



ANÁLISE E PROPOSTA DE ENSAIOS PRÁTICOS COMO COMPLEMENTO AO ENSINO DE PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA ALUNOS DE GRADUAÇÃO

Janayna Kirley Moura Martins¹ – janaynakirley09@hotmail.com

Benedito Mesley Lima Portela¹ – mesleylima123@hotmail.com

Ângelo Marcílio Marques dos Santos¹ – amarciliomsantos@gmail.com

Juan Carlos Pequeña Suni¹ – jcarlosps@gmail.com

¹Universidade Federal do Ceará, Curso de Engenharia Elétrica, *Campus* de Sobral
Rua Estanislau Frota, S/N – Bloco I – Mucambinho – Centro
62010-560 – Sobral – Ceará

Resumo: *Este artigo aborda os problemas inerentes ao ensino de proteção de sistemas de energia elétrica e a proposta de inserção de ensaios práticos na disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência associados ao programa de graduação em Engenharia Elétrica do campus Sobral da Universidade Federal do Ceará. O primeiro e mais difícil obstáculo são laboratórios devidamente implementados, devido ao alto custo de relés e malas de testes e/ou simuladores em tempo real. Outro obstáculo são as disciplinas teóricas necessárias, como Estabilidade de Sistemas de Energia. Geralmente, alunos de graduação só têm como disciplinas obrigatórias Controle Clássico ou Dinâmico, Números complexos e Álgebra Linear. Por isso que, na maioria dos casos, o ensino de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência é ministrado no somente nível de pós-graduação ou através de seminários. Sem uma base teórica dos conceitos de relés de proteção, os testes de relés de proteção são muito prescritivos e com ensaios práticos no campo ou no laboratório se contribui na motivação e interesse dos alunos no curso, além de complementar os conhecimentos adquiridos da parte teórica.*

Palavras-chave: *Proteção de sistemas elétricos, Ensaaios práticos, Engenharia elétrica.*

1 INTRODUÇÃO

Este artigo expõe os problemas encontrados no ensino da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência no curso de graduação de engenharia elétrica no campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, e mostra alternativas para superar estes problemas.

A busca por metodologias pedagógicas que venham colaborar no processo ensino-aprendizagem é cada vez mais intensa e se faz necessária nas mais diversas áreas do conhecimento, não sendo diferente na área das ciências exatas e tecnológicas, a qual dispõe de aparelhos cada vez mais tecnológicos que venham a auxiliar os professores na abordagem de conteúdos e colaborar para o aprendizado e compreensão dos alunos de forma mais rápida, tanto em conteúdo de teor teórico quanto prático. Assim, utilizar práticas em laboratório para



exemplificação e fixação de conteúdos torna-se uma atividade cada vez mais adotada, já que assim o aluno tem a possibilidade de observar na prática o que foi estudado em teoria, além de poder acompanhar e compreender o comportamento dos parâmetros do sistema, bem como suas variações em tempo real. Por conseguinte, através dessa didática de uso de práticas virtuais em laboratório, essa forma de ensino tende a se tornar cada vez mais sólida e utilizada nos centros acadêmicos, podendo ganhar cada vez mais incentivo, principalmente na modalidade de ensino à distância (LIMA E MEDRADO, 2006).

Na disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, do curso de engenharia elétrica, não é diferente, uma vez que nela são abordados conteúdos importantíssimos para a vida profissional e acadêmica do aluno, e a compreensão desses conteúdos de forma prática é de suma importância.

Dessa forma, o trabalho proposto visa motivar os alunos da graduação para a disciplina de Sistemas Elétricos de Potência, além de aplicar conhecimentos em simulação, programação e controle em um dos componentes mais importantes vistos na disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência: o Relé. Far-se-á isso através do relé SEL 351S e seus softwares, que serão utilizados como plataforma didática experimental.

1.1 Análise dos problemas e alternativas de solução

Um número limitado de cursos de engenharia elétrica nas universidades está especializando-se em sistemas elétricos de potência e oferecendo disciplinas na graduação de proteção de sistemas elétricos de potência. Mesmo quando é oferecida a disciplina, a falta de motivação dos alunos nas aulas teóricas é ainda um desafio a ser superado, devido à forte base matemática necessária no desenvolvimento da disciplina, como por exemplo um assunto básico como componentes simétricas que exige conhecimento de números complexos e álgebra linear. Para superar este problema podemos utilizar programas de simulação como ATP/EMTP, Matlab/SimPowerSystems, PSCAD, etc., onde o aluno pode ter uma clara ideia, de forma gráfica, de como as componentes simétricas são representadas (J. FERRIS, 2013).

