



PROPOSIÇÃO DO USO DE SOFTWARES DE SIMULAÇÃO EM PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

+Núbia Silva Dantas Brito – nubia@dee.ufcg.edu.br

+Benemar Alencar de Souza – benemar@dee.ufcg.edu.br

+Jamile Pinheiro Nascimento – jamile.nascimento1@gmail.com

+Cecília Alves Buriti da Costa – cecilia.costa@ee.ufcg.edu.br

+Ravel Alves Martins – ravel.martins@ee.ufcg.edu.br

+Universidade Federal de Campina Grande
Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Aprígio Veloso – 882 – Bairro Universitário
CEP: 58.429-900 – Campina Grande – PB – Brasil

Resumo: *O artigo propõe o uso de softwares de simulação como alternativa de curto prazo na modernização da disciplina Proteção de Sistemas Elétricos. A utilização de softwares permitirá ao aluno estudar casos mais complexos e em maior quantidade, simular cenários mais realísticos e compreender melhor os conceitos relacionados com a filosofia da proteção.*

Palavras-chave: *Software, Proteção de Sistemas Elétricos, Ferramenta Didática.*

1. INTRODUÇÃO

A criação do novo modelo do setor elétrico aliada aos novos padrões de exigência dos consumidores, que passou a solicitar eficiência do sistema e qualidade do serviço prestado, obrigou as empresas de energia elétrica a se reestruturarem. Conforme o Artigo 22 do Código de Defesa do Consumidor (BRASIL, 1990), as empresas de energia elétrica são obrigadas a fornecer serviços adequados, eficientes, seguros e, quanto aos essenciais, contínuos. Dentre esses parâmetros, a continuidade de serviço é considerada como sendo da maior relevância, visto que afeta o cotidiano das pessoas e causa grandes transtornos por comprometer serviços essenciais ao consumidor.

Em termos do sistema elétrico (Figura 1), a continuidade de serviço está diretamente relacionada com a qualidade do seu sistema de proteção (Figura 2), que é definido como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos e para outras condições de operação anormais em componentes de um sistema de energia elétrica (ONS, 2008). Em outras palavras, o sistema de proteção tem como objetivo salvaguardar os equipamentos e manter a integridade de fornecimento contínuo e econômico da energia elétrica.

Realização:



Organização:



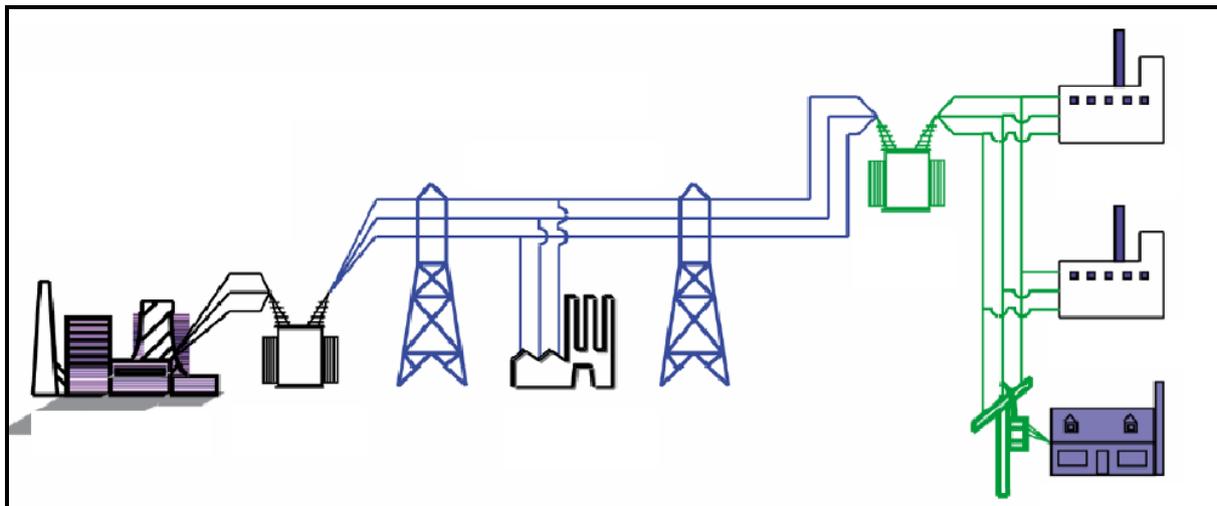


Figura 1. Diagrama esquemático de um sistema de energia elétrica.

