



SISTEMA SUPERVISÓRIO DE CONTROLE DE REFRIGERAÇÃO EMBARCADO EM UM KIT DIDÁTICO MICROCONTROLADO

Guilherme S. Terçariol – tercariol66@hotmail.com

Arthur H. Bertachi – arthurltda@hotmail.com

Bruno A. Angélico – bangelico@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Av: Alberto Carazzai, 1640

86300-000 – Cornélio Procópio – Paraná

***Resumo:** Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle supervisionado de refrigeração utilizando o Kit Educacional XM118, que é baseado no microcontrolador PIC18F4550 e possui interface de comunicação USB. Através da ação de controle de uma ventoinha é possível controlar a temperatura de um sistema térmico. O trabalho foi desenvolvido para auxiliar os professores das disciplinas que envolvem Sistemas de Controle e Sistemas Microcontrolados. Através da interface computacional desenvolvida no software LabVIEW, os alunos podem visualizar em tempo real a resposta do sistema e também variar os parâmetros do controlador PID embarcado em um microcontrolador, consolidando os conceitos teóricos aprendidos em sala de aula.*

***Palavras-chave:** Controle de refrigeração, Sistema Supervisório, Aplicação Didática.*

1. INTRODUÇÃO

As disciplinas de controle estão presentes na maioria dos cursos de engenharia. Para contribuir com a formação do aluno, é muito importante que exista a aplicação dos conceitos teóricos abordados em sala de aula em situações práticas. Particularmente para as áreas elétrica, mecânica e afins, cursos com ementas envolvendo controle e automação fazem parte da grade. Tais conhecimentos são fundamentais para a formação de um profissional para o mercado de trabalho. Portanto, o aluno deve estar preparado para enfrentar os problemas cotidianos de um ambiente industrial graças à abordagem desses problemas em sala de aula.

Os controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) são os mais utilizados em ambientes industriais (OGATA, 2000), (LI *et al.*, 2006). Isso faz com que a abordagem deste conteúdo seja essencial nas disciplinas relacionadas a controle de processos. Do ponto de vista educacional, a utilização de práticas em sistemas físicos deste tipo de controle é muito importante, uma vez que o aprendizado baseado simulação geralmente

não aborda os problemas tradicionais encontrados em situações reais, principalmente relacionados a ruídos aditivos.

O desenvolvimento de um sistema supervisor de controle PID é de extrema importância para monitorar e controlar grandezas pertinentes aos processos. No âmbito educacional, observar a resposta do sistema facilita o aprendizado dos alunos, proporcionando a visualização dos conceitos teóricos abordados previamente, aplicados em um sistema físico real (TERÇARIOL *et al.*, 2012).

No trabalho de Terçariol *et al.* (2012) foi desenvolvido uma malha de controle para controlar a temperatura de um sistema composto apenas por uma resistência e um sensor de temperatura no mesmo kit educacional considerado no presente trabalho.

Neste artigo é desenvolvida uma outra malha de controle, onde um novo atuador é inserido no processo. Uma ventoinha é utilizada para controlar a temperatura do sistema, adicionando uma nova abordagem de controle do sistema térmico, utilizando um atuador cuja ação de controle é inversamente proporcional ao comportamento da variável manipulada do sistema.

2. KIT EDUCACIONAL EXSTO XM118

O kit XM118, da fabricante EXSTO, foi concebido com base no PIC18F4550, visando facilitar o aprendizado e o desenvolvimento de aplicações de microcontroladores PIC18. A Figura 1 ilustra o equipamento.



Figura 1 – Kit didático XM118.

Fonte: (ADRIANO & MARÇANO, 2009).

Este kit foi adquirido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procópio com o intuito de ser utilizado como material de apoio da disciplina de sistemas microcontrolados, uma vez que o kit conta com diversos recursos: 8 LEDs convencionais, 2 LEDs bicolores, 4 displays de 7 segmentos, display LCD alfanumérico, gerador de onda quadrada, *buzzer*, sensor de temperatura, resistência de aquecimento e lâmpada, relés, entre outros (ADRIANO & MARÇANO, 2009).

