

Análise de ferramentas para o ensino de Proteção de Sistemas Elétricos

Rodrigo César Dantas de Lima, Rafaella Nascimento Meira,*
Núbia Silva Dantas Brito, Karcus Marcelus Colaço Dantas**

* *Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
PPqEE/UFCG (e-mail: rodrigo.lima@ee.ufcg.edu.br;
rafaella.meira@ee.ufcg.edu.br)*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, DEE/UFCG (e-mail:
nubia@dee.ufcg.edu.br; karcus@dee.ufcg.edu.br)*

Abstract: The replacement of electromechanical relays by digital relays has caused a real revolution in the electrical power systems protection (PSP). This fact has demanded changes from the academy in the teaching and learning of this subject, such as the use of software and simulators. This article is inserted in this context and reports the use of these tools in the teaching of PSP at the Federal University of Campina Grande (UFCG). The use of these tools made the learning process more dynamic and attractive to the students and the protection concepts could be further developed through more realistic scenarios, contributing to the formation of more qualified engineers that meet the demands of the labor market

Resumo: A substituição dos relés eletromecânicos pelos relés digitais provocou uma verdadeira revolução na proteção dos sistemas elétricos de potência. Esse fato tem exigido da academia mudanças nas formas de ensino/aprendizagem da disciplina Proteção de Sistemas Elétricos (PSE), como por exemplo, o uso de *softwares* e simuladores. Este artigo insere-se nesse contexto e apresenta o relato do uso de algumas dessas ferramentas no ensino da disciplina PSE da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O uso dessas ferramentas tornou o processo de aprendizagem mais dinâmico e atraente para os alunos e os conceitos de proteção puderam ser desenvolvidos através de cenários mais realistas, contribuindo para a formação de engenheiros mais qualificados que atendam às demandas do mercado de trabalho.

Keywords: Teaching; Teaching Tools; Protection of Electrical Systems; Simulators; Softwares.

Palavras-chaves: Ensino; Ferramentas Didáticas; Proteção de Sistemas Elétricos; Simuladores; Softwares.

1. INTRODUÇÃO

No contexto da Engenharia Elétrica, Proteção de Sistemas Elétricos foi, sem dúvida, uma das áreas que sofreu o maior impacto dos avanços científicos e tecnológicos (BRITO et al., 2012). Atualmente, a substituição dos relés eletromecânicos por relés digitais aliada à integração da proteção com outras áreas do setor elétrico, tais como supervisão e controle, resultou em mudanças no perfil do profissional de proteção, tanto no ambiente acadêmico quanto empresarial.

Na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), a capacitação dos profissionais para atuarem na área de proteção está a cargo da disciplina de cunho teórico Proteção de Sistemas Elétricos (PSE), a qual integra o rol das disciplinas de conteúdos específicos do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica (CGEE), integrando os conhecimentos da ênfase Eletrotécnica. 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. Atualmente, a ementa do curso de PSE na UFCG

consiste em: cálculo de parâmetros de linha; transitórios eletromagnéticos; proteção de sistemas elétricos e fundamentos da transmissão em corrente contínua.

Uma pesquisa conduzida pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) revelou algumas informações interessantes sobre o *status* dessa disciplina no Brasil, como (COTOSCK, 2007):

- Na grande maioria dos cursos, a disciplina é ofertada no último ano do curso, é de natureza optativa, as ementas estão defasadas e as turmas possuem poucos alunos.
- Poucas instituições possuem infraestrutura laboratorial. Os poucos laboratórios existentes estão em sua grande maioria obsoletos, haja vista o alto custo requerido para se estruturar um laboratório de proteção.

A questão da interdisciplinaridade (integração de dois ou mais componentes curriculares na construção do conhecimento) foi outro aspecto analisado na pesquisa. Por ser considerada uma disciplina horizontal, ou seja, uma disciplina que está ligada a outros conteúdos, PSE requer alunos com maior conhecimento técnico.

Nesse âmbito, o Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da UFCG vem envidando esforços visando se adequar às novas exigências do mercado e dentre as diversas medidas que estão sendo colocadas em prática, uma das mais importantes foi, sem dúvida, a construção do Laboratório de Proteção Digital, cuja infraestrutura é considerada uma das mais modernas do país, dispondo atualmente de: simulador digital em tempo real, relés, caixa de teste, módulo didático para ensino de proteção, computadores, *softwares*, qualímetros, registradores de perturbação, amplificadores, osciloscópios, etc.

