

## PROPOSTA DE PLANTA PILOTO: CONTROLE DE VAZÃO E TEMPERATURA DE LÍQUIDOS

**Ronilson Rocha** – [rocha@decat.em.ufop.br](mailto:rocha@decat.em.ufop.br)

Universidade Federal de Ouro Preto

EM/DECAT

Campus Universitário Morro do Cruzeiro

35400-000 - Ouro Preto - MG

**Luiz de Siqueira Martins Filho** – [luizm@iceb.ufop.br](mailto:luizm@iceb.ufop.br)

Universidade Federal de Ouro Preto

ICEB/DECOM

Campus Universitário Morro do Cruzeiro

35400-000 - Ouro Preto - MG

**Ricardo Sergio Prado** – [rprado@cefetop.edu.br](mailto:rprado@cefetop.edu.br)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto

35400-000 - Ouro Preto - MG

**Luciano Recla Soprani** – [lrsoprani@yahoo.com.br](mailto:lrsoprani@yahoo.com.br)

Universidade Federal de Ouro Preto

EM/DECAT

Campus Universitário Morro do Cruzeiro

35400-000 - Ouro Preto - MG

**Resumo:** Este artigo apresenta uma proposta para a construção de uma planta piloto em escala de laboratório que represente de forma consistente as condições operacionais de um processo industrial real. A planta em questão representa um processo industrial para controle de vazão e temperatura de água, sendo constituída basicamente de uma pequena bomba automotiva e um dispositivo de aquecimento resistivo. A água armazenada em um reservatório é bombeada e aquecida, sendo posteriormente resfriada para sua reutilização em ciclo fechado. A temperatura e a vazão na saída do tubo são medidas com o intuito de controlá-las no processo em questão, regulando a energia dissipada no dispositivo de aquecimento e a velocidade de rotação da bomba. A aquisição de dados e os algoritmos de controle são executados por um Controlador Lógico Programável (CLP), ficando um microcomputador encarregado de desempenhar a supervisão do processo. Esta planta será utilizada principalmente para a demonstração experimental em aulas práticas, apresentando uma grande versatilidade para o estudo e avaliação de estratégias e técnicas de controle avançadas, uma vez que permite abordagens de controle clássico, multivariável e não-linear.

**Palavras-chave:** Planta-Piloto, Laboratório de Controle e Automação, Controle de Processos.

### 1. INTRODUÇÃO

Por controle de processos, entende-se atuar sobre um determinado processo, ou sobre as condições a que esteja sujeito, de modo a atingir algum objetivo específico. Este objetivo pode ser manter uma variável do processo em um valor constante na presença de distúrbios ou fazê-la seguir uma determinada função no tempo. Um sistema de controle confiável permite operar próximo aos limites impostos pela segurança, pelo meio-ambiente e pelo processo, o que permite alterar as condições normais de operação para uma condição mais favorável. A figura 1 mostra graficamente a atuação de um sistema de controle, a qual pode ser representada como um fluxo de informações entre módulos com funções distintas.

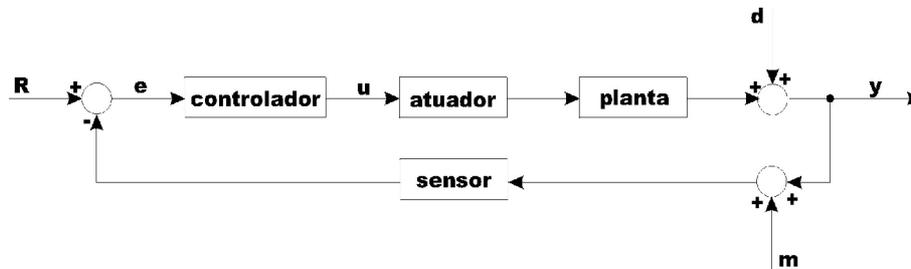


Figura 1: Diagrama de um sistema de controle

A função do elemento de monitoração (sensor) é a medição de alguma propriedade do sistema e a sua conversão em um tipo de sinal que possa ser utilizado pelo controlador. Em alguns casos, o elemento sensor gera um tipo de sinal que não é diretamente compatível com o sistema de controle, sendo necessário utilizar elementos transmissores para convertê-lo em um sinal adequado ao sistema. Em muitos casos, o próprio transmissor é também o elemento sensor. A informação obtida pelo elemento de monitoração é comparada com o valor desejado (referência) e enviada ao controlador, que opera como o cérebro do sistema, tomando decisões baseadas nas informações disponíveis para a redução do erro e comunicando a ação que deve ser tomada a um elemento final. O elemento final, também conhecido como atuador, interfere em alguma condição de processo para alterar o comportamento do processo.

