VINÍCIUS JOSÉ SANTOS LOPES

**INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL APLICADA
AO ENSINO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

SÃO PAULO
2007

VINÍCIUS JOSÉ SANTOS LOPES

**INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL APLICADA
AO ENSINO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas de
Potência

Orientador: Prof. Dr. José Aquiles Baesso
Grimoni

SÃO PAULO
2007

Dedico este trabalho ao meu querido e saudoso avô José Lopes Fortes, que mesmo na ausência, sei que me acompanhou em todo meu percurso com conselhos, amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos pelo apoio incondicional, pelo carinho, compreensão e a partilha comigo das vitórias e dos maus momentos sempre com um sorriso de confiança e palavras de incentivo, e em especial aos meus tios e padrinhos, Denis e Joceli que sempre me ajudaram desde o curso pré-vestibular.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni, pela atenção e apoio durante o processo de definição e orientação, que nestes seis anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para o meu crescimento científico e intelectual.

Aos meus companheiros junto ao laboratório, especialmente ao Marcos Oliveira, Adelino Damaceno, Edson Santana e Marcelo Magdalena, com quem pude contar em todos os momentos, que com suas experiências, cada um da sua maneira, sempre me ajudaram.

Os professores doutores Osvaldo S. Nakao, Denise Consonni e Clóvis Goldenberg, que contribuíram de forma importante para o desenvolvimento deste trabalho. E em especial ao professor e amigo Octávio F. Offonso pelas discussões, incentivos, pela companhia e conversas nos cafés de toda tarde.

Aos meus amigos que me ajudaram de forma direta e indireta na realização deste trabalho. Em especial ao Fábio C. Leite e Lívia Santiago que me deram conselhos ajudando com sugestões e muita paciência durante a revisão deste texto.

Agradeço a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado e aos seus funcionários todos representados na pessoa da Ana Angélica A. de Moura que sempre me atendeu com atenção e carinho na biblioteca durante as minhas pesquisas.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Obrigado!

“Divinizar ou diabolizar a tecnologia ou a ciência é uma forma altamente negativa e perigosa de pensar errado.”

Paulo Freire

RESUMO

LOPES, V. J. S **Instrumentação virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica**. 2007. 108f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

A proposta deste trabalho é apresentar algumas potenciais aplicações do *software* LabVIEW da National Instruments, associado a um *hardware* de aquisição de dados, aplicado em experiências ligadas à área de sistemas de energia elétrica como ferramenta de apoio ao ensino presencial. Esta dissertação mostra o desenvolvimento de uma experiência em um laboratório de sistemas de energia elétrica que utilizam sensores Hall de tensão e corrente, uma placa A/D e o *software* LabVIEW para monitorar variáveis elétricas, calcular e analisar potência, energia e fator de potência de um minissistema de energia em baixa tensão, que contém geradores síncronos trifásicos de 2kVA-220 V, um modelo de uma linha de transmissão com reatores e capacitores, e uma caixa de resistência para representar uma carga passiva. Uma placa A/D permite saídas digitais, que por sua vez podem controlar contadores que ligam ou desligam elementos do circuito em análise. Um programa foi desenvolvido para servir como ferramenta de apoio no processo ensino-aprendizagem. Este programa possibilita monitorar e atuar na montagem experimental, disponibilizando três instrumentos virtuais básicos para o desenvolvimento da experiência. Estes três instrumentos são: uma primeira tela que mostra o diagrama dos fasores de todos os sinais de tensão e corrente simultaneamente; uma segunda tela, que mostra a forma de onda dos sinais de tensão e corrente no minissistema com as suas respectivas defasagens; e a terceira e última tela que fornece um sincronoscópio virtual possibilitando analisar os ajustes de tensão e frequência necessários na operação de paralelismo do minissistema com a concessionária de energia. Este programa possibilita o acesso à montagem experimental do minissistema de energia pelo computador instalado na bancada do laboratório, permitindo também aos alunos, o monitoramento e controle do experimento a partir de seus próprios computadores, visualizando e reforçando no laboratório, os conceitos vistos na teoria.

Palavras-chave: LabVIEW, Aquisição de Dados, Processamento de Sinais, Sistemas de Energia e Acesso Remoto.

ABSTRACT

LOPES, V. J. S **Virtual instrumentation applied to electrical engineering education.** 2007. 108f. Dissertation (M. Sc.) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

The proposal of this work is to present some potential applications of the *software* LabVIEW, from National Instruments, associated with data acquisition hardware, applied to experiments in the Electric Energy Systems area as a tool to support the presential education. This dissertation shows the developing of an experience in a electric energy system laboratory, which use Hall Effect sensors, A/D data acquisition board, connected to a PC, and the software LabVIEW (National Instruments) in order to monitor electrical parameters, calculate and analyze power, energy and power factor in a low-voltage power system, which contains synchronous three-phase generators of 2 kVA-220V, with a transmission line model provided with reactors and capacitors, and a resistance box representing a passive load. The A/D board allows controlling digital outputs that can control counters that switch on or off the circuit elements in the analysis. A program was developed in order to act a tool to support the process teaching-learning. This program allows to monitor and to act in the experimental assembly providing three basic virtual tools for the experiment development. These three tools are: one screen that simultaneously shows the phasor diagram with current and voltage; a second screen that shows voltage and current waveform of the mini-system with its respective imbalances; and the third and last screen, that provides a virtual synchronoscope which makes possible the analysis of the necessary adjustments of voltage and frequency in the operation of parallelism between the mini-system and the energy power supplier. This program allows the access to the experimental assembly of the energy mini-system through a computer installed in a bench of the laboratory. As a result, the students can also monitor and control the experiments through their own computers, allowing them to visualize and to reinforce in the laboratory, the concepts taught in theory.

Keywords: LabVIEW, Data acquisition, Signal processing, Energy systems and Remote access.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de arquitetura de um instrumento virtual.....	19
Figura 2 – Instrumento virtual baseado em um sistema de aquisição de dados.	21
Figura 3 – Plataformas de aquisição de dados.....	22
Figura 4 – Painel frontal de um osciloscópio de dois canais.....	28
Figura 5 – Diagrama de blocos do osciloscópio de dois canais.	29
Figura 6 – Painel do VI de respostas de circuitos RC.....	31
Figura 7 – Painel frontal do SAARF ilustrando um teste de R.F.....	32
Figura 8 – Instrumentação para o experimento com o motor de indução.....	33
Figura 9 – Painel frontal do experimento com o inversor.	34
Figura 10 – Arquitetura básica do sistema de aquisição e tratamento de sinais.	36
Figura 11 – Fonte de energia no minissistema de potência.....	36
Figura 12 – Modelo da linha de transmissão.	38
Figura 13 – Linha de transmissão no minissistema de potência.	39
Figura 14 – Ligação dos sensores e contadores.....	40
Figura 15 – Tela inicial do programa Minissistema.	43
Figura 16 – Medições simultâneas no minissistema sob carga.....	44
Figura 17 – Indicação do estado do minissistema sem alimentação.	47
Figura 18 – Conjunto de 16 imagens utilizada para representação dos estados.	48
Figura 19 – Tela do diagrama de fasores do minissistema sob carga.....	49
Figura 20 – Telas do modo osciloscópio virtual com e sem filtro fundamental.	51
Figura 21 – Esquema de ligação do sincronoscópio de lâmpadas no sistema.....	52
Figura 22 – Telas do modo sincronoscópio virtual.	53
Figura 23 – Bancada utilizada na experiência do Minissistema.	57
Figura 24 – Instrumentos de controle na bancada experimental.....	58
Figura 25 – Medidas de tensão e corrente com o minissistema em vazio.	61
Figura 26 – Medições antes e depois da inserção da carga.....	62
Figura 27 – Sistema sob carga: medições antes e depois da rejeição da carga.	63
Figura 28 – Medidas de tensão e corrente com o minissistema sob carga.....	64
Figura 29 – Diagrama de fasores do minissistema em vazio e sob carga.....	65
Figura 30 – Processo de sincronização.....	66

Figura 31 – Medidas de tensão e corrente com o minissistema sincronizado.	66
Figura 32 – Sistema sincronizado: medições antes e depois da rejeição da carga. .	67
Figura 33 – Medições simultâneas em diferentes condições de paralelismo.....	68
Figura 34 – Minissistema operando como gerador síncrono.	69
Figura 35 – Ambiente virtual para o ensino de cinemática vetorial.	71
Figura 36 – Interface gráfica do laboratório remoto de eletrônica industrial.....	73
Figura 37 – Minissistema acessado remotamente via Internet Explorer.....	75
Figura 38 – Janela solicitando a execução do controle ActiveX.....	76
Figura 39 - Remote Panel Connection Manager do LabVIEW.....	76
Figura 40 – Acesso remoto da experiência pelos computadores da bancada.....	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL EM LABORATÓRIOS DIDÁTICOS	17
2.1	Instrumentação Virtual: Conceito	18
2.2	Dispositivos de Aquisição e Controle: <i>Hardware</i>	20
2.2.1	Aquisição de Dados	20
2.2.2	Controle de Instrumentos	23
2.3	Ambiente de Desenvolvimento: <i>Software</i>	24
2.3.1	Linguagens de Programação	26
2.3.2	LabVIEW (<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>)	27
2.4	Uso em Laboratórios Didáticos	29
2.4.1	Respostas de Circuitos RC e RLC em Regime Permanente Senoidal	30
2.4.2	Sistema Automático para Análise de Resposta em Frequência	31
2.4.3	Experimentos com Conversores Eletrônicos de Potência	33
3	UTILIZANDO O LABVIEW EM UMA EXPERIÊNCIA DIDÁTICA	35
3.1	Arquitetura Básica do Experimento	35
3.1.1	Sistema de Potência Reduzido	36
3.1.2	Sensores e Contatores	39
3.1.3	Placa de Condicionamento	41
3.1.4	Computador com Placa A/D	41
3.2	Programa Desenvolvido	42
3.2.1	Medições Simultâneas	44
3.2.2	Estado do Minissistema	46
3.2.3	Instrumentação Virtual	48
3.2.4	Proteção do Minissistema	53
4	RESULTADOS OBTIDOS COM A AUTOMAÇÃO DO LABORATÓRIO	54
4.1	O laboratório antes da automação	54
4.2	O laboratório depois da automação	56
4.2.1	Vantagens da automação do laboratório	59
4.2.2	Desvantagens da automação do laboratório	59
4.3	Utilizando o programa na execução da experiência	60
4.3.1	Funcionamento do minissistema em vazio	60

4.3.2	Funcionamento do minissistema sob carga	62
4.3.3	Operação de paralelismo	65
5	POSSIBILIDADE DE USO EM ENSINO A DISTÂNCIA	70
5.1	Laboratórios Digitais	70
5.1.1	Laboratórios virtuais	71
5.1.2	Laboratórios remotos	72
5.2	A Experiência Minissistema adaptada à Educação a Distância	74
5.2.1	Ferramenta de publicação na web	74
5.2.2	Vantagens e desvantagens do acesso remoto	77
	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – Código Fonte	88
	APÊNDICE B – Manual de Instalação do Programa Minissistema	96
	APÊNDICE C – Procedimento de Operação Automatizado	97
	APÊNDICE D – Arranjo Experimental Automatizado	99
	ANEXO A – Arranjo Experimental Sem Automação	100
	ANEXO B – Procedimento de Operação Sem Automação	101
	ANEXO C – Diagrama elétrico do quadro de comando	102
	ANEXO D – Relatório da Experiência Minissistema	103

1 INTRODUÇÃO

Há algumas décadas, o uso de ferramentas como as réguas de cálculo, ábacos e calculadoras mecânicas eram indispensáveis para um curso de engenharia. Com o passar do tempo, as calculadoras eletrônicas substituíram tais recursos, tornando-se indispensáveis.

Diversos autores tais como Amorim e Naegeli (1997) apontam os resultados da evolução tecnológica sobre os diversos setores produtivos, a necessidade de adaptação dos profissionais, bem como, a precisão de uma revisão profunda nos currículos dos cursos, na maneira e no conteúdo que deve ser ensinado. Uma das funções do ensino superior é oferecer um ambiente educacional, que reflita as condições de trabalho, em que o futuro profissional irá atuar.

“A explosão dos negócios mundiais, acompanhada pelo avanço tecnológico da crescente robotização e automação das empresas, antevê profundas modificações no trabalho e, conseqüentemente, na educação” (ARANHA, 1989).

A distância que separa a prática de novas tecnologias no mercado de trabalho e no universo acadêmico pode ser medida pela vivência, que o estudante de engenharia passa em atividades laboratoriais com recursos tecnológicos avançados e aulas práticas em áreas tão diversas como aquelas, em que poderá atuar profissionalmente.

Conforme Moedler e Feil (2003), os avanços tecnológicos pelos quais o mundo vem passando, com reflexos significativos no comportamento e nos valores da sociedade criaram um novo paradigma na educação no sentido de assimilar tais avanços na formação dos indivíduos de forma a prepará-los para esta nova realidade.

Segundo Moram, Massetto e Behrens (2000), a informática ou as chamadas tecnologias de informação são meios auxiliares para se desenvolver as atividades em um processo, atingir os objetivos estabelecidos, chegando, assim, a fim determinado. As novas possibilidades de informação, se bem utilizadas, poderão tornar a educação inovadora e eficiente. Atualmente, os computadores com seus *softwares*¹ são as principais ferramentas de auxílio em um curso de engenharia.

¹ Programas de computador; instruções que o computador é capaz de entender e executar.

Numa pesquisa realizada por Guimarães e Pereira (2003), na Universidade Federal da Bahia, os professores apresentaram disciplinas, que por utilizar o modelo pedagógico tradicional, foram consideradas desestimulantes, levando o aluno ao desinteresse pelo curso e, conseqüentemente, pela profissão. Em situações extremas houve o abandono do curso.

Para a utilização de recursos tecnológicos no ensino, conforme Valente (1997), é necessário ter clara a abordagem educacional que será utilizada, definindo o papel destes dentro da sala de aula. Desta forma, a aprendizagem pode ser encarada a partir de duas visões educacionais: a promoção do ensino ou a construção do conhecimento.

Na primeira abordagem, os recursos tecnológicos passam a desempenhar papel semelhante ao do professor, como transmissor de conhecimento, sendo utilizado como um instrumento de auxílio à instrução. Ao aluno cabe visualizar e desenvolver o conteúdo preparado e transmitido pelo professor com ajuda dos recursos tecnológicos. Neste processo de aprendizagem, o aluno é parte passiva, apenas assimila um conhecimento já pronto e a figura do professor tem sua importância reduzida, uma vez que divide a sua função com o computador. Tal abordagem não estimula a formação de um indivíduo crítico e reflexivo, tendendo a ser repensada na medida em que não responde as exigências da sociedade moderna.

Já na segunda abordagem, o conhecimento não é transmissível e sim construído pelo aluno por meio de uma interação do indivíduo com os recursos tecnológicos mediados pelo professor. A aprendizagem constituiu-se a partir da experimentação dos recursos tecnológicos por parte do aluno, realizando atividades reflexivas dentro de um ambiente criado pelo professor e propício para o desenvolvimento do conhecimento. Nesse processo, o professor deixa de ser a fonte única do conhecimento, passa a ser um mediador e estimulador da aprendizagem. O aluno por sua vez passa a desempenhar função ativa, sendo responsável pela formação do seu conhecimento.

Nesta linha de pensamento, os projetos pedagógicos e metodológicos passam a desempenhar um papel fundamental no processo de aprendizagem e o papel do professor é valorizado, ganhando um novo sentido.

Para Mercado (1999), as novas tecnologias, por permitirem uma maior interação do aluno com o objeto de conhecimento, podem, desde que baseadas em

uma boa proposta metodológica, tornarem-se mediadoras do processo de aprendizagem, possibilitando ao aluno construir o seu próprio conhecimento. O educador se torna responsável pela função de integrar, por meio de um ambiente de ensino-aprendizagem propício, as tecnologias com as situações, permitindo ao aluno construir o seu conhecimento conforme os objetivos educacionais desejados.

O uso do computador na educação começa concretizar um novo paradigma: estimular o aluno a construir o conhecimento. As relações entre professor e aluno são modificadas e as responsabilidades individuais aumentam. É preciso que tanto alunos como professores envolvam-se, tomando a iniciativa de participar do processo de construção do saber.

Em todas as escolas de engenharia, atualmente, o grande desafio dos professores, além de motivar para o exercício da profissão, é capacitar seus alunos a prosseguirem no processo de construção do aprendizado, superando e suprimindo as deficiências que trazem do passado, atualizando mecanismos propostos para cada disciplina (NAKAO, 2005, p. 291).

No campo da educação, muitos avanços têm sido alcançados com o desenvolvimento de ferramentas educacionais tais como os ambientes TelEduc² e WebCT³, além de inúmeras pesquisas na área de realidade virtual aplicada à educação, laboratórios e simuladores virtuais e *softwares* educacionais. Além disso, cada área de conhecimento tem movido esforços no sentido de desenvolver ferramentas apropriadas para a transmissão de seus conteúdos.

