

SISTEMA DIDÁTICO DE CONTROLE DE TEMPERATURA

DIÓGENES V. M. FERREIRA, ALAN KARDEK RÊGO SEGUNDO, VINÍCIUS DE OLIVEIRA GOMIDE, HUGO S. NOGUEIRA

*Departamento de Engenharia de Controle e Automação e de Técnicas Fundamentais-DECAT
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

*E-mails: diogenes_viegas@ymail.com, alankardek2@gmail.com,
viniciusgomide@yahoo.com.br, hugo.nogueira@hotmail.com*

This work shows the development of a low-cost didactic equipment to support the learning process of Control Engineering. The system consists of: an acrylic structure forming a forced ventilation tunnel by a mini-fan; a heat resistance; LM35 temperature sensor; and microcontroller PIC18F4550, which communicates via USB with the supervisory system. This software enables identification of system parameters, tuning the controller, adjustment of controller parameters in real-time, and monitoring of variables of the system by means of graphics.

Keywords: Microcontroller, PID, SCADA System.

Neste trabalho foi desenvolvido um equipamento didático de baixo custo para auxiliar no ensino de Teoria de Controle de Sistemas nos cursos de Engenharia. O sistema consiste em: uma estrutura montada em acrílico formando um túnel de ventilação forçada por meio de um miniventilador (*cooler* de computador); uma resistência de aquecimento; sensores de temperatura LM35; e um microcontrolador PIC18F4550, que se comunica via USB com o programa supervisor do sistema. Esse *software* possibilita a identificação dos parâmetros do sistema, a sintonia do controlador, o ajuste dos parâmetros do controlador em tempo real, e o monitoramento das variáveis do sistema por meio de gráficos.

Palavras-chave: Microcontrolador, PID, Sistema SCADA.

1 Introdução

Entender e controlar os materiais e forças da natureza em benefício da humanidade é uma das principais preocupações da engenharia, permitindo que engenheiros de controle desenvolvam controladores de sistemas e criem produtos úteis e economicamente viáveis para a sociedade (Dorf and Bishop, 2005).

Nota-se que com o aumento da competição global, sistemas de controles são fundamentais para um bom funcionamento de indústrias, laboratórios e processos diversos de diferentes áreas, desenvolvendo produtos de alto valor de mercado. Para Nise (2011), um sistema de controle tem como objetivo a obtenção de uma saída desejada e um desempenho desejado, a partir de uma entrada específica fornecida.

Na Universidade, educadores estão em constante busca de uma elevada eficiência no processo de ensino, mas existe um problema desafiador, que é oferecer aos alunos de graduação ferramentas pedagógicas interessantes e pragmáticas. As Universidades possuem como desafio proporcionar aos alunos uma experiência na capacidade de projetar, tendo diferentes pontos de vista e limitações de análise, ensinando que se é possível resolver problemas de um projeto real (Bristol, 1986). Para solucionar o problema mencionado, é essencial a aplicação de experimentos em que os alunos, na prática, complementem a teoria apresentada nas aulas com trabalhos reais envolvendo aplicações reais.

Usualmente os estudantes aprendem a modelar sistemas matematicamente, mas muitas das vezes não entendem perfeitamente o funcionamento de um controlador, e como a variação de seus parâmetros irão influenciar no seu comportamento. Nesta sequência, Zhao e colaboradores (2011) propuseram que fosse realizada a construção de um equipamento de controle de temperatura de uma linha de montagem industrial para melhoria na qualidade de produção e redução no consumo de energia. O objetivo do referido projeto foi aumentar a interação e interesse dos alunos através do método experimental de ensino. Segundo Cocota (2012) essa tendência associada à reduzida oferta no mercado de bancadas didáticas para o controle de sistemas contínuos nos mostra que o ensino de engenharia associado à prática se tornou uma metodologia indispensável na motivação aos estudantes de graduação.

Atualmente, professores de engenharia contam com muitas ferramentas para auxiliar o aluno a absorver melhor o conteúdo. O uso do quadro branco, slides e outras tecnologias estão entre elas. Apesar de realmente auxiliarem no processo de aprendizado, alguns estudos afirmam que outras metodologias mais eficazes podem ser utilizadas em conjunto para tornar este processo mais eficaz, e como pode ser observado na Figura 1, as atividades que envolvem o desenvolvimento de alguma montagem real pode aumentar o percentual do que os alunos irão lembrar das atividades desenvolvidas para 90%. Portanto, o ensino de engenharia associado a atividades práticas baseadas em projetos ou problemas tornou-se essencial na motivação dos alunos de graduação.

