



SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA CONTROLE DE TEMPERATURA EM KIT EDUCACIONAL MICROCONTROLADO

Guilherme S. Terçariol – tercariol66@hotmail.com
Marcos K. Minamihara – marcos.kat.sushi@gmail.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 descreve o desenvolvimento de um sistema de controle supervisionado de temperatura utilizando o Kit Educacional XM118, que é baseado no microcontrolador PIC18F4550 e possui interface de comunicação USB. O trabalho foi desenvolvido para servir de apoio às disciplinas de Sistemas de Controle e Sistemas Microcontrolados dos cursos graduação de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Cornélio Procópio. Através da interface computacional desenvolvida no software LabVIEW, os alunos podem visualizar a resposta do sistema e também variar os parâmetros do controlador PID embarcado no PIC, consolidando os conceitos aprendidos em sala de aula em um sistema real.

Palavras-chave: Controle de Temperatura, Microcontroladores, Sistema de Controle, Sistema Supervisório.

1. INTRODUÇÃO

Disciplinas que envolvem sistemas de controle estão presentes na maioria dos cursos de engenharia por todo o mundo. É fundamental que o engenheiro tenha um conhecimento sólido em controle de processos. 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. No ambiente acadêmico, portanto, é de suma importância que se tenham formas de reproduzir, mesmo que em escalas reduzidas, um processo industrial, com vistas a complementar as atividades teóricas desenvolvidas em sala de aula.

A utilização de controladores em um sistema tem como objetivo fazer com que uma saída alcance um dado valor de referência, dentro de valores toleráveis tanto em regime permanente como em regime transitório. Controladores do tipo PID são os mais utilizados em ambientes industriais (OGATA, 2000), (LI *et al.*, 2006) e, por isso, é de fundamental importância que aspectos práticos de utilização desses controladores sejam abordados nos cursos de engenharia.

Realização:



Organização:





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.

A evolução de sistemas de controle digital está intimamente ligada ao avanço das técnicas de processamento digital de sinais. Um sistema de controle com hardware digital, como por exemplo, um computador, um microcontrolador ou um processador digital de sinais (DSP), utiliza dados amostrados em intervalos preestabelecidos, resultando em séries temporais de sinais (KUO, 1992), (FRANKLIN *et al.*, 1998). Em sistemas de controle contínuos que utilizam uma malha com sinal elétrico, o controlador é implementado utilizando, circuitos elétricos/eletrônicos analógicos.

O Kit Educacional XM118, fabricado pela EXSTO Tecnologia é um ambiente de desenvolvimento que visa facilitar o aprendizado e o desenvolvimento de aplicações baseadas no PIC18F4550, que dentre outras características, possui um periférico USB *Device*. As diversas aplicações que este equipamento possui, estão dispostas de forma didática, com indicação na serigrafia da placa. A Figura 1 ilustra o Kit Educacional utilizado.



Figura 1: Kit didático XM118.

O Kit foi concebido para poder explorar ao máximo, os recursos oferecidos pelo microcontrolador, possuindo 8 LEDs convencionais, 2 LEDs bicolores, 4 displays de 7 segmentos, Display LCD alfanumérico, entre outros (ADRIANO & MARÇANO, 2009). Portanto, é uma ferramenta que proporciona diversas abordagens voltadas para o ensino de sistemas microcontrolados.

2. DESENVOLVIMENTO

Buscando uma abordagem voltada para o ensino de sistemas de controle, é possível utilizar o Kit Educacional da EXSTO para implementar um sistema de controle térmico. O sistema é composto por uma resistência de potência que tem sua alimentação controlada pelo microcontrolador. Como sensor de temperatura, é utilizado o circuito integrado LM35, que fornece 10mV/C° e operará em uma faixa de temperatura que vai de -55° até 155°. A Figura 2 mostra o sistema térmico do Kit Educacional.



Figura 2: Sistema de Controle Térmico do Kit XM118.

