

LABORATÓRIOS INTEGRADOS PARA CONTROLE DE PROCESSOS E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS INDUSTRIAIS

Francisco José Gomes e Danilo Pereira Pinto

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia
Campus Universitário – Bairro Martelos
36036-330 – Juiz de Fora - MG

chico.gomes@ufjf.edu.br ; danilo.pinto@ufjf.edu.br

Resumo: *O trabalho apresenta uma proposta conceitual, e sua implementação prática, de laboratórios integrados para controle de processos e análise da eficiência energética de sistemas industriais. Baseado em um diagnóstico do curso e das novas demandas colocadas para o engenheiro eletricitista em seu trabalho com sistemas industriais, propôs-se a implementação de um laboratório integrado, flexível, com ambiência industrial que possibilita o desenvolvimento de competências na operação com sistemas industriais. Integrado por uma planta de processos contínuos, com controle das quatro variáveis básicas de processos, e por quatro bancadas que possibilitam a análise da eficiência energética das principais cargas industriais, o Laboratório funciona de forma aberta, atendendo à graduação, cursos de extensão, pós-graduação e possibilitará a realização de intercâmbios estudantis.*

Palavras-chave: *Sistemas Industriais, Controle de Processos, Eficiência Energética, Laboratórios na Educação em Engenharia*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Novas Diretrizes Curriculares

A legislação educacional brasileira atual¹ determinou, na construção dos currículos dos cursos de graduação, o fim dos currículos mínimos obrigatórios enquanto as Diretrizes Curriculares (DC) incorporaram a flexibilização curricular, trazendo avanços significativos na formação do engenheiro. As DC trazem em seu bojo a intenção de mudar a base filosófica do curso de Engenharia, enfocando-o na competência e na busca de uma abordagem pedagógica “centrada no aluno com ênfase na síntese e na transdisciplinaridade”. Prega ainda a “valorização do ser humano e preservação do meio ambiente, integração social e política do profissional, possibilidade de articulação direta com a pós-graduação e forte vinculação entre teoria e prática” [Pinto, 2003].

Estas mudanças criaram a necessidade de significativa reestruturação na formação dos engenheiros e, conseqüentemente, na atividade docente, tendo em vista a mudança de foco no processo ensino-aprendizagem, onde o aluno passa a ser o centro do processo, na gestão acadêmica dos cursos, na avaliação discente, docente e institucional.

¹ Lei 9.394 de 20 de dezembro de 1996 que estabeleceu as “Diretrizes e Bases da Educação Nacional” (LDB) e Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia (DC), Resolução CNE/CES 11/2002.

As escolas de engenharia, em sua maioria, ou não se adaptaram ou estão se adaptando muito lentamente às novas exigências na legislação e continuam formando profissionais com base em currículos cuja organização dificulta a integração entre as diversas disciplinas. O estudante tem dificuldades para ver sua inter-relação prática no desenvolvimento de projetos ou execução de determinados empreendimentos. Isto sem mencionar os aspectos didáticos que acabam por agravar a “aprendizagem”, devido a metodologias de ensino que consideram muito mais a questão do “como ensinar” do que o “como aprender”.

De uma maneira geral, a maioria destes estudos aponta para uma necessidade de melhorias, ou mesmo de superação do modelo atual de organização dos cursos de engenharia, pressupondo desde uma revisão das modalidades, passando por proposições de reestruturação curricular e de formatação de conteúdos, até a mudança de aspectos relacionados a concepções pedagógicas e de metodologias de ensino/aprendizagem praticadas [Pinto, 2001]. Dentre todos estes aspectos abordados um aspecto essencial engloba a concepção, o projeto e a utilização dos laboratórios didáticos.

1.2. Laboratórios na Educação em Engenharia

A engenharia é uma profissão prática, direcionada ao aproveitamento e modificação dos recursos fundamentais que a humanidade dispõe para criação de toda a tecnologia: energia, materiais e informação (...). Portanto, desde os primeiros dias da educação em engenharia, laboratórios didáticos têm constituído parte fundamental da graduação e, em muitos casos, da pós-graduação. Pode-se mesmo afirmar que, anteriormente à ênfase na componente científica da engenharia, a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios [Feisel, 2005].

Sua utilização, contudo, deve estar associada a uma visão clara dos objetivos educacionais pretendidos com sua utilização, que perpassa o tipo de formação propiciada pelo curso. É conhecido o ditado: “Se você não sabe onde deseja ir, então não sabe que caminho tomar e nem mesmo se já chegou onde deseja”. Aplicada à educação em engenharia a frase coloca um questionamento sobre a correta utilização dos laboratórios, cuja resposta passa por algumas considerações.

Inicialmente, torna-se necessário distinguir entre três tipos de laboratórios utilizados na engenharia: desenvolvimento, pesquisa e educacional, cada qual com atribuições bem-definidas. Enquanto o laboratório de desenvolvimento trabalha assuntos mais imediatos, buscando responder questões e levantar dados para subsidiar projetos, bem como verificar se um projeto funciona como planejado, o de pesquisa alarga o conhecimento, de forma generalizada e sistematizada, sem aplicação específica em mente. Já o educacional deve propiciar aos estudantes a oportunidade de desenvolver sua formação técnica e construir o aprendizado de conhecimentos que os engenheiros, supostamente, dominam [Feisel, 2005].