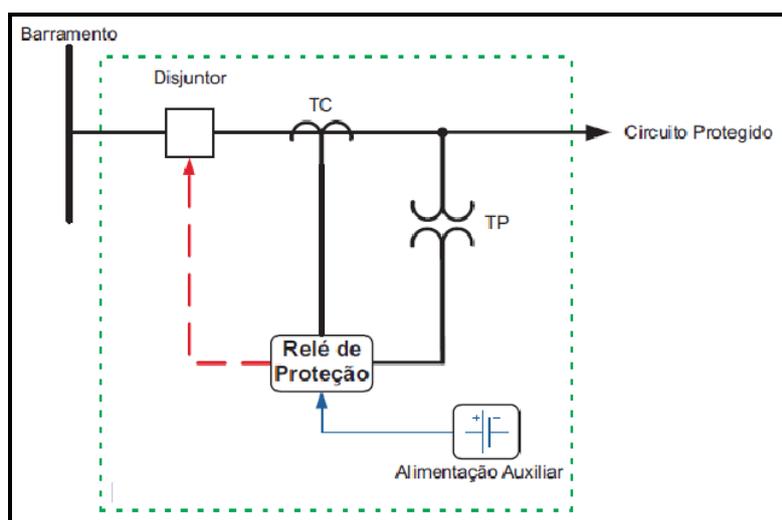


Figura 2. Diagrama esquemático de um sistema de proteção (NETTO, 2008).

O princípio de funcionamento de um sistema de proteção típico pode ser descrito da seguinte forma: os transformadores para instrumentos (transformador de corrente – TC e transformador de potencial – TP) reduzem as magnitudes das grandezas necessárias à função de proteção (tensão e/ou corrente) 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 abrindo os contatos principais do disjuntor (SÁ *et al*, 2010).

De um modo geral, a capacitação de profissionais (engenheiros) para atuarem na área de proteção está a cargo da disciplina **Proteção de Sistemas Elétricos**. Na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), essa disciplina integra o rol das disciplinas da ênfase Eletrotécnica do Curso de Engenharia Elétrica. Dentre as disciplinas do Curso, Proteção de Sistemas Elétricos foi, sem dúvida, uma das que sofreu o maior impacto dos avanços científicos e tecnológicos.



O processo irreversível de substituição dos relés eletromecânicos pelos relés digitais provocou uma verdadeira revolução no mundo da proteção, tanto do ponto de vista acadêmico quanto empresarial. Em termos acadêmicos, isso se traduz em laboratórios obsoletos e ementas defasadas e, conseqüentemente, alunos despreparados para o mercado de trabalho atual. Como a construção/modernização de um laboratório requer uma quantidade razoável de recursos financeiros, uma alternativa para minimizar esse problema em curto prazo seria adotar o uso de *softwares* de simulação.

Neste sentido, apresenta-se neste artigo uma proposta de uso de um *software* como ferramenta auxiliar no ensino dos fundamentos da filosofia da proteção e dos princípios gerais de funcionamentos dos relés e demais dispositivos de proteção.

2. FILOSOFIA DA PROTEÇÃO

Filosofia da proteção é o nome que se dá a todas as ações pertinentes ao sistema de proteção, ou seja: selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um sistema elétrico, de forma a guardar entre si uma determinada relação, tal que uma anormalidade no sistema possa ser isolada e removida, sem que as outras partes do mesmo sejam afetadas (GIGUER, 1988).

Os requisitos necessários para a operação dos sistemas elétricos exigidos pelos órgãos reguladores são (GUERRA, 2011):

- Continuidade do serviço: mediante limites para os indicadores coletivos de duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) verifica se os índices estão em limites aceitáveis. Se a concessionária não cumprir os limites, recebe uma multa.
- Eficiência Energética: a expressão eficiência energética refere-se às técnicas e procedimentos que visam reduzir perdas e eliminar desperdícios, sem comprometer conforto e produção.
- Qualidade da Energia: a expressão qualidade de energia refere-se a um conjunto de alterações de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos, da geração ao uso final.

De modo a atender tais requisitos, a filosofia da proteção visa alcançar os seguintes objetivos (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 (efeitos térmicos e eletrodinâmicos) 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 índice máximo 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 último em relação ao funcionamento do resto do sistema.



3. O SOFTWARE CAPE

O CAPE é um *software* comercial desenvolvido pela *Eletron International, Inc.* (CAPE, 2012). O *software* possui instalação fácil e pode ser executado em ambiente Windows Vista, XP e 2000. Empregando uma linguagem de programação de alto nível desenvolvida para uso no ambiente CAPE, denominada CUPL (se assemelha ao padrão de linguagens de programação processuais, tais como FORTRAN e Pascal), o usuário tem acesso direto ao banco de dados, realiza operações lógicas e aritméticas com as quantidades ali armazenadas, define variáveis, além de escrever sequências de comandos (macros) que irão automatizar a coordenação da proteção.

