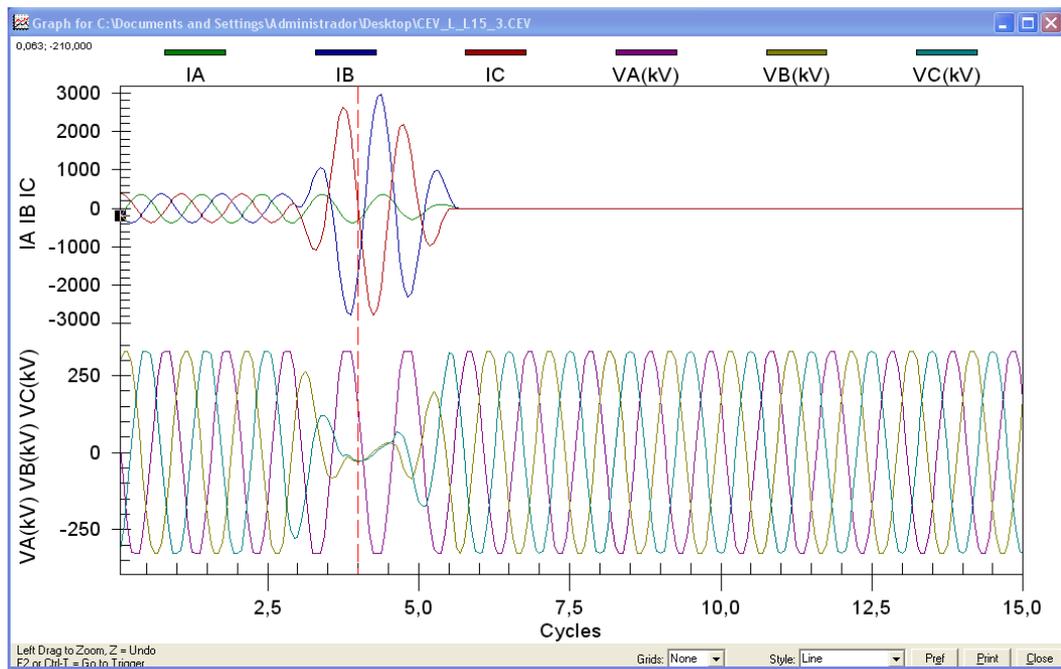


Figura 3.34: Gráficos de corrente e tensão: falta BCT.

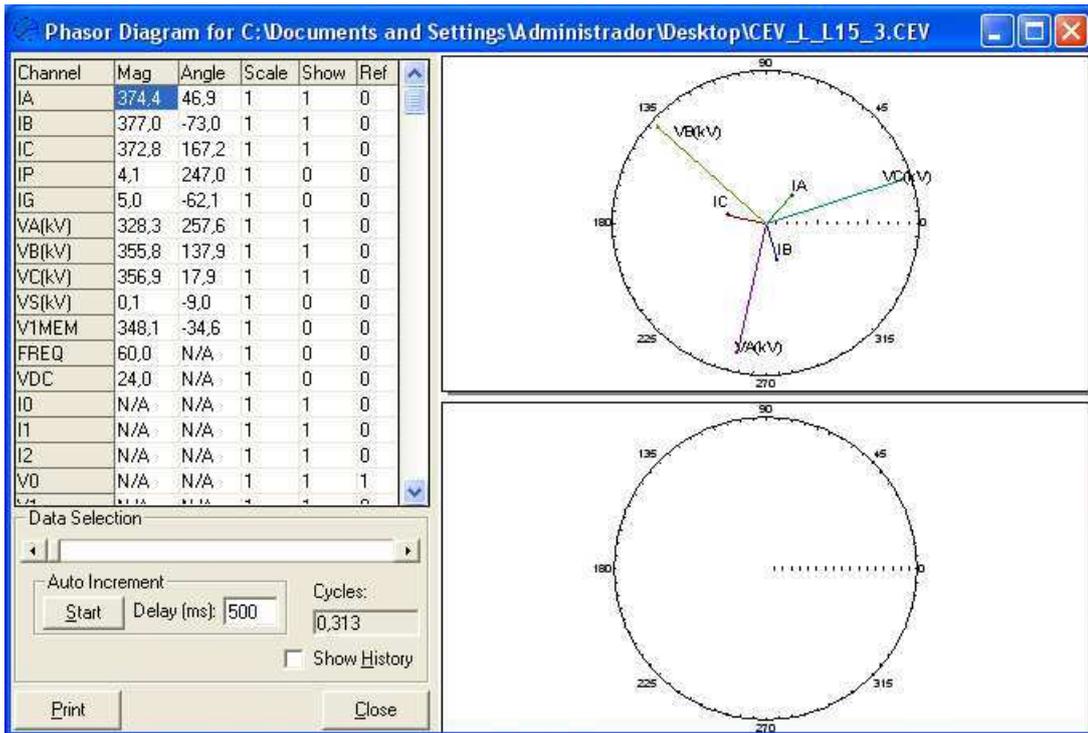


Figura 3.35: Diagrama fasorial: falta BCT.