Estando este trabalho focado em laboratórios didáticos, entram em pauta questionamentos mais pedagógicos: que características um laboratório de engenharia, de forma geral, deve possuir para propiciar a formação desejada ao estudante? Peterson [2002] prioriza treze aspectos nos quais os estudantes devem estar capacitados ao final de um curso laboratorial: aplicar e utilizar instrumentação; entender e utilizar modelos conceituais; realizar experimentos práticos; coletar, analisar e interpretar dados; executar um projeto sob demanda; aprender com as falhas e erros; desenvolver a criatividade; desenvolver a capacidade psicomotora; ter compreensão da segurança do trabalho; comunicar, de forma oral e por escrito, os resultados e conclusões obtidas; trabalhar em equipe; desenvolver uma postura ética e utilizar os sentidos para apreensão de informações.

A estas características associam-se ainda outras especificidades para a educação em engenharia, onde Balchen (1981) relaciona demandas às quais os procedimentos laboratoriais

devem responder: demonstrar idéias importantes; refletir problemas práticos relevantes; possuir escalas de tempos apropriadas; fornecer sensações acústicas e visuais; não devem ser perigosas; devem ser de baixo custo e não apresentar complexidades para o usuário.

O presente trabalho analisa o projeto conceitual e a implementação prática de Laboratórios integrados de Processos Contínuos e de Sistemas Motrizes, ligados ao Laboratório de Eficiência Energética LEENER, da Universidade Federal de Juiz de Fora. Serão discutidos o enfoque conceitual adotado, o perfil profissional buscado para o engenheiro formado e as soluções encontradas para responder às estas questões, inclusive colocando alternativas à grade curricular convencional. O trabalho está dividido como segue: a seção 2 efetua uma análise do curso, a seção 3 discute o projeto conceitual e a implementação do laboratório de Processos Contínuos, a seção 4 discute o Ambiente de Sistemas Motrizes. A filosofia de utilização, bem como as conclusões, são discutidas na seção 5, encerrando o trabalho.

2. A REALIDADE DO CURSO

2.1. Diagnóstico da Área de Sistemas Industriais

O projeto de um laboratório para educação em engenharia deve se basear em duas considerações básicas: a realidade do curso no qual estará inserido e o tipo de formação que o aluno deve desenvolver neste ambiente. No primeiro aspecto vale ressaltar que, desde 1963, quando foi implementado, o curso de Engenharia Elétrica da UFJF teve como enfoque principal a área de Sistemas Elétricos de Potência, decorrência natural de sua estrutura anterior que formava engenheiros civis com atribuições em Eletrotécnica. Esta ênfase ainda é predominante no curso, embora reformulações curriculares tenham introduzido alterações disciplinares. Uma análise sucinta, contudo, destaca pelo menos dois aspectos graves relacionados ao projeto, controle, operação e otimização de sistemas industriais:

a) Na área de controle e automação de processos industriais, o curso disponibiliza somente duas disciplinas obrigatórias, Teoria de Controle I e II, ministradas nos 6^o e 7^o períodos, cujas ementas mostram forte aderência à teoria de sistemas lineares e uma base introdutória, meramente conceitual, relacionando aspectos do controle de processos industriais. A ausência programática de temas diretamente ligados à prática do controle de processos industriais e/ou automação, associada à base estritamente conceitual adotada, sem atividades de laboratório, impede o contato dos alunos com as complexidades subjacentes à realidade do controle e automação de processos industriais;

b) Inexistem tópicos que enfoquem a questão da otimização energética de sistemas motrizes industriais (motor elétrico - acoplamento - carga mecânica), que constituem as cargas de maior consumo de energia elétrica no país e onde, provavelmente, se encontram as maiores perdas de energia. Na área de sistemas industriais, são disponibilizadas as disciplinas obrigatórias de Instalações Elétricas I, no 6^o período (instalações residências e prediais); Instalações Elétricas II, no 7^o período (instalações industriais); Eletrotécnica Aplicada I, no 8^o período (controle de velocidade de motores e acionamento de máquinas); e a disciplina opcional, Eletrotécnica Aplicada II, no 9^o período (estudos de curto-circuito industrial para o dimensionamento e especificação de comando e proteção, barramentos elétricos, grupo gerador de emergência e nobreak).

2.2. Necessidades: Controle de Processos e Eficiência Energética de Sistemas Motrizes

O tema da educação em controle tem sido recorrente, de forma crescente, nos últimos anos, assinalando-se a expansão de artigos, congressos e periódicos sobre o assunto

(Kheir,1996). Este interesse se explica por razões estruturais, ligadas à base conceitual do controle (Antisaklis,1998) bem como ao desenvolvimento das tecnologias de informação e comunicação - TIC e seu impacto sobre o desenvolvimento científico e tecnológico, com rebatimento sobre a educação dos engenheiros e especialistas na área (Murray, 2002).

Emerge deste debate uma posição consensual que a educação em controle deve fomentar as bases de um aprendizado contínuo que habilite o engenheiro da área a lidar com os complexos, crescentes e emergentes problemas de controle. E, mais importante: ela deve permitir estabelecer, e manter, elevados padrões de excelência que possibilitem o aprendizado adequado das bases e conceitos fundamentais da engenharia de controle (Kheir, 1996):

- a) a compreensão da dinâmica de sistemas, correlacionando sua resposta à uma evolução temporal, com memória;
- b) o duplo caráter da estabilidade, que se coloca não só como conceito fundamental do controle, mas principalmente como requisito prático para os diversos sistemas;
- c) o sentimento da realimentação, com compreensão da relação de seu custo-benefício
- d) a compreensão da compensação dinâmica, que possibilita operar nos limites das especificações impostas pelas propriedades físicas dos componentes utilizados.