A utilização de computadores como componente de apoio nos ambientes de ensino tem aumentado, em parte pelas facilidades que os avanços tecnológicos têm trazido, em termos de velocidade de processamento, recursos de comunicação e capacidade de armazenamento. Uma das formas de utilização do computador nesses ambientes consiste em permitir o uso de *softwares* que se caracterizam como ferramentas de apoio ao ensino.

Neste contexto, discutem-se as melhores maneiras de inserir as novas tecnologias no ensino de maneira eficaz, sem trazer prejuízos à formação do aluno.

² Ferramenta desenvolvida por pesquisadores da Unicamp para a realização de ensino a distância; <http://teleduc.nied.unicamp.br/>

³ Ferramenta concebida pela Universidade da Columbia Britânica, Canadá, para melhorar o processo de ensino-aprendizagem; possui rotinas desenvolvidas especificamente para estimular a interação entre professor-aluno e entre os próprios alunos; <http://www.webct.com/>

Há facilidades advindas da utilização de sistemas, da aquisição e do tratamento de dados por meio do uso de *hardware*⁴ e *software* apropriados, que levam a uma presença de ferramentas associadas a diversos tipos de sistemas desenvolvidos pelo homem, como por exemplo, na indústria automotiva, na fabricação de produtos eletrônicos, empresas de energia e outras. Os sistemas ligados à área de energia elétrica são usuários destes tipos de ferramentas para facilitar o seu monitoramento, operação e manutenção. Portanto, o uso de sistemas e ferramentas deste tipo em experiências de laboratórios de graduação de cursos de engenharia elétrica faz-se necessário.

A proposta deste trabalho é apresentar algumas potenciais aplicações do *software* LabVIEW®⁵ da National Instruments, associado a um *hardware* de aquisição de dados, aplicado em experiências ligadas à área de sistemas de energia elétrica como ferramenta de apoio ao ensino presencial.

O *software* permite realizar uma série de tratamentos em cima destes dados, como também a sua visualização e gravação destes em arquivos para posterior análise por meio da aquisição de um conjunto de grandezas elétricas, através de um conjunto de sensores, placa de condicionamento de dados e placa de conversão analógica/digital e um micro padrão PC⁶.

O *software* utilizado é de fácil programação, pois é todo visual e possui uma interface, que permite visualizar como os dados se propagam durante o processo de aquisição e de tratamento dos sinais. Os sensores que medem sinais de corrente ou de tensão são de efeito *Hall*, o que garante uma isolamento galvânica dos sinais. Existe uma placa que faz o condicionamento dos sinais para a placa de conversão analógica digital, da National Instruments, que tem 16 entradas analógicas, para converter sinais analógicos na faixa de 0 a 10 V para valores digitais.

Foi desenvolvido um programa, utilizando o *software* LabVIEW 7.1 Professional, da National Instruments (2003), para aquisição e tratamentos de sinais elétricos de um minissistema de energia elétrica. Este programa possibilita ao usuário monitorar e atuar na montagem experimental, analisando a forma de onda dos sinais de tensão e corrente, visualizando o diagrama dos fasores de todos os

⁴ Os componentes físicos de um sistema de computador, abrangendo quaisquer periféricos como impressoras, placas de aquisição e controladores.

⁵ LabVIEW é marca registrada da National Instruments, Texas, Estados Unidos da América.

⁶ Acrônimo de **P**ersonal **C**omputer. Microcomputador que obedece ao padrão desenvolvido pela IBM para computadores pessoais.

sinais de tensão e corrente simultaneamente, e a tela de um sincronoscópio virtual. Isso possibilita verificar os ajustes de tensão e frequência necessários na operação de paralelismo do minissistema com a concessionária de energia.

O Capítulo 2, desta dissertação, trata do conceito da instrumentação virtual aplicada em laboratórios didáticos, mostrando o seu conceito, as definições de sistemas de aquisição de dados e controle de instrumentos, e também algumas aplicações de instrumentação virtual como ferramenta de apoio ao ensino presencial.

O Capítulo 3 descreve a aplicação realizada na experiência Minissistema de Potência presente na disciplina de Laboratório de Sistemas de Potência - PEA-2406, que é ministrada aos alunos do oitavo semestre do curso de engenharia elétrica com ênfase em energia e automação elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a automação do laboratório, descrevendo o laboratório antes e depois da automação, e também as funcionalidades que podem ser exploradas durante a execução do roteiro experimental.

O Capítulo 5 mostra a possibilidade de uso em ensino à distância, apresentando o conceito de laboratório digital (virtuais e remotos) e realizando a adaptação do programa desenvolvido para permitir o acesso remoto.

Segue, então, a conclusão em que são analisados resultados e problemas encontrados, como também são apresentadas propostas para uma futura continuidade do trabalho.

2 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL EM LABORATÓRIOS DIDÁTICOS

A rápida evolução do PC, nos últimos 20 anos, proporcionou uma revolução na instrumentação utilizada em testes, medidas, e na automação. O principal desenvolvimento resultante da evolução do PC é o surgimento do conceito de instrumentação virtual, que oferece diversos benefícios aos engenheiros, cientistas e também aos educadores, que requerem aumento de produtividade, exatidão e desempenho nas suas atividades.

Os instrumentos tradicionais autônomos tais como osciloscópios e geradores de onda são muito poderosos, caros, e projetados para executar uma ou mais tarefas específicas definidas pelo fabricante. Entretanto, o usuário geralmente não pode estendê-las ou customizá-las. Todos os botões e as teclas no instrumento, como também os circuitos internos, e as funções disponíveis ao usuário, são específicos à natureza do instrumento. Esta tecnologia especial e os componentes que devem ser desenvolvidos para construí-los tornam estes instrumentos caros e difíceis de se adaptar a outras aplicações requeridas pelos seus usuários.

Um instrumento virtual consiste em uma ferramenta de programação adequada, um equipamento de aquisição flexível, que acoplado ao computador pessoal, executam juntos as funções de instrumentos tradicionais.

Os instrumentos virtuais, pela virtude de serem baseados em PC, beneficiaram-se das últimas tecnologias incorporadas aos computadores. Estes avanços de tecnologia e de desempenho estão diminuindo rapidamente a diferença entre instrumentos tradicionais e virtuais, os quais incluem processadores mais velozes e sistemas operacionais que além de incorporar características poderosas oferecem também o acesso fácil às ferramentas tais como a Internet. Os instrumentos tradicionais também perdem, na maioria das vezes, por não serem portáteis, visto que os instrumentos virtuais funcionam também em *notebooks*⁷, incorporando automaticamente a sua natureza de portabilidade.

Atualmente, diversos instrumentos analógicos ou digitais podem ser concentrados de maneira virtual em um único instrumento virtual, possibilitando

⁷ Computador portátil que possa ser transportado com facilidade.

redução de espaço e de custo. Por exemplo, em um único computador é possível ter um gerador de funções, um multímetro, um osciloscópio, um analisador de espectro e outros instrumentos.

Empregando soluções de instrumentação virtual em laboratórios didáticos, pode-se reduzir os custos com a aquisição de instrumentos de medição e controle necessários para a montagem das bancadas experimentais, como também adicionar novas funções às experiências didáticas, através do *software*, sem a necessidade de mudar o *hardware* utilizado na montagem experimental, dando assim uma maior versatilidade ao laboratório.

2.1 Instrumentação Virtual: Conceito

A instrumentação virtual combina as seguintes tecnologias: computador pessoal padrão, *software* de programação adequado e uma grande variedade de dispositivos de aquisição e controle, estando então dividida em duas partes: *software* e *hardware*.

Segundo Ferrero (1990), um instrumento virtual (VI⁸) será usualmente constituído por um PC equipado com placas de medida (internas e/ ou externas) e com “*software*” específico, que permite obter capacidade idêntica ou superior às dos instrumentos tradicionais. A operação de um VI envolve a utilização de interfaces gráficas especializadas que permitem por um lado uma comunicação fácil com o instrumento e, por outro lado, uma representação adequada e flexível dos resultados da medição. Considerando as funções de aquisição, processamento e representação de dados, no caso de um instrumento virtual é possível que apenas a primeira seja realizada por “*hardware*” e as restantes por “*software*”.

Para Goldberg (2000), um instrumento virtual “é composto por alguns periféricos especializados, um computador de uso geral, um *software* de desenvolvimento adequado, e conhecimento específico à aplicação desejada”.

O instrumento virtual, conforme Kögler (2004), é um sistema formado por um computador mais um instrumento de medida ou equipamento de comando (reais),

⁸ Acrônimo de *Virtual Instrument*; como são chamados os programas que implementam instrumentos virtuais.

colocados em comunicação. Um programa executado no computador torna o instrumento ou o controlador acessível ao operador por meio de uma interface gráfica de *software*. Essa interface é dotada de botões, chaves, mostradores, indicadores, painéis de exibição de gráficos, etc, apresentados como objetos interativos, animados sob ação do operador através do cursor do *mouse*. O instrumento conectado ao computador pode ser desde um equipamento completo, como um osciloscópio ou um frequencímetro, ou mesmo um simples sensor como um termopar ou um extensômetro.

Os botões e indicadores que aparecem na tela do instrumento virtual podem não corresponder a controles reais do instrumento que está conectado ao computador. Isto é, usando o computador, podemos ampliar a funcionalidade de um instrumento, acrescentando-lhe novas funções executadas pelo computador com as medidas fornecidas pelo instrumento.

O conceito de instrumentação virtual consiste então em implementar instrumentos tradicionais utilizando o computador. Seus elementos básicos são:

- ? sensores, que convertem grandezas de diversos tipos em sinais elétricos;
- ? condicionadores de sinal, utilizados para adequar os sinais provenientes dos sensores às limitações do sistema de aquisição de dados;
- ? placa de aquisição de dados;
- ? computador;
- ? *softwares* de desenvolvimento.

A figura 1 ilustra um exemplo de arquitetura de um instrumento virtual.

Figura⁹ 1 – Exemplo de arquitetura de um instrumento virtual.

⁹ Figura retirada do catálogo da National Instruments 2006.

2.2 Dispositivos de Aquisição e Controle: *Hardware*

O *hardware* associado ao computador pessoal para se ter um instrumento virtual pode ser dividido em duas categorias: dispositivos de aquisição de dados e dispositivos de controle de instrumentos.

Os dispositivos de aquisição de dados agem entre o computador e o mundo exterior. Estes dispositivos funcionam primeiramente como um conversor dos sinais analógicos em sinais digitais, fazendo com que o computador possa interpretá-los. Sendo estes sinais obtidos pelos sensores ou transdutores dos fenômenos da natureza envolvidos em cada experiência laboratorial.

O controle de instrumentos pelo computador é realizado, quando o computador é responsável por monitorar e controlar os instrumentos utilizados nas experiências laboratoriais via comunicação digital de dados, onde se requer o uso de interfaceamento e transmissão de sinais digitais.

2.2.1 Aquisição de Dados

Há uma variedade de *hardware* disponível que você pode acoplar no computador ou acessar através de uma rede. Estes dispositivos oferecem uma enorme gama de possibilidades de aquisição de dados a um custo significativamente mais baixo do que se utilizar dispositivos dedicados.

À medida que a tecnologia de circuito integrado avança, os componentes eletrônicos tornam-se mais baratos e potentes, fazendo com que os dispositivos de aquisição beneficiem-se de um aumento nas taxas de aquisição de dados, na exatidão das medidas, na precisão, e em uma melhor isolamento do sinal analisado.

O sinal analisado pode ser obtido a partir de um sensor ou transdutor responsável por transformar uma dada grandeza física (sinais de tensão ou corrente, temperatura, pressão, e outros.) em uma grandeza mensurável pelos dispositivos de aquisição de dados.

Às vezes os transdutores e sensores geram sinais difíceis ou até perigosos para se medir diretamente com um dispositivo de aquisição de dados. Por exemplo, em se tratando de alta tensão, ambiente ruidoso, sinais elevados ou extremamente baixos, ou em medidas simultâneas de sinais, torna-se necessário condicionar os

sinais para uma eficaz aquisição de dados. O condicionamento de sinais maximiza a exatidão do sistema, permitindo que os sensores operem corretamente e garantindo segurança ao sistema.

Os dispositivos utilizados para condicionar sinal têm uma variedade de tarefas incluindo amplificação de sinais extremamente baixos, atenuação de sinais extremamente altos, isolamento galvânica do sistema de alta-tensão, amostragem simultânea de sinais elétricos, alimentação de transdutores ou sensores ativos e outros condicionamentos necessários para cada aplicação.

Dependendo da aplicação particular, o dispositivo de aquisição utilizado para implementar a experiência didática pode incluir: entradas ou saídas analógicas, entradas ou saídas digitais, contadores, temporizadores e filtros. A grande diversidade de placas e de dispositivos disponíveis pode incluir qualquer uma destas características ou uma combinação delas. A figura 2 ilustra um instrumento virtual baseado em um sistema de aquisição de dados.

Figura¹⁰ 2 – Instrumento virtual baseado em um sistema de aquisição de dados.

Existem diversas plataformas de dispositivos utilizados na aquisição de dados. A plataforma mais utilizada é o computador de mesa (*desktop*), em que existem todos os tipos possíveis de placas de aquisição de dados com *slot*¹¹ tipo PCI¹². Além dessa plataforma, existem outras plataformas como, por exemplo, os

¹⁰ Figura retirada do catálogo da National Instruments 2006.

¹¹ Um soquete contido em um computador, que é projetado para conter placas de expansão e conectá-las ao barramento do sistema (a via de dados).

¹² Abreviatura de Peripheral Component Interconnect. Especificação lançada pela Intel Corporation que define um sistema de barramento local que permite a instalação de até dez placas de expansão compatíveis com PCI no computador.

módulos PXI/CompactPCI, plataformas de aquisição distribuída e plataformas portáteis USB¹³ e PCMCIA¹⁴. A figura 3 mostra algumas destas plataformas.

Os módulos PXI/CompactPCI são uma plataforma de aquisição de dados mais robusta, que possui um computador dedicado especificamente para controlar os dispositivos de aquisição. A plataforma de aquisição de dados distribuídos é baseada em módulos de entrada e saída de dados com comunicação *Ethernet*¹⁵. A plataforma portátil utilizada para aquisição de dados possui comunicação via porta USB ou PCMCIA, que podem trabalhar com *notebook*¹⁶ ou PDAs¹⁷. A figura 3 mostra algumas destas plataformas.

Figura¹⁸ 3 – Plataformas de aquisição de dados.

¹³ Acrônimo de Universal Serial Bus. Um barramento serial com uma largura de banda de 1,5 megabits por segundo (Mbps).

¹⁴ Acrônimo de Personal Computer Memory Card International Association. Grupo de fabricantes e fornecedores formado para promover um padrão comum de periféricos baseados na PC Card e do slot projetado para acomodá-los, especialmente em laptops, palmtops e outros computadores portáteis.

¹⁵ Um sistema de rede local, largamente utilizado, desenvolvido pela Xerox em 1976, a partir do qual o padrão IEEE 802.3 foi desenvolvido.

¹⁶ Computador pessoal pequeno e portátil que funciona com baterias ou alimentação em corrente alternada.

¹⁷ Acrônimo de Personal Digital Assistant. Computador laptop leve, projetado para executar operações específicas, como organização pessoal ou comunicação. Muitos dispositivos PDA se baseiam em uma caneta ótica ou outro dispositivo indicador para entrada de dados.

¹⁸ Figura retirada do catálogo da National Instruments 2006.

2.2.2 Controle de Instrumentos

O principal objetivo de se controlar instrumentos tradicionais a partir do computador é obter os sinais e transferi-los para o computador, uma vez que os fabricantes destes instrumentos disponibilizam estes sinais na forma digital. A vantagem de se fazer isso está na possibilidade de estender as funcionalidades do instrumento, além das funções disponibilizadas pelo fabricante. Assim, o osciloscópio pode ser transformado em algum tipo de analisador de sinais, realizando, por exemplo, uma análise espectral por meio da transformada de Fourier, calculada no computador.

Há diversas opções de dispositivos para se comunicar e controlar os instrumentos laboratoriais. Historicamente, a maior parte dos instrumentos são controlados por meio de protocolos de comunicação bem consolidados, como por exemplo, o GPIB e o Serial (RS-232). Entretanto, alguns outros protocolos estão tomando espaço, tais como o *Ethernet* e o USB, aparecendo assim como uma nova alternativa no controle de instrumentos.