Figura 3.36: Janela de eventos: falta CT.

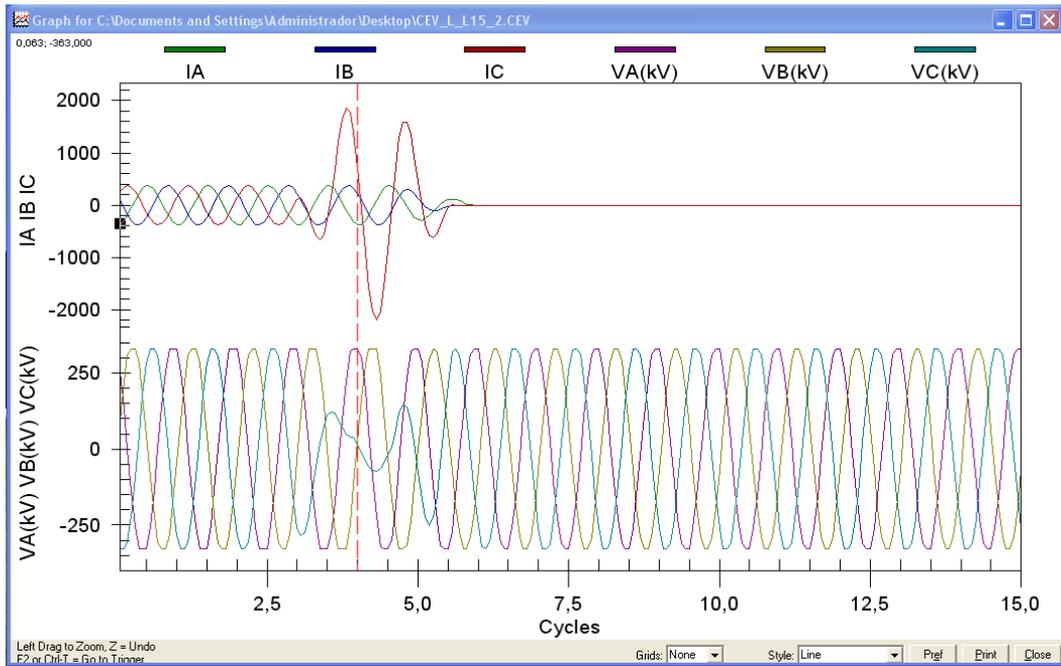


Figura 3.37: Gráficos de corrente e tensão: falta CT.

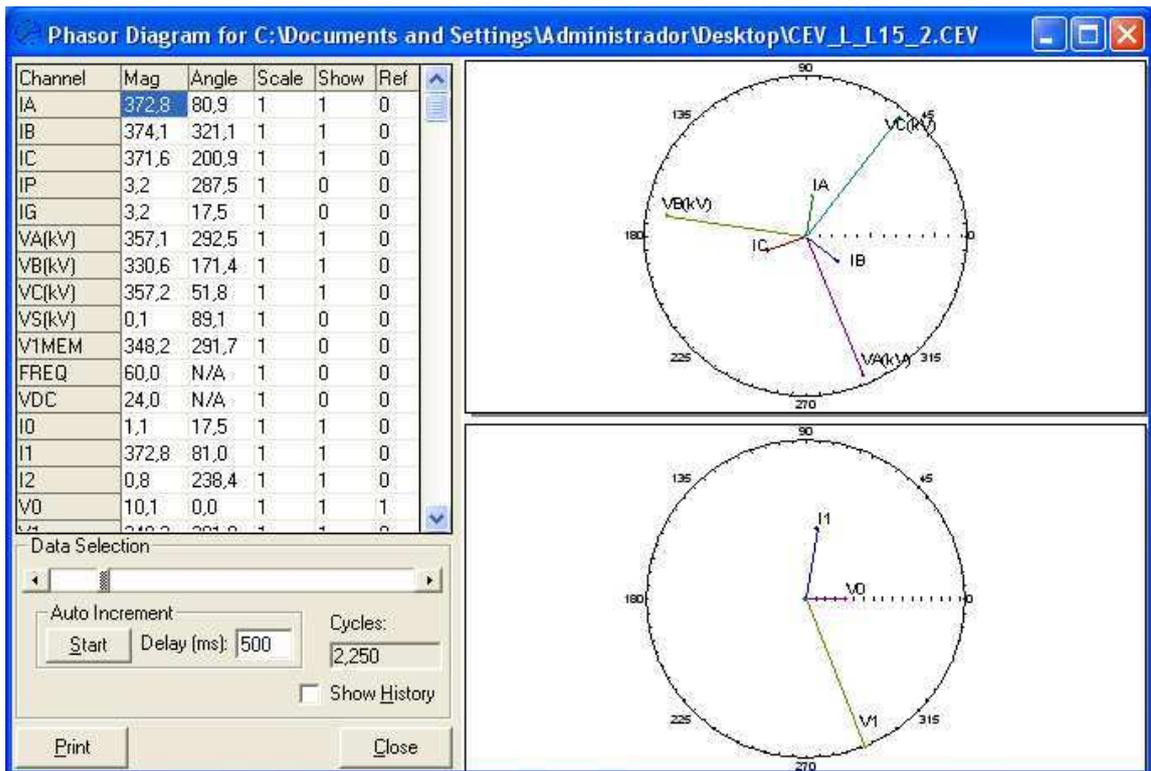


Figura 3.38: Diagrama fasorial: falta CT.