Toda essa infraestrutura vem sendo utilizada tanto para o desenvolvimento de pesquisas quanto para a realização de aulas práticas para os alunos de PSE. Este artigo apresenta um relato da experiência em curso na UFCG, sendo organizado da seguinte forma: inicialmente apresentam-se conceitos básicos dos fundamentos da proteção, os quais são importantes para o entendimento dos estudos de casos realizados; em seguida, as principais características das ferramentas utilizadas são apresentadas. O artigo é finalizado com a realização de estudos de casos e apresentação das conclusões inferidas.

2. FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO

Conforme o Glossário de Termos Técnicos do Operador Nacional do Sistema, o sistema de proteção constitui o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos, também denominados de faltas, e outras condições de operação anormais em componentes do sistema elétrico (ONS, 2008). Um sistema de proteção típico é representado no esquema da Figura 1.

Seu princípio de funcionamento pode ser resumido do seguinte modo: inicialmente, os transformadores para instrumentos (transformadores de corrente – TC e transformadores de potencial – TP) reduzem as amplitudes da corrente e tensão, respectivamente, as quais são as grandezas necessárias à função de proteção para níveis aceitáveis de leitura e acesso seguro. Em seguida, essas informações são disponibilizadas ao relé, que se encarrega de processá-las. Caso os valores das grandezas excedam valores pré-definidos, os contatos do relé são fechados e neste instante, a bobina de abertura do disjuntor, alimentada por uma fonte auxiliar, é energizada e logo em seguida, abre os contatos principais do disjuntor (SÁ et al., 2010).

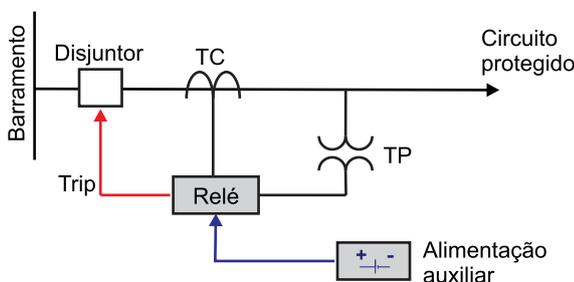


Figura 1. Esquema de um sistema de proteção típico.

Todo sistema de proteção deve obedecer aos requisitos da filosofia da proteção que consiste em selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um Sistema Elétrico de Potência (SEP), de forma a guardar entre si uma determinada relação, tal que

uma anormalidade no SEP possa ser isolada e removida, sem que outras partes sejam afetadas (GUIGUER, 1988).

Dentre os elementos que compõem um sistema de proteção, o relé é considerado o mais importante, visto que é o responsável por detectar condições anormais no sistema e decidir sobre a abertura ou não dos disjuntores. Como resultado dos avanços tecnológicos, os relés evoluíram para os denominados *Intelligent Electronic Device* (IED) que, além de agregarem maiores recursos às tarefas de proteção, são capazes de participar de diversas funções de supervisão, controle e automação (PEREIRA et al., 2012). Das funções que podem ser inseridas nos relés digitais, destaca-se aqui, a função proteção de distância, a qual é extensivamente utilizada na proteção de linhas de transmissão (LT), devido sobretudo a sua simplicidade de parametrização (ajuste e coordenação) e viabilidade econômica (SILVA, 2009).

O relé de distância aplica o algoritmo da função proteção de distância, o qual se baseia no princípio da medição da impedância de sequência positiva da LT entre o local onde o relé está instalado e o local de ocorrência da falta, tomando como base as grandezas medidas pelos secundários dos TP e TC (ZIEGLER, 2006). A escolha da impedância de sequência positiva se deve ao fato dela apresentar distribuição praticamente uniforme, estar presente em todos os tipos de falta e não depender da resistência do solo (ANDERSON, 1999).

3. AS FERRAMENTAS

Para demonstrar o potencial do uso de novas ferramentas no ensino de PSE, selecionaram-se a bancada didática, um *software* comercial destinado a realizar estudos de PSE e um simulador digital em tempo real, cujos usos didáticos são demonstrados na forma de estudos de casos, visando apresentar ao aluno o uso dessas ferramentas e aplicar os conceitos apresentados nas aulas teóricas. Um resumo das principais características e funcionalidades de cada ferramenta é apresentado a seguir.