Os protocolos são responsáveis por todo interfaceamento e transmissão de sinais digitais entre os instrumentos e o computador. Segue abaixo a descrição de alguns desses barramentos:

- ? GPIB (**G**eneral-**P**urpose **I**nterface **B**us) é um barramento desenvolvido pela Hewlett-Packard para troca de informações entre computadores e equipamentos de automação industrial. A definição elétrica desse barramento foi incorporada a um padrão do IEEE¹⁹, a IEEE 488. Este padrão especifica as linhas de dados, controle do mesmo, níveis de voltagem e corrente que deve ser usado com ele.
- ? Serial é a transmissão de informações entre computadores, ou entre computadores e equipamentos periféricos, um *bit*²⁰ de cada vez por um único canal. A comunicação serial pode ser síncrona ou assíncrona. Um aspecto importante da comunicação serial é que o emissor e o receptor precisam usar a mesma taxa de transferência, paridade e informações de controle. Foi

¹⁹ IEEE: acrônimo de **I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronics **E**ngineers. Organização que congrega engenheiros e profissionais da eletrônica, reconhecida pelo desenvolvimento de padrões de *hardware* e *software*.

²⁰ Forma reduzida de **b**inary **d**igit (dígito binário); o zero ou o um do sistema binário de numeração. No processamento e armazenamento de dados, um bit é a menor unidade de informação tratada pelo computador.

definido um padrão RS-232 para estabelecer as conexões seriais. Esta norma foi adotada pela Electrical Industries Association dos Estados Unidos, em que se define linhas específicas e características de sinais usados pelas controladoras de comunicação serial, com a finalidade de padronizar a transmissão de dados seriais entre os equipamentos.

- ? *Ethernet* é um padrão baseado num padrão IEEE 802.3, que define o método de disputa para redes. A *Ethernet* utiliza uma topologia em estrela ou de barramento, baseando-se na forma de acesso conhecida com CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) para controlar o tráfego nas linhas de comunicação. Os nós da rede são ligados por cabos coaxiais, por cabos de fibra ótica ou por fios de pares trançados. Os dados são transmitidos em quadros de tamanho variável, contendo informações sobre controle e entrega e até 1.500 *bytes*²¹ de dados. O padrão *Ethernet* oferece transmissões em banda-base de dez megabits (10 milhões de *bits*) por segundo.
- ? USB (**U**niversal **S**erial **B**us) é um barramento, serial com uma largura de banda de 1,5 megabits por segundo (Mbps), que se destina a conexões periféricas com um microcomputador. O USB é capaz de conectar 120 periféricos, como sistemas de aquisição, instrumentos de medidas e controladores. Há sistemas através de uma única porta. O USB fornece suporte a conexões automáticas e *multiple data streams*²².

2.3 Ambiente de Desenvolvimento: **Software**

Embora o PC e a tecnologia de circuito integrado têm experimentado avanços significativos nas últimas duas décadas, é o *software* que tem fornecido um verdadeiro avanço na criação de instrumentos virtuais, fornecendo maneiras melhores e inovadoras de se reduzirem significativamente os custos. Com os instrumentos virtuais, pode-se construir sistemas de medição e automação que

²¹ Abreviatura de **binary term**. Uma unidade de dados que hoje consiste quase sempre em oito *bits*.

²² Categoria de arquitetura de computador envolvida no processamento paralelo em que os processadores buscam instruções e processam dados de forma independente.

servem exatamente às necessidades de uma determinada aplicação (definida pelo usuário) em vez de serem limitados pelos instrumentos tradicionais que possuem as suas funções fixas (definida pelo fabricante).

À exceção dos componentes e dos circuitos especializados encontrados em instrumentos tradicionais, a arquitetura geral de instrumentos autônomos é muito similar àquela de um instrumento virtual. Ambos requerem um ou mais microprocessadores, portas de comunicação (por exemplo, serial e GPIB), capacidade de apresentação, assim como módulos de aquisição de dados. O que faz um diferente do outro é sua flexibilidade e o fato de se poder modificar e adaptar um instrumento virtual as necessidades particulares. Um instrumento tradicional pode conter um circuito integrado para executar um conjunto de funções de processamento de dados e em um instrumento virtual. Estas funções são executadas pelo *software* que está no processador do PC. Pode-se estender o conjunto das funções facilmente, limitado somente pela capacidade do *software* de programação que está sendo usado para desenvolver o instrumento virtual.

O *software* é o componente mais importante de um instrumento virtual. Com uma ferramenta adequada de programação pode-se eficientemente criar suas próprias aplicações, projetar e integrar as rotinas que um processo particular requer. Cria-se uma interface com o usuário apropriado, com o melhor conjunto de programas para uma determinada aplicação e os elementos que interajam com ela. Pode-se definir como e quando o aplicativo adquire os dados dos dispositivos, como se processam, manipulam-se e armazenam-se dados, e como os resultados serão apresentados ao usuário.

Conforme já comentado, os instrumentos virtuais desenvolvidos são programas conhecidos por VI (*virtual instrument*) e possuem como característica principal a linguagem de programação gráfica.

A programação visual permite uma execução direta do algoritmo de medição, mesmo aos usuários que não são peritos em programação de computador. O algoritmo, de fato, é criado graficamente, selecionando e interconectando os blocos funcionais disponíveis na biblioteca do sistema de desenvolvimento. As relações gráficas, que se assemelham aos instrumentos reais, fazem o uso e a compreensão dos instrumentos virtuais mais imediatos para indivíduos acostumados a trabalhar com a instrumentação convencional.

2.3.1 Linguagens de Programação

Muitas linguagens de programação foram projetadas para superar as dificuldades entre as conexões dos dispositivos de medições e o computador, já que as linguagens tradicionais não podem estabelecer facilmente esta comunicação. Linguagens de programação tais como: JavaScript²³, Borland C++ Builder²⁴, Visual Basic²⁵, HP-VEE²⁶ e LabVIEW²⁷ e outras, são mais apropriadas para o desenvolvimento destas aplicações.

No entanto, para o desenvolvimento de aplicações, utilizando instrumentação virtual em laboratórios, a linguagem de programação LabVIEW é a mais utilizada por possibilitar um ambiente de programação gráfica que combina programação flexível. Nessa linguagem os diagramas de blocos demonstram a lógica estabelecida para resolver um determinado problema, por meio da conexão de ícones utilizados para implementar uma determinada rotina.

Ao se tratar de uma tarefa maior, o programador geralmente a divide em tarefas menores e mais fáceis de se resolver. Estas tarefas menores são mais manejáveis e fáceis de testar, já que as dependências que podem causar comportamentos inesperados estão reduzidas. Assim, pode-se desenvolver um instrumento virtual que resolve cada uma destas tarefas menores, juntando-as então em um sistema completo para resolver a tarefa maior. A facilidade com que você pode realizar esta divisão depende muito da arquitetura do *software* utilizado para desenvolver o instrumento virtual.

Um dos fatos mais atrativos é que um instrumento virtual bem desenvolvido pode ser considerado como uma rotina de programa, sendo, portanto, usado para projetar um sistema maior ou mais complexo. Sendo assim, é importante que o ambiente de desenvolvimento de instrumentos virtuais forneça esta modularidade.

²³ Linguagem de criação de scripts (programas utilitários) desenvolvida pela Netscape Communications e pela Sun Microsystems, Inc., que é ligeiramente relacionada à Java.

²⁴ Uma versão orientada a objetos da linguagem de programação C, desenvolvida no início da década de 1980, por Bjarne Stroustrup, nos Laboratórios Bell.

²⁵ Uma versão de programação visual, de alto nível, do Basic. O Visual Basic foi desenvolvido pela Microsoft para a criação de aplicações baseadas no Windows.

²⁶ Acrônimo de Hewlett-Packard Virtual Engineering Environment; É um ambiente de instrumentação virtual criado pela Hewlett-Packard para trabalhar com seus próprios equipamentos e demais instrumentos compatíveis.

²⁷ Linguagem de programação gráfica criada pela National Instruments para o desenvolvimento de instrumentos virtuais.

No LabVIEW, este reuso de VIs é implementado, desenvolvendo-os como SubVI (*sub virtual instrument*), possibilitando diversos tipos de argumentos como entradas e obtendo como saída um ou vários argumentos processados. Estes argumentos podem ser variáveis, *string*, matrizes, imagens, gráficos e diversos outros parâmetros disponíveis na linguagem de programação, portanto a possibilidade de reuso destes VIs, torna o desenvolvimento de um novo VI mais fácil.

2.3.2 LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*)

O *software* de desenvolvimento fornece uma interface intuitiva para se desenvolver os instrumentos virtuais específicos a cada experiência didática. O LabVIEW é um exemplo deste tipo de *software*, onde o ambiente gráfico de desenvolvimento oferece uma linguagem de programação flexível e com funcionalidades e configurações especificamente projetadas para aplicações de medidas e automação.

O LabVIEW foi desenvolvido, pela National Instruments, para ser um ambiente de programação voltado ao desenvolvimento de aplicações, utilizando o conceito de instrumentação virtual. A linguagem de programação visual é chamada de **G** (de **G**raphics, numa referência à linguagem **C**).

O LabVIEW é, então, uma linguagem de programação gráfica, que usa ícones em vez das linhas de comandos para criar as suas aplicações. Contrasta com as linguagens de programação, baseadas em linha de comando, em que as instruções determinam a ordem de execução do programa. O LabVIEW usa o fluxo de dados dentro da programa, em que o fluxo de dados por meio dos nós no diagrama de blocos determina a ordem de execução do VIs e das funções.

O LabVIEW é uma linguagem muito apropriada para o desenvolvimento de interfaces com o usuário, interagindo com o programador por meio de duas telas separadas: o painel frontal e o diagrama de blocos. No painel frontal, os botões, os indicadores e os gráficos podem ser alcançados para controle direto do usuário. Já no diagrama de blocos, o fluxo de dados e as funções de controle podem ser desenvolvidos através do código fonte gráfico que define a funcionalidade do VI.

O painel frontal é parte do VI, que define a relação de usuário. A figura 4 mostra um exemplo de um painel frontal de um osciloscópio de dois canais

desenvolvido pela National Instruments e disponível como exemplo no LabVIEW 7.1 Professional. Esta interface com o usuário é desenvolvida por meio de controles e indicadores, que são os terminais interativos de entrada e de saída do VI, respectivamente. Os controles são botões, chaves seletoras, e outros mecanismos de entrada que simulam mecanismos de entrada no instrumento virtual, fornecendo dados ao diagrama de blocos. Os indicadores são os gráficos, LEDs²⁸, e os outros tipos de saída que simulam mecanismos da saída no instrumento virtual, apresentando os dados que o diagrama de blocos adquiriu ou gerou.

Figura 4 – Painel frontal de um osciloscópio de dois canais.

O diagrama de blocos é desenvolvido através de representações gráficas de funções para controlar os objetos do painel frontal. As representações gráficas das funções podem ser operações matemáticas, lógicas ou estruturas de programação (*while loop*, *for loop*, *case structure*, etc.) e os objetos do painel frontal são os terminais presentes no diagrama de blocos dos respectivos controles e indicadores.

A figura 5 mostra o respectivo diagrama de blocos implementado com o LabVIEW, pela National Instruments, para desenvolver a lógica de funcionamento do osciloscópio de dois canais.

²⁸ Acrônimo de **L**ight-**E**mitting **D**iode; dispositivo semicondutor que converte a energia elétrica em luz.

Figura 5 – Diagrama de blocos do osciloscópio de dois canais.

2.4 Uso em Laboratórios Didáticos

O uso do conceito de instrumentação virtual em laboratórios didáticos para cursos de engenharia elétrica é interessante devido principalmente à redução de custos na aquisição dos equipamentos para medições e também no aumento da velocidade para a realização das experiências.

A redução de custos na aquisição de equipamentos é possível devido à utilização do mesmo *hardware*, por exemplo, uma placa de aquisição, na elaboração de diversas experiências. No caso da placa de aquisição, há possibilidade de simular uma diversidade de equipamentos utilizados em laboratórios didáticos como multímetro, osciloscópio, analisador de harmônicas, freqüencímetro, wattímetro e outros.

A realização das experiências fica facilitada visto que as medições são realizadas de maneira automática, permitindo aos alunos concentrarem-se na análise dos conceitos vistos em sala de aula.

A seguir serão ilustrados três exemplos de aplicações de instrumentação virtual no ensino experimental de engenharia elétrica. Será apresentada uma aplicação, envolvendo experimento sobre respostas de circuitos RC (resistivo – capacitivo) e RLC (resistivo – indutivo – capacitivo) em regime permanente senoidal, um experimento utilizando um sistema automático para análise de resposta em frequência em máquinas elétricas e o uso de instrumentação virtual aplicada aos experimentos com conversores eletrônicos de potência.

2.4.1 Respostas de Circuitos RC e RLC em Regime Permanente Senoidal

Este instrumento virtual foi desenvolvido por CONSONNI *et al* (2004). O VI implementado consiste numa rotina associada aos experimentos de eletricidade básica que foram desenvolvidos para serem utilizados como bancadas virtuais no ensino de Engenharia Elétrica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Foi desenvolvido um painel frontal com os principais recursos e funções de alguns instrumentos (osciloscópio digital, gerador de onda, caixas de resistência e capacitância) na tela do computador. Portanto, no contexto desse trabalho, os instrumentos virtuais (VIs) estão fazendo a interface de módulos reais, em que o computador é de fato reprodução de equipamentos tradicionais.

O painel frontal, com acessórios e cabos, é interconectado em uma vasta bancada virtual. Assim esses instrumentos virtuais podem ser operados pelo uso de um computador, mouse, teclado e procedimentos de medição podendo ser simulados como se eles fossem realizados em uma bancada real de laboratório.

A análise de circuitos lineares sob regime permanente senoidal é um tópico importante em cursos de circuitos elétricos, tornando-se, assim, objeto de estudo em experiências de laboratório. A figura 6 ilustra o painel frontal utilizado para estudar as respostas de circuitos RC e RLC, em regime permanente senoidal.

O usuário deve ligar ambos os instrumentos, ativando as conexões do gerador até a entrada do circuito, conectando as pontas de prova do osciloscópio aos nós do circuito. No circuito RC, o canal 1 amostra a tensão na saída do gerador,

e o canal 2 mede a tensão sobre o capacitor. A tensão sobre o resistor pode ser obtida através da operação (canal 1 – canal 2), usando o botão “ $\pm$ ”. Conforme o usuário varia os valores dos parâmetros R e C, a frequência e a amplitude do sinal, os efeitos nas formas de onda mostradas na tela podem ser prontamente visualizadas. Amplitudes e diferenças de fase nos sinais podem ser comparadas com os valores esperados calculados.

Figura 6 – Painel do VI de respostas de circuitos RC.

Além do experimento de Respostas de Circuitos RC e RLC em Regime Permanente Senoidal, apresentado neste item, os autores também desenvolveram instrumentos virtuais para os seguintes experimentos: Entendendo a Resposta em Frequência de Multímetros, Projetando Pontes de Indutância e Resistência com Alta Sensibilidade, Ganhando Familiaridade com Osciloscópios Digitais, e Dependência da Resposta Transiente em Frequências Naturais Complexas de Circuitos RLC.

2.4.2 Sistema Automático para Análise de Resposta em Frequência

Este instrumento virtual foi desenvolvido por SELLSCHOPP *et al* (2004). O VI implementado consiste em um Sistema Automático para Análise de Resposta em

Frequência (SAARF) com aplicação no laboratório de máquinas elétricas dos cursos de graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Instituto Tecnológico de Laguna – México.

Foi desenvolvido um instrumento virtual que executa testes de resposta em frequência em diversas máquinas elétricas. Estes testes foram executados enquanto as máquinas elétricas estavam desconectadas da fonte, estando na condição de vazio. Os dados obtidos no ensaio podem ser usados para estimar parâmetros das máquinas elétricas, fazendo uso do método dos mínimos quadrados. No experimento são assumidos modelos matemáticos lineares, ou seja, a saturação magnética é desprezada, sendo representadas por funções de transferência.

O painel frontal, conforme a figura 7, do SAARF tem um conjunto de botões através dos quais os estudantes podem controlar o experimento.

Figura 7 – Painel frontal do SAARF ilustrando um teste de R.F.

Um exemplo de arranjo experimental utilizado nos ensaios do SAARF está ilustrado na figura 8.

Figura 8 – Instrumentação para o experimento com o motor de indução.

O entendimento de testes em máquinas elétricas é valioso para os estudantes de Engenharia Elétrica. Portanto, este VI é um complemento prático à teoria vista em aula. Quando os estudantes aplicam a teoria da resposta em frequência em um sistema simulado, eles têm dificuldade em entender a física do problema. Por outro lado, se eles experimentam em máquinas reais, eles respondem positivamente à experiência, fazendo com que os experimentos laboratoriais ajudem os estudantes no processo de aprendizagem.

2.4.3 Experimentos com Conversores Eletrônicos de Potência

Este instrumento virtual foi desenvolvido por JIMÉNEZ-MARTÍNEZ *et al* (2005). O VI implementado consiste em experimentos com conversores eletrônicos de potência do Laboratório de Eletrônica de Potência do Departamento de Tecnologia Eletrônica da Universidade Técnica de Cartagena – Espanha.

A eletrônica de potência é uma área importante dentro da Engenharia Elétrica por uma numerosa quantidade de razões que incluem avanços na tecnologia de semicondutores, novas aplicações em microeletrônica e equipamentos eletrônicos industriais de potência, como controle eletrônico de velocidade de motores, fontes ininterruptas (*no breaks*), robótica, carros elétricos e outros.