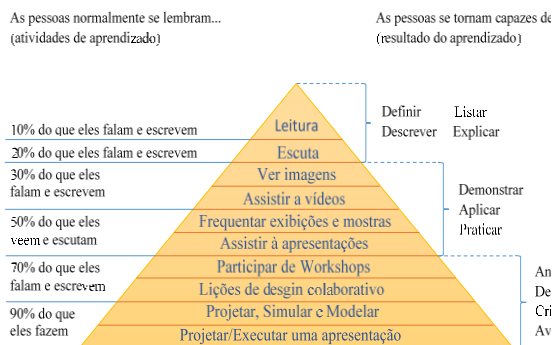


Figura 1. Cone de Edgar Dale

Este trabalho, baseado em Ferreira (2014) e Rêgo Segundo et al. (2015), apresenta o projeto e o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para auxiliar o ensino de Teoria de Controle de Sistemas para estudantes de graduação. A ferramenta didática consiste em um tubo de ventilação forçada por meio de um miniventilador (cooler), uma resistência elétrica de aquecimento, sensores de temperatura e um circuito eletrônico baseado em um microcontrolador. A bancada se comunica com um programa computacional que permite a realização de práticas de controle de temperatura em malha fechada, por meio do ajuste automático da velocidade do cooler. Neste caso, a potência entregue para a resistência de aquecimento é mantida constante. Para isso, o estudante deve identificar os parâmetros da planta, bem como projetar e sintonizar um controlador para o sistema.

2 Disciplina de Microcontroladores Aplicados à Engenharia de Controle e Automação

A disciplina de Microcontroladores Aplicados a Engenharia de Controle e Automação foi criada para facilitar o entendimento de conceitos teóricos aprendidos durante o curso de Engenharia de Controle e Automação usando a metodologia PBL (*Project Based Learning* – Metodologia Baseada em Projetos). A disciplina possui 60 horas, sendo duas teóricas e duas práticas por semana, incluindo o tempo gasto com avaliações aos alunos durante o semestre. O método de avaliação consiste em relatórios de aulas práticas e apresentação do trabalho final, que envolve a criação de um dispositivo para fazer a interface com os sistemas operacionais Android ou Windows. Portanto, os estudantes devem desenvolver a capacidade de projetar um sistema tanto em termos de hardware e quanto de software no final do semestre, o que facilita a criação de conceitos relacionados a sistemas embarcados, eletrônica, sistemas de controle, sistemas integrados, interfaces e sistemas de programação.

3 Desenvolvimento do Protótipo

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Protótipos e Desenvolvimento de Novas Tecnologias

e no Laboratório de Máquinas Elétricas, ambos do Departamento de Engenharia de Controle e Automação da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

O trabalho foi concebido em três etapas: (i) projeto e desenvolvimento do dispositivo eletrônico; (ii) desenvolvimento do programa computacional supervisor; e (iii) projeto e sintonia de controladores pelos métodos Ziegler-Nichols e Cohen-Coon.

3.1 Projeto e Desenvolvimento do Dispositivo Eletrônico

O hardware foi desenvolvido usando o ambiente de desenvolvimento PROTEUS, utilizando técnicas para imunidade a ruído dos sinais apresentadas por García et al. (2004). O projeto envolveu conhecimentos em Eletrônica, Sistemas Embarcados e Instrumentação. O dispositivo foi desenvolvido utilizando um microcontrolador PIC18F4550, um miniventilador de computador, resistência elétrica de aquecimento, sensores de temperatura LM35, encoder de velocidade, conector USB, transistores, LEDs, resistores e capacitores. A Figura 2 mostra o diagrama eletrônico da placa e os respectivos componentes.