3.1 Bancada Didática

Equipamento desenvolvido pela empresa *Engineering and Technical Teaching Equipment*, o qual permite ao aluno adquirir experiência teórica e prática com relés de proteção (EDIBON, 2011). O equipamento possui arquitetura modular, sendo constituído de uma estrutura principal de alumínio anodizado, contendo o módulo de controle e medições e área para montagem dos relés e demais módulos. Para demonstrar seu potencial como ferramenta didática, utilizaram-se os seguintes módulos, cuja numeração está indicada na Figura 2:

- (1) Módulo de controle e medições.
- (2) Módulo de linha de transmissão, o qual simula uma LT trifásica a parâmetros concentrados, constituída por uma: i) parte resistiva, composta por resistores de 15Ω e 33Ω ; ii) parte indutiva, composta por um único enrolamento de resistência desprezível, com terminações que variam entre 33, 78, 140, 193 e 236 mH; iii) parte capacitiva, composta por capacitores cujos valores disponíveis são $0,5 \mu\text{F}$, $1,0 \mu\text{F}$ e $2,0 \mu\text{F}$.

- (3) Módulo de injeção de faltas, o qual permite a aplicação de diferentes tipos de curtos-circuitos em pontos específicos do sistema.
- (4) Módulo de proteção de distância, constituída por um relé de distância comercial.



Figura 2. Bancada Didática.

Um experimento com a bancada didática auxilia no entendimento dos conceitos básicos de PSE e possibilita a interação dos alunos com um relé real, sendo realizado conforme os passos a seguir.

- Modelagem do sistema-teste via realização das conexões entre os módulos.
- Parametrização do relé.
- Seleção e aplicação do tipo de curto-circuito no módulo de injeção de faltas.

3.2 Software para estudos de PSE

O software comercial utilizado é desenvolvido pela *Eletrocon International, Inc.* para realização de estudos de PSE, sendo largamente usado por concessionárias de energia elétrica (MEIRA, 2018). O software tem estrutura modular, com cada módulo possuindo funções específicas, as quais compartilham dados entre si por meio de uma base de dados comum. O usuário pode modelar desde sistemas fictícios até sistemas reais complexos. Dentre os diversos módulos que o compõem, destacam-se os apresentados na Tabela 1, os quais serão utilizados para demonstrar seu potencial como ferramenta didática.

Um experimento com esse software comercial possibilita que os alunos apliquem os conceitos básicos de PSE, sendo realizado conforme os passos a seguir.

- Modelagem do sistema-teste no módulo *One-Line Diagram*, assim como a parametrização do relé e da LT.
- Aplicação das faltas no módulo *Short-Circuit*.
- Análise da atuação da proteção de distância no módulo *Coordination Graphics*.

Tabela 1. Alguns módulos do software.

Módulo	Função
<i>Database Editor</i>	Repositório do banco de dados do sistema elétrico
<i>Short Circuit</i>	Simula curtos-circuitos e analisa a resposta dos dispositivos de proteção
<i>One-Line Diagram</i>	Desenha o diagrama unifilar do sistema elétrico
<i>Coordination Graphics</i>	Avaliar as características de operação das proteções
<i>System Simulator</i>	Realiza estudos em cenário único de forma interativa com o diagrama de uma linha

3.3 Simulador Digital em Tempo Real

O simulador digital em tempo real utilizado (Figura 3) é uma combinação de hardware e software produzido e comercializado pela empresa *RTDS Technologies Inc.*, a qual permite a simulação de SEP em tempo real, uma vez que as soluções do sistema elétrico são obtidas em um intervalo de tempo muito menor que as constantes de tempo do sistema real. Uma de suas principais aplicações é no teste em malha fechada de sistemas de proteção, visto que ele permite a comunicação com equipamentos externos, como relés digitais. Dessa forma, é possível transmitir os sinais de corrente e tensão diretamente para o relé, de modo que atue conforme as condições impostas pelo sistema modelado no simulador digital.