Outro problema encontrado é o ensino optativo ou mesmo a ausência, na grade curricular da graduação, da disciplina de estabilidade de sistemas de potência. Na maior parte dos casos, os estudantes têm apenas disciplinas de controle clássico e/ou dinâmico. Dessa maneira, novamente é recomendado o uso dos softwares mencionados anteriormente como ferramenta para superar este problema, onde, de forma gráfica, os alunos podem analisar e entender melhor a estabilidade em sistemas elétricos.

Finalmente, o mais difícil obstáculo para os estudantes e também docentes da disciplina de proteção, que são os laboratórios devidamente implementados. Sem relés reais e sem equipamentos como a mala de testes de relé, ou mesmo simuladores em tempo real (P.G. MCLAREN, 1992), a disciplina acaba desmotivando aos alunos. Uma proposta de solução seria a combinação ideal da ajuda das simulações através de softwares preparados com bibliotecas de relés, práticas de laboratório com relés reais e a teoria dada em sala de aula.

O curso de engenharia elétrica campus Sobral, da UFC, não conta com relés ou mala de testes e nem com um simulador de tempo real próprios, devido ao pouco tempo de existência do campus (10 anos de formado) ou falta de recursos pela conjuntura atual do país. Por enquanto conta-se com um Relé 351S da empresa SEL e uma mala de testes CE-6006 da empresa CONPROVE ‘emprestados’ por tempo definido do campus de Fortaleza. Este



problema pode ser superado realizando projetos de pesquisa com empresas da área para obter recursos e, assim, implementar o laboratório de sistemas de energia do campus.

2 DESENVOLVIMENTO

A disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos, é a responsável por fornecer os conceitos básicos de sistemas de proteção, de coordenação e integração da proteção em sistemas elétricos de potência (DEE-UFC, 2005). Todo e qualquer sistema elétrico é suscetível a perturbações que podem trazer severas consequências ao sistema elétrico. Dessa forma, os sistemas elétricos de potência necessitam ser equipados com a devida proteção, o que torna de fundamental importância o conteúdo da disciplina.

Um dos equipamentos fundamentais nos sistemas de proteção são os relés, os quais são estudados detalhadamente na disciplina de Proteção. Os relés representam uma gama numerosa de equipamentos e dispositivos, com as mais diversas formas de construção e operação, cuja aplicação de cada tipo é dada de acordo com o porte da instalação considerada. Dentre a diversidade de relés de proteção existentes no mercado, estão os relés digitais, os quais, baseados em técnicas de microprocessamento, têm a capacidade de processar digitalmente os valores medidos do sistema, tais como tensão, corrente, frequência, etc. e de realizarem operações lógicas e aritméticas, dentre outras vantagens, além das funções básicas de disjunção inerentes aos relés de proteção (MAMEDE, 2005). Os relés digitais são, dessa forma, de fundamental importância no desenvolvimento de qualidade dos sistemas elétricos de potência.

Assim, com o intuito de aprimorar o conhecimento prático no desenvolvimento disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, o uso desse tipo equipamento pode ser inserido através de práticas de laboratório. O trabalho proposto visa aplicar os conhecimentos teóricos através do uso do Relé SEL 351-S, com a realização de práticas básicas para melhor aproveitamento da disciplina. Juntamente com esse relé, utiliza-se a mala de testes CE-6006 e os softwares dos mesmos. As especificações desses equipamentos e os ensaios a serem realizados em laboratório são explanados na sequência.

2.1 Perturbações nos sistemas elétricos

Frequentemente, os sistemas elétricos estão sujeitos tanto a defeitos transitórios quanto permanentes. Essas irregularidades podem ser, resumidamente, curtos-circuitos, sobrecargas, variações no nível de tensão e no nível de frequência, o que pode causar danos desastrosos ao sistema elétrico (MAMEDE, 2005).

Os curtos circuitos são resultantes de falhas na isolação de algum ponto sob tensão do sistema elétrico ao qual está inserido, ou em decorrência de ações externas, o que pode gerar valores de corrente muito elevados e causar, assim, danos irreparáveis a instalação, caso não haja o devido sistema de proteção interferindo no circuito. Esse tipo de falta ocorre, geralmente, entre três fases (minoridade dos casos), entre duas fases (também pouco frequente), entre duas fases e o terra e entre fase e terra, onde os dois últimos tipos são os mais frequentes entre os curtos-circuitos (MAMEDE, 2005).