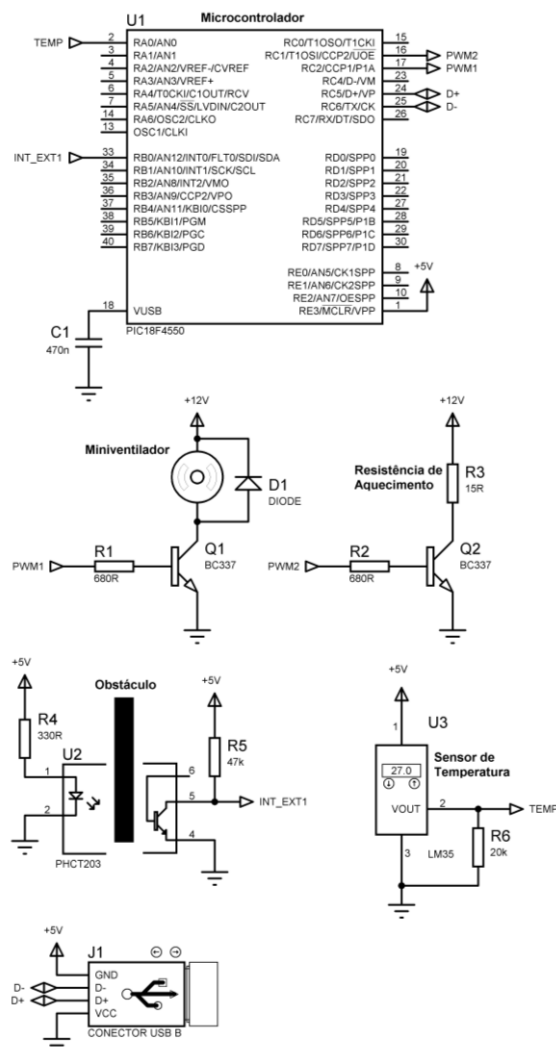


Figura 2. Diagrama eletrônico do sistema

3.1.1 Sensor de Temperatura

No desenvolvimento do sistema de medição de temperatura foram utilizados sensores LM35, por apresentarem baixo custo e boa precisão, além de larga faixa linear de medição.

O LM35, fabricado pela National, é um sensor de temperatura cuja tensão no pino de saída é linearmente proporcional à temperatura. Ele opera em uma faixa de temperatura que vai de até -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$, com tensão de operação de 4V a 30V. Devido à sua baixa impedância de saída, juntamente com o fator linear de escala correspondente a 10 mV para cada grau Celsius de temperatura, o LM35 possui interface de medição simples (NATIONAL, 1999). Para a medição de temperatura do sistema, foram utilizados três sensores de temperatura LM35, para que o usuário possa analisar a temperatura do sistema em diferentes posições.

3.1.2 Encoder de Velocidade

Com o objetivo de determinar a velocidade das pás do cooler, um medidor de velocidade foi projetado utilizando um sistema de emissão e recepção de sinal infravermelho, por meio da chave optoeletrônica PHCT203. O encoder funciona da seguinte maneira: quando a luz IR não chega ao receptor, devido ao bloqueio efetuado pela pá do miniventilador, ele apresenta saída em nível (+5V); já quando a luz IR chega ao receptor, ao passar entre duas pás do miniventilador, ele apresenta saída em nível baixo (0V). Desta forma, é possível calcular a velocidade de giro das pás, em rotações por segundo (rps), pois à medida que o mini ventilador gira, o encoder fornece um sinal de saída com frequência proporcional à velocidade.

3.1.3 Microcontrolador

O microcontrolador PIC18F4550, fabricado pela Microchip Technology, foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho por possuir a vantagem de um elevado desempenho computacional a um preço acessível, além de já possuir módulo de comunicação USB no próprio chip. Ele possui 40 pinos, os quais 35 deles podem ser configurados como entrada/saída e diversos periféricos como memória EEPROM de 256 bytes, um módulo CCP e ECCP, dois comparadores analógicos e temporizadores de 8 bits e/ou 16. A Figura 3 mostra o fluxograma do programa desenvolvido para o microcontrolador, utilizando linguagem C.

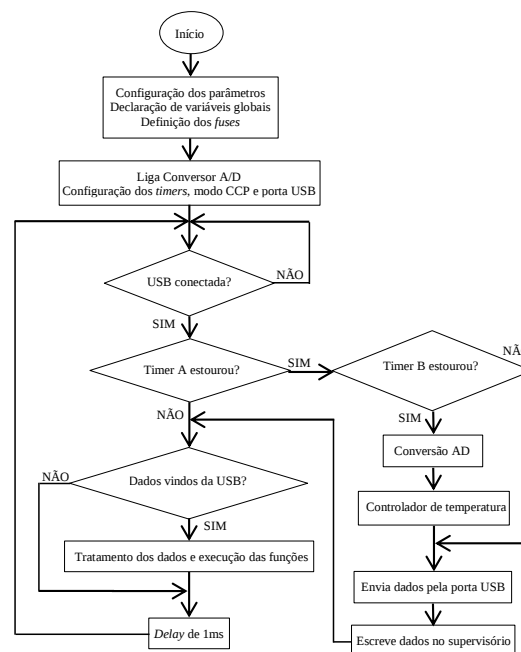


Figura 3. Fluxograma simplificado do Firmware

3.2 Desenvolvimento do Sistema Supervisório

Foi desenvolvido um sistema SCADA em linguagem de programação C Sharp (C#) por meio do ambiente de desenvolvimento integrado Visual Studio Express. O sistema supervisório foi projetado para atender às necessidades da aplicação, de forma simples, amigável e com interface autoexplicativa, o que favorece o caráter didático do sistema.