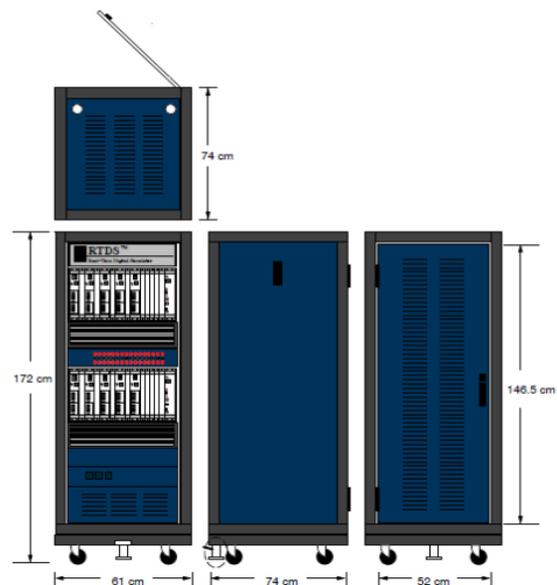


Figura 3. Modelo do simulador digital utilizado.

O software do simulador digital é organizado de forma hierárquica em três níveis distintos:

- GUI (*Graphical User Interface*) - nível mais alto: interface denominada de RSCAD, responsável pela interação entre o usuário e o simulador digital, sendo composta por um conjunto de módulos individuais.

Na Tabela 2 estão descritos os módulos que serão utilizados.

- Compilador - nível médio: tem como função conectar o *software* e *hardware* do simulador digital, gerando códigos para cada simulação.
- Biblioteca de modelos - nível mais baixo: armazena uma grande variedade de modelos de componentes e controle, os quais são usados na criação do sistema a ser simulado. Caso o usuário não encontre o modelo do componente desejado, ele pode criá-lo por meio do módulo *Cbuilder*.

Tabela 2. Módulos individuais da GUI.

Módulo	Função
<i>Draft</i>	Responsável pela modelagem do sistema.
<i>RunTime</i>	Controla a simulação em tempo real.
<i>Tline-Cable</i>	Edita os parâmetros e a configuração das LT.
<i>Cbuilder</i>	Ambiente de criação de novos componentes de controle e de novos componentes do sistema.

Um experimento com o simulador digital em tempo real é realizado conforme os passos a seguir.

- Programação do sistema-teste no módulo *Draft* do simulador digital.
- Criação do relé no módulo *Cbuilder*.
- Simulação via módulo *RunTime*.
- Aplicação dos curtos-circuitos desejados.

4. ESTUDOS DE CASO

4.1 Bancada Didática

No estudo de caso com a bancada didática, utilizou-se o sistema-teste da Figura 4, o qual é constituído de uma LT simples de 100 km de comprimento. O sistema de proteção é composto por um disjuntor que abre seus contatos comandados pelo sinal de comando (*trip*) enviado pelo relé instalado na barra S e um TC e um TP com relação de transformação de 2 A:1 A e 3,64 V:1 V, respectivamente. Selecionaram-se curtos-circuitos fase-terra (AT) e fase-fase (AB), com resistência de falta 0 Ω, os quais foram aplicados nos pontos 33 mH e 140 mH, correspondendo as zonas 1 e 2 de proteção, respectivamente.

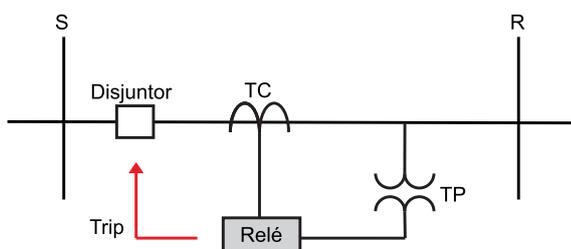


Figura 4. Sistema-teste da Bancada Didática.

O primeiro estudo de caso consistiu em simular uma falta AT no módulo de injeção de faltas, a qual foi aplicada no ponto 140 mH no módulo de linha de transmissão.

Conforme apresentado na Figura 5, o relé indicou corretamente as fases envolvidas na falta: fase A e o terra G. Além disso, a falta foi detectada na zona 2, como esperado, e o disjuntor abriu seus contatos (mensagem *BREAKER OPEN*).



Figura 5. Zona em que o relé detectou a falta AT.

O segundo estudo de caso consistiu em simular uma falta AB no módulo de injeção de faltas, a qual foi aplicada no ponto 33 mH no módulo de linha de transmissão. Conforme apresentado na Figura 6, o relé indicou corretamente as fases envolvidas na falta, fases A e B, e a zona na qual a falta foi detectada, zona 1, com o disjuntor abrindo seus contatos (mensagem *BREAKER OPEN*).