Um típico sistema de controle tem como objetivo controlar uma grandeza através de um estímulo gerado na entrada. Nesta aplicação, a resistência será alimentada em até 12Vcc através de uma chave que é controlada pelo sinal de PWM do microcontrolador. Buscando auxiliar as aulas de sistemas de controle, foi desenvolvido um sistema supervisorio utilizando o *software* LabVIEW, que servirá de interface entre os alunos e o microcontrolador. Dessa maneira, é possível proporcionar que os alunos observem a variação de temperatura do sistema e parametrizem um controlador PID embarcado no microcontrolador, em uma única tela de supervisão.

2.1. Estratégia de controle

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 , onde T é o período de amostragem (OPPENHEIM, 1999), como ilustra a Figura 3.

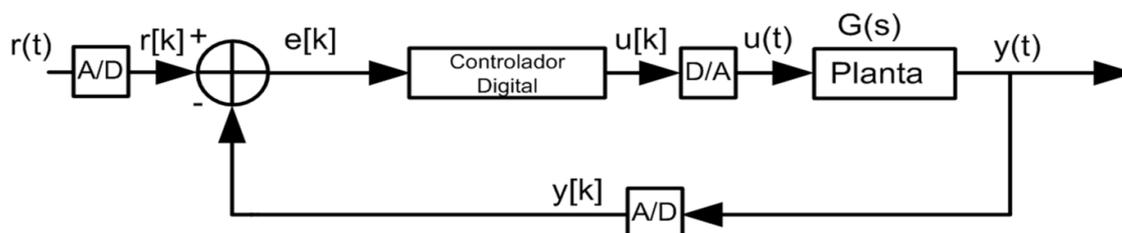


Figura 3: Elementos de um diagrama de bloco.

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 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:

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

onde: $a = Kp$, $b = Kp \cdot \frac{T_s}{T_i}$ e $c = Kp \cdot \frac{T_d}{T_s}$.

2.2. Firmware

Devido a programação em *assembly* ter uma abordagem que exige muito mais experiência e trabalho do programador, a Linguagem C considerada uma linguagem de alto nível e estruturada, foi escolhida para programar o microcontrolador.

Para facilitar o projeto do *firmware*, foi desenvolvido um fluxograma do programa, conforme ilustrado na Figura 4. A estrutura lógica da programação em C foi elaborada com base no fluxograma.