O CAPE possui ainda ajuda *online* incluindo tutoriais explicando o funcionamento das principais ferramentas e suporte para: redes de qualquer tamanho, configuração complexa dos modernos relés digitais e funções de coordenação do relé.

As diversas funções do CAPE estão separadas em grupos chamados *módulos*, através dos quais o usuário pode modelar desde sistemas fictícios até sistemas reais complexos.

Para realizar o estudo apresentado neste artigo, foram utilizados os módulos apresentados a seguir.

3.1. Módulo *Short Circuit* (Figura 3)

Esse é o módulo principal. Nele é possível simular faltas (curtos-circuitos) e analisar a resposta dos dispositivos de proteção. É de fácil acesso, pois suas funções estão integradas a todos os outros módulos do CAPE, incluindo o módulo *One-Line Diagram*. Com as ferramentas disponíveis nesse módulo, o usuário pode aplicar faltas de qualquer tipo a sistemas de qualquer dimensão.

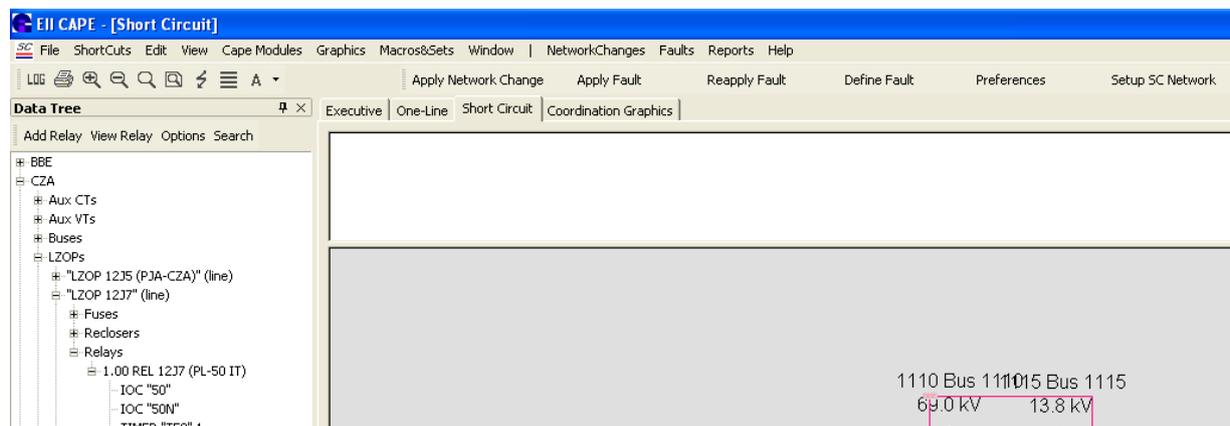


Figura 3. Módulo *Short Circuit*.

3.2. Módulo *One-Line Diagram* (Figura 4)

Nesse módulo, o usuário desenha o diagrama unifilar do sistema elétrico. Duas barras de ferramentas compõem esse módulo: a *Network Toolbar* (barra de ferramentas de rede) e a *Protection Toolbar* (barra de ferramentas de proteção).

A *Network Toolbar* contém ícones que representam cada tipo de componente, tais como: barramentos, motores, linhas, transformadores de potência, capacitores em série, etc. A



Protection Toolbar é utilizada para inserir dispositivos de proteção no sistema, tais como: transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), zonas de proteção, painéis dos relés, relés, fusíveis, entre outros.

O módulo *One-Line Diagram* oferece diversos recursos, tais como: exibição das unidades na forma polar, retangular ou por-unidade; destaque das linhas acopladas para facilitar a visualização; personalização da espessura e da cor dos barramentos de acordo com a tensão nominal de cada um deles; possibilidade de adicionar uma legenda ao desenho, de duplicar qualquer barramento, transformador, gerador e de posicionar um elemento em outro local; grade para auxiliar a montagem do sistema.

