



COBENGE 2010
12º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia
12 A 15 SET • FORTALEZA • CE
Hotel Gran Marquise



SISTEMA DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE MODELADO EM LABVIEW APLICADO AO ENSINO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA ELÉTRICA

José A. B. Grimoni – aquiles@iee.usp.br

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – PEA-POLI-USP
Av. Luciano Gualberto, Travessa 3, nº 158
CEP 05508-900 – São Paulo - SP

Tiago A. S. L. Rocha – tiago.rocha@poli.usp.br

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – PEA-POLI-USP
Av. Luciano Gualberto, Travessa 3, nº 158
CEP 05508-900 – São Paulo - SP

Vinícius J. S. Lopes – viniciuslopes@ufmt.br

Universidade Federal de Mato Grosso – *Campus* Sinop – ICAA
Av. Alexandre Ferronato, 1200, Reserva 35, Setor Industrial
CEP 78550-000 – Sinop – MT

Resumo: *Este artigo apresenta o desenvolvimento de um Sistema de Proteção de Sobrecorrente (SPS) modelado em LabVIEW e procura determinar a capacidade e limites de operação deste, viabilizando a criação de um roteiro de experiência para laboratório didático com finalidade de ensinar conceitos de proteção e instrumentação virtual. O SPS é composto por transdutores de efeito Hall, operando como sensores de corrente; contadores, responsável por abrir o circuito protegido; uma placa A/D que comunica o computador com seus periféricos e um software desenvolvido em LabVIEW, chamado Instrumento Virtual (VI), que faz o processamento dos dados. O programa desenvolvido conta com três telas, onde o aluno pode observar as diferentes curvas de tempo inverso, a operação do relé para uma corrente simulada ou lida pelo sensor e por fim fazer observações acerca do experimento salvando em um arquivo os procedimentos executados para posterior análise.*

Palavras-chave: *LabVIEW, Instrumentação Virtual, Proteção de Sobrecorrente, Processamento de Sinais*



COBENGE 2010
12º Congresso Brasileiro de Engenharia
12 A 15 SET - FORTALEZA - CE
Hotel Gran Marquise



1 INTRODUÇÃO

Os métodos utilizados no ensino devem acompanhar a rápida evolução tecnológica dos dias atuais, isso é ainda mais verdade tratando-se de cursos como engenharia, onde a tecnologia é uma forte aliada em sua execução. Autores como Amorim e Naegeli apontam os resultados da evolução tecnológica em diversos setores produtivos, assim como a necessidade da adaptação dos profissionais na área e revisão da estrutura curricular dos cursos superiores na maneira e conteúdo a ser ensinado, tendo em vista que uma das funções do ensino superior é situar o estudante em condições que enfrentará em sua vida profissional.

Uma vez que um sistema de distribuição de energia está sujeito a faltas de diversas naturezas, tais como curto-circuito e sobre-correntes, um sistema de proteção confiável é indispensável para garantir segurança e estabilidade da rede onde o sistema de proteção deve isolar o equipamento defeituoso do restante da rede para evitar danos as cargas ligadas a mesma e outros acidentes como explosões e incêndios, que resultariam em despesas elevadas e comprometimento do uso de diversos clientes, portanto o ensino teórico e prático da utilização deste tipo de sistema em um curso superior de engenharia elétrica torna-se indispensável.

O objetivo deste artigo é apresentar um Sistema de Proteção de Sobrecorrente (SPS) modelado em LabVIEW utilizando sistema operacional Windows que permitirá alunos do curso de engenharia elétrica monitorar em um laboratório didático a corrente no circuito a ser protegido que baseiam-se nas curvas propostas pelo IEEE e em um valor de referência escolhido previamente, calculando o tempo de atuação do relé de proteção que por sua vez controlará um contator responsável para abrir e proteger o circuito disponível na arranjo experimental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A instrumentação virtual agrupa o computador pessoal padrão com um software de programação adequado e uma diversidade de dispositivos de aquisição de dados e controle. Segundo Kögler, o instrumento virtual é um sistema que combina um computador e um instrumento de comando ou sensor (reais) através de um programa executado no computador; assim, o usuário tem acesso ao controle desses instrumentos por uma interface dotada de botões, chaves, painéis exibidores de gráficos que podem ser operados pelo *mouse* de forma interativa.