O conversor de potência ilustrado na figura 9 é um inversor. Nesta aplicação existem alguns dispositivos de controle que estão disponíveis para fornecer ao usuário a entrada dos valores dos principais parâmetros, apresentação dos gráficos

com os sinais de disparo (*trigger*) e opção de seleção das ondas de tensão ou corrente.

No painel frontal, os controles de entrada de dados (tensão e freqüência) são usados para calcular e gerar os sinais mais importantes relacionados ao inversor. Além desses sinais, o programa deriva o espectro Fourier da tensão de saída, que mostrará a influência dos harmônicos em cada topologia.

O usuário pode controlar os parâmetros fundamentais de cada topologia selecionada do conversor por meio da interface com o usuário e com um pouco de trabalho, comparando os resultados com circuitos reais. A plataforma é um complemento ideal para um estudo teórico. A experiência tem mostrado que o novo equipamento ajuda a minimizar a complexidade e o tempo tomado pelos experimentos, provendo um benefício extra para os estudantes e assegurando um melhor uso das lições do laboratório.

Figura 9 – Painel frontal do experimento com o inversor.

3 UTILIZANDO O LABVIEW EM UMA EXPERIÊNCIA DIDÁTICA

O trabalho descrito neste capítulo consiste na utilização do *software* LabVIEW 7.1 Professional para o desenvolvimento de instrumentos virtuais que auxiliem no desenvolvimento da experiência “Minissistema de Potência” presente na disciplina de Laboratório de Sistemas de Potência - PEA 2406, ministrada aos alunos do oitavo semestre do curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Energia e Automação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Estes instrumentos virtuais possibilitam aos alunos monitorar e atuar na montagem Experimental; analisar as formas de onda dos sinais de tensão e corrente; observar o diagrama dos fasores de todos os sinais de tensão e corrente simultaneamente; e também visualizar uma tela de um sincronoscópio virtual, possibilitando verificar os ajustes de tensão e frequência necessários na operação de paralelismo do minissistema com a concessionária de energia.

Os instrumentos virtuais possibilitam aos alunos acompanhar o funcionamento do minissistema em vazio e em carga, verificar os efeitos das compensações reativas e rejeição de carga, além de visualizar o processo de sincronização do minissistema com a concessionária de energia e os efeitos da barra infinita no minissistema estando em paralelo.

3.1 Arquitetura Básica do Experimento

A arquitetura básica do experimento desenvolvido no laboratório para a aquisição e tratamento de sinais envolvidos com a experiência do Minissistema está dividida nos seguintes blocos: Sistema de Potência Reduzido, Sensores e Contatores, Placa de Condicionamento e Computador com Placa A/D²⁹. A figura 10 ilustra os respectivos blocos desta arquitetura, que será detalhada a seguir.

²⁹ Acrônimo de Analog/ Digital; um dispositivo que converte sinais continuamente variáveis (analógicos), como voltagens, emitidos por um instrumento de monitoração em códigos binários a serem usados por um computador.

Figura 10 – Arquitetura básica do sistema de aquisição e tratamento de sinais.

3.1.1 Sistema de Potência Reduzido

A geração de energia no sistema de potência reduzida, montada para estudo no laboratório é composta por uma máquina assíncrona acionada por um inversor de frequência, representando a turbina, que acoplada ao eixo de uma máquina síncrona trifásica de 2kVA-220 V, representando o gerador, simula em tamanho reduzido o conjunto turbina-gerador de uma usina hidrelétrica. A figura 11 ilustra a unidade geradora de energia elétrica do minissistema.

Em uma usina hidrelétrica real, o controle da frequência e tensão é feito de forma automática. O controle de frequência é feito a partir da abertura ou fechamento do duto forçado, que manda água para a turbina, mantendo sempre rotação constante independente da carga acoplada ao gerador. O controle de tensão é feito por meio de um circuito retificador controlado, que monitora a tensão na saída do gerador, que aumenta ou diminui a corrente de excitação do gerador de tal forma que a tensão nos terminais do gerador permaneça sempre constante.

No sistema de potência reduzido, o controle da frequência e tensão da unidade geradora não é feito de forma automática, por se tratar de um laboratório didático, em que o objetivo é que o aluno verifique a influência, na frequência e na tensão da saída do gerador, modificada por diferentes tipos de cargas acopladas aos seus terminais.

Figura 11 – Fonte de energia no minissistema de potência.

O controle de rotação da turbina representada pela máquina assíncrona acionada a partir de um inversor de frequência é feito no próprio painel do inversor por meio de um dial, que controla a frequência de excitação da máquina assíncrona. Portanto, aumentando a frequência de excitação da máquina assíncrona têm-se um aumento na rotação do eixo do conjunto turbina-gerador do minissistema, e conseqüentemente, diminuindo a frequência de excitação da máquina assíncrona têm-se uma redução na rotação do eixo do conjunto turbina-gerador do minissistema. Assim, torna-se possível realizar o controle da frequência de operação no sistema de potência reduzido.

O controle da tensão, induzida nos terminais do gerador, representada pela máquina síncrona, acoplada ao eixo da turbina, representada pela máquina assíncrona, é feito por meio de um variac acoplado a uma ponte retificadora, que serve como fonte de alimentação da corrente de excitação da máquina síncrona. Portanto, aumentando a tensão no variac, têm-se um aumento da corrente de excitação da máquina síncrona, provocando o aumento da tensão induzida nos terminais do gerador, e conseqüentemente, diminuindo a tensão no variac, têm-se uma redução da corrente de excitação da máquina síncrona, provocando uma redução da tensão induzida nos terminais do gerador.

O modelo de linha de transmissão (LT) construído, conforme Grimoni e Senger (1998), representa uma linha de transmissão real com os seguintes parâmetros: tensão de 440 kV, comprimento de 400 km, resistência de seqüência direta igual a $0.02 \text{ } \Omega / \text{ km}$, reatância de seqüência direta igual a $0.3 \text{ } \Omega / \text{ km}$, capacitância de seqüência direta igual a 13.4 nF / km , resistência de seqüência zero igual a $0.28 \text{ } \Omega / \text{ km}$, reatância de seqüência zero igual a $1.2 \text{ } \Omega / \text{ km}$ e capacitância de seqüência zero igual a 8 nF / km . O fator de escala dos parâmetros (tensão, corrente, potência e impedância) utilizado entre o modelo da L.T. e a L.T. real está indicado na tabela 1.

Fatores de Escala			
Parâmetros	Símbolo	Definição	Valor
Tensão	k_v	$V_{real}(kV)=k_v$ $V_{modelo}(kV)$	2.0 (kV/V)
Corrente	k_i	$I_{real}(A)=k_i$ $I_{modelo}(A)$	200 (A/A)
Potência	K_s	$S_{real}(MVA)=k_s$ $S_{modelo}(VA)$	0.4 (MVA/VA)
Impedância	K_Ω	$Z_{real}(\Omega)=k_\Omega$ $Z_{modelo}(\Omega)$	10 (Ω/Ω)

Tabela 1 – Fatores de escala entre o modelo de L.T. e a L.T. real.

O modelo reduzido da linha de transmissão é obtido pela associação de reatores e capacitores dados pelo modelo *pi* de representação de linhas de transmissão. A figura 12 mostra a associação de indutores e capacitores utilizados para a construção da L.T.

Figura 12 – Modelo da linha de transmissão.

As bobinas utilizadas na construção do modelo reduzido da LT foram posicionadas em uma montagem separada da bancada experimental, buscando minimizar os fluxos magnéticos concatenados entre elas e reduzindo a interferência no sistema de aquisição de dados.

A montagem separada da LT foi feita em uma mesa compacta provida de rodas para facilitar o seu transporte. Esta mesa disponibiliza acesso aos terminais de entrada e saída da LT por meio de bornes instalados em sua superfície, sendo

previsto também bornes para instalação de sensores de corrente em série com o modelo reduzido da LT.

A figura 13 ilustra um modelo real construído para representar uma unidade de transporte de energia do sistema de potência reduzido.

Figura 13 – Linha de transmissão no minissistema de potência.

O sistema de potência reduzido disponibiliza, acoplado aos terminais de saída da linha de transmissão, uma chave comutadora que permite três estados ao sistema: LT operando em vazio, LT acoplada a uma caixa de resistência representando uma carga passiva e a LT realizando o acoplamento do gerador em paralelo com a rede da concessionária de energia na operação de paralelismo.

3.1.2 Sensores e Contatores

No sistema de potência reduzido, os sensores e os contatores estão posicionados na superfície da mesa que representa a LT, sendo no total, nove sensores de tensão, três sensores de corrente e quatro contatores.

Os sensores são utilizados para monitorar os principais sinais elétricos de interesse na experiência, possibilitando o acesso simultâneo a todos os sinais e evitando a utilização de múltiplos equipamentos manuais de medições. Os sinais monitorados no minissistema são: os três valores de tensão na saída do gerador, os três valores de tensão na final da LT, os três valores de tensão da concessionária de energia e os três valores de corrente na LT.

Os sensores utilizados são baseados em transdutores de efeito Hall, que possuem uma boa resposta em frequência para tensão e corrente elétrica para os

fenômenos estudados. Eles podem ser configurados de acordo com as faixas de leituras apropriadas: até 180 V ou 270 V para sensores de tensão e até 5 A, 6 A, 8 A, 12 A ou 25 A para sensores de corrente. Na montagem experimental, a configuração da faixa de leitura dos sensores já está ajustada para garantir a perfeita cobertura dos valores esperados nos diversos arranjos previstos no roteiro da experiência.

Os contatores são utilizados para substituir as chaves manuais utilizadas nas operações de acoplamento entre gerador, linha de transmissão e carga, possibilitando um controle automático e centralizado. Os quatro contatores estão disponíveis na montagem experimental de forma a garantir o controle a partir do computador dos seguintes acoplamentos:

- ? Acoplamento entre o gerador e o início da LT;
- ? Acoplamento entre o término da LT e a chave comutadora;
- ? Acoplamento entre a compensação reativa e o início da LT;
- ? Acoplamento entre a compensação reativa e o término da LT.

A figura 14 ilustra a montagem dos sensores e contatores, possibilitando a monitoração dos valores de tensão no início e término do LT, corrente na LT, tensão no barramento infinito (concessionária de energia), controle da energização no início e término da LT, e também das respectivas compensações reativas.

Figura 14 – Ligação dos sensores e contatores.

3.1.3 Placa de Condicionamento

A placa de condicionamento, como o próprio nome já diz, é responsável pelo condicionamento dos sinais que serão enviados para placa A/D instalada no computador. Ela também realiza a interação entre as saídas digitais da placa A/D e os contadores utilizados no sistema de potencia reduzido. As funções executadas pela placa de condicionamento, nesta montagem, são as seguintes:

- ? Alimentação dos transdutores utilizados na montagem experimental;
- ? Condicionamento dos sinais elétricos dos transdutores em sinais de tensão com amplitude máxima de 10V;
- ? Controlar o acionamento de relés, utilizados no controle dos contadores, por meio das saídas digitais da placa A/D;
- ? Proteção da placa A/D instalada no computador, contra surtos de tensão e corrente ocorridos no minissistema.

Os sinais de tensão e correntes condicionados para tensões de amplitude máxima de 10V, possuem os seus valores corrigidos para os respectivos valores reais no programa de computador, em que já estão armazenadas as respectivas configurações de faixas de leituras utilizadas nos sensores.

O dimensionamento da placa de condicionamento foi feito a partir das características presentes na Placa A/D. Esta placa pode ser utilizada em uma diversidade de arranjos possíveis independente da quantidade e tipo de sensores, quantidade de entradas ou saídas digitais utilizadas em cada montagem experimental.

3.1.4 Computador com Placa A/D

Foi utilizada uma placa de aquisição de dados *DAQ (Data Acquisition)* modelo PCI 6023E, da National Instruments, que possui 16 entradas analógicas de 12 bits (11 de amplitude + 1 de sinal), 8 entradas ou saídas digitais, frequência de amostragem de 200k.amostras/seg e isolamento para até 45 V. A principal função desta placa é realizar a conversão dos sinais analógicos obtidos pelos sensores para sinais digitais, utilizando as saídas digitais para controlar os relés da placa de condicionamento e possibilitando o acionamento dos contadores.

O computador padrão com processador *Pentium*³⁰ IV 2 GHz, 256 MB de memória RAM³¹, disco rígido de 40 GB e sistema operacional Windows 2000 Professional, da Microsoft Corporation, possui instalado o *software* LabVIEW 7.1 Professional, da National Instruments.

O *software* LabVIEW possui total integração com a placa de aquisição, possibilitando comunicação, análise e apresentação das variáveis monitoradas e controladas no minissistema, garantindo o funcionamento de todo o sistema elaborado.

3.2 Programa Desenvolvido

Foi desenvolvido um programa, utilizando o conceito de instrumentação virtual descrito no capítulo anterior, tendo como ambiente de desenvolvimento o *software* LabVIEW 7.1 Professional.

A metodologia adotada no desenvolvimento deste programa consistiu em dividir o processo geral e complexo que o programa devia realizar em vários processos menores e mais fáceis de serem implementados. Os processos menores foram implementados na forma de SubVIs que unidos todos em um único VI executam as funções especificadas para o programa.

A especificação das tarefas a serem realizadas pelo programa foi determinada pelo procedimento descrito no roteiro experimental da experiência do Minissistema e de quais instrumentos eram utilizados para a sua execução. Para concentrar todas as medições e informações necessárias para a confecção do relatório da experiência pelo aluno, o programa deve ser capaz de realizar as seguintes tarefas:

- ? Aquisição dos sinais de tensão e corrente, fazendo as respectivas correções para os valores reais;
- ? Cálculo das potências ativa, reativa e aparente com respectivo fator de potência;

³⁰ Microprocessador fabricado pela Intel Corporation.

³¹ Acrônimo de *random access memory*; memória baseada em chips semicondutores que podem ser lidos e gravados (escritos) pelo microprocessador e outros dispositivos.

- ? Determinação do valor da frequência do sistema em Hertz;
- ? Controle dos contatores por meio de botões que comandam as saídas digitais e atualizam imagem na tela indicativa do estado do sistema;
- ? Apresentação simultânea de todos os sinais adquiridos na forma de um diagrama de fasores;
- ? Implementação de um osciloscópio virtual;
- ? Implementação de um sincronoscópio virtual;
- ? Proteção dos sensores e do minissistema contra operação com correntes acima das especificações nominais.

O código fonte do VI principal e todos os SubVIs desenvolvidos para realizar estas tarefas estão indicados no apêndice A. O manual de instalação do programa está indicado no apêndice B.

O programa desenvolvido possui uma interface com o usuário dividida basicamente em três partes: medições simultâneas, estado do minissistema e instrumentação virtual. A figura 15 apresenta a tela inicial do programa, delineando as partes da tela referente às medições simultâneas, ao estado do minissistema e a instrumentação virtual.

Figura 15 – Tela inicial do programa Minissistema.

3.2.1 Medições Simultâneas

A parte referente às medições simultâneas apresenta os valores das tensões na saída do gerador (representadas por V_a' , V_b' e V_c' , em V), os valores das correntes eficazes na linha de transmissão (representadas por I_a , I_b e I_c , em A), os valores das tensões no fim da linha de transmissão (representadas por V_a'' , V_b'' e V_c'' , em V), frequência no minissistema (em Hertz), valor da potência ativa (representada por P , em kW), valor da potência reativa (representada por Q , em kVAr), valor da potência aparente (representada por S , em kVA) e o valor do fator de potência (representado por FP).

A figura 16 ilustra a parte do programa que disponibiliza as medições simultâneas. Os valores de tensão, corrente, frequência, potências e fator de potência foram ilustrados e obtidos com o minissistema, operando com compensação reativa e carga acoplada no fim da LT.

Figura 16 – Medições simultâneas no minissistema sob carga.

Os valores eficazes dos sinais de tensão e corrente foram obtidos a partir da aquisição de mil amostras a uma taxa de 6 k.amostras/seg de cada sinal analisado, formando, assim, um vetor com mil valores de cada sinal analisado. Os valores contidos nestes vetores são os respectivos valores de tensões com amplitude máxima de dez volts, fornecidos por cada transdutor de tensão ou corrente, sendo então necessário fazer as respectivas correções para valores reais em cada sinal.

Estas correções são feitas, multiplicando os valores contidos em cada vetor por um fator de correção determinado a partir das faixas ajustadas em cada sensor. No programa foi usado um fator igual a 0,8 para os sensores de corrente e um fator de correção igual a 43,5 para os sensores de tensão.