Muitos processos apresentam ordens elevadas, não linearidades, múltiplas entradas e saídas, atraso de tempo e restrições de entrada. Alguns processos são bastante acoplados, devido a um alto grau de interação entre entradas e saídas. Em muitos casos, somente um número limitado de medidas é disponível para o controle. Frequentemente, um único elemento é utilizado para executar mais de uma função dentro do processo, tal como um simples vaso que pode operar simultaneamente como aquecedor, reator e separador em um processo químico (Bequette e Ogunnaike, 2001). Muitas vezes, o mesmo controlador de temperatura é requerido para resfriar sob algumas condições e aquecer sob outras. Neste contexto, os controladores de processos devem ser projetados para oferecer o máximo desempenho nas mais variadas aplicações. Entretanto, embora o desempenho de um sistema de controle possa ser avaliado pela sua capacidade em manter a variável controlada próximo a um valor desejado (setpoint), frequentemente a robustez torna-se a consideração principal para alguma condição de operação particular, uma vez que o controlador deve proporcionar um bom desempenho mesmo na presença de incertezas e perturbações. Uma vez que os controladores possuem parâmetros ajustáveis que permitem alterar seu comportamento, a sintonia de controladores para a obtenção de um melhor desempenho para uma dada aplicação consiste em um dos campos mais interessantes e de grande aplicação prática.

Dentro deste escopo, uma extensa teoria relativa aos sistemas de controle foi desenvolvida, providenciando métodos para projetos para vários tipos de sistemas de controle e determinando critérios para julgar o desempenho de sistemas de controle em operação. O conteúdo desta teoria consiste essencialmente da reformulação e unificação de vários conceitos para aplicação a novos problemas associados com sistemas de controle, tais como dinâmica de sistemas físicos, teoria das equações diferenciais, teoria da probabilidade e

estatística (*Jayawant, 1988*). Devido ao um alto nível de abstração envolvido na engenharia de controle, não há como negar que trabalhar no campo dos sistemas de controle pode ser altamente teórico, e até mesmo esotérico, sendo que um dos tópicos mais difíceis no estudo de sistemas de controle é a conexão da teoria com a prática (*Aström e Ostberg, 1986*). Além disso, a filosofia de gerenciamento do processo, estrutura da engenharia de processo, software e hardware utilizado no controle da planta, seleção dos sensores, manutenção e tratamento analítico dispensado para cada planta influencia significativamente a prática do controle de processo e, conseqüentemente, os objetivos da educação em controle e automação (*Bequette e Ogunnaike, 2001*).

Uma alternativa muito utilizada para contornar estes problemas é o uso de modelos matemáticos e simulações computacionais. Através de estudos e experimentações com modelos matemáticos, é possível proporcionar aos estudantes uma maneira de trabalhar com sistemas impossíveis de se lidar em laboratório por serem potencialmente perigosos, de grandes dimensões ou mesmo muito caros. A definição das equações de diferentes partes de um sistema e a observação de como elas interagem entre si proporciona uma clara compreensão a respeito da estrutura do sistema, bem como o seu modo de operação, permitindo ao estudante desenvolver uma melhor compreensão dos princípios e propriedades físicas envolvidos em determinado processo. A serviço da modelagem matemática, encontram-se disponíveis poderosas ferramentas de simulação computacional, tais como o TUTSIM, MATLAB, SIMNON, etc, que possibilita a análise e síntese de aspectos de sistemas de controle, operando como uma fonte educacional padrão em controle e automação (*Moreno et al., 1991*). Considerando que as características de um sistema real podem ser reproduzidas por sistemas análogos, cuja implementação prática é mais fácil, esta técnica pode ser uma interessante alternativa para o ensino em controle de processos, onde um circuito eletrônico análogo reproduziria o comportamento dinâmico de um sistema genérico, o qual pode ser mecânico, elétrico, químico, térmico, hidráulico, econômico, biológico, etc (*Rocha et al., 2003*).

Entretanto, o contato com um processo real e o seu hardware associado consiste em um aspecto importante concernente a educação em engenharia (*Saco et al., 2002*), de forma que a educação em controle e automação pode ser melhorada com o uso de demonstrações de alto impacto, as quais desperta o interesse e a motivação dos estudantes para problemas reais onde podem aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos (*Abusleme et al., 2003*). Experiências baseadas em atividades de laboratório proporcionam uma melhor compreensão para o conteúdo teórico e encoraja os estudantes para o confronto com desafios práticos (*Rocha et al., 2003*). Assim, a educação deve ser uma mistura de partes experimentais e conceituais (*Coelho et al., 2001*). Considerando que experimentos em laboratório oferecem uma maneira de introduzir maior realismo na educação em controle automático, a utilização de uma planta piloto em escala de laboratório como plataforma para implementação de aulas práticas representa uma boa maneira de superar muitas das dificuldades existentes, permitindo a compreensão de vários conceitos relativos ao controle de processos e favorecendo o processo de aprendizagem, uma vez que o estudante é colocado em contato com diversas situações encontradas pelos profissionais de instrumentação e controle, tais como a validação de modelos, avaliação de efeito dos distúrbios e da medição sobre a planta, análise de técnicas e estratégias de controle, implementação e sintonia de reguladores, etc.