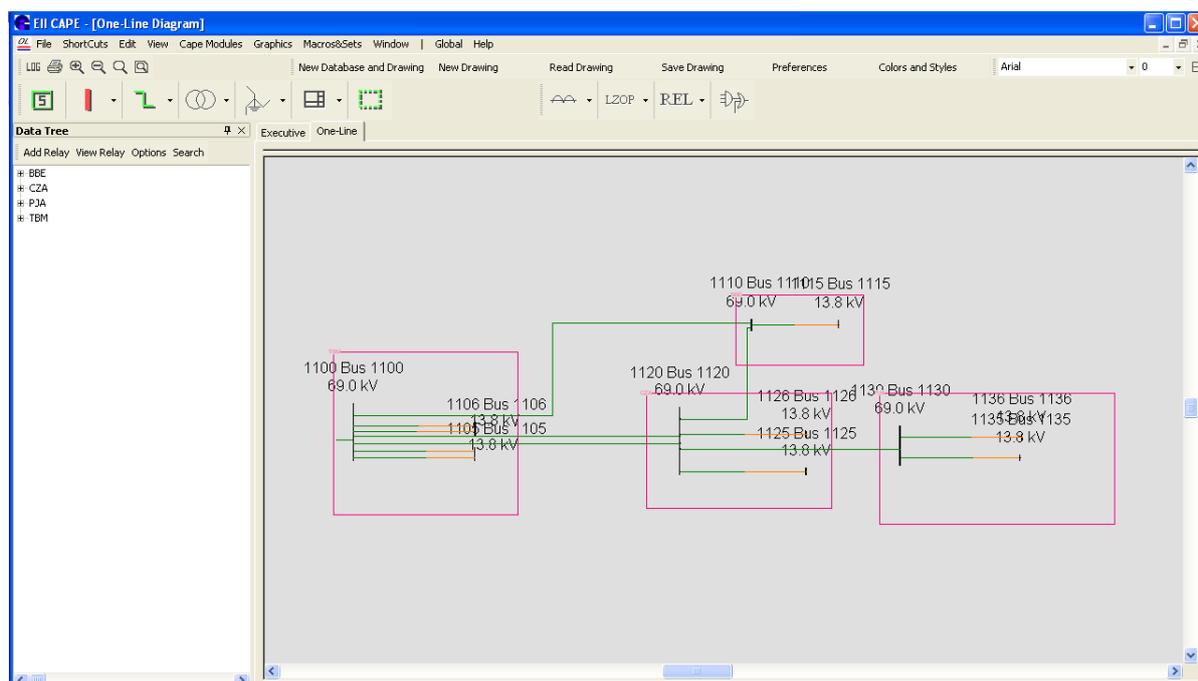


Figura 4. Módulo *One-Line Diagram*.

3.3. Módulo *Coordination Graphics* (Figura 5)

Módulo utilizado para avaliar, por meio de uma curva de tempo *versus* corrente, a coordenação entre dispositivos de proteção de sobrecorrente (relés, religadores de distribuição e fusíveis). Nesse módulo, o usuário pode: exibir as características dos elementos de sobrecorrente, de distância, ou de ambos simultaneamente; visualizar graficamente as características de qualquer tipo de falta aplicada no módulo *Short Circuit*; avaliar as respostas dos dispositivos de proteção; elaborar um diagrama de distância *versus* tempo; manipular as curvas apenas com o *mouse*; etc.

O *Coordination Graphics* possui uma grande variedade de dispositivos de proteção em sua biblioteca, que está sempre se expandindo. Além disso, as curvas de danos mecânicos e térmicos dos transformadores são desenhadas de forma interativa respeitando o padrão ANSI 57.109-1985, o que confere ao projeto uma maior veracidade e credibilidade.