Desta maneira, é feita a conversão do sinal real medido para o visualizado e utilizado para cálculos e análises. Uma vez obtidos os vetores com valores reais de cada sinal, é feito o cálculo dos valores eficazes, utilizando uma rotina do próprio LabVIEW, que determina o valor da raiz quadrada da média dos quadrados dos valores contidos em cada vetor. A equação utilizada para o cálculo do valor eficaz está descrita a seguir:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_i^2}, \text{ nesta equação tem-se:}$$

- ? V_{ef} : valor eficaz do sinal analisado;
- ? n : número de elementos contidos no vetor do sinal;
- ? X_i : valores do vetor do sinal, em que $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Os cálculos dos valores de potência ativa, reativa, aparente e do fator de potência foram realizados segundo modelos propostos por Emanuel (1990), Filipski, Baghzouz e Cox (1994), Paula e Pereira (2000) para sistemas trifásicos senoidais.

Os sensores que monitoram as tensões na saída do gerador (V_a' , V_b' e V_c') são ligados de forma a obterem os respectivos valores de tensões de fase (ligação fase-neutro) e os sensores de correntes então ligados em série e no início da LT, obtendo, assim, as respectivas correntes de fase do gerador (I_a , I_b e I_c).

As equações utilizadas para calcular os valores de potência ativa, aparente e reativa e fator de potência a partir dos valores de tensões de fase e corrente de fase do gerador estão descritas a seguir:

A equação utilizada para o cálculo do valor de potência ativa.

$$P = \frac{1}{1000} \sum_{i=0}^{n-1} V_a'i \cdot I_{ai} + \sum_{i=0}^{n-1} V_b'i \cdot I_{bi} + \sum_{i=0}^{n-1} V_c'i \cdot I_{ci}, \text{ nesta equação temos:}$$

- ? P : valor da potência ativa trifásica em kW;
- ? n : número de elementos contidos nos vetores dos sinais de tensão e corrente;
- ? $V_a'i$, $V_b'i$ e $V_c'i$: vetores dos sinais de tensões de fase do gerador em V;
- ? I_{ai} , I_{bi} e I_{ci} : vetores dos sinais de correntes de fase do gerador em A.

A equação utilizada para o cálculo do valor de potência aparente.

$S = \frac{1}{1000} \sqrt{V_a'^2 I_a'^2 + V_b'^2 I_b'^2 + V_c'^2 I_c'^2}$, nesta equação temos:

- ? S: valor da potência aparente em kVA;
 - ? V_a' , V_b' e V_c' : valor eficaz dos sinais de tensões de fase do gerador em V;
 - ? I_a' , I_b' e I_c' : valor eficaz dos sinais de correntes de fase do gerador em A.
- A equação utilizada para o cálculo do valor de potência reativa.

$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$, nesta equação temos:

- ? Q: valor da potência reativa em kVAr;
- ? S: valor da potência aparente em kVA;
- ? P: valor da potência ativa em kW.

A equação utilizada para o cálculo do fator de potência.

$FP = \frac{P}{S}$, nesta equação temos:

- ? FP: valor do fator de potência, adimensional;
- ? P: valor da potência ativa em kW;
- ? S: valor da potência aparente em kVA.

O valor da frequência foi obtido por meio de uma rotina do próprio LabVIEW chamada *Tone Measurements*³². Para se obter o valor da frequência de um sinal, utilizando a rotina *Tone Measurements*, é necessário fornecer como entrada um vetor com os valores do sinal que se deseja calcular a frequência e multiplicar o valor fornecido na saída da rotina pela respectiva taxa de amostragem utilizada na aquisição do respectivo sinal, obtendo, assim, o valor de frequência em hertz do sinal. O valor de frequência apresentado na tela do programa foi obtido a partir do sinal de tensão V_a' .

3.2.2 Estado do Minissistema

Os contadores dispostos na linha de transmissão são representados na tela do programa por meio de uma imagem com chaves dispostas em um diagrama uni

³² O atalho dentro do LabVIEW 7.1 Professional para se encontrar a rotina *Tone Measurements* é o seguinte: *Functions Palette >> Waveform >> Analog Waveform >> Waveform Measurements >> Tone Measurements*

filas da LT. As chaves estão numeradas de um a quatro, fazendo referência as seguintes conexões:

- ? Chave 1: conecta a saída do gerador ao início da linha de transmissão;
- ? Chave 2: conecta o término da linha de transmissão à chave comutadora;
- ? Chave 3: conecta a compensação reativa no início da linha de transmissão;
- ? Chave 4: conecta a compensação reativa no fim da linha de transmissão.

O estado do minissistema pode ser alterado através do quadro de comando de chaves, que possui um botão com retenção de estado para cada uma das chaves. A atualização do estado do minissistema é feita por meio da substituição da imagem ilustrativa por outra que represente o estado atual, sendo assim, um total de 16 estados diferentes para as quatro chaves existentes.

A figura 17 indica o minissistema em um estado em que as compensações reativas estão ligadas e as chaves no início e no término da linha de transmissão estão desligadas. O estado das chaves pode ser visualizado tanto na imagem como também na luz verde localizada no interior do botão, em que a luz pode estar acesa ou apagada, indicando respectivamente chave ligada ou desligada.

Figura 17 – Indicação do estado do minissistema sem alimentação.

A figura 18 ilustra o conjunto das 16 imagens utilizadas pelo programa para poder representar todos os possíveis estados das chaves no minissistema.

Figura 18 – Conjunto de 16 imagens utilizada para representação dos estados.

3.2.3 Instrumentação Virtual

A parte de instrumentação virtual possui três modos de operação:

- ? Modo de operação: diagrama de fasores;
- ? Modo de operação: osciloscópio virtual;
- ? Modo de operação: sincronoscópio virtual.

A parte do programa referente à instrumentação virtual apresenta somente um modo de operação, em que a seleção do modo de operação, é feita através de um menu disponível na tela do programa logo acima do local de apresentação das medições simultâneas.

3.2.3.1 Modo de operação: diagrama de fasores

Este modo de operação é responsável por realizar a apresentação simultânea de todos os sinais de tensão e corrente do minissistema na forma de fasores sobrepostos em um diagrama. Para poder sobrepor os fasores de tensão e corrente em um mesmo diagrama foi adicionado um menu, em que foi selecionado um fator multiplicativo para o valor eficaz das correntes, já que os valores de suas amplitudes são na maioria das vezes desprezíveis em relação às amplitudes dos sinais de tensão. Este fator pode ser 1, 10, 20, 50 ou 100 vezes o valor real obtido para o sinal de corrente.

A figura 19 ilustra a tela disponibilizada pelo programa quando selecionada a opção diagrama de fasores, onde neste exemplo tem-se o minissistema operando sob carga.

Figura 19 – Tela do diagrama de fasores do minissistema sob carga.

No diagrama dos fasores com o minissistema em vazio, verifica-se somente o aparecimento dos fasores que representam as tensões na saída do gerador, enquanto no diagrama dos fasores com o minissistema, operando com carga verificam o surgimento de todos os fasores, das correntes na linha de transmissão como também das tensões no início e no final da LT.

O modo de operação diagrama de fasores possibilita ao usuário do programa verificar as defasagens entre os sinais de corrente e os sinais de tensão em diferentes situações de carga e operação do minissistema.

Para a representação dos sinais na forma de fasor, foi necessário determinar uma amplitude e fase para cada um dos sinais presentes no minissistema. O valor de amplitude foi igualado ao valor eficaz calculado nas medições simultâneas. No cálculo das fases, foi necessário adotar a fase da componente fundamental da decomposição harmônica da tensão $V_{a'}$ como referência e aproximar os valores de fase de cada sinal pela respectiva diferença de fase da sua componente fundamental e a da referência.

O cálculo da fase da componente fundamental da decomposição harmônica dos sinais foi realizado, utilizando uma rotina do próprio LabVIEW chamada

*Amplitude and Phase Spectrum*³³. Para obter o valor da fase da componente fundamental de um sinal, utilizando a rotina *Amplitude and Phase Spectrum*, é necessário fornecer como entrada um vetor com os valores do sinal, que calcula a fase e o valor da frequência do respectivo sinal, obtendo na saída o valor da fase em radianos.

3.2.3.2 Modo de operação: osciloscópio virtual

O osciloscópio é um equipamento que contém circuitos para receber o sinal medido, condicionar adequadamente e apresentar a forma de onda do sinal na tela do instrumento. O condicionamento corresponde ao acoplamento e à atenuação/pré-amplificação do sinal. O sinal, assim, condicionado é injetado no amplificador vertical para gerar a deflexão vertical no feixe na tela, tomando a forma do sinal no monitor do instrumento. Outros circuitos existentes correspondem à geração de varredura, de acordo com uma base de tempo selecionada, disparando segundo informações de sincronização e disparo retiradas eventualmente do sinal de entrada.

O osciloscópio virtual irá reproduzir na tela do computador a mesma forma de onda obtida pelo instrumento tradicional por meio da representação gráfica dos vetores obtidos na aquisição de sinais.

Este instrumento virtual reproduz na tela do computador algumas funcionalidades do instrumento tradicional que são necessárias para o desenvolvimento da experiência. As informações disponíveis no modo de operação osciloscópio virtual são:

- ? A forma de onda dos sinais de tensão V_a' e I_a , presentes na saída do gerador, tendo o sinal V_a' como referência;
- ? O diagrama de fasores dos sinais de tensão V_a' e I_a , presentes na saída do gerador, tendo o fasor V_a' como referência;
- ? O valor da defasagem entre o sinal de corrente e o sinal de tensão apresentado na tela do programa em graus;
- ? O controle do número de ciclos de tensão e correntes que são enquadrados na tela da representação gráfica de forma de onda;

³³ O atalho dentro do LabVIEW 7.1 Professional para se encontrar a rotina *Amplitude and Phase Spectrum* é o seguinte: *Functions Palette >> Analyze >> Signal Processing >> Frequency Domain >> Amplitude and Phase Spectrum*.

? Um fator multiplicativo para sinal de corrente, podendo, assim, sobrepor os sinais de corrente e tensão em um mesmo gráfico.

A existência de um ruído devido à terceira harmônica presente no minissistema, oriunda do inversor de frequência, fez com que fosse desenvolvido um filtro digital da componente fundamental dos sinais. A forma de onda dos sinais foi aproximada para a forma de onda da componente fundamental para obter uma melhor visualização dos sinais. A figura 20 ilustra o osciloscópio virtual com e sem a ação do filtro.

Figura 20 – Telas do modo osciloscópio virtual com e sem filtro fundamental.

A forma de onda indicada na tela sem o filtro é a própria representação gráfica dos sinais amostrados e a forma de onda com o filtro é a reprodução da forma de onda da fundamental obtida após a decomposição harmônica dos sinais de tensão e corrente.

3.2.3.4 Modo de operação: sincronoscópio virtual

O sincronoscópio é um instrumento utilizado para analisar os ajustes de tensão e frequência para a operação de paralelismo entre o minissistema e a concessionária de energia. Um método de simples concretização, para indicar a situação de sincronismo é a utilização de lâmpadas, ou seja, o sincronoscópio de lâmpadas. Este método é realizado, ligando lâmpadas entre as fases homólogas, indicando o momento em que a diferença de tensão é nula, que os dois sistemas trifásicos têm mesma seqüência de fase e estão sincronizados.

Na saída da chave comutadora que acopla o minissistema à concessionária de energia, encontra-se instalado um sincronoscópio de lâmpada, conforme indicado na figura 21. Com esta montagem, verifica-se que:

- ? Quando a seqüência de fases é diferente, as lâmpadas acendem e apagam alternadamente; quando a seqüência de fases é a mesma as lâmpadas acendem e apagam simultaneamente;
- ? Quando a seqüência de fases é a mesma, as lâmpadas estão acesas quando existe diferença de tensão entre a mesma fase dos dois sistemas, e as lâmpadas estão apagadas quando não existe diferença de tensão entre os dois sistemas – quando os sistemas estão em sincronismo.

Figura 21 – Esquema de ligação do sincronoscópio de lâmpadas no sistema.

Existe uma forma de justificar a relação entre o comportamento das lâmpadas e a relação entre fases dos sistemas trifásicos de corrente alternada, através dos diagramas dos fasores de cada um dos sistemas. O modo de operação sincronoscópio virtual apresenta os diagramas de fasores do minissistema e da concessionária de energia sobrepostos com o intuito de justificar o comportamento das lâmpadas instaladas na montagem experimental.

Desta maneira, é possível verificar por meio dos três fasores de tensão na saída da linha de transmissão e dos três fasores de tensão da concessionária, os critérios necessários para a operação de paralelismo:

- ? Os valores eficazes das tensões do gerador e da rede devem ser exatamente iguais;

- ? A seqüência de fases deve ser a mesma. Se isto não ocorrer, é necessário inverter duas fases no gerador;
- ? A freqüência deve ser praticamente igual, sendo normal usar uma freqüência ligeiramente superior no gerador que é colocado em paralelo com a rede.

A figura 22 mostra a tela referente ao sincronoscópio virtual no momento em que as lâmpadas do osciloscópio instalado na bancada estão apagadas, podendo verificar uma mínima discordância entre os fasores do final da linha de transmissão e da concessionária de energia. A mesma figura mostra também o momento em que as lâmpadas estão acesas, verificando uma grande discordância entre os fasores do final da linha de transmissão e a concessionária de energia.

Figura 22 – Telas do modo sincronoscópio virtual.

3.2.4 Proteção do Minissistema

Na montagem experimental, têm-se os sensores de tensão ajustados na faixa de 270 V e os de corrente na faixa de 5 A. O programa desenvolvido conta com uma proteção que desarma o contator no início da L.T. quando o limite de corrente de 5 A é ultrapassado em qualquer uma das fases da linha de transmissão.

A proteção envia uma mensagem na tela do programa, comunicando que o limite de corrente foi ultrapassado, mantendo desarmado o contator até que a tensão na saída do gerador seja reduzida para um valor abaixo de 50 V, forçando, assim, que o usuário reinicie a operação do minissistema com valores de corrente abaixo dos limites suportados pelos sensores e pelo sistema.

4 RESULTADOS OBTIDOS COM A AUTOMAÇÃO DO LABORATÓRIO

O laboratório didático, segundo Grandini e Grandini (2004), propicia aos alunos vivência e manuseio de instrumentais, permitindo conhecer diversos tipos de atividades, estimulando a curiosidade e a vontade em vivenciar ciência. O laboratório deve incentivar o aluno a conhecer, entender e aplicar a teoria na prática, dominando ferramentas e técnicas que poderão ser utilizadas em pesquisa científica ou no ambiente de trabalho. O aluno deve aprender a observar cientificamente, interpretar e analisar experimentos por meio da objetividade, precisão, confiança, perseverança, satisfação e responsabilidade.

Levando em consideração os objetivos propostos pelo laboratório didático no processo de aprendizagem em cursos de graduação, o programa desenvolvido para a automação do laboratório possibilita ao aluno monitorar e atuar na montagem experimental. Permite analisar a forma de onda dos sinais de tensão e corrente, observar o diagrama dos fasores de todos os sinais de tensão e corrente simultaneamente, e também visualizar uma tela de um sincronoscópio virtual. Verificando os ajustes de tensão e frequência necessários na operação de paralelismo do minissistema com a concessionária de energia.

O processo de automação provocou alterações consideráveis no funcionamento da “máquina PEA” (como é chamada o sistema de geração de energia do laboratório), na linha de transmissão e nos equipamentos utilizados para medição e controle da experiência conforme descrito a seguir.

4.1 O laboratório antes da automação

Antes da automação, a execução da experiência Minissistema de Potência era realizada, utilizando instrumentos manuais de medição e controle. A montagem dos instrumentos de medição e controle foi realizada em cima de uma mesa do laboratório. O esquema utilizado para montagem da bancada experimental está

indicado no anexo A. A lista de equipamentos necessários para a montagem da bancada experimental e o procedimento de operação do minissistema utilizado anteriormente no laboratório está indicado no anexo B.

O arranjo experimental utilizado para a execução da experiência antes da automação possuía algumas deficiências, em que se pode citar:

- ? Dependência entre os controles de frequência e tensão do minissistema;
- ? Barulho excessivo durante a execução da experiência;
- ? Falta de proteção da instalação para o aluno durante a utilização da bancada experimental;
- ? Processo de medição e controle durante a execução da experiência feito de forma lenta e descentralizado.

O conjunto turbina-gerador utilizado na experiência consistia em uma máquina C.C. (Corrente Contínua), simulando a turbina e uma máquina síncrona, simulando o elemento gerador. A alimentação de todo o conjunto era feita através de um único variac trifásico acoplado a um retificador trifásico.

O controle de frequência e tensão no arranjo experimental era feito respectivamente por meio das correntes de campo da máquina C.C. e de excitação da máquina síncrona, utilizando reostatos alimentados a partir do variac trifásico. O controle de frequência podia ser feito tanto a partir da tensão de armadura (ajuste grosso) como também da corrente de campo (ajuste fino).

Nas operações, envolvendo ajustes grossos na frequência de operação do minissistema havia a necessidade de reajustar o variac trifásico, utilizado para alimentar a tensão de armadura e que também era utilizado na alimentação do campo da máquina síncrona (controle de tensão), fazendo com que o ajuste de frequência influenciasse no ajuste de tensão do gerador. A influência entre os ajustes de frequência e tensão do gerador não é presenciado em um sistema de potência real, portanto o modelo reproduzido em laboratório não apresentava o comportamento aprendido na teoria.