A implementação de uma malha de controle no kit aumenta as possibilidades de aplicação do mesmo em sala de aula, aumentando a gama de aplicações em disciplinas da grade dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. A Figura 2 ilustra o sistema de controle térmico implementado, onde pode ser observada a resistência e a ventoinha.

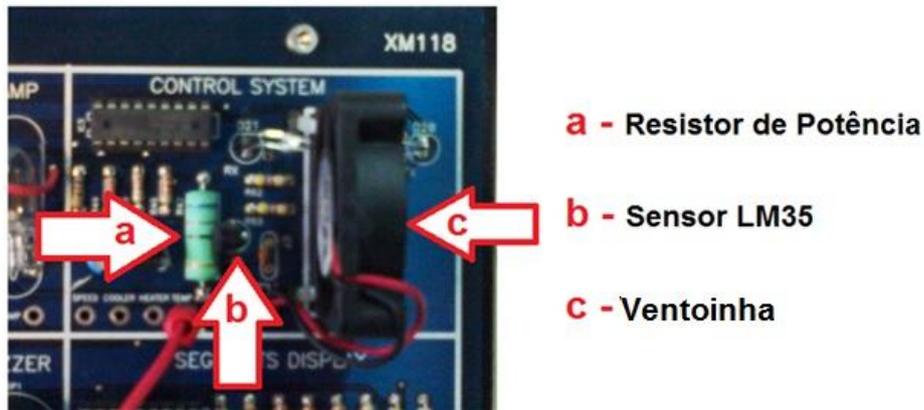


Figura 2 – Sistema de Controle Térmico do Kit XM118.

Abaixo serão listados os principais componentes utilizados nesta nova malha de controle:

- *Resistor de potência*: é alimentado com 12Vcc e controlado pelo módulo PWM. Foi utilizado como componente principal, a ser controlado no presente trabalho.
- *Sensor LM35*: posicionado junto ao resistor, fornece uma variação linear de tensão de 10 mV por grau Celsius. É o responsável por fazer a leitura da temperatura do resistor.
- *Ventoinha*: sua velocidade foi controlada pelo módulo PWM do PIC, com resolução de 10 bits (0 a 1023), que corresponde à variação de 0% a 100% da velocidade de rotação da ventoinha.

3. SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÃO

Um sistema de controle tem como objetivo controlar uma ou mais grandezas através de um ou mais estímulos gerados na entrada. Nesta aplicação, a resistência será constantemente alimentada com 90% de PWM, que corresponde a, aproximadamente, 10,5 Vcc.

O algoritmo de controle foi totalmente embarcado no microcontrolador e foi desenvolvido em linguagem C. Um ambiente de supervisão do processo foi desenvolvido no software LabVIEW®. Esta interface tem como objetivo possibilitar uma maior interação entre o aluno e o sistema controlado, onde o mesmo pode alterar parâmetros do controlador e observar o comportamento do sistema em tempo real.

3.1. Estratégias de controle

A estrutura clássica de um controlador PID paralelo é composta pela soma de três parcelas: um termo proporcional ao erro, um termo proporcional a integral do erro, e um termo proporcional a derivada do erro. O PID tem sua ação $u(t)$ representada pela Equação (1).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Para controlar este sistema, que possui resposta em tempo contínuo, foi utilizado um controlador digital, neste caso, um algoritmo embarcado no microcontrolador. Para realizar o controle de sistemas em tempo discreto, o sinal na entrada do controlador (sinal de erro atuante) é convertido em uma sequência de números. Sequências são obtidas através amostragem periódica de um sinal analógico, ou seja, o valor numérico do k -ésimo termo de uma sequência é igual ao valor do sinal analógico em um instante kT_s , onde T_s é o período de amostragem (OPPENHEIM, 1999). Através de conversores A/D e D/A, ocorre a transição dos sinais em analógicos para sinais discretos e de sinais discretos para analógicos, respectivamente. A Figura 3 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle. Na aplicação em questão, o conversor D/A é o sinal PWM, cuja tensão média é proporcional à razão cíclica que, por sua vez, é proporcional a um valor de 0 a 1023 (10 bits de resolução).