Pode-se então confrontar as condições reais de educação em controle de processos industriais existentes no curso de Engenharia Elétrica, quando confrontadas com estas demandas. Podem-se agregar à análise as competências desejáveis para o graduando, que incluem, fundamentalmente, a capacidade de operar sistemas de controle e automação em ambientes industriais, basicamente associados à indústria de processos contínuos, com domínio das variáveis fundamentais de processo – vazão, pressão, temperatura e nível. Constata-se, como deficiência primordial, a inexistência de laboratórios associados ao tema, quer acadêmicos de bancada, quer sistemas de maior porte com características industriais.

Uma análise das condições de educação e das bases conceituais nos currículos dos cursos de graduação associadas ao trabalho de eficiência energética de sistemas motrizes destaca as seguintes necessidades (Pinto, 2001):

- (i) Ampliar o mercado de trabalho - o ambiente competitivo impõe aos consumidores industriais reduzir custos com energia elétrica, o que requer análises profundas da planta (diagnóstico energético), tanto na implantação do projeto como na operação da instalação;
- (ii) Criar cultura de combate ao desperdício energético - consiste em intensificar ações educativas para alterar a cultura do desperdício, ora vigente. Ressalta-se que os alunos dos cursos de engenharia e arquitetura atuarão diretamente nos projetos e operação de sistemas elétricos, e poderão difundir a cultura do combate ao desperdício de energia;
- (iii) Formar profissionais integrados no contexto socioeconômico - além da mudança de hábitos, os graduandos estarão capacitados a atuar na sociedade, transformando-a e mais preparados a enfrentar o mundo do trabalho e suas modificações;
- (iv) Formar Multiplicadores - Os egressos, agindo na sua comunidade, irão atuar como multiplicadores, provocando alterações na cultura do desperdício. (Pinto, 2001)

Como primeira iniciativa para lidar com esta situação, foi proposta a disciplina Eficiência Energética, optativa, oferecida no 7º. período, que funciona como uma atividade integralizadora de conhecimento. Espera-se, ao término da disciplina, que os alunos tenham desenvolvido habilidades e competências para realizar projetos de combate ao desperdício de energia, propondo ações que conduzam ao funcionamento eficiente das instalações, à redução no consumo de energia e à adequação às normas técnicas, modernizando as instalações e processos. Esta postura permitirá que tirem vantagens competitivas dos equipamentos tecnologicamente mais eficientes, atuando na sociedade como multiplicadores de uma cultura de combate ao desperdício de energia elétrica. Adicionalmente, com o apoio institucional da UFJF, de diversas empresas e do PROCEL/Eletróbrás, foi implantado o LEENER –

Laboratório de Eficiência Energética da UFJF (figuras 1 e 2), para apoiar as ações de formação, transferência de tecnologia, pesquisa e desenvolvimento nas áreas de combate ao desperdício de energia e fontes alternativas de energia. A metodologia praticada baseia-se na idéia de laboratório aberto, sem experimentos focados, onde o aluno identifica um problema e procura as soluções podendo através de experimentos simples e idealizados por eles, comprovar os conhecimentos adquiridos, realizar simulações e desenvolver protótipos. Com isso, pretende-se adequar e modernizar o currículo do curso, atendendo à LDB e DC, através do desenvolvimento de atividades integralizadoras de conhecimento.



Figura 1 – Sala de aula do LEENER



Figura 2 – Ambiente de Desenvolvimento do LEENER

A partir do LEENER foi idealizado um novo convênio de cooperação financeira com o PROCEL/Eletrobrás a fim de implementar um ambiente de otimização de sistemas motrizes, incluindo um laboratório de controle de processos industriais (Pinto, 2007;). Considerando-se o diagnóstico efetuado, bem como as considerações pedagógicas destacadas, será discutido o projeto conceitual e a implementação prática destes laboratórios: o Laboratório de Processos Contínuos e o Ambiente de Sistemas Motrizes, ligados ao Laboratório de Eficiência Energética LEENER/UFJF.

3. A PROPOSTA DA PLANTA DE PROCESSOS CONTÍNUOS

3.1 Projeto Conceitual

No ambiente educacional descrito, que restringe as oportunidades da educação em controle, buscou-se uma solução de compromisso que possibilitasse aos alunos, inicialmente, a construção de um espaço para apreensão dos requisitos fundamentais da educação em controle (Kheir, 1996). Buscou-se, adicionalmente, que este contato propiciasse a construção de competências e habilidades que os capacitasse a interagir, de forma segura, com sistemas e ambientes industriais, espaço este onde poderão vir a desempenhar sua profissão.

A proposta subjacente à implementação do laboratório foi a busca pela formação de engenheiros capacitados a operar sistemas de controle de processos em ambientes industriais. Surge então, de imediato, o primeiro aspecto: esta proposta implica que os estudantes dominem a dinâmica e controle das quatro variáveis básicas de processos, com suas especificidades e complexidades: temperatura, vazão, nível e pressão. Buscou-se assim, um projeto onde pudessem ser trabalhadas, de forma integrada, as quatro variáveis citadas. Outro aspecto considerado no projeto foi propiciar o contato do aluno com condições que se assemelhassem, o mais possível, às existentes em um ambiente industrial. Esta questão, embora aparentemente simples, pode se revelar complexa: sua obtenção pode colidir, em parte, com as normas de segurança desejáveis para um laboratório acadêmico (Abu-Khalaf, 2001). Desejou-se, ainda, colocar o aluno em contato com equipamentos e condições operacionais dos ambientes industriais reais, com diversidade de sensores, atuadores, componentes e equipamentos disponíveis. Procurou-se cobrir uma gama de equipamentos que refletisse parte da disponibilidade tecnológica existente nos processos reais.