O barulho excessivo durante a execução da experiência, vindo do conjunto turbina-gerador atrapalhava a comunicação entre o professor e os alunos, sendo necessário parar o conjunto durante a execução da experiência para alguma explicação mais detalhada por parte do professor ou para a realização de perguntas por parte dos alunos.

A montagem experimental era feita em cima de uma mesa do laboratório, em que não possuía nenhum sistema de proteção da instalação (disjuntores, relés ou botão de emergência), sistema de aterramento ou proteção contra contatos casuais, havendo perigo de choque elétrico ou de outros tipos de acidentes.

O processo de medição de corrente e tensão era feito por meio de amperímetros e voltímetros analógicos instalados ao longo da montagem experimental. Os valores de potência ativa trifásica eram obtidos através de dois wattímetros, utilizando o teorema de Blondel. No laboratório, estava também à disposição dos alunos um amperímetro de alicate utilizado para obter valores de corrente e tensão no decorrer da experiência. O chaveamento dos circuitos era feito manualmente, utilizando chaves facas.

O fato dos chaveamentos e das medições estarem distribuídos ao longo da montagem experimental, força os alunos a se dividirem em grupos durante a realização da experiência para obter todas as leituras de forma simultânea. Já que para a interpretação de alguns fenômenos físicos envolvidos com a experiência, a obtenção de leituras simultâneas era necessária. Durante a realização da experiência, todos os valores medidos tinham que ser anotados manualmente para poder ser utilizados depois na confecção do relatório.

4.2 O laboratório depois da automação

No processo de automação, foi desenvolvida uma bancada experimental especialmente para experiência do Minissistema, ilustrada na figura 23, com o objetivo de corrigir as deficiências presentes no arranjo experimental utilizado anteriormente. A lista de equipamentos necessários para a montagem da bancada experimental e o procedimento de operação do minissistema utilizado na experiência automatizada está indicado no apêndice C.

Figura 23 – Bancada utilizada na experiência do Minissistema.

Nesta nova bancada, o conjunto turbina-gerador foi retirado de cima da mesa e posicionado no seu interior. A mesa foi fechada e revestida internamente com isoladores acústicos para se reduzir o barulho gerado pelo conjunto. Além do revestimento acústico, foram instalados coxins na base de sustentação do conjunto turbina-gerador com o objetivo de diminuir a vibração gerada pelo conjunto na bancada experimental.

O conjunto turbina-gerador foi refeito, possuindo agora uma máquina assíncrona, simulando a turbina, alimentada por um inversor de frequência e a mesma máquina síncrona, simulando o gerador, tendo como fonte de alimentação de campo um retificador monofásico. Este novo arranjo possui o controle de frequência e tensão do minissistema de forma completamente independente pelo fato de não compartilharem a mesma fonte de alimentação.

O controle de frequência é feito através do painel do inversor, ajustando a frequência de alimentação da máquina assíncrona e o controle de tensão por meio do retificador monofásico que alimenta o campo da máquina síncrona, controlando assim a corrente de excitação. Os dispositivos utilizados no controle de tensão e frequência estão apresentados na figura 24.

Figura 24 – Instrumentos de controle na bancada experimental.

Para evitar os perigos de choques elétricos ou de outros tipos de acidentes foi montado na nova bancada experimental um quadro de comando, indicado na figura 23, responsável pela proteção da instalação elétrica, protegendo também contra o risco de contatos casuais. Estão presentes neste quadro de comando os seguintes itens:

- ? Disjuntores termomagnéticos de proteção da instalação elétrica;
- ? Alimentação do conjunto turbina-gerador;
- ? Alimentação da bancada por contator e controlado por botoeira, permitindo o desarme via botão de emergência ou relé de proteção do inversor de frequência;
- ? Bornes com as fases da concessionária de energia;
- ? Bornes com as fases do gerador.

O esquema utilizado para montagem da bancada experimental está indicado no apêndice D e o diagrama elétrico do quadro de comando do conjunto turbina-gerador está no anexo C.

4.2.1 Vantagens da automação do laboratório

O conceito de instrumentação virtual aplicado à experiência do Minissistema, detalhado no capítulo três, contribuiu com a melhoria no desenvolvimento das atividades laboratoriais nos seguintes aspectos:

- ? Possibilitou a automação das medidas e controle da experiência, concentrando tudo na tela do computador, em que o aluno podia capturar a tela do programa e gravá-la em um arquivo de computador para auxiliá-lo posteriormente na confecção do relatório da experiência;
- ? A agilidade do sistema de medições simultâneas favoreceu que o aluno não se desconcentrasse dos fenômenos de interesse da experiência, com a necessidade de ter que realizar diversas medidas em locais distintos do minissistema de potência através da divisão do grupo para leitura dos instrumentos de medições;
- ? A diversidade de informações apresentadas na tela do programa e os instrumentos virtuais disponíveis facilitaram a demonstração do funcionamento do minissistema de potência pelo professor, melhorando a compreensão do todo pelos alunos;
- ? Proporcionou ao aluno a utilização de um sistema de aquisição e de tratamento de dados por meio do uso de *hardware* e *software* apropriado, familiarizando-o com as ferramentas utilizadas atualmente no monitoramento, operação e manutenção de sistemas ligados à área de energia elétrica.

4.2.2 Desvantagens da automação do laboratório

As principais dificuldades e problemas encontrados durante a realização da experiência foram os seguintes:

- ? A necessidade de treinamento e orientação dos alunos para a operação do sistema automatizado no início de cada experiência não proporcionou redução no tempo gasto para a realização da experiência porque o tempo que se economizou na obtenção das medidas foi gasto com a familiarização com o sistema de aquisição;

- ? O aluno não interfere na montagem experimental, ligando os circuitos, em que para o aluno realizar a montagem, o tempo gasto para familiarização da instalação dos elementos (minissistema – sensores – placa de condicionamento – micro computador) seria demasiado e fugia dos objetivos da experiência, apesar de fazer parte da prática laboratorial;
- ? As telas do programa salvas pelos alunos, onde aparece selecionado o instrumento virtual diagrama de fasores, não possuem o fator multiplicativo da corrente corretamente ajustada de modo a permitir a correta sobreposição dos fasores, possibilitando interpretações referentes à fase da corrente em relação à tensão.

4.3 Utilizando o programa na execução da experiência

O roteiro experimental utilizado em laboratório, indicado no anexo D, para a execução da experiência “Minissistema de Potência” está dividido basicamente em três partes: 1º Parte – Acompanhamento do funcionamento do minissistema em vazio; 2º Parte – Acompanhamento do funcionamento do minissistema sob carga; 3º Parte – Ligando o sistema da concessionária de energia em paralelo com o minissistema.

4.3.1 Funcionamento do minissistema em vazio

Na primeira parte do relatório o professor faz a demonstração aos alunos do funcionamento do minissistema de potência, descrevendo:

- ? Como é simulado o elemento gerador de energia (“máquina PEA”);
- ? Como se efetua o controle de velocidade (frequência) e tensão da “máquina PEA”;
- ? Qual a topologia do sistema: “máquina PEA”; linha de transmissão e suas respectivas compensações reativas; carga resistiva; barramento infinito (concessionária de energia);

- ? Quais os equipamentos de medição e suas respectivas funções no processo de supervisão e controle;
- ? Descrição do que ocorre com o sistema em vazio, quando se retira parte da compensação reativa.

A análise da deficiência de compensação reativa pode ser feita, observando os valores de tensões e correntes no minissistema com as chaves acionadas de forma a indicar os seguintes estados: minissistema em vazio com compensação reativa no início e no fim; minissistema em vazio sem compensação reativa no fim da L.T.; e minissistema em vazio sem compensação reativa no início da L.T. A figura 25 mostra os estados do minissistema com os respectivos valores de tensões e correntes utilizados para análise da deficiência de compensação reativa com o sistema em vazio.

Figura 25 – Medidas de tensão e corrente com o minissistema em vazio.

Com os valores obtidos, o aluno pode concluir que ocorre um aumento na corrente que circula pela L.T. e também a ocorrência de sobretensões no início e no término da L.T.

4.3.2 Funcionamento do minissistema sob carga

Na segunda parte do relatório é feito o acompanhamento do minissistema sob carga, analisando os seguintes tópicos:

- ? Descrição do que ocorre com a tensão de saída da “máquina PEA” e com a frequência do sistema ao se conectar uma carga resistiva no final da linha de transmissão e quais são as medidas corretivas para que a tensão e frequência retornem aos seus valores nominais;
- ? Descrição do que ocorre com o sistema sob carga, quando se retira parte da compensação reativa;
- ? Descrição do que ocorre com o sistema sob carga, quando se desconecta a carga do mesmo.

O procedimento de inserção da carga no minissistema pode ser analisado pelo aluno por meio da observação dos valores de tensão na saída da “máquina PEA” e também da frequência no minissistema. A figura 26 mostra os respectivos valores medidos de tensões, correntes, frequência e potências do minissistema antes e depois da inserção da carga.

Figura 26 – Medições antes e depois da inserção da carga.

As medições obtidas pelo programa indicaram que a inserção da carga, refletindo na frequência do sistema e na tensão de saída do gerador, provocando uma diminuição da frequência e da tensão de saída do gerador, pois a carga irá buscar a energia necessária nos geradores do sistema. Ou seja, a velocidade destes geradores precisa ser aumentada, o que é conseguido por atuação dos controladores de velocidades dos geradores, que atuam para que a velocidade dos geradores cresça de forma a manter a frequência e tensão nominal.

O inverso também ocorre, ou seja, quando há uma rejeição da carga, os geradores precisam ter sua velocidade diminuída. A figura 27 indica a situação em que ocorre a rejeição de carga.

Figura 27 – Sistema sob carga: medições antes e depois da rejeição da carga.

As medições obtidas pelo programa indicaram que a rejeição da carga também refletiu na frequência do sistema e na tensão de saída do gerador, provocando um aumento da frequência e da tensão de saída do gerador, pois o torque resistente da máquina síncrona diminui e o torque oferecido pela máquina assíncrona é constante e determinada pelo inversor. Ou seja, a velocidade destes geradores precisa ser diminuída, o que é conseguido por atuação dos controladores de velocidades dos geradores, que atuam para que a velocidade dos geradores diminua de forma a manter a frequência e tensão nominal.

A análise da deficiência de compensação reativa do minissistema sob carga pode ser feita, observando os valores de tensões e correntes no minissistema com as chaves acionadas de forma a indicar os seguintes estados: minissistema sob carga com compensação reativa no início e no fim; minissistema sob carga sem

compensação reativa no fim da L.T.; e minissistema sob carga sem compensação reativa no início da L.T. A figura 28 mostra os estados do minissistema com os respectivos valores de tensões e correntes utilizados para análise da deficiência de compensação reativa com o sistema sob carga.

Figura 28 – Medidas de tensão e corrente com o minissistema sob carga.

Com os valores obtidos, o aluno pode concluir que ocorre um sensível aumento na corrente que circula pela L.T. e também a ocorrência de sobretensões no início e no término da L.T..

Além dos valores obtidos pelas medições simultâneas, o aluno pode descrever o funcionamento do minissistema sob carga nas diversas condições solicitadas pelo relatório da experiência, utilizando o diagrama de fasores em que se pode obter a informação de fase dos sinais de tensão e corrente. A figura 29 ilustra o diagrama de fasores do minissistema em vazio e sob carga.

Figura 29 – Diagrama de fasores do minissistema em vazio e sob carga.

4.3.3 Operação de paralelismo

Na terceira parte do relatório é feita a operação de paralelismo do minissistema com a concessionária de energia, observando os seguintes pontos:

- ? Descrição do funcionamento do sincronoscópio e também dos aspectos relacionados à tensão e à frequência no processo de sincronização;
- ? Descrição do que ocorre com a tensão e a frequência do minissistema, ao se conectar a carga, na condição de paralelismo;
- ? Descrição do que ocorre com o minissistema na condição de paralelismo, quando se retira parte da compensação reativa;
- ? Descrição do que ocorre com o minissistema na condição de paralelismo, quando se desconecta a carga do mesmo;
- ? Verificação da influência da barra infinita quando se tenta variar a velocidade do gerador;
- ? Descrição do que ocorre com o minissistema, sob carga, quando é desconectada a alimentação vinda da barra infinita.

O processo de sincronização envolve três ajustes: ajuste na concordância de fases, ajuste da tensão, e o ajuste da frequência do minissistema. O VI sincronoscópio virtual possibilita a verificação destes três ajustes a partir da tela do computador e auxilia também na compreensão do funcionamento do sincronoscópio de lâmpadas instalado na bancada experimental. A figura 30 indica a tela do sincronoscópio virtual antes e depois do processo de sincronização entre o minissistema e a concessionária de energia.

Figura 30 – Processo de sincronização.

A análise da deficiência de compensação reativa do minissistema sincronizado com a concessionária de energia pode ser feita da mesma forma que foi feito com o minissistema em vazio e sob carga.

A figura 31 mostra os estados do minissistema com os respectivos valores de tensões e correntes utilizados para análise da deficiência de compensação reativa com o sistema sincronizado.

Figura 31 – Medidas de tensão e corrente com o minissistema sincronizado.

Na análise de inserção ou rejeição de carga com o minissistema sincronizado com o barramento infinito, observa-se que a potência do barramento infinito é muito grande em relação à potência do minissistema, em que as variações de carga são absorvidas pelo barramento infinito, e acabam não sendo percebidas pelo minissistema.

A figura 32 indica as situações nas quais ocorrem a inserção e a rejeição de carga com o minissistema sincronizado com a concessionária de energia.

Figura 32 – Sistema sincronizado: medições antes e depois da rejeição da carga.

As medições obtidas pelo programa indicaram que a inserção ou a rejeição da carga com o minissistema sincronizado não impactou em grandes variações de

freqüência no minissistema, já que quem impõe a freqüência de rotação do gerador é o barramento infinito.

Uma vez conectado ao barramento infinito, a freqüência é mantida constante em 60 Hz. Portanto, ao se tentar variar a velocidade do gerador do minissistema, a única diferença que ocorre com o gerador é referente à troca de potências.

O aumento de velocidade da máquina assíncrona (turbina) provocará, na realidade, um aumento de torque fornecido a máquina síncrona (gerador), fazendo esta fornecer potência ativa ao barramento infinito. Por outro lado, se a velocidade ajustada na máquina assíncrona fornecer um torque menor do que o necessário para a condição de flutuação (situação em que não ocorre troca de potência entre minissistema e concessionária), fazendo com que a máquina síncrona seja “vista” pelo barramento infinito como um receptor, ou seja, recebendo energia para atuar como um motor e a máquina assíncrona atuar como carga.

A figura 33 mostra os valores das medidas simultâneas do minissistema nas condições em relação ao barramento infinito: flutuação, fornecendo energia e recebendo energia.

Figura 33 – Medições simultâneas em diferentes condições de paralelismo.

O VI osciloscópio virtual desenvolvido possibilita ao aluno a visualização do minissistema, operando como gerador síncrono por meio do controle da corrente de excitação da máquina síncrona. A figura 34 mostra o minissistema, operando como fonte de energia reativa capacitiva, como fonte de energia reativa indutiva e sem gerar energia reativa.

fonte de energia reativa capacitiva

fonte de energia reativa indutiva

sem fornecer energia reativa

Figura 34 – Minissistema operando como gerador síncrono.

5 POSSIBILIDADE DE USO EM ENSINO A DISTÂNCIA

O uso generalizado do computador como ferramenta de apoio ao ensino em cursos de graduação é incontestável. O computador é um poderoso elemento introduzido, principalmente nas últimas duas décadas, auxiliando o professor em todas as etapas de seu trabalho, seja na preparação, apresentação, aulas e avaliação.

Hoje em dia, além do computador, tem-se a Internet como a grande rede mundial que permite acesso à informação em escala global. Durante a última década, pode-se observar o rápido desenvolvimento das redes de computadores e da Internet. A *Web*³⁴, um dos serviços da Internet mais conhecidos, propiciou meios para disponibilizar e permitir acesso a grandes volumes de informações em formatos textuais ou multimídia. Estas características da *Web* são bastante promissoras para desenvolvimento de ambientes para Educação a Distância (EaD).

Como a demanda por cursos de engenharia em ambientes de EaD, vem aumentando e o laboratório experimental nestes cursos possui um papel importante no processo de ensino-aprendizagem, fazendo com que as instituições de EaD procurem métodos para oferecer aos seus estudantes a oportunidade de executar experiências em laboratórios que deverão ser disponibilizadas de forma presencial ou sob a óptica do Ensino a Distância.

5.1 Laboratórios Digitais

Os cursos de engenharia normalmente usam a *Web* no processo de ensino-aprendizagem através do emprego efetivo de alguns de seus recursos disponíveis, como por exemplo, temos o uso dos ambientes TelEduc e WebCT no apoio do ensino presencial. Entretanto, a necessidade de aulas práticas em laboratório está levando ao desenvolvimento de duas modalidades de uso da *Web* nos cursos de engenharia: Laboratórios Virtuais e Laboratórios Remotos.