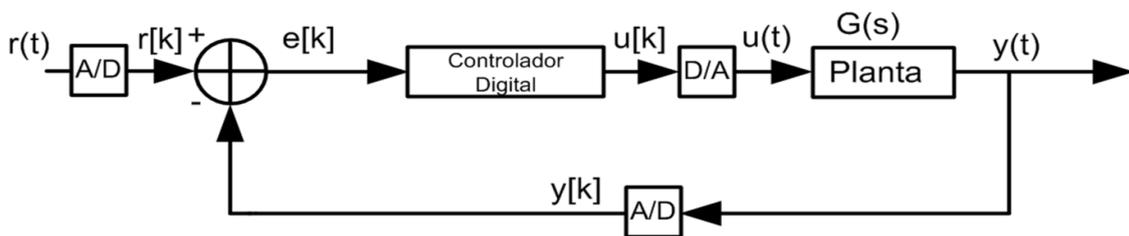


Figura 3 – Elementos de um diagrama de bloco.

Para encontrar o equivalente discreto do controlador PID, aplicou-se a aproximação *backward* nos termos integrativo e derivativo (FRANKLIN *et al.*, 1998). A Equação (2) apresenta a equação de diferenças encontrada por essa aproximação:

$$u[k] = u[k-1] + a(e[k] - e[k-1]) + b \cdot e[k] + c(e[k] - 2 \cdot e[k-1] + e[k-2]) \quad (2)$$

onde: $a = K_p$, $b = K_p \cdot \frac{T_s}{T_i}$, $c = K_p \cdot \frac{T_d}{T_s}$ e T_s é o período amostral do sistema.

3.2. Algoritmo de Controle

O algoritmo de controle embarcado no microcontrolador foi desenvolvido em linguagem C. A estrutura de controle foi concebida conforme o fluxograma simplificado da Figura 4.

Assim como no trabalho de Terçariol *et al.* (2012), a comunicação entre o Kit Educacional e o computador é, neste trabalho, realizada através da porta USB. Utiliza-se a classe conhecida como USB CDC.

O aluno pode optar inicialmente entre realizar o ensaio em malha aberta ou o ensaio em malha fechada. O ensaio em malha aberta possibilita a identificação do modelo matemático do sistema. Para fins didáticos, para o processo térmico considerado, o modelo do sistema foi aproximado por uma função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte, representado pela equação (3).

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (3)$$

onde K representa o ganho estático do sistema, τ é a constante de tempo do sistema e θ é o atraso de transporte do sistema (COELHO e COELHO, 2004).