A atividade em laboratório de controle e automação envolvendo uma planta piloto como elemento didático deve ter como propósito demonstrar conceitos e idéias importantes, tais como (*Aström e Ostberg, 1986*): modelagem, simulação, estimação de parâmetros, medidas, interfaces, tecnologia de sensores e atuadores, conceito de realimentação, técnicas de projeto e implementação de sistemas de controle de processos em tempo real, efeitos de distúrbios e erros de medida no sistema de controle, etc. Também é necessário considerar outras restrições impostas ao desenvolvimento da prática laboratorial, tais como o número de estudantes, limitação de espaço, o tempo máximo de duração das aulas e os custos envolvidos na

operação e manutenção da planta piloto. Deste modo, uma planta piloto em escala de laboratório deve apresentar as seguintes características (Aström e Ostberg, 1986; Braae, 1996):

- Ser um sistema onde se possa demonstrar idéias importantes;
- Consistir de uma aplicação industrial que reflita problemas práticos relevantes;
- Ser um processo de fácil modelagem e identificação;
- Apresentar um comportamento dinâmico claramente insatisfatório em malha aberta;
- Possuir escalas de tempo convenientes,
- Ter uma boa sensação visual e acústica,
- Não representar nenhum risco aos experimentadores,
- Apresentar um baixo custo operacional.

Com alguma engenhosidade, uma versátil planta piloto em escala de laboratório, similar em muitos aspectos a diversos processos industriais reais, pode ser desenvolvida e implementada de forma relativamente simples e barata para o desenvolvimento de atividades didáticas na área de controle e automação. Neste artigo é descrita uma proposta de uma planta piloto constituída basicamente de uma bomba automotiva e um dispositivo de aquecimento resistivo, concebida de forma a permitir a caracterização e avaliação experimental de diversas estratégias envolvendo múltiplas malhas de controle. O objetivo é o controle de vazão e temperatura de um líquido. Para simular a operação de uma rede de chão de fábrica, um Controlador Lógico Programável (CLP) é utilizado para a aquisição de dados e a execução dos algoritmos de controle, sendo a supervisão do processo realizada através de um microcomputador.

## 2. ATIVIDADES PRÁTICAS

A utilização da planta piloto em escala reduzida em aulas práticas permite o desenvolvimento de uma série de atividades que podem ser realizadas no espaço de um ou dois semestres letivos envolvendo o laboratório de controle. Entre estas atividades, pode-se citar:

- Modelagem matemática: Dentro do contexto de controle e automação, a descrição matemática das características dinâmicas de um sistema é de suma importância, uma vez que simplifica o processo analítico, permitindo extrapolações e a redução dos custos envolvidos.
- Simulação computacional: A simulação é uma tarefa subsequente e de extrema importância na determinação da sensibilidade de um dado processo face às mudanças nas variáveis operacionais e na otimização de processos.
- Desenvolvimento de sistemas para atuação e medição: Para a implementação da planta piloto, é necessário estudar e desenvolver circuitos eletrônicos para processar os sinais de medição e para variar a potência do aquecedor e a velocidade da bomba, permitindo um maior contato do aluno com os fundamentos da eletrônica.
- Implementação prática da planta piloto: Utilizando materiais e equipamentos disponíveis, a planta piloto pode ser montada e testada, permitindo a validação do modelo matemático obtido. Nesta etapa, também são definidas as lógicas de intertravamento devem ser definidas para evitar problemas de operação.
- Interface entre a planta piloto e o CLP: Com a finalidade de tornar operacional o sistema de controle, o CLP deve ser adequadamente conectado à planta piloto. Também é realizada a programação do CLP para a aquisição de dados, intertravamentos e algoritmos de controle.
- Implantação de um sistema de supervisão: Um sistema de supervisão instalado no microcomputador do tipo PC permite monitorar e atuar no sistema em funcionamento e disponibiliza ao usuário ferramentas de criação de telas de sinótico, registros gráficos, tratamento de alarmes, relatórios, bancos de dados, transferência de

informações para outros aplicativos, visualização em múltiplos monitores, dentre as muitas outras características.

- Estudo de estratégias e técnicas de controle da planta piloto: Aplicação e análise de técnicas de controle à planta piloto.