Os dados obtidos pelos sensores podem ser processados pelo computador, que por sua vez, pode tomar decisões e controlar atuadores. Dessa maneira, o computador é usado tanto para controlar o instrumento, quanto para conduzir uma experiência; provendo a mesma funcionalidade e maior praticidade de utilizar sensores e atuadores da forma habitual. Por isso, um programa desenvolvido em LabVIEW é chamado de VI (*Virtual Instrument*).

A arquitetura do SPS não é diferente do conceito de Instrumentação Virtual genérico e pode ser mais bem descrita pela figura abaixo.



Figura 1 – Arquitetura do SPS



Os sensores são transdutores de Efeito Hall ajustados para atuar dentro da faixa de corrente determinada pelo arranjo experimental e devido a facilidade de comando e por não comprometer de maneira significativa o experimento, utilizamos contadores para abrir o circuito, substituindo a função de um rele de proteção em um circuito real.

A aquisição e controle de dados foi realizada através de placa NI-DAQ (*Data Acquisition*) modelo PCI 6023E, da *National Instruments* e instalada no PC, que possui 16 entradas analógicas de 12 bits (11 de amplitude + 1 de sinal), 8 entradas ou saídas digitais, frequência de 200 amostras/s de isolamento para até 45 V. A placa converte os sinais analógicos em digitais, recebidos pelos sensores e utiliza as saídas digitais para controlar os reles da placa de condicionamento, que são usados para acionar os contadores.

Uma placa de condicionamento é responsável por condicionar o sinal recebido pelos sensores e enviar para placa de aquisição instalada no computador. Além disso, realiza a interação entre as saídas digitais, a placa NI-DAQ e os contadores utilizados como comando de proteção.

O software foi desenvolvido em plataforma PC e utilizado um computador padrão com processador Pentium IV 2GHz, 256 MB de memória RAM, sistema operacional Windows 2000 Professional, da Microsoft Corporation e LabVIEW 8.5.

O método utilizado baseia-se em um artigo do IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*) que propõe uma representação analítica, baseada no comportamento eletromecânico dos relés de indução, a aplicação dessas curvas em relés digitais providos de microprocessadores ou computadores em IEEE Std C37.112-1996, onde se define proteção de sobre-corrente em tempo inverso como aquela em que o tempo de atuação da proteção é calculado a partir da integração de uma função $F(I)$ dependente do valor da corrente no elemento protegido. Esse tempo é positivo acima e negativo abaixo de um valor de corrente pré-determinado, as Equações (1) e (2) indicam este comportamento a seguir:

$$\text{Para } 0 < M < 1, \text{ temos: } t(I) = \frac{t_r}{M^2 - 1} \quad (1)$$

$$\text{Para } M > 1, \text{ temos: } t(I) = \frac{A}{M^{p-1}} + B \quad (2)$$

Onde:

- $t(I)$: tempo de *reset* na Equação (1) e tempo de atuação na Equação (2) em segundos;
- M : $I_{\text{entrada}}/I_{\text{referência}}$ ($I_{\text{referência}}$ é o valor de corrente pré-determinado);
- t_r : tempo de *reset* (para $M = 0$);
- A, B, p : constantes que caracterizam a curva de tempo inverso escolhida.

Os reles eletromecânicos possuem propriedades dinâmicas que resultam em um maior valor da velocidade de rotação para um maior valor de corrente, resultando em um tempo menor de atuação para correntes mais elevadas e tempo de atuação maior para correntes mais baixas. Normalmente, condições de falha na rede apresentam uma variação do valor da corrente antes do disparo do rele. A Equação (3) modela essa propriedade dinâmica do disco de velocidade do relé eletromecânico e com ela, mantemos o comportamento de um rele digital como o do eletromecânico, mesmo que a corrente varie durante o tempo de atuação.



$$\int_0^T \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (3)$$

Onde:

- T: tempo de atuação do relé.