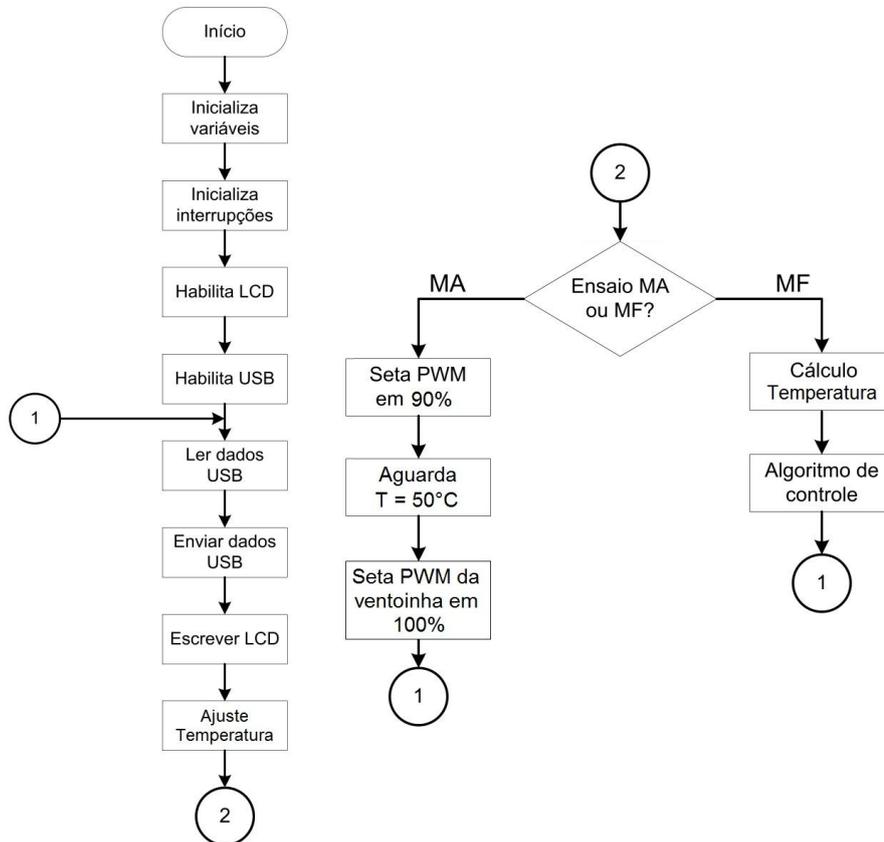


Figura 4 – Fluxograma do programa.

O ensaio em malha fechada é baseado no controle da temperatura medida pelo LM35 através do controlador PID. O aluno pode alterar parâmetros K_p , K_i e K_d , além de alterar o *setpoint* do controlador. Essas alterações são realizadas no sistema de supervisão desenvolvido.

3.3. Sistema de supervisão

Para a interação dos usuários com o kit didático foi escolhido criar-se um sistema supervisório utilizando o software LabVIEW®. Programas desenvolvidos no LabVIEW® recebem a denominação de Instrumentos Virtuais (*Virtual Instruments*), devido a sua aparência e operação serem semelhantes a instrumentos físicos. É possível construir uma interface composta de controles e indicadores, onde os controles são botões, mostradores, caixas de texto, já os indicadores mais comuns são gráficos, LEDs e indicadores analógicos.

Os programas são compostos por dois elementos: o Painel Frontal e o Diagrama de Blocos. Para se realizar a comunicação do LabVIEW® com o microcontrolador, foi utilizada uma ferramenta conhecida como VISA (*Virtual Instrument Software*



Architecture). O VISA é um padrão para configuração, programação e solução de problemas relacionados a sistemas de instrumentação.

A Figura 5 mostra a interface desenvolvida para esta aplicação.



Figura 5 – Interface computacional desenvolvida no LabVIEW®.

O desenvolvimento desta tela de supervisão buscou incluir elementos para facilitar a interação com os usuários. Uma chave possibilita ao aluno escolher qual tipo de ensaio será utilizado: em malha aberta ou em malha fechada.

Pode-se alterar os campos correspondentes aos ganhos do controlador PID, *setpoint* e tempo de aquisição de dados. O aluno também pode escolher um diretório específico para salvar os dados de processo em um arquivo de texto para posteriormente utilizá-los para outros fins.

O ponto principal desta interface é a visualização em tempo real do comportamento do completo do sistema de controle. Ao mesmo tempo em que o aluno observa o comportamento da variável controlada (temperatura), também é apresentada na tela de supervisão a variação da variável de controle (PWM aplicado na ventoinha).

4. ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados neste trabalho estão de acordo com a metodologia utilizada em disciplinas que envolvem projeto de controladores. Inicialmente, efetua-se um ensaio para estimar um modelo matemático da planta, que nesse caso consistiu na resposta em malha aberta do sistema a uma excitação em degrau. Em seguida, efetua-se a sintonia do controlador e então um ensaio em malha fechada é realizado para verificar a eficiência do controle.

Tais ensaios servem como base para que os alunos se familiarizem com os procedimentos clássicos de sintonia de controladores PID.