No caso das sobrecargas, ocorre uma elevação da corrente para valores acima do que foi projetado para o sistema suportar, podendo ser ocasionadas por fatores como: excesso de carga mecânica em motores, introdução de cargas indevidas no circuito, entre outros casos. Geralmente, esse tipo de perturbação ocorre de maneira prolongada, diferente dos curtos-circuitos, que são de rápida duração (MAMEDE, 2005).

Organização



Promoção





Outras perturbações que acarretam sérios danos ao desempenho de uma instalação, são as variações no nível de tensão, as quais podem se dar em curto período de tempo ou de forma prolongada. Essas variações são danosas, tanto para valores de tensão acima do nível de fornecimento tomado pela concessionária, quanto para valores abaixo. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão responsável por regular o setor elétrico brasileiro, no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia (PRODIST), estabelece os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente. De acordo com a norma, os valores adequados de tensão obtidos nas medições devem assumir valores entre 95% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão.

Ainda de acordo com o módulo 8 dos PRODIST, há também a regulamentação dos limites de frequência dentro dos quais é normal a operação do sistema, que é entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando há ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que, no intervalo de tempo de 30 segundos após a ocorrência da falha, retorne para a faixa entre 59,5 Hz e 60,5 Hz, para a recuperação do equilíbrio carga-geração, sendo submetido ainda a outras exigências em condições extremas.

2.2 Relé SEL 351-S

O relé 351S, fabricado pela empresa Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), é um dispositivo que atua na proteção sistemas elétricos com recursos inovadores e mais eficientes. Este relé possui funções de polarização de elementos direcionais, proteção de frequência, religamento automático, localização de faltas, bloqueio de segundo harmônico, detecção no caso de algum disjuntor aberto e, além disso, atua também na medição e monitoramento da qualidade de energia e pode ser empregado em ensaios de sobrecorrente, sobrefrequência, sobretensão, entre outros. Todas essas funções estão disponíveis no site do fabricante (SEL, 2009). A Figura 1 mostra a imagem do painel do referido dispositivo.

Figura 1 - Vista frontal do relé 351S.



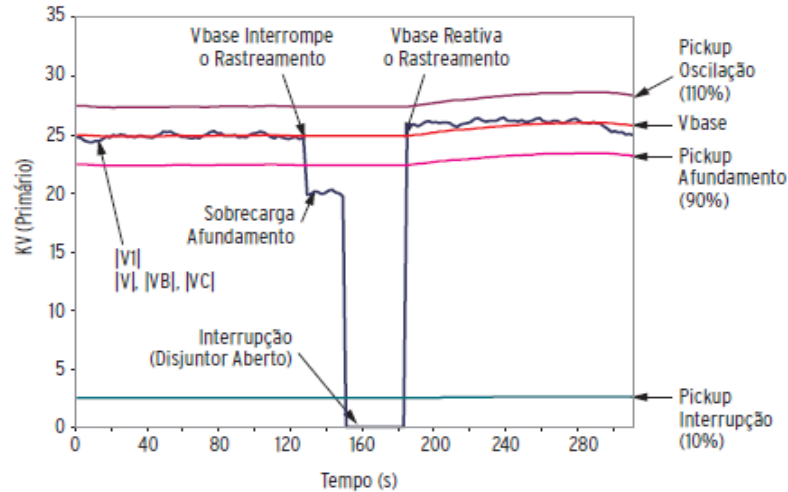
Ademais, o relé possui um servidor web integrado, onde todas as informações podem ser acessadas via conexão Ethernet através de um navegador, onde estarão disponíveis informações sobre status, faltas e suas medições. O mesmo pode ser programado para diversas outras funções, utilizando suas seis entradas digitais, e ainda pode ter suas configurações ajustadas de acordo com a situação que ele vai atuar. Tudo isso é feito através do software AcSELErator QuickSet, instalado em um computador, onde a comunicação entre o relé e o computador é feita através de um cabo serial.

A partir de um registrador de afundamento, oscilações e interrupção da tensão no relé, o usuário pode obter diversas informações sobre qualquer surto ou falha no sistema, passando



assim a monitorar e melhorar a qualidade de energia do sistema de potência. A Figura 2 mostra os níveis de afundamento, oscilação e interrupção da tensão.