As constantes e expoentes usadas nas Equações (1) e (2) definem o tipo de curva, podendo ser Normalmente Inversa, Muito Inversa ou Extremamente Inversa. A constante t_r , quando usada na Equação (1), define a característica opcional de *reset*. A Tabela 1, ilustra as constantes e expoentes para cada tipo de curva, de acordo com o IEEE:

Tabela 1 – Constantes e expoentes para caracterização dos tipos de curva

Tipo de curva	A	B	p	t_r
Normalmente inversa	0,0515	0,1140	0,02	4,85
Muito inversa	19,61	0,491	2,00	21,6
Extremamente inversa	28,2	0,1217	2,00	29,1

Um relé de proteção que utiliza um microprocessador está de acordo com esse padrão se for implementado conforme a Equação (3), onde $t(I)$ dado pela Equação (2) coincide para o intervalo de M de 1,5 a 20 e pela Equação (1) de 0,05 a 0,9. Os limites superiores e inferiores, definidos como faixa de concordância, são de 15% acima ou abaixo dos valores definidos na tabela acima. Os valores limites citados são para definir os tipos padrão de curvas de tempo inverso e não são faixas de tolerância para medir o nível de precisão e grau de concordância entre medições sucessivas.

3 ALGORITMO PROPOSTO COMO SOLUÇÃO

Para realizar a implementação de um relé digital, convém representarmos a Equação (3) em tempo discreto, obtendo:

$$\sum_{n=1}^k \frac{1}{t(I)} \Delta t = 1 \quad (4)$$

Onde após simples manipulação algébrica resulta em:

$$\sum_{n=1}^k \frac{1}{t(I)} = \frac{1}{\Delta t} \quad (5)$$

Onde:

- k : número de iterações.

A Equação (5) pode ser implementada em um algoritmo através do fluxograma indicado na Figura 2.



COBENGE 2010
12º Congresso Brasileiro de Engenharia
12 A 15 SET - FORTALEZA - CE
Hotel Gran Marquise

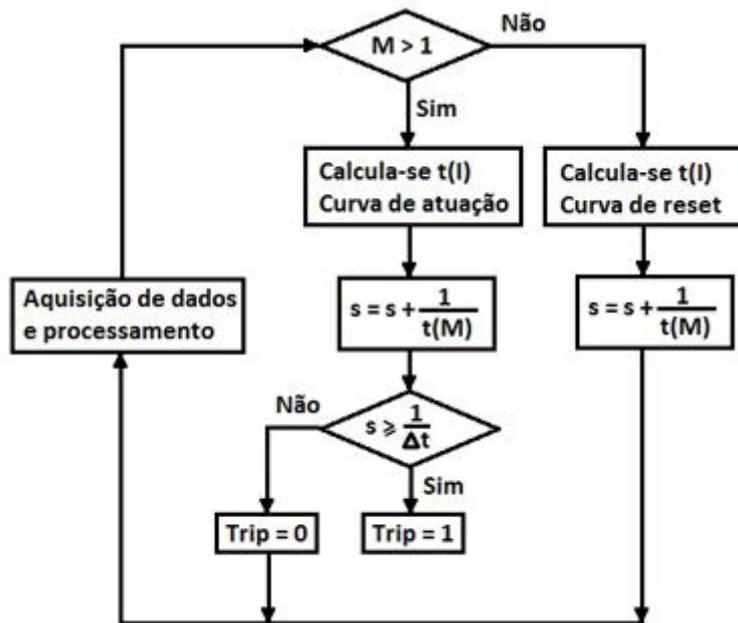


Figura 2 – Fluxograma

A cada iteração, verifica-se o valor da razão entre a corrente de entrada e a de referência. A partir da segunda aquisição de dados, o intervalo de tempo decorrido entre a aquisição atual e a anterior, que define o critério de parada das iterações, também é obtido. O algoritmo toma uma decisão diferente para cada uma das situações.