### 3. PLANTA-PILOTO: CONTROLE DE VAZÃO E TEMPERATURA DE LÍQUIDOS

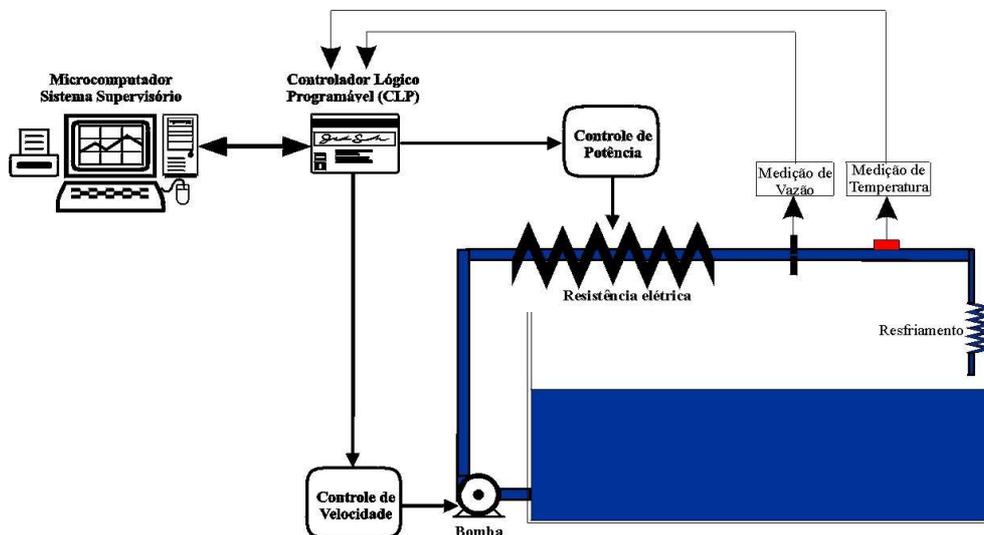


Figura 2: Planta Piloto

O diagrama esquemático da planta piloto proposta neste projeto é mostrado na figura 2. Ela consiste basicamente de uma pequena bomba automotiva (limpador de pára-brisa) que faz circular a água armazenada em um reservatório através de um dispositivo de aquecimento de 400W (cafeteira elétrica). A água é posteriormente resfriada e devolvida ao reservatório para sua reutilização no processo. O objetivo é o controle da temperatura e da vazão da água na saída do sistema, regulando a energia elétrica dissipada no dispositivo de aquecimento e/ou variando a velocidade de rotação da bomba. Apesar da relativa simplicidade da planta piloto proposta, é necessário ressaltar que vários sistemas similares para aquecimento de líquidos são encontrados em diversas plantas industriais reais.

### 3. MODELO MATEMÁTICO DA PLANTA PILOTO

Dentro do contexto da engenharia de controle e automação, a descrição matemática das características dinâmicas de um sistema é de suma importância, uma vez que simplifica o processo analítico, permite extrapolações e reduz os custos envolvidos. Do ponto de vista educacional, a aprendizagem é melhorada quando a planta física é avaliada para a modelagem e experimentação, uma vez que os estudantes podem avaliar e validar o modelo matemático através da comparação dos resultados simulados com dados experimentais (*Saco et alii, 2002*). Desta forma, a modelagem de um sistema é fundamental para o entendimento de problemas de controle de processo, sendo uma atividade complexa que não se resume simplesmente a montar e resolver equações. Ao executar a modelagem, não se deve perder de vista que o modelo a ser desenvolvido deve ser uma representação adequada, e não necessariamente perfeita, de um sistema. A modelagem de um processo constitui-se em uma atividade fundamental para o projeto de um sistema de controle, uma vez que possibilita o planejamento de experimentos visando a coleta racional de dados.

A dinâmica do processo em questão pode ser obtida a partir das relações de conservação da massa e da energia (Seborg et alii, 1989). A partir do balanço da massa  $m$  no interior do dispositivo de aquecimento, obtêm-se:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho V) = \dot{m}_i - \dot{m}_o \quad (1)$$

onde  $V$  é o volume de água no interior do sistema de aquecimento. As vazões de entrada e saída do dispositivo são dadas respectivamente por  $\dot{m}_i$  e  $\dot{m}_o$ . Utilizando uma temperatura de referência  $T_{ref}$ , a aplicação da lei de conservação da energia resulta em:

$$C \frac{d}{dt}[\rho V (T - T_{ref})] = \dot{m}_i C (T_i - T_{ref}) - \dot{m}_o (T - T_{ref}) + Q \quad (2)$$

onde  $T$  é a temperatura e  $T_i$  é a temperatura da água na entrada e  $Q$  é o fluxo de calor cedido pelo elemento de aquecimento. Considerando que a densidade  $\rho$  e o calor específico  $C$  da água são constantes, o lado esquerdo da equação (2) é dado por:

$$C \frac{d}{dt}[\rho V (T - T_{ref})] = C \left[ \rho (T - T_{ref}) \frac{dV}{dt} + \rho V \frac{dT}{dt} \right] = C \left[ (T - T_{ref}) (\dot{m}_i - \dot{m}_o) + \rho V \frac{dT}{dt} \right] \quad (3)$$

Substituindo a equação (2) na equação (3), a dinâmica do processo pode ser definida pelo seguinte sistema de equações:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho} (\dot{m}_i - \dot{m}_o) \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho V} \left( \dot{m}_i (T_i - T) + \frac{Q}{C_p} \right) \quad (5)$$

A partir deste modelo dinâmico da planta, pode-se desenvolver um dimensionamento do dispositivo de aquecimento, tubos e bomba, bem como realizar as primeiras simulações com o objetivo de visualizar o comportamento do sistema.