4.1. Ensaio em malha aberta

Para obter o modelo matemático do sistema de refrigeração de temperatura, representado pela equação (3), é necessário inicialmente acionar a resistência de potência para que a mesma alcance uma temperatura elevada e, somente após isso, acionar a ventoinha para coletar os dados referentes a variação de temperatura deste processo.

Inicialmente, aplicou-se um valor constante de 90% de PWM na resistência de aquecimento. Assim que a resistência atinge a temperatura de 50 °C, a ventoinha é acionada com 100% de PWM, que corresponde a um valor de 12 Vcc. A Figura 6 mostra o comportamento da temperatura durante a realização deste procedimento. A seta indica o momento exato onde a ventoinha é acionada.

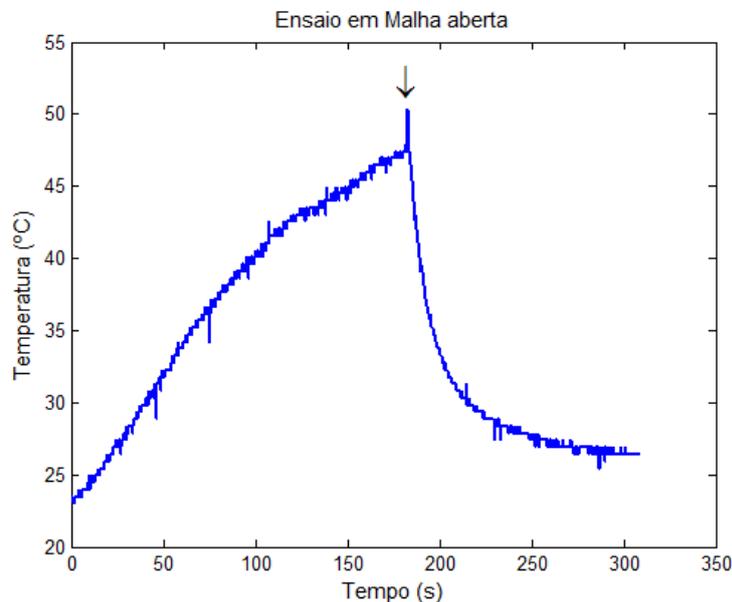


Figura 6 – Ensaio em malha aberta realizado.

Para encontrar a função de transferência do sistema de refrigeração, ou seja, a variação da temperatura em função do PWM da ventoinha, utilizou-se o seguinte procedimento: considerou-se o instante onde a ventoinha foi acionada como início do ensaio. Para utilizar os métodos de identificação a três parâmetros apresentados na literatura, foi necessário inverter a curva de variação de temperatura. Utilizando-se o método de Broída, o modelo que representa o sistema é apresentado na equação (4), e a Figura 7 mostra a comparação entre o sistema real e o sistema identificado.