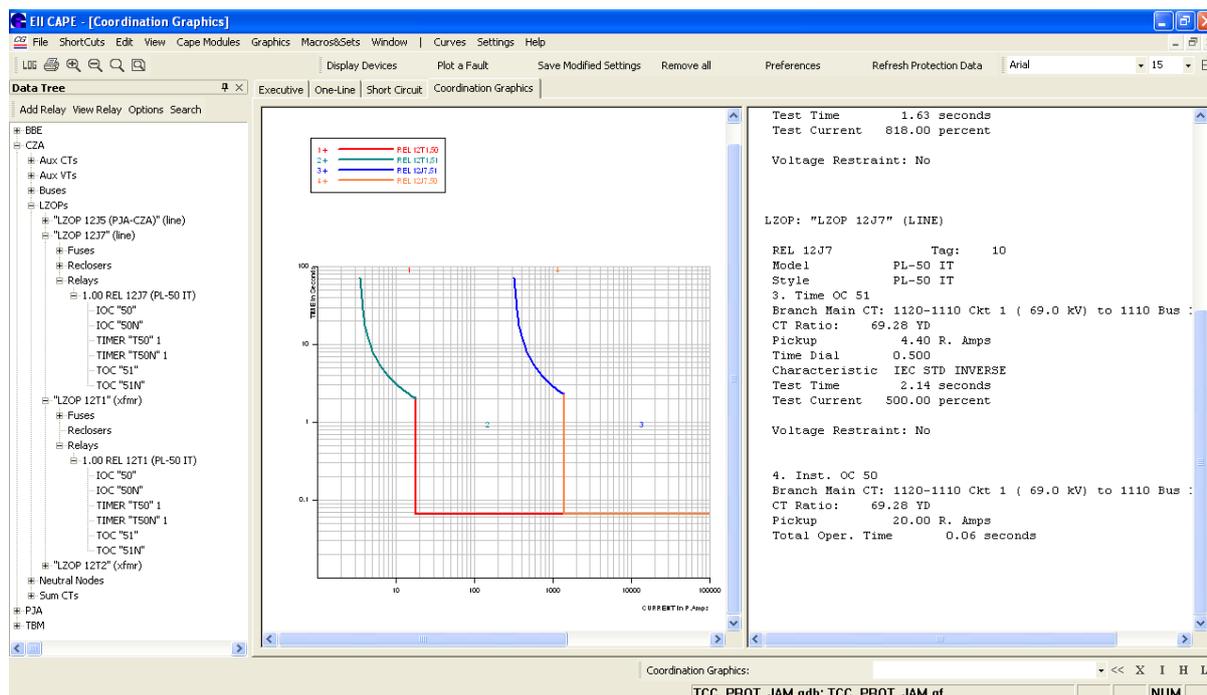


Figura 5. Módulo *Coordination Graphics*.

4. APLICAÇÃO DO SOFTWARE CAPE NA DISCIPLINA PSE

Para ilustrar o uso do CAPE, selecionou-se o exemplo apresentado na Figura 6 (KINDERMAN, 2005). A proteção do sistema é feita por relés eletromecânicos de sobrecorrente GE IAC 51 conectados às barras A e B. O objetivo geral do estudo é aplicar os conceitos da filosofia da proteção e em particular, verificar a coordenação do sistema de proteção ao se aplicar uma falta trifásica simétrica na barra B.

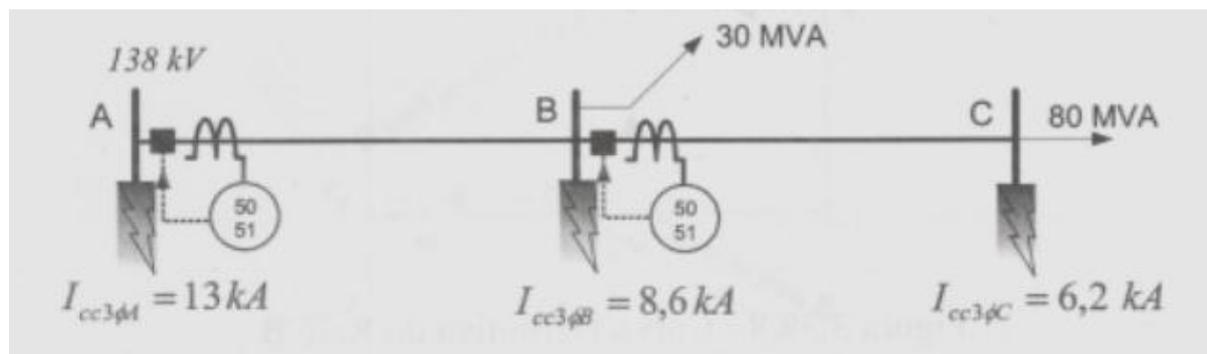


Figura 6. Sistema-teste.

Inicialmente, apresenta-se a resolução analítica do problema conforme KINDERMANN (2005) e em seguida, a resolução via *software* CAPE. A metodologia aqui proposta é que o aluno aprenda a resolver pequenos problemas analiticamente e use o *software* para aprofundar os conceitos em problemas de maior porte. Ao final do estudo, constata-se o ganho de tempo obtido, uma vez que o *software* se encarrega de fazer todos os cálculos. Entretanto, é preciso ressaltar que o uso do *software* só deve ser feito após o domínio do processo de cálculo como um todo.



4.1. Resolução analítica

A solução analítica tradicional é obtida conforme os passos descritos a seguir (KINDERMAN, 2005):

- Dimensionar os TC.

Para isso é necessário calcular a corrente de curto-circuito do enrolamento primário do TC, haja vista a corrente de curto-circuito do enrolamento secundário ser normalizada em 5 ampères. O cálculo é feito utilizando o conceito de Fator de Sobrecorrente (FS):

$$FS = \frac{I_{\text{corrente de CC máxima que pode passar pelo primário do TC}}}{I_{\text{corrente primária nominal do TC}}} \quad (1)$$

No caso de um TC destinado ao uso em proteção, FS = 20. Logo:

$$I_{\text{corrente primária nominal do TC barra A}} = \frac{13000}{20} = 650 \text{ A}; \quad I_{\text{corrente primária nominal do TC barra B}} = \frac{8600}{20} = 430 \text{ A}.$$

Utilizando a norma ANSI para padronização das relações de TC, tem-se: $RTC_A = \frac{800}{5}$ e

$$RTC_B = \frac{600}{5}.$$

- Calcular os TAP dos relés 51 (temporizado).