Se a razão for maior que 1 (um), a corrente medida pelo sensor é maior que ao valor sensível e o relé calcula o valor de $t(I)$, da Equação (2), correspondente a corrente lida. Ao valor acumulado ao somatório, que se inicia nulo, soma-se $1/t(I)$ e verifica-se se o valor do somatório já atingiu o critério de parada, $1/\Delta t$.

Se a razão for igual a 1 (um), a corrente medida está no limiar de sensibilidade do relé, o valor de $t(I)$ é infinito, resultando em um incremento nulo ao somatório.

Se a razão for menor que 1 (um), a corrente medida pelo sensor é menor que o valor sensível e o relé calcula o valor de $t(I)$, correspondente a corrente lida, da Equação (1). Ao valor acumulado ao somatório, incrementa-se $1/t(I)$, que é um valor menor que zero, diminuindo o valor do somatório, que se for negativo, é igualado a zero.

Visto que o algoritmo foi baseado na Equação (5), ele funciona tanto para um valor de corrente constante, como variável, tal como um relé eletromecânico. Isso é importante devido ao fato de uma corrente de falta, como a decorrente de um curto-circuito, não apresentar um comportamento constante.

O algoritmo proposto foi implementado em plataforma LabVIEW, combinando as vantagens da programação gráfica e sua alta qualidade em ferramentas de interface com o usuário. Como uma importante variável do algoritmo é o intervalo de tempo entre as aquisições; por utilizarmos um *hardware* que não trabalha em tempo real (PC) e esse intervalo ser um valor pequeno, são esperados erros de precisão dos cálculos que podem comprometer o desempenho do SPS.

O VI tem como entrada um vetor com valores instantâneos da corrente no circuito a ser protegido e com o este, calcula seu valor RMS que é utilizado como sugerido na Figura 2. Para contornar a flutuação no intervalo de tempo das aquisições decorrente da limitação do *hardware*, é utilizado o valor médio do mesmo que resulta na estabilização do software e conseqüente aumento de semelhança entre o VI e o algoritmo ideal. A saída o SPS é uma variável booleana que controla o contator que abre o circuito quando necessário.

Como a Equação (3) foi aproximada pela Equação (4), teríamos um valor exato se o intervalo de tempo Δt tendesse a zero e fizéssemos um número infinito de aquisições; em contrapartida, um valor de Δt pequeno aumenta a influência da imprecisão ao obter-se o valor do tempo; por isso, o tempo entre as aquisições foi escolhido de forma empírica de forma a minimizar o erro e ter-se uma aproximação suficientemente boa.

4 EXPERIÊNCIA – PROTEÇÃO DE SOBRE-CORRENTE EM TEMPO INVERSO

Para a compreensão do funcionamento do relé de sobre-corrente em tempo inverso pelos alunos durante a experiência didática foi desenvolvida uma interface gráfica dividida em três partes de forma a permitir a visualização das principais variáveis de interesse.

As três partes, selecionadas através de um controle de abas permiti realizar os três passos necessário para o desenvolvimento da experiência didática, descritos a seguir:

- 1º Passo: Permite o aluno configurar a curva característica e ajustar o valor de corrente de pick-up, onde o aluno também pode inserir o nome, o número de identificação discente e algumas observações relativas ao passo do relatório didático que está executando. Neste passo ele visualiza a curva característica que será ensaiada e pode realizar a impressão da tela, conforme indicado na Figura 3, para auxiliar na confecção do relatório da experiência didática.