³⁴ Um conjunto de documentos interligados em um sistema de hipertexto. O usuário acessa o *Web* através de uma *home page*.

5.1.1 Laboratórios virtuais

Para Albu et al (2004, p.140), um laboratório virtual é definido como “ambiente de desenvolvimento interativo para criar e conduzir experimentos simulados”. Um exemplo de laboratório virtual é o protótipo de ensino por meio de realidade virtual para a aprendizagem de fenômenos físicos desenvolvido por Mendes, Cardoso e Silva (2004) para simular os movimentos sob a ação da gravidade (lançamento de um projétil), incluindo movimentos uniformes e variados. A figura 35 mostra o ambiente virtual desenvolvido pelos autores.

Figura 35 – Ambiente virtual para o ensino de cinemática vetorial.

A criação deste ambiente de aprendizagem consistiu na simulação do lançamento de um projétil para atingir um alvo. Para operacionalização do cenário de aprendizagem, elaborou-se um conjunto de objetos educacionais: canhão, painel com as variáveis que interferem no fenômeno do lançamento oblíquo (velocidade, ângulo, coordenadas da bala, alvo). Esses objetos educacionais foram desenvolvidos para efetuar a interação, de tal forma que o usuário possa alterar parâmetros e visualizar o resultado imediato dessas alterações por meio da mudança de comportamento dos objetos virtuais dispostos no ambiente.

Outro exemplo de laboratório virtual pode ser a simulação do circuito elétrico utilizado na experiência Minissistema, em que a partir de algoritmos de análise

nodal, pode-se chegar a resultados similares aos reais que foram presenciados durante a experiência executada no laboratório.

Se a simulação for muito detalhada, o laboratório virtual pode ser um bom substituto para um laboratório real. Por meio da Internet estão reduzindo custos de equipamento e disponibilizando conceitos através do laboratório em cursos de EaD.

5.1.2 Laboratórios remotos

Segundo Álvares e Ferreira (2003, p.3), os laboratórios remotos são aqueles que “permitem que experimentos reais do laboratório sejam controlados remotamente por meio de uma conexão Internet via Web”. Os laboratórios são desenvolvidos, utilizando programas em C++ ou software comercial específico, tal como LabVIEW, que residem no computador local, coordenando os experimentos.

Os laboratórios remotos podem realizar experiências com a mesma veracidade de uma experiência realizada em um laboratório real, em que a diferença neste tipo de laboratório é a questão da não presença no local, cujo experimento é realizado.

Um exemplo é o laboratório remoto aplicado ao ensino de Engenharia Eletrônica, desenvolvido por Marchezan, Chella e Ferreira (2004), no qual são disponibilizados o conjunto de experiências propostas no laboratório convencional do curso de eletrônica industrial oferecido na graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Unicamp. A figura 36 mostra a interface gráfica do laboratório desenvolvido.

Figura 36 – Interface gráfica do laboratório remoto de eletrônica industrial.

As atividades desenvolvidas nestas experiências incluem: selecionar, por meio de chaves (relês), a associação de componentes eletrônicos de potência pré-definidos, levantando curvas através da variação dos valores de resistores (potenciômetro digital) para caracterizá-los. A visualização dos sinais é realizada pelo osciloscópio conectado à placa do experimento e ao computador.

Borges (2002, p.36) comenta que “existe a união da instrumentação virtual com novas tecnologias de *hardware* e *software* para controle de equipamentos à distância que vem trazendo ganhos nos processos de aprendizado”. Estes ganhos de aprendizado são refletidos nos avanços das tecnologias de EaD, em que os laboratórios remotos a partir de mecanismos e metodologias adequadas, viabilizam a execução de experiências de forma remota.

Ao associar a tecnologia da rede Internet com os instrumentos baseados em computador, criam-se meios para o desenvolvimento de ambientes de aprendizado no qual o aluno pode se envolver remotamente em atividades laboratoriais convencionais como se estivesse presente fisicamente no laboratório.

5.2 A Experiência Minissistema adaptada à Educação a Distância

O programa desenvolvido para automatizar a experiência Minissistema de Potência, descrito do capítulo 3, pode ser configurado através do próprio LabVIEW a fim de permitir o acesso remoto a sua interface gráfica, disponibilizando as medidas e o controle do arranjo experimental a computadores conectados a internet.

Este acesso remoto consiste da publicação na *Web* da interface gráfica do instrumento virtual, nos quais os parâmetros de controle podem ser ajustados na página da *Web* e enviados para o servidor que controla o experimento.

5.2.1 Ferramenta de publicação na web

As versões do LabVIEW anteriores a 7.1 possuíam uma interação com a Internet bastante complicada para programadores não familiarizados com o protocolo TPC/IP³⁵ utilizado na comunicação pela Internet.

O acesso ao instrumento virtual era feito com o desenvolvimento de um VI servidor e um VI cliente. O VI servidor era responsável pelo controle da experiência e comunicação via protocolo TCP/IP com os VIs clientes. Os VIs clientes eram responsáveis por apresentar aos usuários a interface gráfica do instrumento virtual localizado no VI servidor, realizando a comunicação via protocolo TCP/IP com o mesmo. Portanto, o acesso via Internet dos instrumentos virtuais era dificultada pela programação pouco amigável e a falta de praticidade para os usuários, que necessitavam baixar o arquivo do VI cliente para acessá-lo remotamente.

A dificuldade de comunicação pela internet e praticidade de acesso do instrumento virtual foi resolvida na versão 7.1 Professional do LabVIEW. Esta versão possui fácil interação com a Internet, permitindo que o usuário controle remotamente um instrumento virtual compartilhando dados para processamento, armazenamento ou monitoração. O acesso remoto do instrumento virtual é realizado através da configuração de um servidor de internet no computador em que está sendo executado o instrumento virtual. A configuração do servidor é feita de forma

³⁵ Acrônimo de *Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*; um protocolo desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos para a comunicação entre computadores.

janela aberta automaticamente, solicitando a instalação e execução deste aplicativo necessário para o acesso remoto do instrumento virtual via navegador da internet.

Figura 38 – Janela solicitando a execução do controle ActiveX.

O acesso pode ser concedido, usando recursos de segurança disponíveis por meio do software. Estes recursos podem ser senhas para acesso, que impeçam que a informação confidencial seja vista pelos usuários não autorizados. A figura 39 apresenta a ferramenta *Remote Panel Connection Manager*³⁹ do LabVIEW, que é responsável pelo gerenciamento das conexões remotas no servidor.

Figura 39 - Remote Panel Connection Manager do LabVIEW.

Uma vez que os instrumentos virtuais são publicados, o servidor pode conceder a qualquer computador a permissão de controlar o VI, mas também tem a capacidade de cancelar o controle a qualquer hora.

³⁹ O atalho dentro do LabVIEW 7.1 Professional para se encontrar a rotina *Remote Panel Connection Manager* é o seguinte: *Tools >> Remote Panel Connection Manager*.

5.2.2 Vantagens e desvantagens do acesso remoto

O acesso remoto da experiência Minissistema, possibilita o compartilhamento de uma única montagem experimental por diversas bancadas situadas no mesmo laboratório através de computadores ligados a rede do laboratório. A figura 40 mostra os computadores das bancadas do laboratório, acessando simultaneamente à experiência do minissistema.

Figura 40 – Acesso remoto da experiência pelos computadores da bancada.

Este acesso possibilita aos alunos um acompanhamento da própria bancada, das demonstrações feitas pelo professor que são feitas na montagem experimental ligada ao computador servidor que realmente possui o controle do minissistema.

A comunicação entre os computadores pela Internet apresenta uma largura de banda heterogênea com taxas de transmissão não determinísticas, que podem variar de 10 kbps (ligação discada) a mais de 100 Mbps em rede local (Fast Ethernet), dependendo da conexão e do tráfego.

Tendo limitação de largura de banda, as aplicações em tempo real para captura de vídeo apresentam sérias restrições. Outra limitação é o delay (atraso) inerente ao protocolo TCP/IP, o que não é desejável para aplicações em tempo real.

A experiência realizada no laboratório apresentou bons resultados na rede local dentro do próprio laboratório, não repetindo o mesmo resultado quando acessado de fora da rede local devido a limitações de largura de banda e do tráfego na rede.

CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu mostrar os resultados de um projeto no qual foi utilizado o software LabVIEW 7.1 Professional para automatizar a aquisição, tratamento, visualização e armazenamento de sinais de um minissistema de potência. É possível citar como vantagens do uso desta ferramenta de aquisição e tratamento de dados, a possibilidade de monitorar muitos pontos simultaneamente e também a possibilidade de gravar os dados em arquivo para posterior análise no próprio LabVIEW ou em outra ferramenta como o MATLAB, MathCad, Mathematica ou outro programa similar.

Desta maneira, o aluno poderá se concentrar para ter uma visão mais ampla do processo, dos dados adquiridos e tratados pelo sistema. Permitindo assim mais subsídios para analisar os fenômenos envolvidos nas experiências, no qual, segundo Perreira e Bazzo (1997, p. 48): “reconhecido o aluno como não neutro, e mais, como detentor de uma história pregressa, da qual se encontra pleno, história esta que foi haurida em construções baseadas em experiências próprias, este indivíduo passa ser ativo em todos os processos de que participa”.

É neste intuito que o presente trabalho busca não desassociar a ação do engenheiro na sociedade tendo em vista seu papel interativo na construção da própria história.

O importante é que os novos recursos, como o computador, não sejam usados apenas como instrumentos, mas se tornem capazes de desencadear transformações estruturais na velha escola. “Só assim a função do professor pode ser revitalizada, libertando-o da aula de saliva e giz, estimulando o aluno a uma posição menos passiva e mais dinâmica” (ARANHA, 1989).

A simples incorporação das novas tecnologias no ensino não significa modernidade, muito pelo contrário, “dependendo da forma como for utilizada pode reafirmar velhas práticas pedagógicas que vêm se mostrando ultrapassadas frente à nova dinâmica exigida pela sociedade atual, além de aumentar a dependência em relação à tecnologia” (MERCADO, 1999).

Conforme Mercado (1999) isso contribui para o insucesso a falta de identificação dos objetivos, a ênfase sobre o meio e não sobre a mensagem, a

resistência a mudanças, a falta de um sistema de apoio, a falta de domínio, por parte dos professores, das novas tecnologias, os custos excessivos de *softwares* e computadores e, por fim, uma escolha equivocada do *software*. Todas estas causas devem ser evitadas, através de um bom planejamento, sob pena de desqualificar o ensino.

É fundamental a redução de custo na montagem dos laboratórios, no qual a instrumentação virtual possibilita vários arranjos experimentais, utilizando o mesmo *hardware* de aquisição de dados e controle, fornecendo um novo modelo de construção de sistemas de automação e medição em laboratórios didáticos.

A chave do sucesso, da instrumentação virtual, inclui o rápido avanço do computador associado com o seu desenvolvimento a baixo custo e alta performance. Estes fatores estão tornando a instrumentação virtual acessível a uma enorme gama de usuários.

A automação realizada na experiência do minissistema possibilita ao aluno concentrar a sua atenção nas principais alterações das variáveis elétricas envolvidas com o minissistema, provocadas por alterações dos estados das chaves, e também agilizar o processo de obtenção das medições necessárias para a confecção do relatório da experiência.

O novo arranjo experimental proporciona certa flexibilização no desenvolvimento do roteiro experimental, em que podem ser utilizadas cargas simuladas por resistores-indutores-capacitores, motores de indução, lâmpadas e composições de retificadores e inversores com motores de CC e motores de indução.

A utilização do inversor de frequência no controle da máquina assíncrona para simular a turbina no minissistema possibilita, por meio da alteração do modo de operação a possibilidade de trabalhar com a máquina ligada ao minissistema tanto com frequência constante como também com torque constante.

Com a combinação destes diversos elementos, pode-se simular uma grande quantidade de montagens experimentais, permitindo, assim, visualizar, explorar e reforçar uma série de conceitos teóricos da área de energia elétrica.

O desenvolvimento de ferramentas de educação à distância baseadas na *Web* abre um grande leque de possibilidades, democratizando o ensino, permitindo que pessoas separadas fisicamente da escola possam ter acesso a um ensino barato e de qualidade.

A possibilidade de comunicação escrita, falada e visual a partir da Internet permite que pessoas com pouca flexibilidade realizem cursos à distância, permitindo que empresas possam treinar seus funcionários com um custo muito baixo e sem a necessidade de deslocamento.

As novas ferramentas que estão sendo desenvolvidas facilitam não somente a comunicação e a troca de conhecimentos, mas também, a colaboração entre os participantes. A realização de trabalhos em grupo, mesmo que os personagens estejam distantes uns dos outros, sem a necessidade de sincronismo de horários, permitindo a flexibilidade no processo de aprendizado e à colaboração entre participantes.

Estes experimentos reais controladas pela Internet motivam os estudantes, desenvolvendo abordagem de resolução de problemas reais de engenharia.

Outro aspecto a considerar, é que não havendo a necessidade de presença física do aluno no laboratório, elimina-se a necessidade de instalações espaçosas, o que pode representar diminuição nos custos.

Disponibilizando a experiência do Minissistema para execução remota a partir de outras bancadas pelos alunos, pretende-se avaliar aspectos quanto à funcionalidade do sistema em uma situação real de aplicação, facilidade de utilização e confiabilidade. Estas informações fornecerão subsídios para implementação das futuras versões do laboratório remoto.

“Além da base teórica necessária apresentada em geral na forma de aulas e materiais de leituras, a experiência de fazer (*hands-on*⁴⁰) proporcionada pelos laboratórios são elementos vitais na formação do profissional de engenharia” (HUA e GANZ, 2003, p.1). Contudo, configurar e manter um laboratório disponível por longos períodos tem custo alto. Com um laboratório remoto, pode-se otimizar a utilização de recursos, podendo disponibilizá-lo para mais de uma instituição de ensino e atender um número maior de alunos.

A implementação deste trabalho permitiu pensar em outros tipos de aplicação para aquisição e tratamento de dados de um minissistema de potência. Atualmente, conforme Grimoni, Lopes e Nakao (2007), um estudante em final de curso desenvolve uma aplicação de curva de corrente em função do tempo de um relé de

⁴⁰ Prático. Envolve o trabalho interativo em um computador ou programa. Um tutorial prático, por exemplo, ensina uma tarefa (como o uso de um programa) através de sessões práticas e diálogos baseados em perguntas e respostas.

sobrecorrente que pode desligar o circuito, usando o sinal de *trip* do próprio relé. O LabVIEW permite a implementação de diversos tipos de curva de corrente, como por exemplo as curvas presentes nas normas IEC.

Outros tipos de relés poderiam ser implementados, como relés: direcionais, de sobretensão, de impedância e diferenciais usados para proteger transformadores, geradores, motores, barramentos e linhas.

Outra aplicação é o estudo de curto circuito, usando dados medidos em várias situações de curto controlados no minissistema de potência. Curto circuitos fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra ou trifásicos montados utilizando reatores para reduzir os valores das correntes, podem ser implementados permitindo aquisição e o tratamento dos dados possibilitando a visualização das componentes simétricas de tensões, correntes e fases, e os valores de linha de forma numérica e fasorial.

É possível implementar o controle da excitação do campo do gerador, controlando a corrente contínua aplicada a bobina de campo, e também controlar a velocidade do motor de indução através do inversor que controla a tensão para simular o sistema de controle automático de velocidade da turbina e tensão na saída do gerador.

Com o uso de uma carga não linear, é possível ver a real propagação das componentes Harmônicas, fluindo pelos elementos do minissistema, como transformadores e modelos de linhas de transmissão. As conexões do transformador poderiam modificar ou eliminar alguns tipos de harmônicas, afetando sua composição em diferentes níveis de tensão do circuito. O uso de filtros ativos e passivos em pontos estratégicos poderia mudar o nível de propagação de harmônicas no circuito, protegendo alguns tipos de elementos do circuito que são sensíveis a presença de harmônicos.

Além dessas implementações, as medidas elétricas obtidas a partir do modelo reduzido do sistema de potência poderiam ser comparadas com os valores obtidos através de simulação, por exemplo, utilizando o programa ATP (*Alternative Transients Program*) que, segundo Leuven (1987), permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por meio de um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de *Bergeron*) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados.

Este programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, etc. De uma forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em sequência (zero e positiva), dependendo do modelo.

Para o modelo de uma linha de transmissão, é possível a obtenção da solução em regime permanente, sendo impressos todas as tensões de barras, fluxos de potência e correntes nos ramos da rede em estudo. O programa permite também a obtenção de valores de potência e energia em determinados elementos da rede.

REFERÊNCIAS

ALBU, M. M.; HOLBERT, K. E.; HEYDT, G. T.; GRIGORESCU, S. D.; TRUSCA, V. Embedding remote experimentation in power engineering education. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 1, p. 139-143, feb. 2004.