Isso é feito utilizando a seguinte relação:

$$\frac{1,5 I_{\text{Nominal de carga do circuito a ser protegido}}}{RTC} \leq I_{\text{ajustado relé}} \leq \frac{I_{\text{CC mínima no final do circuito a ser protegido}}}{1,5 \cdot RTC} \quad (2)$$

Sendo: $I_{\text{ajuste do relé}}$ a corrente vista no secundário do TC que faz com que o relé atue.

Para o relé 51, a corrente nominal é dada por $I_N = \frac{80 + 30}{\sqrt{3} \cdot 138} = 460,2 \text{ A}$. Portanto:

$$\frac{1,5 \cdot 460,2}{5} \leq I_{\text{ajustado relé A}} \leq \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6200}{1,5 \cdot \frac{800}{5}}, \text{ ou seja: } 4,31 \text{ A} \leq I_{\text{ajustado relé A}} \leq 22,37 \text{ A}.$$

Caso o ajuste da corrente obedeça à primeira desigualdade, ele satisfaz também a segunda desigualdade. Como o relé eletromecânico opera com TAP de valor fixo, o valor que mais se aproxima do ajuste inferior será $\text{Tap}_{\text{relé A}} = 5 \text{ A}$. Adotando procedimento semelhante para o relé 51 B, tem-se $\text{Tap}_{\text{relé B}} = 5 \text{ A}$.

- Ajustar os relés 50 (instantâneo), sabendo que o seu ajuste é múltiplo do TAP do relé 51. O relé instantâneo deve ser ajustado para uma corrente de curto circuito a 85% da linha de transmissão protegida, de modo a não haver sobreposição das proteções instantâneas dos outros relés. Os ajustes serão feitos aplicando as seguintes equações:



$$I_{CC3\phi \text{ a } 85\% \text{ da LT}} = \frac{I_{CC3\phi A} \cdot I_{CC3\phi B}}{0,85 \cdot I_{CC3\phi A} + 0,15 \cdot I_{CC3\phi B}} \quad (3)$$

$$I_{\text{Ajuste do instante}} = \frac{I_{CC3\phi \text{ a } 85\% \text{ da LT}}}{RTC \cdot I_{\text{ajuste51}}} \quad (4)$$

Para o relé 50A, tem-se: $I_{CC3\phi \text{ a } 85\% \text{ da LT AB}} = \frac{13 \cdot 8,6}{0,85 \cdot 13 + 0,15 \cdot 8,6} = 9059 \text{ A} ;$

$$I_{\text{ajuste do instante do 50A}} = \frac{9059}{\frac{800}{5} \cdot 5} = 11,32 .$$

Para o relé 50B, tem-se: $I_{CC3\phi \text{ a } 85\% \text{ da LT BC}} = \frac{8,6 \cdot 6,2}{0,85 \cdot 8,6 + 0,15 \cdot 6,2} = 6470 \text{ A} ;$

$$I_{\text{ajuste do instante do 50A}} = \frac{6470}{\frac{600}{5} \cdot 5} = 10,78 .$$

- Coordenar o relé 51A com o relé 51B.

Para haver coordenação, os tempos de operação de dois relés sucessivos devem satisfazer a inequação:

$$t_{\text{tempo de atuação do relé à montante}} - t_{\text{tempo de atuação do relé à jusante}} \geq \Delta t \quad (5)$$

Sendo Δt o tempo de coordenação que geralmente tem valor de 0,5 segundos.

- Aplicar as regras de coordenação para os relés existentes.

4.2. Resolução com o CAPE

O primeiro passo consiste em desenhar o diagrama unifilar do sistema-teste no CAPE. Isso é feito utilizando o módulo *One Line Diagram* (Figura 7).