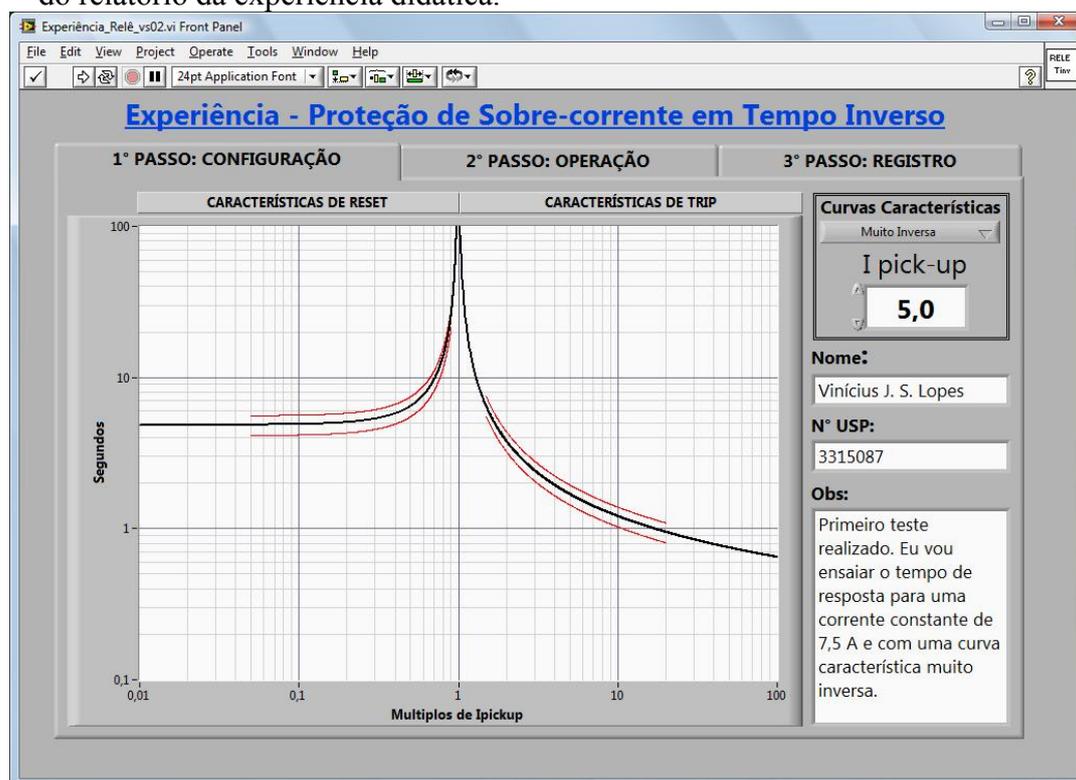


Figura 3: 1º Passo – Configuração do SPS

- 2º Passo: Permite o aluno operar o relé de sobre-corrente tanto com a simulação da corrente no circuito, como também com a aquisição de dados da montagem experimental, bastando selecionar a aba correspondente a simulação ou aquisição. Nesta tela existe um *led* indicando o *status* do relê e um botão permitindo a operação de *reset* e também indicação na tela dos principais parâmetros relativos a experiência e um gráfico com o histórico da corrente de pick-up e a corrente no relê no último minuto, conforme indicado na Figura 4.



Figura 4: 2º Passo – Operação do SPS

- 3º Passo: Permite o aluno visualizar e salvar o registro de cada segundo de todos principais parâmetros monitorados durante a experiência em um arquivo TXT, conforme indicado na Figura 5.