## 4. IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA PILOTO

### 4.1 Controle e medição de temperatura

Um conversor de potência utilizando um Triac, cujo ângulo de disparo é controlado por um circuito baseado no CI TCA 785, é utilizado para regular da energia dissipada na resistência de aquecimento, e conseqüentemente, a energia fornecida para o aquecimento do líquido. A figura 3 mostra o circuito utilizado para controlar a potência do dispositivo de aquecimento e a figura 4 mostra a forma de onda de tensão aplicada à resistência de aquecimento.

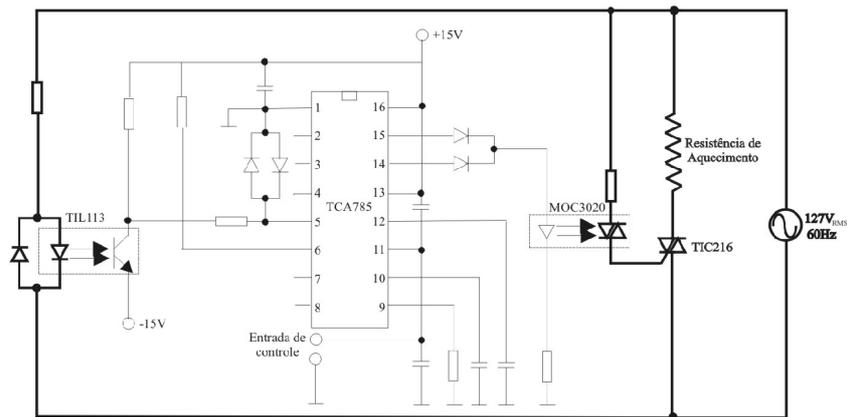


Figura 3: Controle de potencia no dispositivo de aquecimento

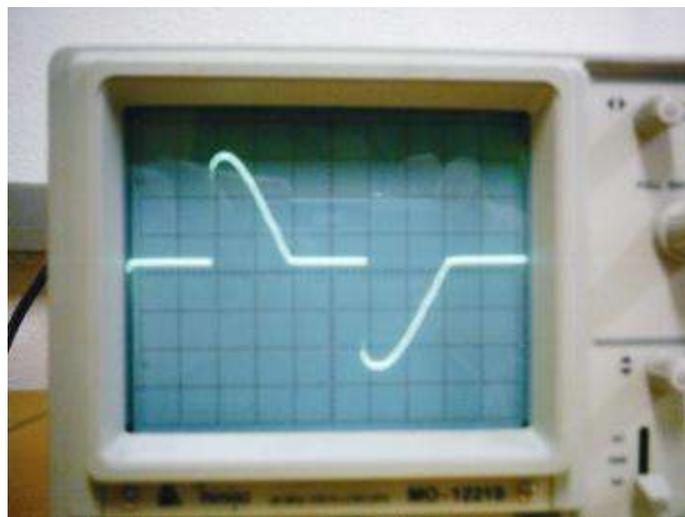


Figura 4: Forma de onda da tensão aplicada na resistência de aquecimento

A medida da temperatura na saída do processo é efetuada um termopar tipo K fixado na extremidade de um tubo metálico. O sinal procedente do termopar é processado e condicionado pelo CI AD 595, um amplificador de instrumentação combinado a um compensador de junção fria, pré-calibrado para produzir uma saída proporcional de 10mV/°C diretamente a partir do sinal fornecido por termopar tipo K. Este CI ainda inclui uma saída para a indicação de falhas, como uma possível desconexão do termopar, a qual é utilizada para acionar a bobina de um relé eletromecânico. Com o propósito de proporcionar um nível tensão de saída adequado para a aquisição (0 a 10V) dentro da faixa de temperatura de trabalho de 0 a 100°C, um amplificador com ganho 10 é inserido no circuito. O circuito para o condicionamento do sinal obtido do termopar é mostrado na figura 5.

#### 4.2 Controle e medição de vazão

O controle da vazão na planta é efetuado mediante a variação da velocidade de rotação de uma bomba C.C.. Isto é facilmente realizado controlando a tensão média C.C. nos terminais da bomba, o que pode ser realizado por um conversor PWM unidirecional tipo Buck com o CI LM3524 mostrado na figura 6. Neste CI, o sinal de referência é reduzido por um divisor de tensão para compatibilizá-lo com os níveis de tensão do circuito. Este sinal é comparado com uma onda dente de serra gerada internamente ao CI, produzindo uma seqüência de pulsos de frequência fixa e largura variável (modulação de largura pulsos) que determina a tensão média

aplicada à bomba. Na figura 7, observa-se o sinal de tensão produzido pela modulação por largura de pulso aplicado à bomba, onde curiosamente pode-se notar claramente o período de roda livre do diodo, a força contra-eletromotriz e a reação de armadura.