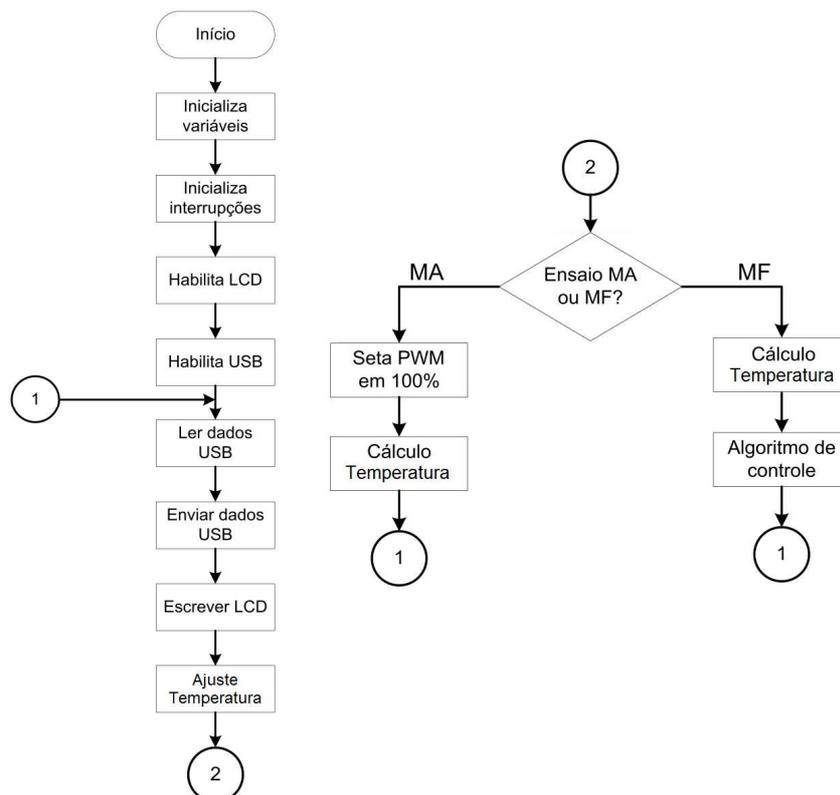


Figura 4: Fluxograma do Programa.

O esquema de controle utiliza a temperatura medida e a compara com a temperatura escolhida pelo usuário, a diferença entre esses valores gera um erro. O controlador PID atua sobre esse erro, gerando um sinal de controle que atua sobre o processo, fazendo com que a



temperatura medida seja próxima da temperatura escolhida pelos alunos. O algoritmo do controlador foi desenvolvido de acordo com a Equação (2).

A comunicação entre o Kit Educacional e o computador é realizada através da porta USB. Utiliza-se a classe conhecida como *USB CDC*, pois é uma forma simples de se implementar para esta aplicação, devido a similaridade com a comunicação serial RS232 (CARMO, 2006).

É importante ressaltar que a implementação de um controle digital embarcado em um microcontrolador é um exemplo bastante propício de aplicação prática para disciplinas que englobam sistemas microcontrolados.

2.3. Sistema supervisório

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 constituída por 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.

Neste caso foram utilizadas as ferramentas *VISA Write* e *VISA Read*, as quais são responsáveis pelo envio de dados ao microcontrolador, e por receber dados advindos do microcontrolador. A Figura 5 mostra a interface computacional desenvolvida, nela buscou-se criar um ambiente de fácil utilização para os usuários.

A interface possui vários elementos para a interação com os usuários, como uma chave onde se pode escolher qual tipo de ensaio se deseja realizar: em malha aberta ou o ensaio em malha fechada com ação do controlador, campos de entrada de dados onde podem ser inseridos os parâmetros do controlador PID do sistema, o valor de referência (*setpoint*) para o ensaio em malha fechada e o tempo total de aquisição de dados.