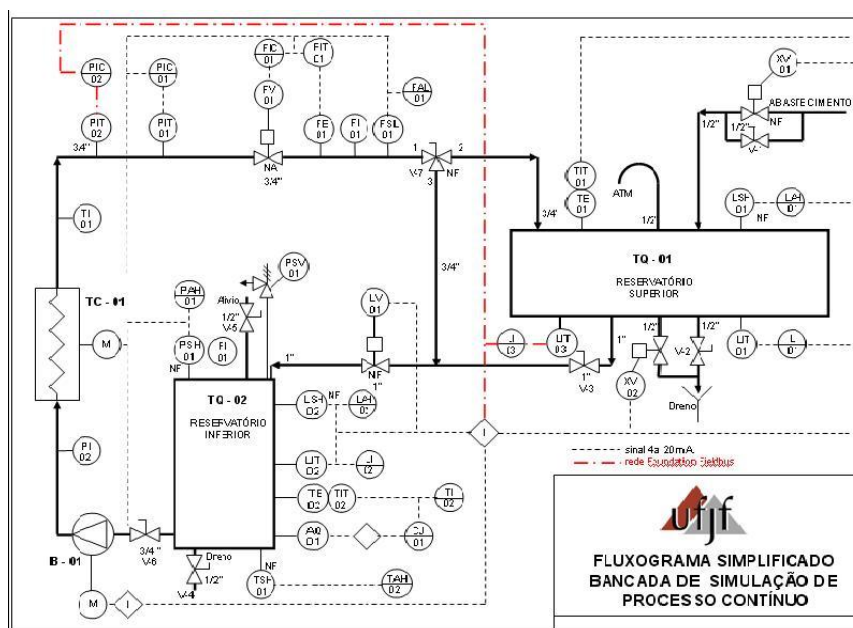


Figura 3. Diagrama conceitual da Planta

O projeto elaborado para a Planta Didática de Processos Contínuos consistiu de um sistema de tanques duplo, com aquecimento e resfriamento, que possibilita o controle das quatro variáveis de processo - vazão, nível, temperatura e pressão - em circuito único, configurado segundo topologias distintas (figura 3). O sistema permite alteração das variáveis de controle e controladas, para cada malha distinta, em concepção por realimentação (“feedback”) ou por antecipação (“feedforward”). Opera baseada na padronização de sinais de 4 a 20 mA, adicionalmente ao protocolo digital Profibus PA. A operação ocorre conforme escolha do usuário, com utilização simultânea ou não dos dois padrões de instrumentação, em malhas distintas (figura 4). A Planta disponibiliza um Sistema Supervisório (figura 4), com monitoramento em tempo real e operando com as redes de dados ModBus, Profibus PA e Ethernet; disponibiliza interface gráfica e publicação das telas gráficas dinâmicas, na Internet, em tempo real; gera relatórios e histórico de dados, dentre os quais:

- Série histórica das variáveis de controle, controlada, referência e erro, para cada experimento realizado, para cada uma das quatro variáveis;
- Figuras de mérito (IAE, ISE e ITAE) para o erro e para as quatro variáveis de processos, bem como figuras de mérito do esforço de controle associado, para as ações de controle.

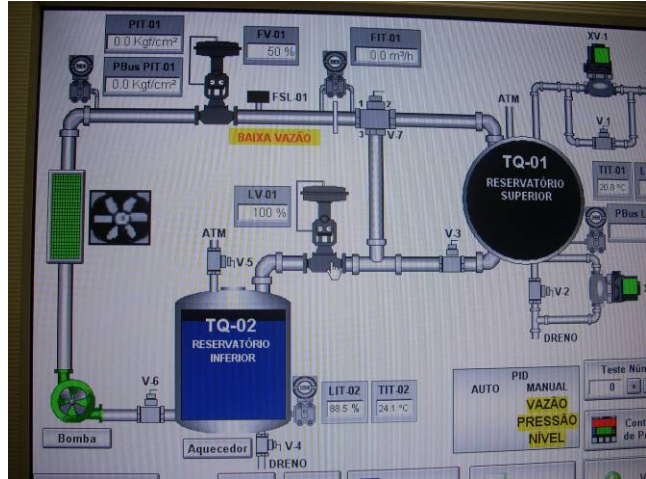


Figura 4. Vista Geral da Planta e Supervisório

O Supervisório permite a configuração e utilização de um Controlador Lógico Programável – CLP, responsável pelos algoritmos de controle - possibilitando estudar os comportamentos servo (entradas tipo degrau, rampa e parábola) e regulatório (entrada tipo degrau) dos controladores. Existem, adicionalmente malhas individuais das variáveis controladas de processo - nível, pressão, temperatura e vazão – operadas por PID analógicos com os modos ON-OFF, P+I+D, auto-sintonia e programação de referência. A planta disponibiliza ainda placas de aquisição compatíveis com o software LabView® permitindo a utilização deste ambiente para controle da planta, adicionalmente ao software fornecido.