ÁLVARES, A. J.; FERREIRA, J. C. E. Metodologia para implantação de laboratórios remotos via internet na área de automação da manufatura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia - MG. Disponível em: <www.grima.ufsc.br/papers/PaperLabsRemotosFinal.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2006.

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 ENGENHARIA, 23., 1997, Salvador – BA. **Anais...** Salvador: Abenge, 1997. p.115-138.

ARANHA, M. L. A. **História da Educação**. São Paulo: Moderna, 1989. 288 p.

BORGES, A. P. **Instrumentação virtual aplicada a um laboratório com acesso pela internet**. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CONSONNI, D.; AZEVEDO, M. F.; BERNARDO NETO, O.; ROGERI, R. C. Applications of virtual instruments in electrical engineering education. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING EDUCATION AND RESEARCH, Prague, Czech Republic, 2004. **Anais ...** Prague: International Network for Engineering Education and Research, 2004. p. 1075-1088.

EMANUEL, A. E. Powers in nonsinusoidal situations a review of definitions and physical meaning. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 3, p. 1377-1389, jul. 1990.

FERRERO, A. Software for personal instruments. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 39, n. 6, p. 860-863, dec. 1990.

FILIPSKI, P. S; BAGHZOUZ, Y; COX, M. D. Discussion of power definitions contained in the IEEE dictionary. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 3, p. 1237-1244, jul. 1994.

GOLDBERG, H. What is virtual instrumentation? **IEEE Instrumentation and Measurement Magazine**, v. 3, i. 4, p. 10-13, dec. 2000.

GRANDINI, N. A.; GRANDINI, C. R. Os objetivos do laboratório didático na visão dos alunos do curso de licenciatura em física da UNESP. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Bauru, v. 26, n. 3, p. 251–256, jun. 2004.

GRIMONI, A. B.; LOPES, V. J. S.; NAKAO, O. S. Using labview in a mini power system model allowing remote access and new implementations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING EDUCATION, 2007, Coimbra, Portugal. **Anais...** Coimbra: International Network for Engineering Education and Research, 2007.

GRIMONI, J. A. B.; SENGGER, E. C. Sistema de aquisição de dados para um mini sistema de potência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 24., 1998, São Paulo – SP. **Anais...** São Paulo: Abenge, 1998. p. 3355-3362.

GUIMARÃES, A. B; PEREIRA, T. R. D. S. A formação do profissional de engenharia frente às inovações tecnológicas computacionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO ENGENHARIA, 31., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Abenge, 2003. 1 CD-ROM.

HUA, J.; GANZ, A. A new model for remote laboratory education based on next generation interactive technologies. /Artigo/. Disponível em: <<http://www.conferenceexp.com/community/Library/Papers/aseeivlab.pdf>>. Acesso em 25 jan. 2005.

JIMÉNEZ-MARTÍNEZ, J. M.; SOTO, F.; JÓDAR, E. DE; VILLAREJO, J. A.; ROCA-DORDA, J. A new approach for teaching power electronics converter experiments. **IEEE Transactions on Education**, v. 48, n. 3, p. 513-519, aug. 2005.

JOHNSON, G. W. **LabVIEW Graphical Programming: Practical Applications in Instrumentation and Control**. New York: McGraw-Hill, 1997. 637 p.

KÖGLER JUNIOR, J. E. Instrumentação virtual: PSI 2222 – prática em eletricidade e eletrônica. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. Apostila. Disponível em: <www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/Inst.Virtual_apost1.pdf> Acesso em: 12 jan. 2006.

LEUVEN, K.U. **ATP: Alternative Transients Program Rule Book**. Leuven EMTP Center, 1987.

LOPES, V. J. S.; GRIMONI, J. A. B. Utilizando o labview em uma experiência de mini sistema de energia possibilitando acesso remoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO ENGENHARIA, 33., 2005, Campina Grande – PB. **Anais...** Campina Grande: Abenge, 2005. 1 CD-ROM.

MARCHEZAN, A. R.; CHELLA, M. T.; FERREIRA, E. C. Laboratório remoto aplicado ao ensino de engenharia eletrônica. /Artigo/. Disponível em: <<http://inf.unisul.br/~ines/workcomp/cd/pdfs/2211.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2006.

MENDES, E. B.; CARDOSO, A.; SILVA, L. F. Um protótipo de ensino virtual orientado por modelo psico-pedagógico. In: CONGRESSO NACIONAL DE AMBIENTES HIPERMÍDIA PARA APRENDIZAGEM, 1., 2004, Florianópolis – SC. **Anais...** Disponível em: <www.conahpa.ufsc.br/2004/artigos/Tema1/05.pdf>. Acesso em 30 mai. 2007.

MERCADO, L. P. L. **Formação Contínua de Professores e Novas Tecnologias**. Maceió: Edufal, 1999. 176 p.

MODLER, L. F. A; FEIL, M. S. Características, possibilidades e limitações de um software como ferramenta de apoio para o ensino das disciplinas do curso de engenharia civil da UNIJUÍ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO ENGENHARIA, 31., 2003, Rio de Janeiro – RJ. **Anais...** 1 CD-ROM.

MORAN, J. M; MASSETTO, M. T; BEHRENS, M. A. **Novas tecnologias e mediação pedagógica**. Campinas: Papirus, 2000.173 p.

NAKAO, O. S. **Aprimoramento de um curso de engenharia**. 2005. 338 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NATIONAL INSTRUMENTS. Introduction to data acquisition. /Tutorial/. Disponível em: <[ftp://ftp.ni.com/pub/devzone/pdf/tut_3536.pdf](http://ftp.ni.com/pub/devzone/pdf/tut_3536.pdf)>. Acesso em 20 out. 2006a.

_____. LabVIEW fundamentals. /Manual/. 2005. Disponível em: <www.ni.com/pdf/manuals/374029a.pdf>. Acesso em 30 ago. 2005.

_____. Long-term instrument control and connectivity solutions. /Home Page/. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3606>>. Acesso em 20 out. 2006b.

PAULA, A; PEREIRA, J. C. Comparação entre algoritmos para medição de energia elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 13., 2000, Florianópolis – SC. **Anais...** Arquivo recebido por <pereira@sel.eesc.usp.br> em 03 jun. 2003.

PERREIRA, L. T. V; BAZZO, W. A. **Ensino de Engenharia:** na busca do seu aprimoramento. Florianópolis: Editora da UFSC, 1997. 167 p.

SELLSCHOPP, F. S.; ARJONA, M. A. An automated system for frequency response analysis with application to an undergraduate laboratory of electrical machines. **IEEE Transactions on Education**, v. 47, n. 1, p. 57-64, feb. 2004.

VALENTE, J. A. O uso inteligente do computador na educação. **Pátio – Revista Pedagógica**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 19-21, mai. 1997.

APÊNDICE A – Código Fonte

VI: Principal.vi

Diagrama de Bloco

Cases Escondidos

SubVI: *potencias.vi*

Diagrama de Bloco

SubVI: *controle_telas.vi*

Diagrama de Bloco

Cases Escondidos

SubVI: *grafico_fasores.vi*

Diagrama de Bloco

SubVI: coordenadaspolares.vi

Diagrama de Bloco

SubVI: referencia.vi

Diagrama de Bloco

SubVI: *osciloscopio.vi*

Diagrama de Bloco

Cases Escondidos

SubVI: *filtra_fundamental.vi*

Diagrama de Bloco

Cases Escondidos

SubVI: *frequencia.vi*

Diagrama de Bloco

SubVI: *sincronoscopia.vi*

Diagrama de Bloco

APÊNDICE B – Manual de Instalação do Programa Minissistema

O programa Minissistema foi desenvolvido com o software LabVIEW 7.1 Professional. O sistema operacional que suporta esta aplicação é o Windows 2000/NT 4.0 Service Pack ou superior, portanto o programa não é executado nas plataformas Windows Me/98/95.

Para realizar a instalação do programa, execute os passos seguintes:

- ? Colocar a pasta “Telas Minissistema” no diretório C:\, sem alterar o nome da pasta;
- ? Instalar a placa PCI NI-DAQ 6023E como o software *Measurement & Automation Explorer*;
- ? Para configurar a placa de aquisição de dados PCI 6023E execute o programa *Measurement & Automation* e faça as seguintes configurações:
 - I. Em *Configuration*, selecione:
My System >> Devices and Interfaces >> Traditional NI-DAQ Devices >> PCI-6023E >> Properties (vai abrir uma janela).
 - II. Na opção AI, tem que selecionar:
Polarity/ Range: -10V – + 10V
Mode: Referenced Single Ended
 - III. Click em **Aplicar** e em seguida **OK**.
- ? Altere a resolução do monitor para 1024 x 768 pixels;
- ? Instale o programa Minissistema, executando o arquivo *setup.exe* que está dentro da pasta *Installer*. Siga os passos do instalador;
- ? Ajustar os *jumpers* da placa de condicionamento para o modo: saída digital.

APÊNDICE C – Procedimento de Operação Automatizado

Para a realização da experiência são necessários os seguintes equipamentos:

- ? 1 inversor de frequência 220V – 2kVA;
- ? 1 retificador monofásico;
- ? 2 chaves facas seccionadoras trifásicas;
- ? 1 caixa de resistência de 60 Ohms, em duplo delta;
- ? 6 indutores pequenos;
- ? 4 contatores;
- ? 9 sensores de tensão;
- ? 3 sensores de corrente;
- ? 1 amperímetro 1A;
- ? 1 voltímetro 300V;
- ? 1 placa de condicionamento de sinais;
- ? 1 computador padrão PC equipado com placa de aquisição de sinais.

O procedimento de operação do minissistema automatizado consiste nos seguintes passos:

1. Ligue o filtro de linha atrás do quadro dos bornes;
2. Ligue o computador e espere a inicialização do sistema operacional;
3. Energize a bancada puxando o botão vermelho indicado na figura 01;

Figura 1 – Dispositivos de controle de tensão e frequência.

4. Verificar se o ajuste de freqüência no inversor de freqüência e o de corrente de excitação da máquina síncrona se encontra na posição de mínimo valor (os *diais* devem estar posicionados até o fim de curso do sentido anti-horário). A figura 1 indica os *diais* de ajuste de freqüência e corrente de excitação (I_{exc});
5. Rodar o programa Minissistema já instalado no computador da bancada experimental. O programa é acessado a partir do seguinte atalho:
Iniciar >> Programas >> Minissistema >> Minissistema
6. Ligar a placa de condicionamento indicada na figura 2. O led vermelho central deve permanecer ligado (caso não ligue, desligue e ligue novamente a placa);

Figura 2 – Placa de condicionamento

7. Ligue o inversor de freqüência no botão verde presente ao lado do dial de freqüência;
8. Ajuste o dial de freqüência até obter o valor de 60 Hz no painel do inversor;
9. Ajuste a dial da corrente de excitação até obter o a valor de 127 Volts em V_a' ;

ANEXO B – Procedimento de Operação Sem Automação

Para a realização da experiência eram necessários os seguintes equipamentos:

- ? 1 variac trifásico;
- ? 1 ponte retificadora, trifásica;
- ? 1 reostato de partida para máquina C.C. (22 Ohms – 10 A – 2 HP);
- ? 1 reostato de 700 Ohms / 0,6A para o campo da máquina C.C.;
- ? 1 reostato de 4500 Ohms para o campo da máquina síncrona;
- ? 1 sincronoscópio;
- ? 1 caixa de resistência de 60 Ohms, em duplo delta;
- ? 7 chaves facas seccionadoras, sendo 2 bifásicas e 5 trifásicas;
- ? 12 indutores pequenos;
- ? 1 freqüencímetro para 60Hz – 220V;
- ? 4 amperímetros, sendo dois de 1A e dois de 10A;
- ? 5 voltímetro, sendo três de 300V e dois de 300/600V;
- ? 4 Wattímetros analógicos.

O procedimento de operação do minissistema consistia nos seguintes passos:

- I. Antes da alimentação, deviam-se observar os seguintes pontos:
 - ? O variac trifásico deve estar na posição de mínima tensão;
 - ? O reostato de campo (700 Ohms) da máquina de corrente contínua deve ser ajustado na posição: mínima resistência / máxima corrente;
 - ? O reostato de campo (4500 Ohms) do gerador síncrono deve ser ajustado na posição: máxima resistência / mínima corrente.
 - ? Somente a chave faca, que secciona os indutores na extremidade final da linha de transmissão com origem no gerador, é que deve ficar fechada. Todas as outras devem ficar abertas.
- II. Para iniciar a operação, devem-se seguir os seguintes passos:
 - ? Alimentar o variac e ajustá-lo até obter 220V na saída do retificador;
 - ? Fechar a chave faca de proteção e girar lentamente o reostato de partida até o fim do curso (travando-o). Em seguida ajustar o reostato de campo da máquina C.C. até obter a velocidade de 1800 rpm;

- ? Fechar a chave faca de energização do enrolamento de campo do gerador síncrono e ajustar o reostato de campo até obter, mais ou menos, 220V.

ANEXO C – Diagrama elétrico do quadro de comando

ANEXO D – Relatório da Experiência Minissistema

PEA 2406 – LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

EXPERIÊNCIA 4 – MINI SISTEMA DE POTÊNCIA

RELATÓRIO

NOTA

.....

Grupo:.....

Professor:..... **Data:**.....

Objetivo:.....

1. Acompanhamento do funcionamento do mini sistema em vazio:

Nesta parte da experiência, o professor irá demonstrar aos alunos o funcionamento do mini sistema de potência, descrevendo:

- Como é simulado o elemento gerador de energia (“máquina PEA”);
- Como se efetua o controle de velocidade (frequência) e tensão da “máquina PEA”;
- Qual a topologia do sistema: “máquina PEA”; linhas de transmissão e suas respectivas compensações reativas; carga resistiva; barramento infinito (“ELETROPAULO”);
- Quais os equipamentos de medição e suas respectivas funções no processo de supervisão e controle.

1.1. Diagrama Unifilar:

A partir da descrição do mini sistema de potência, desenhe o diagrama unifilar do mesmo, indicando todos os seus elementos topológicos.

1.2. Funcionamento da “máquina PEA”:

Descreva como é feita a alimentação do motor que simula o elemento gerador da “máquina PEA”, identificando como é exercido o controle de velocidade da mesma.

.....

.....

.....

.....

.....

1.3. Identificação dos equipamentos de medição:

Identifique todos os equipamentos de medição envolvidos na simulação em vazio, descrevendo suas funções no processo de aquisição das informações e, por conseguinte, no processo de controle da frequência (“máquina PEA”) e da tensão (“máquina PEA” e sistema de transmissão).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

1.4. Análise da deficiência de compensação reativa em linha sob tensão:

Descreva o que ocorre com o sistema em vazio, quando se retira parte da compensação reativa.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Acompanhamento do funcionamento do mini sistema sob carga:

2.1. Inserção da carga:

Descreva o que ocorre com a tensão de saída da “máquina PEA” e com a frequência do sistema ao se conectar a carga resistiva (final da linha de transmissão que sai da “máquina PEA”).

.....

.....

.....

.....

2.2. Medidas corretivas:

Quais as medidas corretivas a serem levadas a termo para que a tensão e frequência retornem aos seus valores nominais?

.....

.....

.....

.....

2.3. Análise da deficiência de compensação reativa em linha sob tensão:

Descreva o que ocorre com o sistema sob carga, quando se retira parte da compensação reativa.

.....

.....

.....

.....

2.4. Rejeição de carga:

Descreva o que ocorre com o sistema sob carga, quando se desconecta a carga do mesmo.

.....

.....

.....

.....

3. Ligando o sistema da “ELETROPAULO” em paralelo com o mini-sistema:

3.1. Funcionamento do Sincronoscópio:

Descreva o sincronoscópio e seu funcionamento no processo de sincronização entre os dois sistemas.

.....

.....

.....

.....

.....

3.2. Sincronizando os dois sistemas (com carga desconectada):

Descreva o processo de sincronização, levando em conta os aspectos relacionados à tensão e à frequência. O que aconteceria se tentássemos conectar os dois sistemas quando as lâmpadas do sincronoscópio estivessem acesas?

.....

.....

.....

.....

.....

3.3. Efeito da conexão da carga no mini sistema:

Descreva o que ocorre com a tensão e a frequência do mini sistema, ao se conectar a carga, na condição de funcionamento em paralelo com o “sistema ELETROPAULO”.

.....

.....

.....

.....

.....

3.4. Análise da deficiência de compensação reativa em linha sob tensão:

Descreva o que ocorre com o sistema, quando se retira parte da compensação reativa.

.....

.....

.....

.....

3.5. Rejeição de carga:

Descreva o que ocorre com o sistema sob carga, quando se desconecta a carga do mesmo.

.....

.....

.....

.....

3.6. Influência da barra infinita:

Descreva o que ocorre com a frequência da "máquina PEA" ao se tentar variar a velocidade de seu gerador.

.....

.....

.....

.....

3.7. Perda de despacho:

Descreva o que ocorre com o mini sistema sob carga, ao se desconectar a alimentação vinda da barra infinita. Quais as consequências disto num grande sistema de potência?

.....

.....

.....

.....

.....

.....