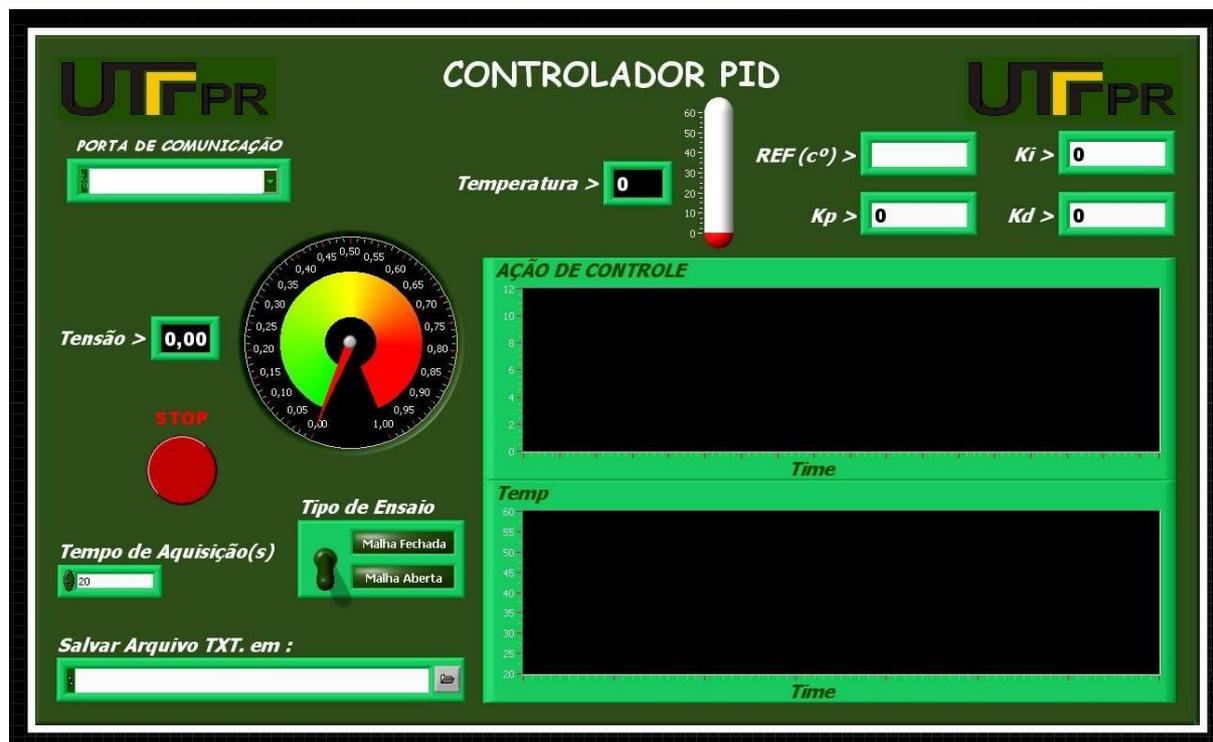


Figura 5: Interface computacional desenvolvida no LabView.

Na tela é possível visualizar a temperatura medida através de uma barra semelhante a um termômetro, um indicador analógico mostra o valor de tensão de saída do sensor LM35 e os gráficos de Temperatura e de Ação de Controle. No gráfico de temperatura é mostrado em tempo real o valor medido de temperatura e também o *setpoint* escolhido pelo usuário, já no gráfico de ação de controle é mostrado valor médio de tensão sobre o resistor.

É possível salvar os dados dos ensaios realizados em um arquivo de texto (.txt). Assim, enquanto o programa é executado, os dados serão salvos de forma simultânea no arquivo escolhido pelo usuário, facilitando posteriormente a análise dos dados coletados.

3. 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 procedido para validar a estratégia de controle adotada.

3.1. Ensaio em malha aberta e sintonia

É possível obter o modelo matemático que descreve um sistema de primeira ordem através da análise de sua resposta a uma entrada degrau. Neste trabalho realizou-se um ensaio em malha aberta, com uma entrada degrau em 12Vcc (100% do PWM). A curva de resposta do sistema está ilustrada na Figura 6.