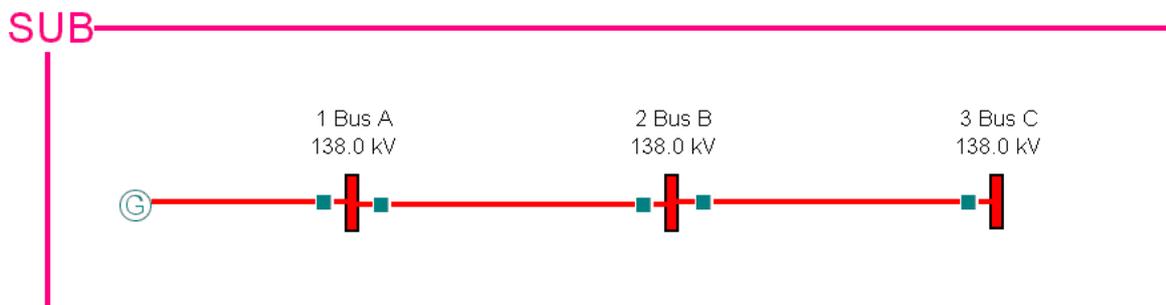


Figura 7. Implementação do sistema-teste no CAPE.

Para verificar a coordenação do sistema, aplicou-se uma falta trifásica simétrica na barra B utilizando os módulos: *Short Circuit* e *Coordination Graphics* (Figura 8). Conforme



esperado, em uma falta trifásica simétrica, as componentes de sequência zero e negativa têm valor nulo.

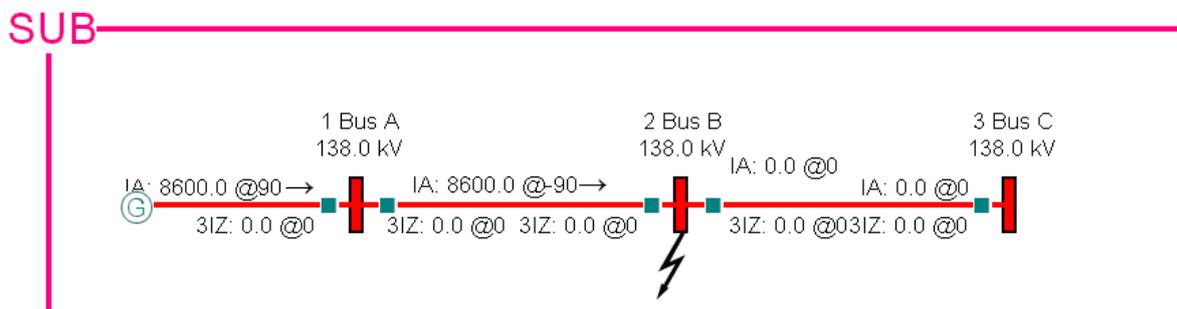


Figura 8. Aplicação de uma falta trifásica na barra B.

Ao final do estudo o *software* fornece um relatório (Figura 9) e as curvas de atuação dos relés (Figura 10). Conforme esperado (KINDERMAN, 2005):

- O valor da corrente de falta foi de 8.600 A.
- O elemento instantâneo do relé **A** (curva 3) não operou.
- O elemento de tempo inverso do relé **A** (curva 4), os elementos instantâneo (curva 1) e de tempo inverso (curva 2) do relé **B** atuaram com múltiplo e tempo de atuação esperados.

```

Fault: E
  Close-in THREE_PHASE at bus 2 Bus B
  Close-in fault point at "2 Bus B"
  On line "2 Bus B" to "3 Bus C" Ckt 1
  
```

Curve	Current Primary A	Current A/Pickup	Operating Seconds	Source/Total line (+ seq SIR)
1	8599.96	1.33	0.025	Unavailable
2	8599.96	14.33	0.247	2.58 @ 0.0
3	8599.96	0.95	Infinite	Unavailable
4	8599.96	10.75	0.510	1.95 @ 0.0

Figura 9. Relatório emitido pelo *software*.

5. CONCLUSÕES

Conforme se observou, o uso de um *software* como ferramenta auxiliar pode trazer inúmeros benefícios para o aprendizado, haja vista o tempo exíguo de duração dos cursos tradicionais de Proteção de Sistemas Elétricos ministrados na grande maioria das universidades brasileiras. O uso de um *software* permitiria 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