Figura 6. Zona em que o relé detectou a falta AB.

A execução desse experimento requer do aluno: i) estudo do manual do relé e dos procedimentos de parametrização; ii) capacidade de análise das informações disponibilizadas no painel do relé; iii) aplicação dos fundamentos de curtos-circuitos e modelagem de LT. Por fim, o aluno tem a oportunidade de desenvolvimento de prática laboratorial.

4.2 Software para estudos de PSE

No estudo de caso com o *software* comercial, utilizou-se o sistema-teste da Figura 7, o qual é constituído de uma LT simples de 80 km de comprimento e um TC e um TP com relação de transformação de 500 A:5 A e 230 kV:115 V, respectivamente.

O primeiro passo consistiu em desenhar o diagrama unifilar do sistema-teste no módulo *One-Line Diagram*, o qual está representado na Figura 8. Em seguida, parametrizou-se o relé e a LT (informando o comprimento e o valor da impedância).

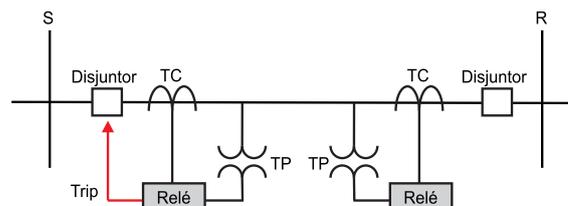


Figura 7. Sistema-teste do *software* comercial.

Para verificar a atuação do sistema de proteção, aplicou-se uma falta trifásica simétrica *close-in* (próxima a subestação S) utilizando os módulos *Short Circuit* e *Coordination*

Graphics. Conforme esperado e apresentado na Figura 9, em uma falta trifásica simétrica, as componentes de sequência zero e negativa têm valor nulo ($3I_Z = 0$).



Figura 8. Módulo *One-Line Diagram*.

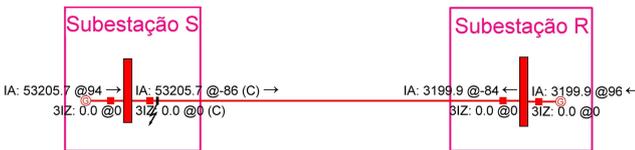


Figura 9. Aplicação de uma falta trifásica.

Por fim, no *Coordination Graphics* (Figura 10), analisou-se a atuação da proteção de distância via característica mho, onde o círculo em azul representa a primeira zona, o círculo verde a segunda zona e a reta em preto a LT. Como a falta foi aplicada na barra local, sua localização foi em primeira zona no início da LT (X em vermelho).

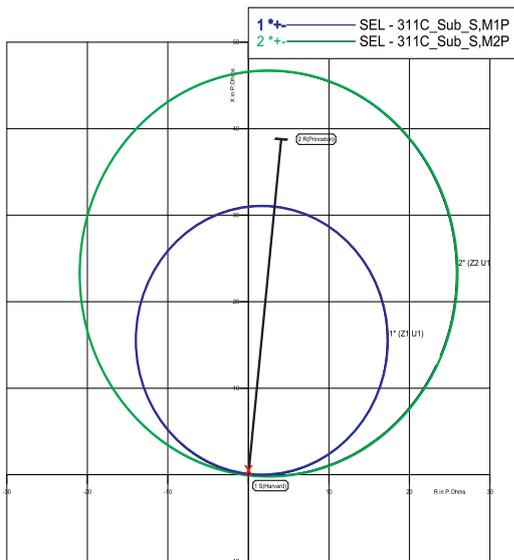


Figura 10. Atuação da proteção no *Coordination Graphics*.

O uso desse *software* comercial como ferramenta didática permite ao aluno: i) estudo do manual do relé e dos procedimentos de parametrização; ii) capacidade de análise das informações disponibilizadas nos módulos do *software* e dos relatórios fornecidos; iii) estudo de SEP mais complexos e realísticos.

4.3 Simulador Digital em Tempo Real

Para ilustrar o uso do simulador digital como ferramenta didática, utilizou-se o sistema-teste apresentado na Figura 11, o qual foi programado no módulo *Draft* (BRITO et al., 2012). Na montagem do circuito os seguintes componentes foram copiados das bibliotecas para a área de projeto: um gerador trifásico que está conectado ao barramento S, uma LT (cujos parâmetros são editados no módulo *Tline*),

uma carga trifásica equilibrada conectada ao barramento R, um relé monitorando as correntes do barramento S e um sistema de aplicação de faltas ao longo da LT. Após a montagem, o circuito foi salvo e compilado.