$$G(s) = \frac{1,996}{14,53s + 1} e^{-0,89s} \quad (4)$$

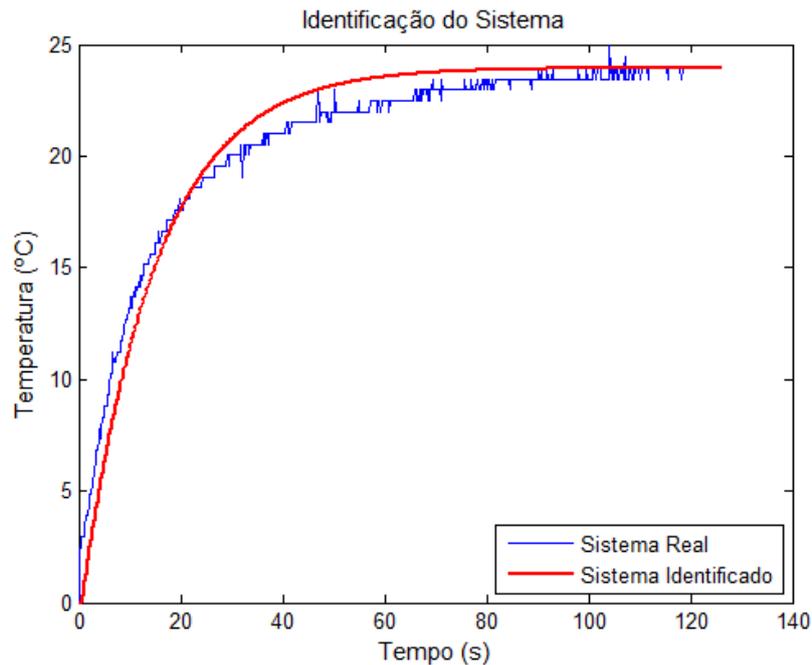


Figura 7 – Comparação entre o sistema real e o sistema identificado.

Durante a realização do experimento, o aluno pode observar o comportamento do sistema em tempo real, conforme ilustra a Figura 8. Considerando que a ação de controle é inversamente proporcional ao comportamento da variável de saída, deve-se mudar o sinal do erro que atua no controle para que o controlador se comporte da maneira correta.



Figura 8 – Tela de supervisão para o ensaio em malha aberta.

4.2. Sintonia do controlador

A sintonia do controlador foi feita pelo método de Ziegler e Nichols, baseado na equação (4). Foram calculados os ganhos K_p e K_i para um controle do tipo PI, apresentados na Tabela 1. O ganho K_d foi considerado zero. No entanto, todo o sistema foi projetado de maneira que é possível a utilização de um controlador PID.

Tabela 1 - Ganhos do controlador obtidos pelo do método de sintonia Ziegler e Nichols.

| K_p | K_i |
|-------|-------|
| 7,71 | 2,73 |

Para verificar se o controlador consegue atuar de maneira correta sobre o processo, é necessário realizar o ensaio em malha fechada do sistema. De acordo com Carmo (2006), este procedimento de sintonia é apenas a etapa inicial para ajustar os parâmetros do controlador, sendo as vezes necessária a realização de uma sintonia fina de tais parâmetros. No trabalho de Li *et al.* (2006) é apresentada uma tabela que relaciona o comportamento do sistema com o aumento dos parâmetros K_p , K_i e K_d .

4.3. Ensaio em malha fechada

Para validar os parâmetros encontrados do controlador PI, foi realizado um ensaio onde o *setpoint* foi escolhido em 40 °C. A Figura 9 apresenta a tela de supervisão do sistema para este ensaio, onde pode ser visualizado o gráfico do comportamento da variável manipulada do sistema (PWM da ventoinha) e o comportamento da temperatura.