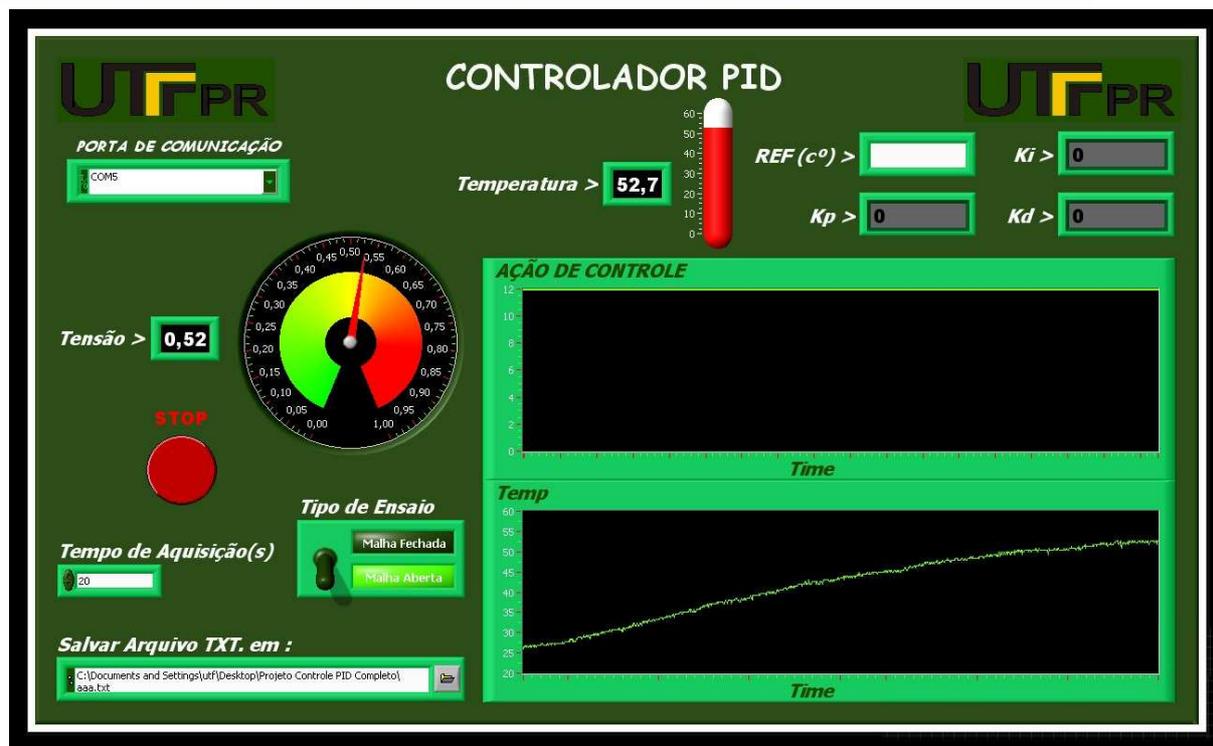


Figura 6: Resposta do Sistema em Malha Aberta.

O sistema térmico apresentou uma resposta típica de sistemas de primeira ordem com atraso de transporte.

Utilizando-se do método de identificação de Bróida, considerado em (HAMIT *et al*, 1996), chegou-se a função de transferência do sistema térmico, descrita na Equação (3):

$$G(s) = \frac{2.8}{114.5s + 1} e^{-13.7s} \quad (3)$$

A Figura 7 mostra uma comparação entre a curva de resposta real do sistema (cor azul) e a curva de resposta simulada a partir do modelo matemático (cor vermelha). O modelo matemático aproximou-se muito do modelo real.

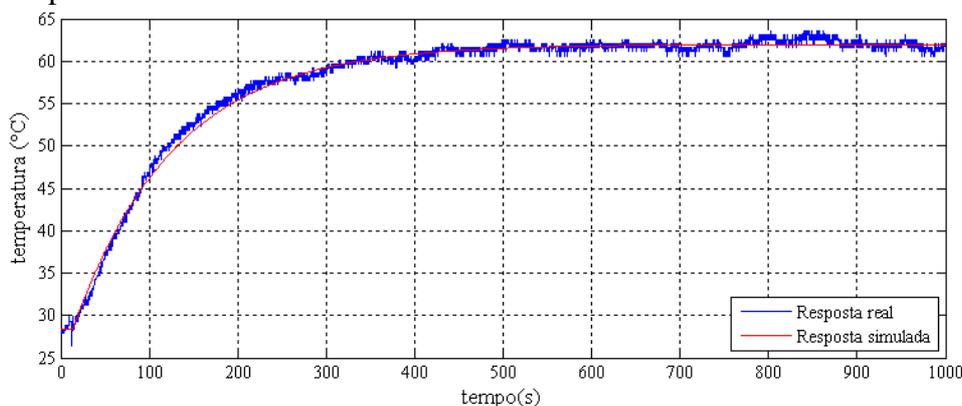


Figura 7: Resposta real e resposta simulada



A sintonia do controlador foi feita pelo método de Ziegler e Nichols em malha aberta. 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, pois sistemas de primeira ordem geralmente não utilizam a ação de controle derivativa.

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

K_p	K_i	K_d
2,69	0,059	0

3.2. Ensaio em malha fechada

Para validar os parâmetros encontrados do controlador PI foram realizados ensaios com diferentes valores de referência. A curva representada em preto na Figura 8 mostra o comportamento do sistema para um valor de *setpoint* de 45°C. Pode-se observar a existência de um sobressinal considerável da temperatura.