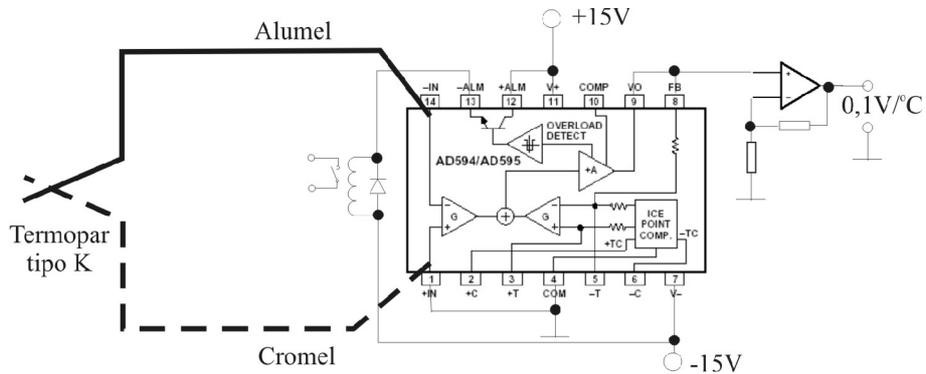


Figura 5: Circuito de condicionamento do sinal de medida de um termopar tipo K

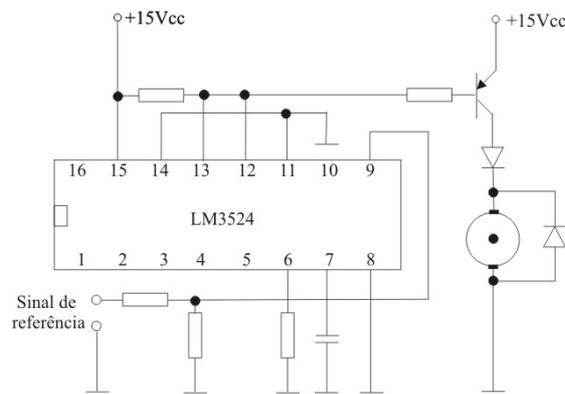


Figura 6 – Circuito PWM para acionamento da bomba C.C.

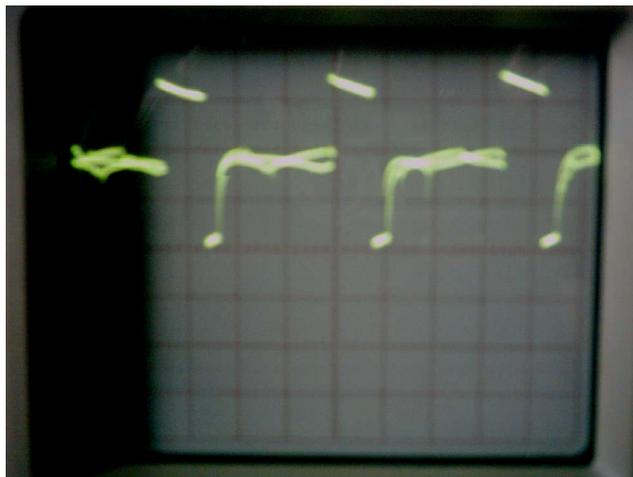


Figura 7: Forma de onda da tensão aplicada na bomba

Embora ainda não tenha sido implementada, a intenção é realizar a medição de vazão utilizando uma turbina tipo Pelton localizada na saída do tubo metálico. Esta turbina, conjugada a uma pequena máquina C.C., configura um sistema de geração elétrica cuja tensão de saída é proporcional a vazão na planta. A vantagem de se efetuar a medição de vazão por

este método é que o sistema de geração poderia ser convertido facilmente em uma segunda planta piloto a ser utilizada didaticamente.

### 4.3 Sistema de aquisição, controle e supervisão

A aquisição de dados, seqüências de intertravamento e implementação das leis de controle são realizadas utilizando um Controlador Lógico Programável (CLP), o que permite reproduzir as condições de um processo nos moldes industriais através de uma rede de chão de fábrica. O CLP é um dispositivo concebido com base na arquitetura de computador para aplicações industriais de controles seqüenciais, combinacionais e temporais, sendo capaz de armazenar instruções para a execução de funções de controle (seqüência lógica, temporização, etc), realização de operações lógicas e aritméticas, manipulação de dados e comunicação em rede, consistindo em um instrumento muito importante na área de engenharia de controle. O equipamento utilizado nesta planta piloto consiste no CLP da série “Piccolo” (PL-104/R) da Altus, o qual possui 2 canais de entrada e 2 canais de saída para controle analógico, além de 16 pontos de entrada e 16 pontos de saída para controle discreto. Pretende-se utilizar ambos os canais analógicos do CLP para implementar as malhas para o controle de vazão e temperatura. Os controladores serão implementados utilizando os algoritmos PID (proporcional, derivativo e integral) fornecidos pelo fabricante do CLP.