Figura 5. Supervisório da Planta com Menus de Operação e Sensores e Atuadores

3.2 Sensores e Atuadores

Foram selecionados sensores e atuadores que replicassem uma ambiência industrial e permitissem ao aluno não só o contato com equipamentos e componentes utilizados rotineiramente na indústria, mas também seu ajuste e calibração (figura 5):

- Transmissor inteligente de pressão diferencial capacitivo, configuração via programador, 4 a 20 mA a 2 fios, linear, indicador digital local;

- Transmissor inteligente de pressão diferencial capacitivo, configuração via programador, protocolo de comunicação Profibus – PA, característica linear, indicador digital local;
- Sensor de temperatura tipo PT-100, a 3 fios para o tanque e o reservatório;
- Transmissor inteligente de temperatura, sinal de saída 4 a 20 ma, ligação à 2 fios, indicador digital, protocolo de comunicação HART.
- Manômetro petroquímico, 0 a 1000 mm H₂O.
- Transmissor inteligente de pressão manométrica capacitivo, configuração via programador, 4 a 20 mA 2 fios, linear, indicador digital local.
- Transmissor inteligente de pressão manométrico capacitivo, protocolo de comunicação Profibus - PA, característica linear, indicador digital local;
- Termômetro tipo capela angular;
- Rotâmetro para medição de vazão de água;
- Placa de orifício

A Planta permite, adicionalmente, o contato dos alunos com controladores PID analógicos, para as malhas associadas às quatro variáveis controladas. Nesta situação, o supervisor desabilita o CLP da malha desejada e passa o controle ao PID analógico, onde é disponibilizado controle ON - OFF, P + I + D, auto-sintonia, “soft-start” e programação de rampas e patamares (figuras 6). Cada malha possui um controlador específico e todos os dados da operação são gravados e disponibilizados em tempo real no supervisor. A incorporação dos PIDs analógicos deriva do fato que estes controladores, a despeito da extensa utilização dos CLPS, ainda serem intensivamente utilizados nos ambientes industriais.



Figura 6. Painel de Controle com os quatro PID e Supervisor com opção para PID

3.3 Especificidades das Malhas de Controle

Adicionalmente às características específicas de cada malha, o projeto do sistema prevê complexidades adicionais, comuns em ambientes industriais. Dentre estas vale citar:

1) Atrasos de transporte variáveis: a temperatura do fluido pode ser controlada tanto no tanque inferior, onde se encontra a resistência de aquecimento, como no tanque superior, distante da resistência. Uma válvula na tubulação de interligação entre os tanques altera a resistência hidráulica do duto e o valor do atraso de transporte, permitindo o contato dos alunos com um problema complexo de controle e extremamente comum em ambientes industriais;

2) Modelagem não linear: o tanque superior foi projetado com formato de cilindro invertido (figura 7) apresentando relação não linear entre o volume nele contido e a altura do líquido. Esta situação possibilita o contato do aluno com dinâmicas extremamente não lineares, mas ao mesmo tempo extremamente comuns na ambiência industrial;



Figura 7. Tanque Cilíndrico Invertido Não Linear e Segurança Operacional

3) Controle não linear: a dinâmica do tanque superior gera sintonias diferenciadas para o controle PID, dependentes do volume de líquido no reservatório, confrontando os alunos com situações de controle não lineares e necessidades de re-sintonia ou alteração de parâmetros dos controladores;

4) Alteração de variáveis de controle para uma mesma malha: a flexibilidade do sistema permite que uma mesma malha - p. ex, controle da temperatura do tanque superior - possa ser efetuada: a) através da potência dissipada na resistência de aquecimento do tanque inferior; b) através da vazão do fluido, mantendo-se constante a potência da resistência de aquecimento; c) através da taxa de resfriamento do radiador, para vazão e potência constantes, d) para qualquer das configurações citadas, é possível alteração nas variáveis durante o processo.

Aspectos como estes permitem intensa flexibilidade na utilização da planta, onde podem ser abordados e praticados os mais diversos aspectos da educação em controle necessários ao perfil profissional pretendido para o engenheiro formado no curso.

3.4 Segurança Operacional

Uma das preocupações centrais do projeto, considerando-se as dimensões e variáveis com magnitudes semelhantes às existentes em ambientes industriais, foi a segurança operacional (Abu-Khalaf, 2001). Neste aspecto, o projeto incorporou os seguintes itens:

- 1) Chave de emergência, desenergizando instantaneamente os equipamentos e atuadores;
- 2) Válvula de segurança e alívio da pressão no tanque inferior, que contém o aquecedor, ajustada para uma pressão máxima de 1000 mbar;
- 3) Desligamento automático do aquecimento se a temperatura do fluido ultrapassar 90°C ;
- 4) Desligamento da bomba de circulação primária e fechamento da válvula solenóide na entrada de alimentação do tanque superior, se seu nível ultrapassar 95% do valor final. O tanque inferior apresenta ainda sensores de nível destinados à proteção contra transbordamento e baixo nível de trabalho da bomba. Todos esses transmissores e sensores mencionados são monitorados (valores instantâneas, arquivos de dados históricos, curvas e gráficos), tendo seus valores mostrados via supervisório.
- 5) Alarmes sonoros e visuais no Supervisório para baixas e altas vazões, baixos e altos volumes e altas pressões, evitando também danos aos equipamentos.