A fim de reduzir o sobressinal e melhorar a resposta do sistema, foi realizado um ajuste fino do controlador alterando e testando empiricamente os ganhos K_p e K_i . Após algumas tentativas, chegou-se aos ganhos mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Ganhos do controlador obtidos através de ajuste empírico

K_p	K_i	K_d
3	0,050	0

Outro ensaio foi então executado com o mesmo *setpoint* de 45°C e os novos parâmetros. O ensaio resultou na curva representada em azul na Figura 8, que foi gerada com auxílio do *software* Matlab®, através dos dados amostrados salvos no arquivo de texto selecionado na tela de supervisão. É possível constatar que o desempenho do controlador melhorou satisfatoriamente, pois a resposta do sistema não apresenta mais o sobressinal, possui tempo de assentamento menor e um valor de erro estacionário praticamente nulo.

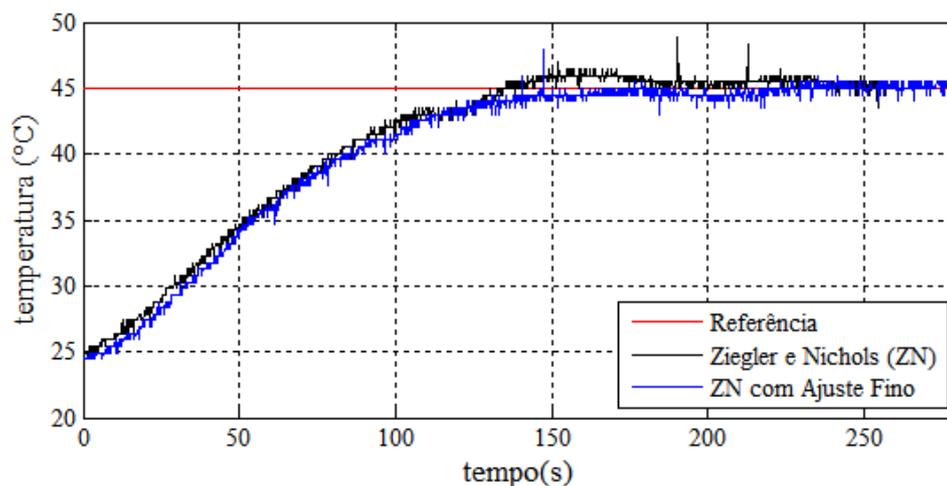


Figura 8: (em preto) Sintonia com Ziegler e Nichols, (em azul) Sintonia Ziegler e Nichols com ajuste fino.



Na Figura 9 pode-se ver a tela de interface em funcionamento com os parâmetros de sintonia Ziegler e Nichols já ajustados.