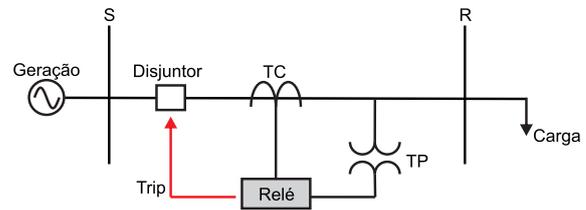


Figura 11. Sistema-teste do simulador digital em tempo real.

Para criar o relé digital fez-se uso do módulo *Cbuilder*, desde o *design* do componente até as definições das entradas e saídas, assim como os parâmetros utilizados na função de proteção. A lógica interna do relé foi desenvolvida em linguagem C e a partir do módulo, montou-se a lógica de desligamento completo do disjuntor que conecta a LT à barra de geração, cujos elementos descritos a seguir estão apresentados na Figura 12.

- (1) Filtro digital passa-baixa *antialiasing* com frequência de corte inferior a frequência de *Nyquist* e conversor analógico digital A/D: no simulador digital, as amostras de tensão e corrente são calculadas a cada 50 μ s, o que equivale a uma taxa de amostragem de 20 kHz. Como consequência, o conversor A/D foi substituído por um bloco reamostrador, com frequência de amostragem de 680 Hz (16 amostras por ciclo). A frequência de corte utilizada no filtro passa-baixas foi de 180 Hz.
- (2) Algoritmo de Fourier de um ciclo em tempo real: esse módulo estima os fasores de corrente (amplitude e fase) que serão avaliados pelo relé digital. Sua programação foi feita no módulo *Cbuilder*.
- (3) Relé digital: dispositivo desenvolvido no módulo *Cbuilder*. Quando uma falta é detectada, o relé envia um *trip* para abertura do disjuntor e contenção da falta na LT.
- (4) Desligamento do disjuntor: isola o sistema após atuação da lógica de proteção.

Uma falta trifásica, a 45% do barramento local (S), com resistência de aproximadamente 0Ω foi executada via módulo *RunTime*, o qual permite interagir com o sistema e obter amostras das tensões e correntes analógicas em cada um dos barramentos. Finalizada a simulação o sistema segue em regime permanente. Como esperado, o *trip* foi enviado logo após a detecção da falta pela unidade instantânea e a falta isolada, em tempo real, logo após a abertura dos contatos do disjuntor. A duração total do evento, do instante da detecção da falta até a abertura dos contatos do disjuntor, foi de aproximadamente um ciclo. As tensões e correntes na LT (terminal da barra S) e o sinal de *trip* enviado pelo sistema de proteção para o desligamento do disjuntor são apresentados na Figura 13.

Dentre as vantagens proporcionadas pelo simulador digital, destacam-se a praticidade desse equipamento, sua rapidez de processamento de dados e a interação do aluno com a máquina. Além disso, tem a vantagem de represen-

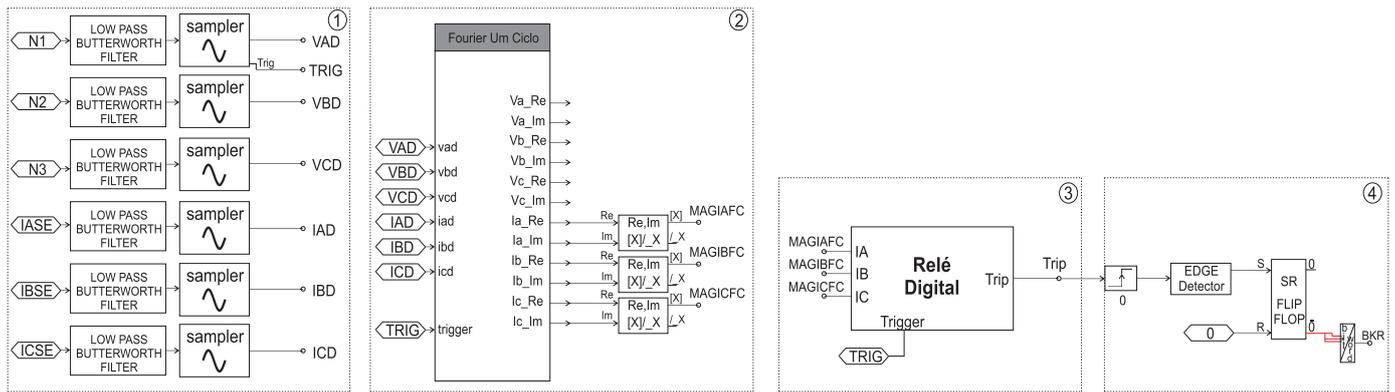


Figura 12. Lógica do sistema de proteção.