A figura 8 mostra a implementação prática da planta piloto aqui proposta. Com relação à supervisão e monitoração da planta piloto, considerada-se as seguintes possibilidades:

- Utilização da ferramenta PID-Tool, fornecida pela Altus, que ao ser executada assume o comando sobre as malhas de controle, permitindo o ajuste manual ou automático dos parâmetros da função de forma on-line. Esta ferramenta ainda permite a visualização em gráfico do comportamento do ponto de ajuste, da variável de atuação e da variável medida.
- Utilização de uma versão demo do software de supervisão ELIPSE, o qual permite monitorar, analisar e atuar sobre o desempenho do sistema de controle on-line, disponibilizando ao usuário ferramentas de criação de telas de sinótico, registros gráficos, tratamento de alarmes, relatórios, bancos de dados, transferência de informações para outros aplicativos, visualização em múltiplos monitores, entre outras características.

## 5. POSSÍVEIS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE A SEREM IMPLEMENTADAS

Uma vez que esta planta piloto possui duas entradas de controle (fluxo de calor externo  $Q$  e vazão de entrada  $m_i$ ) e duas variáveis de saídas passíveis de ser controladas (a vazão de saída  $m_o$  e a temperatura  $T$  do líquido na saída do sistema), ela consiste em um sistema multivariável. Tal característica confere uma grande versatilidade a esta planta piloto para o estudo e avaliação de estratégias e técnicas de controle, permitindo tanto abordagens clássicas (SISO) como multivariáveis (MIMO). No primeiro caso, a temperatura  $T$  do líquido pode ser controlada utilizando somente a potência dissipada no dispositivo de aquecimento, enquanto a ocorrência de distúrbios externos seria simulada por variações da velocidade da bomba. Em uma segunda configuração, a vazão determinada pela velocidade da bomba poderia controlar a temperatura  $T$ , ficando a simulação de distúrbios a cargo das variações da potência de aquecimento. Abordagens multivariáveis podem ser utilizadas, se for considerado que a temperatura da água na saída do sistema pode ser controlada simultaneamente variando ambas entradas de controle. Neste caso, poderia ser realizado também o controle simultâneo da vazão e da temperatura, procurando verificar os efeitos que as interações entre as malhas podem ter sobre o sistema de controle. Entre as técnicas de controle multivariável que poderiam ser estudadas utilizando esta planta piloto estão as configurações multiloop, controle em cascata,

técnicas de desacoplamento (conversão do sistema MIMO em vários sistemas SISO) e realimentação de estados (controle robusto e ótimo).

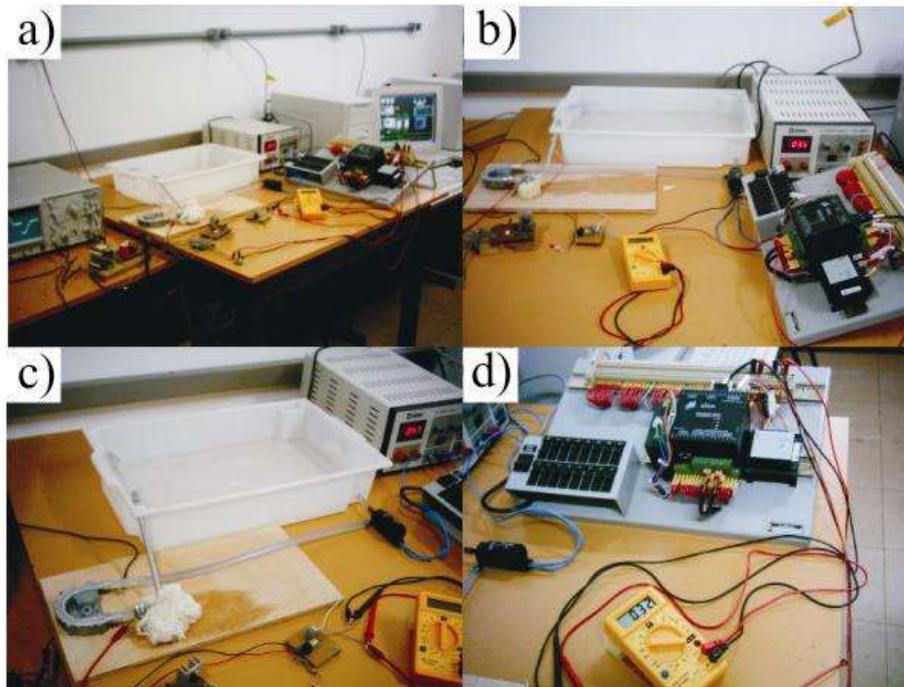


Figura 8: Detalhes da Implementação Prática da planta piloto: a) Geral; b) Equipamentos; c) Tanque, Aquecedor e Bomba, d) Controlador Lógico Programável.

Abordagens não-lineares para o projeto e análise de sistemas de controle também podem ser estudadas a partir desta planta piloto. Considerando o modelo matemático apresentado na seção 3 deste artigo, percebe-se claramente a existência de um produto entre uma variável de entrada e uma variável de saída, que em conjunto com o comportamento não linear dos circuitos atuadores e de medição, consiste em um fator de degradação do desempenho dos controladores lineares. Neste contexto, é possível realizar uma análise experimental de forma a demonstrar a robustez do controle linear, e se for o caso, propor soluções baseadas em técnicas de controle não linear. Abordagens utilizando inteligência artificial, tais como a Lógica Fuzzy ou nebulosa (que busca incorporar a forma humana de pensar em um sistema de controle) e as Redes Neurais (técnica que emula funções de aprendizagem humana de baixo nível para a resolução de problemas de controle) também podem ser utilizadas no projeto e análise de sistemas de controle da planta piloto proposta.