4. A PROPOSTA DO AMBIENTE DE SISTEMAS MOTRIZES

4.1. Projeto conceitual

O ambiente de Sistemas Motrizes simula as condições operativas dos equipamentos e componentes dos sistemas de força motrizes (motor e carga) encontrados nas indústrias. Ele permite realizar pesquisas e difusão das informações técnicas e tecnologias mais atuais sobre o tema, apoiar as ações de formação e de transferência de tecnologia, objetivando também a capacitação de agentes para uso mais eficiente da energia evitando desperdícios nas indústrias que utilizam sistemas motrizes. Seus objetivos são:

- Formar e capacitar recursos humanos que possam desenvolver consultorias em eficiência energética;
- Realizar cursos de extensão e palestras para difundir os conceitos e técnicas de eficiência energética aplicadas aos sistemas motrizes industriais;
- Conscientizar consumidores industriais para que reconheçam a importância da eficiência energética, difundindo em seus ambientes melhores hábitos de combate ao desperdício;
- Promover estudos e pesquisas setoriais das tecnologias industriais em uso atual, buscando propostas de utilização de tecnologias mais eficientes;
- Simular índices de eficiência de bombas centrífugas, compressores, ventiladores/refrigeradores de ar e esteiras transportadoras através de ensaios laboratoriais;
- Realizar estudos comparativos da eficiência de motores convencionais e de alto rendimento através de diferentes tipos de acionamentos e partida dos mesmos, em ensaios laboratoriais.

O Ambiente de Sistemas Motrizes é composto por quatro bancadas didáticas que simulam cargas comumente utilizadas nos processos industriais (bomba centrífuga, compressor de ar, ventilador/ar condicionado e esteira transportadora) simulando fenômenos eletromecânicos e suas implicações no consumo de energia elétrica. Cada bancada é composta por sistemas de automação e medição integrados, que controlam automaticamente a execução, coleta de dados e emissão de relatórios. O acionamento dessas cargas pode ser feito por dois motores (convencional e alto rendimento), cada um com três modos de partida: direta, suave (“Soft-Start”) e inversor de frequência, permitindo assim, simular as diversas formas de operação e controle de equipamentos industriais semelhantes.

As bancadas são totalmente monitoradas através de sistema supervisor, que permite acesso aos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência, além de THA e FP) e mecânicos (torque, rotação, vazão, pressão e velocidade). A medição dos parâmetros elétricos é efetuada por um medidor de energia multifunção, que quantifica valores de tensão (de linha e de fase), corrente, potência (aparente, ativa e reativa), energia (ativa e reativa), fator de potência (monofásico e trifásico) e frequência. A comunicação deste medidor com o Controlador Lógico Programável (CLP), existente em cada uma das bancadas, acontece via interface serial com protocolo ModBus, onde tais parâmetros são mostrados e monitorados. Cada bancada conta com um microcomputador e uma impressora.

4.2. Bancada de Bomba Centrífuga

Composta por uma bomba centrífuga de 1” acionada por um motor de 1,5 CV (figura 8) que desloca água entre dois tanques de acrílico transparente, um superior e outro inferior, cada qual com capacidade de 100 litros. O acoplamento motor-carga, ou seja, motor-bomba é

feito pelo deslizamento de um dos motores (convencional ou alto rendimento) em um trilho. Entre os tanques existe um duto de escoamento com uma válvula de retenção e uma válvula manual em paralelo com uma válvula solenóide, comandada pelo CLP dessa bancada.

Na saída dessa bomba foram instalados uma válvula de retenção e uma válvula pneumática proporcional de estrangulamento, um transmissor de pressão diferencial, um manômetro e um rotâmetro analógico de vazão; no reservatório superior tem-se um transmissor de pressão diferencial para medição do nível local. Os reservatórios possuem sensores de nível para proteção contra transbordamento e baixo nível de trabalho da bomba.

Estes transmissores e sensores são monitorados (valores instantâneas, arquivos de dados históricos, curvas e gráficos) pelo supervisor. A bancada de bombas possui, adicionalmente, um dinamômetro com capacidade de 3CV, baseado em um sistema de frenagem por disco de Foucault, que simula o comportamento de cargas extras. Possibilita a aplicação de um torque ao eixo do motor de até 120% do valor nominal. A bancada permite a realização dos seguintes ensaios:

- Curva característica da bomba: Torque x Rotação;
- Curva característica dos dois motores: Torque no eixo x Rotação;
- Eficiência Energética dos motores para variação de carga entre 0 a 120%;
- Eficiência Energética utilizando-se inversores no controle do conjunto motor-bomba;
- Comparação entre grandezas elétricas e mecânicas para os tipos de acionamentos;
- Simulação de rede subdimensionada na alimentação da bomba.



Figura 8. Bancada de Simulação: Bomba Centrífuga e Compressor de Ar

4.3. Bancada de Compressor

Apresenta como carga um compressor, com um reservatório para até 40 litros de ar comprimido (figura 8) e cuja pressão é controlada por uma válvula elétrica via supervisor. Pode-se ainda simular perdas de carga através de 5 furos na tubulação, de diâmetros distintos, intercalados com válvulas solenóide, com comando via supervisor. Vale salientar que esta bancada não pode ser acionada eletronicamente, via inversor de frequência, devido ao tipo de compressor utilizado. A bancada do Compressor permite a realização dos seguintes ensaios:

- Eficiência Energética dos motores para variações de carga entre 0 a 120%;
- Eficiência Energética dos motores em função da variação da pressão do reservatório;
- Curvas temporais dos parâmetros elétricos e mecânicos do conjunto motor-compressor;
- Diferença de correntes de partida para as condições de reservatório cheio e vazio;
- Comparação do consumo de energia por volume comprimido.