Figura 2 - Níveis de afundamento, oscilação e interrupção da tensão.



Fonte: SEL, Sistema de proteção.

Sua função de esquemas de abertura assistido por comunicação garante uma maior segurança na proteção de um sistema, não necessitando da presença de dispositivos de coordenação externamente. Isso ocorre devido suas lógicas internas que possuem um tempo de disparo rápido, reduzindo o tempo de duração de uma falta e protegendo assim as cargas e equipamentos que estão ligados ao sistema elétrico no qual o relé está atuando.

O relé ainda possui elementos de subfrequência flexíveis que atuam na proteção contra subfrequência, onde o usuário pode aplicar até seis de valores de subfrequência e controlar com vários níveis de sub e sobrefrequência, garantindo assim um maior controle na proteção e uma maior abrangência nas cargas (SEL, 2009).

A seguir estão algumas especificações do relé 351S:

- Frequência de 50/60 Hz
- Rotação de fases ABC/ACB
- Entrada serial EIA-232
- Temperatura de operação entre -40°C e +85°C
- Frequência de corte de 3000Hz com a presença de um filtro analógico passa-baixa de 3dB.

2.3 Mala de Testes de Relés CE-6006

A mala de testes Universal Hexafásico CE 6006 é fabricado pela empresa Conprove Engenharia. A principal função da mala é ser utilizado em testes de relés de proteção, podendo ser eles eletromecânicos, estáticos ou numéricos, independentemente de serem monofásico ou trifásico. Além disso, pode reproduzir transitórios DC até 3,1 kHz e também pode ser utilizado em testes de transdutores, seja de tensão, corrente, potência ou até mesmo de frequência.

O equipamento permite a aplicação de ondas senoidais distorcidas com a presença de componentes harmônicas e valores distintos de fase, ângulos e amplitudes para cada fase,

Organização



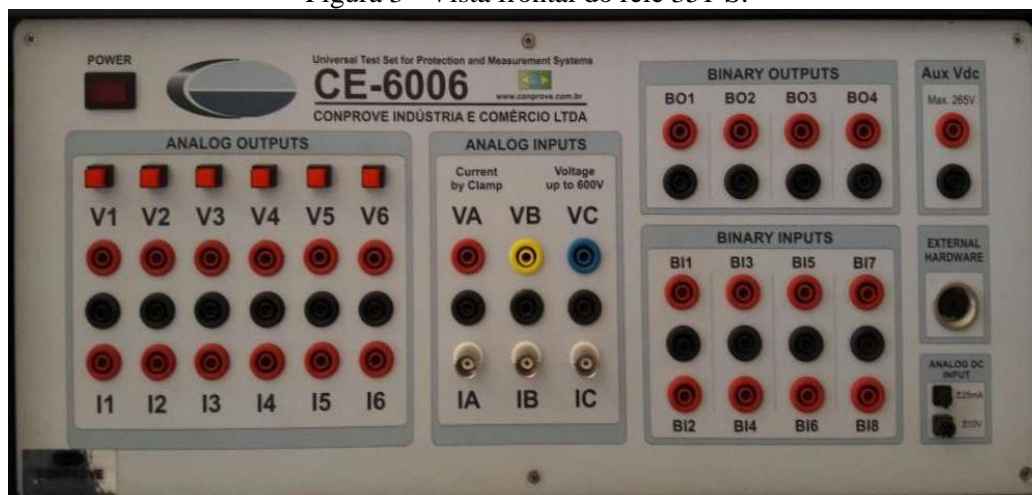
Promoção





onde tudo isso pode ser inserido pelo usuário. A mala de testes possibilita a aplicação de ensaios transitórios, onde a forma de onda pode ser definida pelo próprio usuário, ou obtida através de registradores digitais de perturbação ou de programas de simulação, em formato COMTRADE e ainda possui canais de medição trifásicos de corrente e de tensão, que podem ser utilizados para uma melhor qualidade da energia no sistema. Os medidores de tensão suportam até 600 V de valor eficaz (fase-terra) e os de corrente suportam até 1000 A em valor eficaz. A Figura 3 mostra o painel da mala de testes CE 6006 (CONPROVE, 2009). Figura 1.

Figura 3 - Vista frontal do relé 351-S.