## 6. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentado o desenvolvimento de uma planta piloto em escala de laboratório, a qual pode ser utilizada no desenvolvimento de aulas práticas visando facilitar a compreensão por parte dos estudantes de diversos conceitos relacionados com o controle de processos. A implementação desta planta piloto também permite ao estudante ter contato com diversas situações encontradas pelos profissionais da área de controle de processo, permitindo-o exercitar os seus conhecimentos adquiridos na solução prática de diversos problemas. A planta em questão procura emular as condições operacionais de um processo industrial real com um custo limitado, uma vez que o equipamento utilizado em sua montagem pode ser adquirido facilmente. Embora este artigo tenha proposto a utilização de um Controlador Lógico Programável (CLP) para desempenhar a aquisição de dados e a execução dos algoritmos, soluções mais econômicas podem ser utilizadas com a mesma

eficiência. Os controladores podem ser facilmente implementados a partir de simples circuitos eletrônicos baseados em amplificadores operacionais e/ou microcontroladores. Uma alternativa melhor é o uso de placas de aquisição, as quais permitem uma interface direta com um microcomputador. Esta planta será utilizada principalmente para a demonstração experimental em aulas práticas, apresentando uma grande versatilidade para o estudo e avaliação de estratégias e técnicas de controle avançadas, uma vez que permite abordagens de controle clássico, multivariável e não-linear.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem o suporte financeiro proporcionado pela FAPEMIG, CNPq e CAPES para o desenvolvimento deste projeto. Os autores também agradecem à ALTUS automação pelo cessão do software PIDtools e à ANALOG DEVICES pelo fornecimento de alguns dispositivos eletrônicos que possibilitaram a implementação do protótipo apresentado neste artigo.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABUSLEME, A., CIPRIANO, A.; GUARINI, M. – A low-cost altitude control system for the kadet senior radio-controlled airplane – **IEEE Transaction on Education**, vol.46, N 1, February, 2003.

ASTRÖM, K.J., OSTBERG, A.-B. - A Teaching Laboratory for Process Control - **IEEE Control System Magazine**, Vol.6, N.5, pp 37-42, 1986.

BEQUETTE, W., OGUNNAIKE, B.A. - Chemical process control education and practice - **IEEE Control System Magazine**, pp.10-17, 2001.

BRAAE, M. – A robot arm for a first course in control engineering- **IEEE Transaction on Education**, vol. 39, N. 1, February 1996.

COELHO, A.A.R., ALMEIDA, O.M., SANTOS, J.E.S., SUMAR, R.R. - Laboratório de Simulação no Ensino de Sinais e Sistemas Lineares – In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA 2001, Porto Alegre, Brasil, **Anais**, 2001.

JAYAWANT, B.V.- Are we in control? – **IEE Proceedings**, vol. 135, Pt. D, no. 1, January 1988.

MORENO, L., SÁNCHEZ, J.L., ACOSTA, L. - Experiments in modeling, simulation and control by microcomputers - **IEEE Transaction on Education**, Vol. 34, N.2, pp. 204-208, 1991.

ROCHA, R.; MACHADO, R.F; MARTINS-FILHO, L.S. - Development of electronic circuits to teach dynamic systems and process control - In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17, 2003, São Paulo. **Anais**. São Paulo: USP/ABCM. 2003.

SACO, R., PIRES, E., GODFRID, C. – Real time controlled laboratory plant for control education - 32<sup>nd</sup> ASEE/IEEE Frontier in Educations Conference – November 6-9, 2002.

SEBORG, D.E., EDGAR, T.F., MELLICHAMP, D.A. – **Process Dynamics and Control** – John Wiley and Sons

## **A PROPOSED FOR PLANT PILOT: CONTROL OF LIQUID FLOW AND TEMPERATURE**

***Abstract:** This paper presents the building of a pilot plant in laboratory scale with educational purposes, which represents in a consistent manner the operational conditions of a real industrial process. This plant represents an industrial process to control flow and temperature of a liquid. Basically, it is constituted of a small D.C. pump and a heating device. The water is pumped and heated, and its temperature and flow are measured aiming to control it, regulating the dissipated energy on heating resistance and the pump rotation. The water is cooled for its re-use on a closed cycle. The data acquisition and control algorithms are executed by a Programmable Logic Controller (PLC), with a microcomputer performing the process supervision. This plant will be utilized for experimental demonstration on practical laboratories, presenting a great versatility for the study of advanced control strategies and techniques, once it allows classical, multivariable and non-linear subjects on control.*

***Keywords:** Pilot-Plant, Laboratory of Control and Automation, Process Control.*