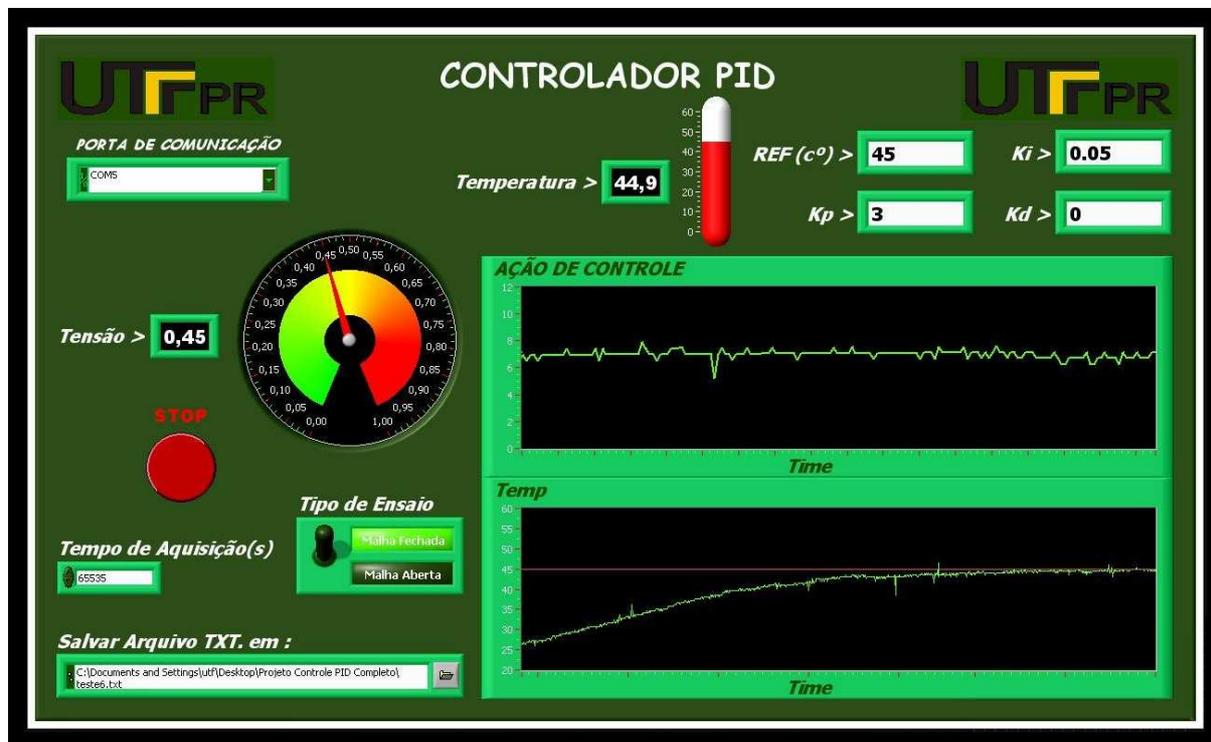


Figura 9: Tela de interface em funcionamento

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentado neste artigo é de relevante importância para complementar as atividades de ensino em disciplinas que envolvem controle, automação, sistemas microcontrolados e sistemas embarcados. A partir de um kit educacional microcontrolado que possui um simples processo térmico com um resistor e um sensor de temperatura, elaborou-se um controle embarcado supervisionado, incrementando recursos funcionais que ampliam a gama de aplicações em disciplinas da grade dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação.

Desta forma, os alunos terão a oportunidade de visualizar os resultados práticos e fazer comparações com os resultados teóricos. A interface criada é uma excelente ferramenta prática para o conteúdo programático do professor, facilitando e auxiliando a administração de aulas de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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).



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

HAMITI, K.; VODA-BESANÇON A.; ROUX-BUISSON H. Position control of a pneumatic actuator under the influence of stiction. **Control Eng. Praticce**, v.4, n.8, 1996.

INSTRUMENTS, N. **LabVIEW**. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/>> Acesso 07 abr. 2012.

INSTRUMENTS, T. **Data sheet – LM35**. Disponível em: <<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=lm35&fileType=pdf>> Acesso em: 07 abr. 2012.

KUO, B. C. Digital control systems. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1992.

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

MICROCHIP. **Data sheet - PIC18F4550**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632b.pdf> > Acesso em: 15 abr. 2012.

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.

SUPERVISORY SYSTEM FOR TEMPERATURE CONTROL IN EDUCATIONAL KIT MICROCONTROLLER

Abstract: *This paper describes the development of a thermal supervised control system using the Educational kit XM118 that is based on the microcontroller PIC18F4550 having USB communication interface. The work was developed in order to provide support for the disciplines of Control Systems and Microcontrolled Systems of undergraduate courses in Electrical Engineering and Automation and Control Engineering at Federal University of Technology - Parana, campus Cornélio Procópio. Through the computer interface software developed in LabVIEW, students can view the system's response and also vary the parameters of PID controller embedded in the PIC, consolidating the concepts learned in classroom by using a real system.*

Keywords: *Temperature Control, Microcontrollers, Control System, Supervisory System.*