A saída da mala de testes é hexafásica e possui diversas combinações para configuração das saídas, sendo tensão e/ou corrente. Cada uma, das seis saídas de tensão, pode entregar até 300 V eficaz com uma potência de 90 VA monofásica e cada uma, das seis saídas de corrente, pode entregar até 20 A eficazes, quando a configuração é hexafásica, com uma potência podendo chegar a 90 VA (CONPROVE, 2009). As entradas digitais servem para o controle do cronômetro durante os testes manuais e automáticos do relé de proteção, enquanto as saídas digitais podem ser empregadas no acionamento por contato e são livres de potencial.

2.4 Apresentação dos softwares utilizados

O relé SEL 351-S pode ser ajustado, monitorado e controlado através do software AcSELErator QuickSet-5030, cuja comunicação entre o relé o computador é feita através de portas serial EIA-232. Através do software de fácil utilização, os parâmetros de operação do relé, como valores de pick up, ajustes de temporização, tipo de curva característica e outros, podem ser ajustados para que este atue para proteger o sistema elétrico. Também são estabelecidos parâmetros característicos de operação do sistema de potência a ser protegido e são configuradas as saídas digitais que comandam os equipamentos de disjunção do circuito. Além disso, esse software fornece relatório de eventos, que informam ao usuário o estado dos diversos componentes que integram a unidade (MANUAL SEL 351-S).

Para simular falhas as quais os sistemas elétricos estão suscetíveis, é utilizado a mala de testes de relés CE-6006, que dispõe de um pacote de softwares diversificados, os quais possibilitam ensaios das principais funções de proteção. Os softwares para testes oferecem as mais diversas funções: Sobrecorrente, Diferencial, Distância, Direcional, Sequência Negativa, Sobre e Sub Frequência, Sobree Sub Tensão, entre outras. Possui funções de criação



automática dos relatórios de testes e comparação com suas características de modo a indicar se o resultado é adequado (MANUAL CE-600X).

2.5 Principais ensaios de laboratório utilizando o Relé SEL 351-S

Os principais testes de proteção a serem realizados são referentes a cada tipo de falha descritos na seção 2.1: proteção contra Sobrecorrente, proteção contra Sub e Sobretensão e contra Sub e Sobrefrequência.

No ensaio de Sobrecorrente, com o relé conectado ao computador por meio da conexão serial, são feitas as configurações do relé no software AcSELeator QuickSet. São inseridos parâmetros como relação de transformação dos transformadores de corrente, a corrente de pick up, dial de tempo, e tipo de curva. Também são inseridos os parâmetros do sistema de potência a ser protegido, como frequência e sequência de fases, e configura-se as saídas digitais do relé que comandam o envio de sinal para os equipamentos de disjunção do circuito, para atuação instantânea e temporizada de fase e de neutro. Todos esses parâmetros são também ajustados no software “Manual” da mala de testes de Relés, um dos programas do pacote de softwares CE-600X da Conprove. As saídas do relé relacionadas à atuação do elemento temporizado e à atuação do elemento instantâneo, programadas de acordo com o manual do relé, são então conectadas às entradas binárias da mala de testes, a qual irá gerar a elevação da corrente para que o relé atue.

No ensaio de Sub e Sobretensão é ajustado o valor da relação de transformação dos transformadores de potencial e são estabelecidas as configurações gerais do sistema a ser protegido, através dos softwares. Além disso, são inseridos os valores de Subtensão e de Sobretensão, segundo as faixas de valor adequados definidos pelo PRODIST, e também os valores de pick up. São selecionadas as saídas do relé referentes aos elementos de Sub e Sobretensão, de acordo com o manual do relé. Com a conexão estabelecida entre as saídas do relé referentes aos elementos do teste, é possível então gerar relatório e verificar a atuação do relé diante da falta simulada (MANUAL SEL 351-S).

No ensaio de Sub e Sobre Frequência, a atuação do relé se dá com a ocorrência de valores menores ou maiores, respectivamente, que os valores adequados estabelecidos pelo PRODIST, cujos valores são pré configurados no software do relé. Definidas as configurações gerais inerentes ao sistema elétrico, são então ajustados os valores para atuação por variações indevidas na frequência nos softwares dos equipamentos. As saídas do relé são configuradas para a atuação do elemento de Sub e Sobre Frequência. Conectando o relé à mala de testes, são gerados sinais para os quais o relé irá atuar, e pode, então, ser gerado relatório completo do ensaio (MANUAL SEL 351-S).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensino a respeito de relés de proteção no nível de graduação em engenharia elétrica é uma tarefa árdua e trabalhosa. A teoria das componentes simétricas por exemplo, são mais acessíveis utilizando técnicas gráficas com ajuda de softwares de simulação adequados. Da mesma forma, técnicas gráficas podem ser usadas para explicar a estabilidade do sistema. Uma vez que eles tenham esse conhecimento, os alunos podem mais facilmente compreender os motivos por trás dos esquemas de proteção que eles estão testando e logo passar a parte dos ensaios ou práticas no laboratório propostos.