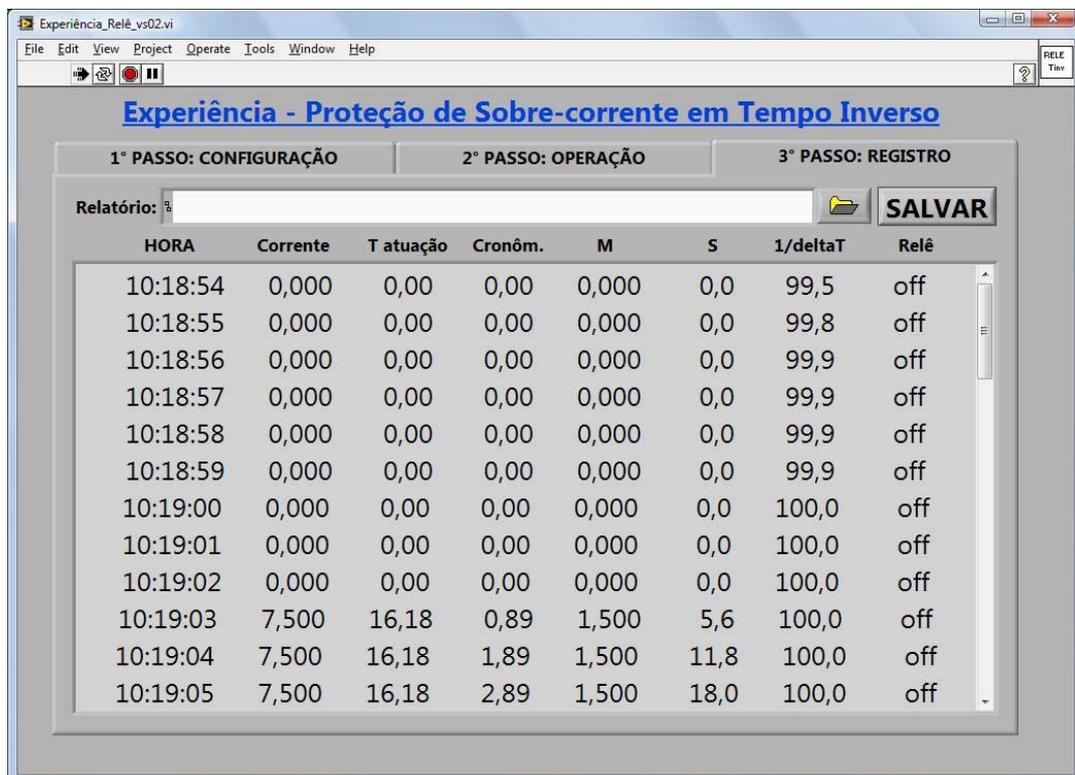


Figura 5: 3º Passo – Registro do SPS



COBENGE 2010
12th Congresso Brasileiro de Engenharia em Fortaleza
12 A 15 SET - FORTALEZA - CE
Hotel Gran Marquise



5 SIMULAÇÕES E ENSAIOS LABORATORIAIS

O software foi testado no Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos (L-PROT) e no Laboratório de Sistema de Potência, ambos na Escola Politécnica da USP.

A realização dos ensaios em bancada foi realizada utilizando um variac ligado à um transformador de corrente que estava em série com um contador de ciclo, utilizado para medir o tempo real da abertura do contator; um transdutor de corrente de efeito Hall, usado como sensor e um contator, substituindo um disjuntor. A Figura 6 apresenta o esquema da montagem no laboratório.

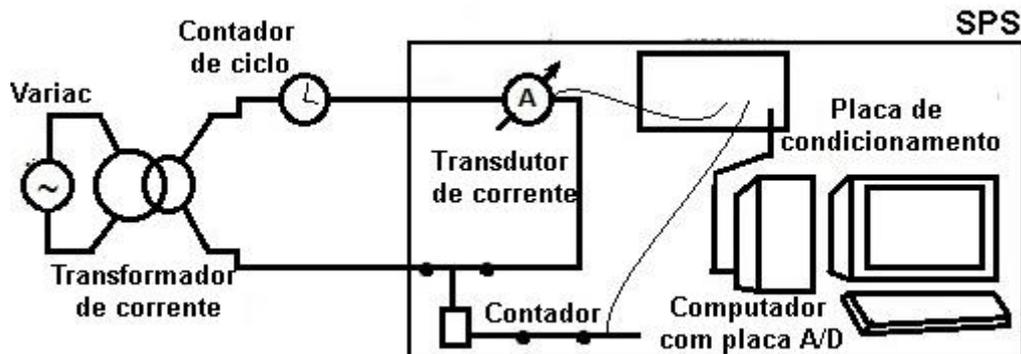


Figura 6 – Esquema representativo da montagem laboratorial

O variac é um gerador de tensão alternada variável e o transformador de corrente é um gerador de corrente vinculado por tensão e o contador de ciclo exibe o número de ciclos de corrente decorridos no intervalo de tempo em que uma corrente maior que 5 A circulou por ele. Para obter o tempo real, bastou dividir esse valor por sessenta, pois a frequência da rede é de 60 Hz.