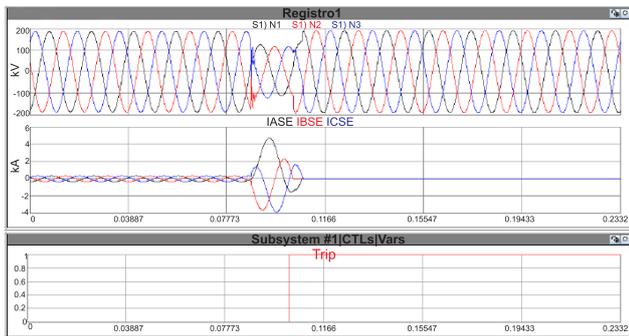


Figura 13. Simulação em tempo real.

tar uma infinidade de SEP com diferentes topologias sem criar nenhum risco ao sistema elétrico, obtendo resultados com uma boa precisão e, se necessário, realizar simulações simultaneamente.

5. CONCLUSÃO

O artigo apresentou propostas do uso de ferramentas alternativas para serem usadas no ensino de Proteção de Sistemas Elétricos, dentre as quais uma bancada didática, um *software* comercial e um simulador digital em tempo real. Conforme se observou, o uso dessas ferramentas pode trazer inúmeros benefícios para o aprendizado, haja vista o tempo exíguo de duração dos cursos tradicionais ministrados na grande maioria das universidades brasileiras. De fato, ferramentas desse tipo permitem o estudo de uma gama maior de cenários, inclusive um maior entendimento dos conceitos relacionados com a filosofia da proteção, tais como seletividade, velocidade, etc.

Além do aprendizado se tornar mais dinâmico e atrativo, o aluno se comportará, indubitavelmente, como um agente ativo do seu conhecimento, podendo abordar diversos aspectos relacionados à proteção. Como resultado, se formará um engenheiro de proteção mais qualificado e muito mais integrado às novas demandas de um mercado de trabalho cada dia mais exigente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P.M. (1999). *Power System Protection*. IEEE Press Series on Power Engineering, Piscataway, NJ - USA.
- BRITO, N.S.D., SOUZA, B.A., NASCIMENTO, J.P., COSTA, C.A.B., and MARTINS, R.A. (2012). *Proposição do uso de softwares de simulação em proteção de sistemas elétricos*. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém, Brasil.
- COTOSCK, K.R. (2007). *Proteção de sistemas elétricos: uma abordagem técnico-pedagógica*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- EDIBON (2011). *Manual do Módulo ERP-UB*.
- GUIGUER, S. (1988). *Proteção de sistemas aéreos de distribuição*. Sagra, Porto Alegre.
- MEIRA, R.N. (2018). *Análise da interoperabilidade de relés via teleproteção*. Mestrado em engenharia elétrica, UFCG, Campina Grande.
- ONS (2008). *Submódulo 2.6: Requisitos Mínimos dos Sistemas de Proteção e de Telecomunicações*.
- PEREIRA, A.C., FILHO, J.M.O., CORREIA, J.R.G., CÁCERES, D., and PELLIZZONI, R. (2012). *Automação de subestações e usinas – estado da arte e tendências utilizando a norma IEC 61850*. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Salvador, Brasil.
- SILVA, K.M. (2009). *Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão*. Doutorado em engenharia elétrica, UFCG, Campina Grande.
- SÁ, J.A., COSTA, F.B., OLIVEIRA, N.L.S., BRITO, N.S.D., SOUZA, B.A., GURJÃO, E.C., and CARMO, U.A. (2010). *Uso de simulador em tempo real no ensino de proteção de sistemas elétricos*. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Fortaleza, Brasil.
- ZIEGLER, G. (2006). *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Publicis Publishing, Berlin, Germany, 2 edition.