4.4. Bancada de Ventilador e Ar Condicionado

Sistema cuja carga é composta por dois ventiladores, um centrífugo e um axial, acoplados a um duto de ar de seção quadrada (figura 9) com um “damper” permitindo, via supervisorio, o controle da vazão de ar. O duto de ar incorpora ainda transdutores de vazão e velocidade do ar, o que possibilita sua monitoração e conseqüente atuação do “damper” diminuindo, aumentando ou bloqueando a saída, com visualização e controle via supervisorio. Além dos ventiladores integra ainda a bancada um sistema completo de condicionador de ar, cujo propósito é analisar o rendimento de diferentes tipos de compressores utilizados nestes sistemas. Os compressores utilizados são do tipo hermético e do tipo “Scroll”, ambos de mesma capacidade, sendo que este último pode ser acionado pelo inversor de frequência controlado pelo CLP, tornando possível a variação de sua velocidade e, conseqüentemente, seu rendimento. Os dois compressores estão instalados em paralelo e através de quatro solenóides do tipo NF, acionadas via supervisorio, é possível opera-los isoladamente no mesmo sistema. Após o “damper”, no duto de ar, existe um evaporador e resistores de aquecimento, blindados, para degelo do evaporador e aquecimento do ar na saída do duto. Transmissores de temperatura e pressão monitoram, em tempo real e com indicação local, estes valores na saída dos compressores. A banca permite a realização dos seguintes ensaios:

- Eficiência Energética dos motores para variações de carga entre 0 e 120%;
- Eficiência Energética dos motores em função da vazão de ar (abertura do “damper”);
- Eficiência Energética do conjunto motor-ventilador, com inversores de frequência;
- Comparação entre grandezas elétricas e mecânicas para partidas direta, suave (“Soft-Start”) e com o inversor de frequência, para diferentes vazões do ar;
- Curvas temporais dos parâmetros elétricos e mecânicos do conjunto motor-ventilador;
- Comparação do consumo de energia entre diferentes tipos de ventiladores;
- Curva operacional do sistema de ar condicionado para variações do volume de ar;
- Comparação de consumo de energia por volume comprimido.



Figura 9. Bancada de Simulação: Correia Transportadora/Ventiladores e Refrigeração.

4.5 Bancada da Correia Transportadora

Sistema cuja carga é uma esteira transportadora de 1 metro, com variação de sua angulação entre 0° e 30° graus em relação à superfície da bancada (figura 9). A esteira possui um redutor de velocidade limitando sua máxima velocidade, a plena carga, a 0,1m/s. A simulação de carga sobre esta esteira é realizada através de um sistema de deslocamento linear acionado por um servomotor ou por um inversor de frequência. A bancada permite a realização dos seguintes ensaios:

- Eficiência energética dos motores para variações de carga entre 0 a 120%;
- Eficiência energética dos motores para diferentes velocidades da esteira, com inversores de frequência;

- Comparação entre as grandezas elétricas e mecânicas para partidas direta, suave (“Soft-Start”) e com inversor de frequência, em função da carga na esteira;
- Curvas dos parâmetros elétricos e mecânicos para diferentes velocidades e cargas da esteira.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Laboratório Integrado de Sistemas Industriais, que envolve o Laboratório de Controle de Processos e o Ambiente de Sistemas Motrizes, cuja implementação ocorreu neste primeiro semestre de 2008, programou diversos cursos, seqüenciais e complementares, cujo objetivo é possibilitar a construção de um espaço de aprendizagem que permita o alcance dos objetivos destacados ao longo do artigo. O Laboratório de Controle de Processos já possui em sua programação diversos cursos, ministrados inicialmente de forma complementar às ementas curriculares, como cursos de extensão de 40 horas, abrangendo uma parte conceitual e uma parte prática, e que estão divididos, inicialmente, em 04 módulos:

- a) Módulo I: contato inicial dos alunos com as variáveis de processos, principais sensores e atuadores, com operação das 4 malhas, com o Sistema Supervisório e os PID analógicos;
- b) Módulo II: modelagem do sistema, com ênfase no tanque cilíndrico vertical, com de sintonia e auto-sintonia dos PID, para as quatro variáveis.
- c) Módulo III: Controle do sistema com introdução de atrasos variáveis, estudo do comportamento das malhas com alterações em degrau, rampa e parábola;
- d) Módulo IV: Estudo, operação e ajuste dos diversos sensores e atuadores, inclusive com sistema Profibus-PA, inversores e CLP.

O LEENER e o Ambiente de Sistemas Motrizes, além de atender as demandas dos alunos das disciplinas de Eficiência Energética do curso de Engenharia Elétrica da UFJF também programam cursos teórico-práticos seqüenciais e complementares, como cursos de extensão e atividades de mobilidade acadêmica para atender a demanda da região por qualificação profissional, programas de especialização e pós-graduação nas áreas de combate ao desperdício de energia e otimização energética em sistemas motrizes (motor -acoplamento – carga) e sistemas de iluminação eficientes. Além disto, está capacitado a realizar diagnóstico energético em indústrias e simular condições atuais e propostas de atualização nos processos industriais tornando-os mais eficientes.

Os laboratórios integrados, objeto deste trabalho, foram concebidos a partir de uma análise conceitual dos objetivos pretendidos, a realidade do curso onde se insere e o perfil profissional desejado para o engenheiro aqui formado. Englobando as principais complexidades, sensores e atuadores existentes na realidade industrial, permitem uma educação em engenharia adequada à um profissional que vá atuar na área de controle industrial. Adicionalmente, por suas características e aspecto diferenciado, com ambiência industrial, pode-se constatar forte motivação e empolgação dos alunos em sua utilização.