Para corrente constante, foram feitas simulações e ensaios para cinco valores no intervalo de 1,5 a 20 do valor de M , como é pedido pela norma de padronização do IEEE e para corrente variável, foi escolhido um tipo de curva que fosse conveniente de maneira que fosse possível observar sua influencia nos cálculos do algoritmo, ou seja, seu comportamento mudasse antes que o tempo de atuação esgotasse.

O objetivo do uso da corrente variável no tempo, além de verificar a resposta do SPS para uma entrada desse tipo, é verificar a atuação da curva de *reset*. Devido a isso, a corrente de entrada foi escolhida de forma em que o valor acumulado pela Equação (3) nunca zerasse, ou seja, o tempo em que a corrente de entrada fica abaixo do nível sensível não pode ser grande o bastante para zerar a integral e o tempo em que a corrente fica acima desse valor, não pode fazer a integral atingir o critério de parada antes de ficar um tempo abaixo.

O fato de ser necessário modificar a corrente de entrada para cada tipo de curva torna impossível comparar curvas diferentes segundo esse critério, portanto decidimos escolher uma em particular. Para simular uma corrente variável no tempo, foi escolhido simular a curva do tipo Muito Inversa, pois obteve uma boa resposta para corrente constante e porque seu expoente é inteiro ($p = 2$), tornando mais fácil computar o valor correto para fazer a comparação com o algoritmo. Assim como no ensaio em corrente constante, foram feitos cinco ensaios.

Os valores de tempo obtidos na simulação foram próximos aos do ensaio, tendo no último, em geral, um erro relativo ao valor real, calculado pela Equação (2), maior que o primeiro. Essa diferença é decorrente do fato do computador precisar executar mais tarefas quanto faz a aquisição de dados de quanto obtém o valor da corrente de entrada por um gerador de funções do LabVIEW que simula um real.



É possível notar um acréscimo médio da ordem de 120 milissegundos, decorrente do tempo de abertura do contator, que não é apresentado na tabela por ser um valor bem estável, podendo ser apenas citado, e não ter grande relevância.

As tabelas a seguir ilustram os dados obtidos:

Tabela 2 – Ensaio com corrente de entrada constante

Ensaio com Corrente de Entrada Constante									
	Normalmente Inversa			Muito Inversa			Extremamente Inversa		
M	t(I) _{teo} (s)	t(I) _{exp} (s)	Erro(%)	t(I) _{teo} (s)	t(I) _{exp} (s)	Erro(%)	t(I) _{teo} (s)	t(I) _{exp} (s)	Erro(%)
1,5	6,439	6,415	0,367	16,179	17,122	5,828	22,682	24,350	7,354
5	1,688	1,637	3,028	1,308	1,253	4,196	1,297	1,238	4,558
10	1,207	1,178	2,383	0,689	0,659	4,307	0,406	0,353	13,122
15	1,039	0,984	5,287	0,578	0,506	15,505	0,248	0,195	21,241
20	0,948	0,913	3,741	0,540	0,509	5,692	0,192	0,109	43,236

Onde:

- M : $I_{entrada}/I_{referência}$ ($I_{referência}$ é o valor de corrente pré-determinado);
- $t(I)_{teo}$: tempo de atuação na equação (2) em segundos para as respectivas curvas e valor de M ;
- $t(I)_{exp}$: tempo de atuação na equação (2) em segundos, obtido experimentalmente;
- Erro: erro relativo entre o valor experimental e teórico em porcentagem.

É possível notar na tabela que para tempos de atuação muito baixos (menores que 300 milissegundos) o erro relativo cresce substancialmente ultrapassando os 15% que o IEEE estabelece. Esse problema acontece devido ao fato de não se utilizar um *hardware* de tempo real e indica os limites de *performance* do VI.