Portanto, com base nos estudos realizados e propostas oferecidas até o momento, fica exposto a importância da implementação de práticas, podendo estas ser elaboradas com o uso



do kit do relé 351-S e seus softwares, que permitem a real simulação das perturbações ocorridas em um sistema elétrico de potência.

Assim, é positivo o uso do kit didático do relé 351-S e seus softwares, já que possibilitam aos alunos da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, bem como a conhecedores do conteúdo, a simulação de testes essenciais feitos com relés através de um sistema que pode facilitar a compreensão por parte dos alunos, além de possibilitar a verificação e a alteração de parâmetros em tempo real.

Dessa forma, o proposto trabalho, como elemento de cooperação para o aprendizado, contribui com o desenvolvimento e a verificação de práticas, que nesse caso, utilizam o Relé SEL 351-S e seus softwares como recurso, a fim de que os estudantes da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência tenham contato prático com os conteúdos abordados em sala de aula e possam antecipar situações as quais encontrarão no mercado de trabalho nesta área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8**. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbd3058d19>. Acesso em: 14 maio 2017.

CONPROVE ENGENHARIA INDÚSTRIA E COMERCIO. CE-600X Manual de utilização dos softwares. Conprove Engenharia Indústria e Comercio Ltda, 2009.

FERREIRA LIMA, JOSELICE; MEDRADO NETO, JOÃO DA ROCHA; EMANUEL DE O. MARTINS, VICTOR; G. A. PEREIRA, SÉRGIO; A. P. S. MARTINS, CARLOS. LVCE: Laboratório virtual de circuitos elétricos. Anais: XXXIV – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Universidade de Passo Fundo: UPF, 2006.

J. FERRIS AND R. B. BASS, "A Power Systems Protection Teaching Laboratory for Undergraduate and Graduate Power Engineering Education," in ASEE Annual Conference & Exposition, Atlanta, Georgia, 2013.

CONPROVE. **Mala de Testes de Relés Hexafásica**. Disponível em:

<<http://www.conprove.com.br/pub/produtos/ce6006.html>>. Acesso em: 06 maio 2017.

P.G. MCLAREN, R. KUFFEL, R. WIERCKX, J. GIERSBRECHT, L. ARENDT, "A Real Time Digital Simulator for Testing Relays," IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 207-213.

PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. **Programa da Disciplina**. Disponível em: <http://www.dee.ufc.br/anexos/Ementas/Opcionais/Protecao_de_Sistemas_El%C3%A9tricos_de_Pot%C3%Aancia.pdf>. Acesso em: 17 maio 2017.

SEL – SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL – 351S Relay, meter, control, fault locator instructor manual. Schweitzer Engineering Laboratories, 2005.

SEL – SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL – Sistema de proteção. Schweitzer Engineering Laboratories, 2009.

Organização



Promoção





ANALYSIS AND PROPOSAL OF PRACTICAL TESTS AS A COMPLEMENT TO THE TEACHING OF PROTECTION OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS FOR GRADUATION STUDENTS

Abstract: *This article discusses the problems inherent to the teaching of electrical power systems protection and the proposal of insertion of practical tests in the discipline of Protection of Electrical Power Systems associated to the graduation program in electrical engineering of the Sobral campus of the Federal University of Ceará. First and most difficult obstacle are laboratories properly implemented, due to the high cost of relays and test cases and / or simulators in real time. Another obstacle is the necessary theoretical disciplines such as Stability of Energy Systems, usually undergraduate students only have compulsory disciplines such as Classical or Dynamic Control, Complex Numbers and Linear Algebra. That is why, in most cases, the teaching of Electrical Power Systems Protection is taught at the postgraduate level only or through seminars. Without a theoretical basis of the concepts of protection relays, the protection relay tests are very prescriptive and with practical field or laboratory tests it contributes to the motivation and interest of the students in the course, besides complementing the knowledge acquired from the theoretical part.*

Key-words: *Protection of electrical systems, Practical tests, Electrical engineering*

Organização



Promoção