Ressalte-se, finalmente que, embora projetada para um curso de graduação, sua flexibilidade permite utilização em trabalhos de pesquisa e desenvolvimento na área de controle de processos e otimização energética, não só para trabalhos de conclusão de curso, mas também treinamento de operadores bem como dissertações de mestrado e teses de doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Novas áreas de pesquisa em controle de processos, especialmente as questões ligadas à eficiência energética dos sistemas industriais e a máxima qualidade nos resultados, que se agrupam dentro das técnicas associadas ao denominado “*Perform and Assesment*”(Quin, 1998) de sistemas industriais,

podem ser trabalhadas e pesquisadas na planta, pelas características que apresenta. O laboratório proposto, portanto, presta-se não somente à educação em controle mas também para desenvolvimento de novas técnicas, ferramentas e procedimentos, compatíveis com os trabalhos realizados nos cursos de pós-graduação da Engenharia Elétrica da UFJF, abrangendo as dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Espera-se que as habilidades e competências que podem ser desenvolvidas nestes laboratórios sejam um diferencial na formação dos engenheiros eletricitistas da UFJF, complementando a formação dos egressos nas áreas de controle e sistemas industriais. Ressalte-se ainda que os Laboratórios abriram novas alternativas para educação em engenharia, possibilitando a formatação de um projeto diferenciados, como o de mobilidade acadêmica, previsto para o segundo semestre de 2008. O projeto permitirá que alunos de diferentes universidades, de todo o país, permaneçam por um período na UFJF desenvolvendo trabalhos e treinamento nos Laboratórios Integrados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PROCEL/Eletróbrás, que através do Convênio ECV 224/2006 viabilizou a implementação do Ambiente de Sistemas Motrizes, a modernização do LEENER, a implementação do Laboratório de Controle de Processos Industriais e apóia às atividades de formação, desenvolvimento e transferência de tecnologia; à UFJF pelo apoio ao desenvolvimento de trabalhos nesta área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-KHALAF, A. M. "Introducing safety in the chemical engineering laboratory course", **Chemical Health & Safety**, January, p. 8-11, February 2001.

ANTSAKLIS P., T. Basra, R. Decarlo, N. H. Mcclamroch, M. Spong and S. Yurkovich, editors. In: **NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education**, National Science Foundation/IEEE Control Systems Society, 1998.

BALCHEN, J. G., Handlykken, M. and Tyss, A. "The need for better laboratory experiments in control engineering education", **Proc. 8th IFAC Triennial, World Congress**, Kyoto, Japan, 1981.

FEISEL, L. D. and A. J. Rosa, "The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education", **Journal of Engineering Education**, January, p. 121-130, 2005.

KHEIR, N. A, K. J. Åström, D. Auslander, K. C. Cheok, G. F. Franklin, M. Masten and M. Rabins, "Control Systems Engineering Education", **Automatica**, vol. 32, n. 2, pp.147-166, 1996.

MURRAY, M. R., editor, "Future Directions on Control, Dynamics and Systems Report", **Control in an Information Rich World**, California Institute of Technology, June, 2002.

PETERSON, G. D, Feisel, L. D., "A Colloquy on Learning Objectives For Engineering Education Laboratories", **Proc. American Society for Engineering Education**, Annual Conference & Exposition, 2002.

PINTO, D. P. , Portela, J. C. S. , e Oliveira, V. F. “Diretrizes Curriculares e Mudança de Foco no Curso de Engenharia” , **Revista ABENGE**, vol. 22 número 2, dezembro de 2003, pp 31-38.

PINTO, D. P., Oliveira, E. J. e Braga, H. A. C. A Disciplina de Eficiência Energética do Curso de Engenharia Elétrica da UFJF. In: **XXIX COBENGE** - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 19 a 22 de setembro de 2001, Porto Alegre - RS.

PINTO, D. P., Oliveira, Vanderli F. de, Engineering Education as an Area of the Scientific Knowledge In: **International Conference on Engineering Education**, Coimbra, 2007.

PINTO, Danilo Pereira , Braga, H. A. C. The Discipline and the Energy Efficiency Laboratory (LEENER): Formation, Development and Transference of Technology for the Combat to the Energy Waste In: Powereng 2007 - **International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives**, 2007, Setúbal.

QUIN, S. J. Control performance monitoring –a review and assessment, **Computers and Chemical Engineering**, n. 23, p. 173-186, 1998.

INTEGRATED LABORATORIES FOR PROCESS CONTROL AND EFFICIENCY ENERGY ANALYSIS OF INDUSTRIAL SYSTEMS

Abstract: *The work deals with a conceptual proposal, and its practical implementation, of integrated laboratories for industrial process control and efficiency energy analysis of industrial systems. Based on a course diagnosis and on the news demands in the engineer profile for actuating in the industrial systems operation, an integrated, flexible and with industrial characteristics that allows a competence development for operating industrial systems. Encompassing a industrial process unit that allows control of the four basic process independent variables – temperature, flow, level and pressure - and four didactic units where is possible to analyze the energetic efficiency of the main industrial loads, the Laboratory operates under an open concept and can be utilized for undergraduate and graduated students, for extension courses and even for interchange training among universities.*

Key-words: *Industrial Systems, Process Control, Energy Efficiency, Education engineering laboratory*