Tabela 3 – Ensaio com corrente de entrada variável

Ensaio com Corrente de Entrada Variável								
Degrau			Rampa			Exponencial		
t(I) _{teo} (s)	t(I) _{exp} (s)	Erro(%)	t(I) _{teo} (s)	t(I) _{exp} (s)	Erro(%)	t(I) _{teo} (s)	t(I) _{exp} (s)	Erro(%)
14,561	15,286	4,979	12,482	13,498	8,140	13,584	14,716	8,333

No teste com corrente variável foi escolhida uma faixa de M em que o VI apresentou uma boa *performance* para que fosse mais fácil notar o erro relativo decorrente das iterações na curva de *reset* e do fato da corrente variar. Foi possível notar que o software apresenta uma resposta razoável, com erro relativo menor que os 15% especificado pelo IEEE.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo mostrou os resultados do desenvolvimento de um Sistema de Proteção de Sobrecorrente modelado em LabVIEW 8.1.6 para ser utilizado em uma experiência de laboratório didático onde serão estudados os principais conceitos em proteção de redes de distribuição de energia. Podemos citar como vantagens dessa ferramenta a facilidade de



COBENGE 2010
15º Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia
12 A 15 SET - FORTALEZA - CE
Hotel Gran Marquise



aquisição e tratamento de dados e atuação em periféricos através das saídas digitais, sendo possível fazê-los em vários pontos simultaneamente.

O LabVIEW mostrou-se um poderoso artifício para fins didáticos, uma vez que automatiza a aquisição de dados e permite a interação com o usuário através de uma interface amigável. O tempo ganho com essa automação proporciona ao aluno mais tempo para aprofundar-se e concentrar-se na parte teórica por trás do experimento, além de apresentar uma ferramenta que ganha cada vez mais espaço no mercado, deixando-o ciente de suas capacidades e limitações.

Tendo em mente o importante papel que uma experiência de laboratório tem no processo de aprendizado por tornar capaz a aplicação dos conceitos teóricos vistos em salas de aula e materiais de leitura e com os resultados conseguidos nesse trabalho, que nos permitiu conhecer o potencial e as limitações do VI, será possível desenvolver um roteiro experimental que permita explorar, além dos conceitos de proteção, o poder e limitação de uma ferramenta cada vez mais imersa no mercado, a Instrumentação Virtual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, F. A. S.; NAEGELI, C. H. Integração teoria e prática no ensino de engenharia: a construção de um novo modelo pedagógico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA. 23., 1997, Salvador – BA. **Anais...** Salvador. Abenge, 1997. p.115-138.

IEEE **Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays**, IEEE Std C37.112-1996

KÖGLER JUNIOR, J. E. Instrumentação Virtual: PSI2222 – Práticas de Eletricidade e Eletrônica. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2004. Apostila. Disponível em

<http://www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/Inst.Virtual_apost1.pdf> Acesso em: 14 jun. 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS **LabVIEW 7.1 Professional Users Manual**. 200

OVERCURRENT PROTECTION SYSTEM MODELED IN LABVIEW APPLIED TO EXPERIMENTAL TEACHING OF ELECTRIC ENGINEERING

Abstract: *This paper shows the development of a Overcurrent Protection System (SPS) modeled in LabVIEW and intend to determinate the reach and limits of its operation, enabling the creation of a itinerary of teaching experience for the laboratory to teach concepts of overcurrent protection and virtual instrumentation. The SPS consists of a Hall effect sensor, a relay to open the protected circuit when necessary, A/D data acquisition board connected to a computer to get data from the sensor and a software developed in the LabVIEW-based programming language called Virtual Instrument (VI), which makes the data processing. The developed VI has three screens, where the student can observe the different shapes of inverse-time, the operation of the relay to a simulated current or got by the sensor and finally relate his observations about the experiment saving in a file to subsequent analysis.*

Key-words: *LabVIEW, Virtual Instrumentation, Overcurrent Protection, Signal Processing*