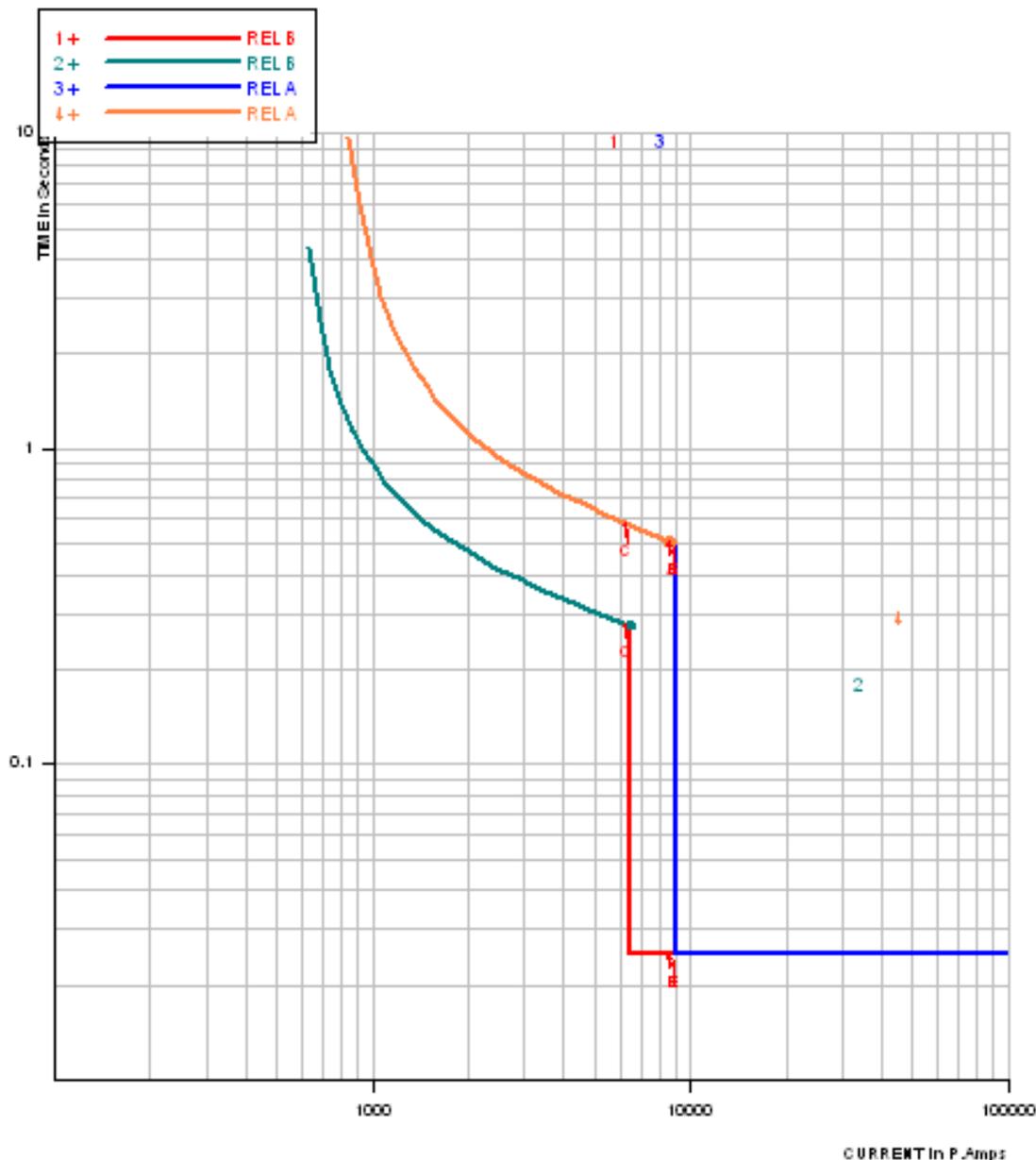


Figura 10. Curvas Tempo *versus* Corrente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Código de Defesa do Consumidor, 1990.

CAPE. Disponível em: <<http://www.electrocon.com/capeintro.html>> Acesso em 08 fev. 2012.

GIGUER, S. Proteção de Sistemas de Distribuição. Editora Sagra. 1ª edição, 1988.

GUERRA, F. C. F. Filosofia da Proteção - Notas de Aula. UFCG, 2011.



KINDERMANN, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. UFSC, vol. 1, 1ª edição, 2005.

NETTO, U. C. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - CAMPUS SÃO CARLOS. Aplicações de controle e supervisão distribuídas em subestações de energia elétrica através dos relés digitais de proteção, 2008. Dissertação (Mestrado).

ONS. Glossário de Termos Técnicos, 2008.

SÁ, J. A.; COSTA, F. B.; OLIVEIRA, N. L. S.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; GURJÃO, E. C. & CARMO, U. A. Uso de um simulador em tempo real no ensino de proteção de sistemas elétricos. **Anais: XXXVIII – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia.** Fortaleza, 2010.

PROPOSITION OF THE USE OF SIMULATION SOFTWARE IN ELECTRICAL SYSTEM PROTECTION

Abstract: *The paper proposes the use of simulation software as an alternative short-term modernization of the discipline Electrical System Protection. The use of software will allow the student to study more complex cases and in greater quantity, to simulate more realistic situations and better understand the concepts related to the philosophy of protection.*

Key-words: *Electrical System Protection, Software, Teaching Tool.*