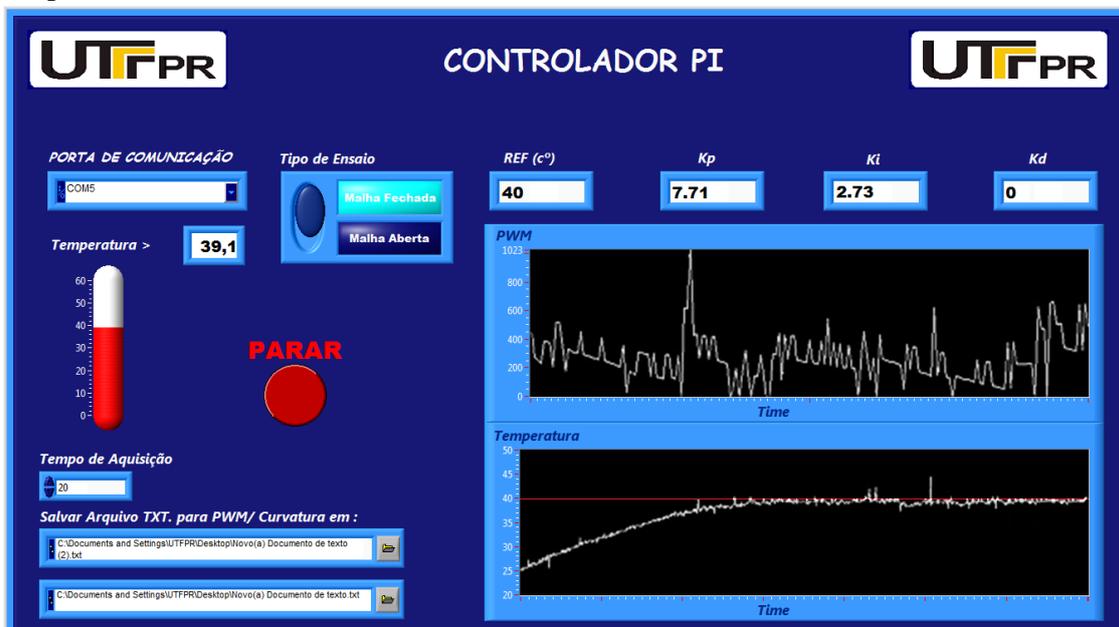


Figura 9 – Tela de supervisão para o ensaio em malha fechada.

Percebe-se que o controlador conseguiu manter o valor de temperatura próximo ao valor de *setpoint*, comprovando a eficiência do controlador para esta aplicação.



5. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma nova abordagem de controle em um kit didático microcontrolado. O sistema de controle desenvolvido neste trabalho, além de aumentar o potencial de uso do equipamento, tem grande valia no quesito didático. O professor ganha uma nova ferramenta para auxiliá-lo em sala de aula. Do ponto de vista dos alunos, a utilização desta aplicação fortalece ainda mais a compreensão de temas importantes envolvendo as disciplinas de controle durante a graduação: identificação de sistemas e sintonia de controladores PID.

Com a possibilidade de alterar os parâmetros do controlador PID e visualizar em tempo real o comportamento do sistema perante tais mudanças, os alunos podem aplicar os conhecimentos teóricos que são muito abordados em livros, em uma situação envolvendo um sistema físico real.

Além disso, o aluno pode abrir e editar o código fonte do *firmware* do microcontrolador, o que o possibilita compreender a estrutura do algoritmo PID digital, bem como modificar a estratégia de controle considerada, trazendo maior flexibilidade no ensino.

6. REFERÊNCIAS

ADRIANO, J. D.; MARÇANO, R. de O. XM118 - Microcontroladores PIC18 (Manual). Santa Rita do Sapucaí: Exsto Tecnologia, 2009.

CARMO, M. J. do; CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS. Ambiente educacional multifuncional integrado para sintonia e avaliação do desempenho de malhas industriais de controle, 2006. Dissertação (Mestrado).

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. Identificação de sistemas dinâmicos lineares. Editora da UFSC. Florianópolis, 2004.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WOKMAN, M. L. Digital control of dynamic systems.3.ed. Half Moon Bay: Ellis-Kagle Press, 1998.

LI, Y.; ANG, K.; CHONG, G. Pid control system analysis and design. **IEEE Control Systems Magazine**, IEEE, v.26, n. 1, 2006.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

OPPENHEIM, A. V. Discrete-time signal processing. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999

TERÇARIOL, G. S; MINAMIHARA, M. K.; BERTACHI, A. H.; ANGÉLICO, B. A. Sistema supervisorio para controle de temperatura em kit educacional microcontrolado. Anais: XL – Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Belém, 2012.



SUPERVISORY SYSTEM FOR COOLING CONTROL EMBEDDED IN A MICROCONTROLLER BASED EDUCATIONAL KIT

***Abstract:** This paper describes the development of a cooling supervised control system using the Educational kitXM118 that is based on the microcontroller PIC18F4550, having USB communication interface. Through the control action of a fan, it is possible to control the temperature of a thermal system. The work was developed to help teaching Control Systems and Microcontrolled Systems in undergraduate courses. Through a computer interface software developed in LabVIEW, students can view in real time the response of the systems and also modify the parameters of PID controller embedded in the PIC, consolidating theoretical concepts learned in the classroom.*

***Key-words:** Cooling Control, Supervisory System, Educational Application.*