4. Conclusão

O TCC teve seu foco na disciplina Proteção de Sistemas Elétricos, cujo destaque foi dado aos equipamentos disponíveis no Laboratório de Proteção Digital: o relé SEL-311C e o RTDS™. O estudo da proteção digital possibilitou uma visão mais ampla no que tange às possibilidades de rotinas de proteção. Neste contexto, a alternativa de múltiplos esquemas de proteção em um único relé, bem como a diversidade de funções executadas por esse equipamento, constitui destaques bastante contundentes no que diz respeito à utilização de relés digitais.

A experiência de escrever guias que sirvam como material inicial para os interessados no estudo de proteção digital foi bastante proveitosa. Estes experimentos são uma sintetização de práticas que possibilitam a visualização da teoria de proteção de sistemas elétricos em simulações digitais.

Dentre os diversos pontos positivos da realização deste TCC, um destaque é o conhecimento que foi agregado na área de proteção digital, bem como a familiarização com equipamentos de simulação e proteção digital. Além disso, compreende-se que este TCC constituiu um complemento importante ao conhecimento adquirido durante a vida acadêmica.

Por fim, espera-se que este relatório, bem como os guias anexados a ele, possa nortear os que estão interessados na utilização de relés digitais em conjunto com o RTDS™.

5. Referências

- ALMEIDA, M. A. D. *Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos*. DEE/UFRN, Natal, 2000.
- CARDOSO, A. J. R. *Ensaio das Funções de Sobrecorrente e Distância Utilizando Relé Digital de Proteção e Aplicação de Sinais com Caixa de Teste*. Monografia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- COSTA, C.A.B. *Relatório de Estágio Supervisionado*. CGEE/UFCG, Campina Grande, 2014a.
- COSTA, C.A.B. *Tutorial: Simulador Digital em Tempo Real*. CGEE/UFCG, Campina Grande, 2014b.
- COSTA, C.A.B. *Guia de Uso: Simulador Digital em Tempo Real*. CGEE/UFCG, Campina Grande, 2014c.
- COSTA, C.A.B.; VERAS, B.P.M.S.; BRITO, N.S.D.; NEVES, W.A. & MORAES, S.R.D. *Proposição de uma Metodologia para Geração de Registros Oscilográficos*. SBSE/2015, Campina Grande.
- COTOSCK, K.R. *Proteção de Sistemas Elétricos: Uma Abordagem Técnico-Pedagógica*. Disponível em:
<<http://www.cpdee.ufmg.br/documentos/Defesas/711/Vers%E3o%20final%20Dissertacao%20Kelly.pdf>>.
Acesso em 07/01/2015.
- FREITAS, R.S. *Aplicação do Relé de Distância Digital SEL 311-C*. Monografia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- GUERRA, F.C.F. *Notas de Aula da Disciplina Proteção de Sistemas Elétricos*. DEE/UFCG, Campina Grande, 2011.
- IEEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. Power System Relaying Committee. 2004.
- SATO, F. *Proteção de Sistemas de Energia Elétrica*. Apostila, DSE/UNICAMP, Campinas, 2005.
- SEL. *Memória de Cálculo para os Ajustes do Relé de Proteção SEL-311C*. Disponível em <<http://www.selinc.com.br/calculo/ROTEIRO%20DE%20AJUSTES%20SEL-311C.pdf>>.
Acesso em 07/12/2014.
- SEL. *Guia prático para configuração, coleta e utilização de oscilografias em relés digitais*. Disponível em
<http://www.selinc.com.br/guia_aplic/Analise_de_Oscilografias_em_reles_digitais.pdf>.
Acesso em 08/01/2015.
- RTDS Technologies. *RTDS™ User's Manual*. Canadá, 2007.

RTDS Technologies. *The World Standard for Real Time Digital Power System Simulation*. Disponível em: <<http://rtds.com/index/index.html>> Acesso em 10 de maio de 2015.

SILVA, H.T. *Estudo da Proteção de Sobrecorrente do Relé SEL 311C*. CGEE/UFCG, Campina Grande, 2011.

SILVA, J.P.S. *Relatório de Estágio Supervisionado*. CGEE/UFCG, Campina Grande, 2012.

Anexos