A aplicação consiste em três telas contendo três gráficos cada (temperatura, saída do controlador de temperatura e erro ao longo do tempo), um indicador de temperatura, botões, caixas de texto e caixas de diálogo para configuração dos parâmetros Kp, Ki e Kd do controlador, assim como a temperatura de referência (*setpoint*) do controlador, sendo uma tela para cada sensor. A quarta tela possui tabelas de definição de parâmetros do controlador pelos métodos de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon. A Figura 4 mostra o fluxograma simplificado do sistema supervisório.

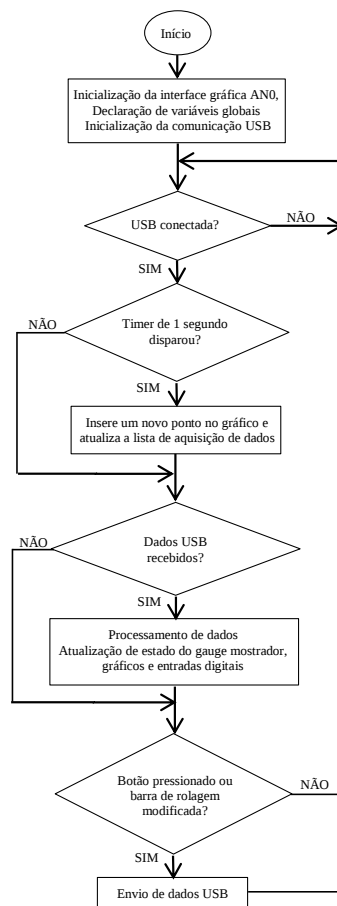


Figura 4. Fluxograma simplificado do sistema SCADA

3.3 Projeto e Sintonia do Controlador

O sistema foi desenvolvido para proporcionar um controlador PID, que possui sinal de saída de acordo com a Equação 1. No entanto, neste trabalho o termo derivativo foi desprezado, pois a dinâmica do sistema de temperatura é muito lenta (Ibrahim, 2002).

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (1)$$

Em que: $U(s)$ é a saída de controle; $E(s)$ é o erro, ambos no domínio de Laplace; K_p é o ganho proporcional; T_i é o tempo integral; e T_d é o tempo derivativo.

O Controlador foi projetado usando o Método de Ziegler-Nichols em Malha Aberta ou Método do Processo da Curva de Reação. Para o projeto foi aplicado um degrau de 12V (100%) sobre a resistência e um degrau de 11rps sobre o cooler. Após a estabilização da temperatura, foi aplicado um degrau de 23 rps sobre o cooler. Logo, traçou-se um gráfico da temperatura do sistema ao longo do tempo. Verificou-se que a resposta foi uma curva em forma de “S”, o que permitiu a aplicação do Método de Ziegler-Nichols. A partir da curva de reação do processo, foi determinado o tempo de atraso ou tempo mor-

to (τ_{dead}), a constante de tempo (τ) e a variação da saída (M_u), de acordo com a variação do degrau (X_0). As constantes K_p , T_i e T_d foram encontrados de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do Método de Ziegler-Nichols.

Controller	K_p	T_i	T_d
P	$K_p = \frac{X_0 \times \tau}{M_u \times \tau_{dead}}$	-	-
PI	$K_p = \frac{0.9 X_0 \times \tau}{M_u \times \tau_{dead}}$	$T_i = 3.3 \tau_{dead}$	-
PID	$K_p = \frac{1.2 X_0 \times \tau}{M_u \times \tau_{dead}}$	$T_i = 2 \tau_{dead}$	$T_d = \frac{\tau_{dead}}{2}$

Segundo Ziegler e Nichols, a função de transferência em malha aberta do sistema pode ser aproximada de um sistema de primeira ordem com atraso de tempo (Ibrahim, 2002), de acordo com a Equação 2. A função de transferência do controlador PI pode ser descrita de acordo com a Equação 3.

$$G_p(s) = \frac{M_u e^{-s\tau_{dead}}}{X_0(1 + s\tau)} \quad (2)$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3)$$

A função de saída do controlador foi transformada do domínio contínuo para o discreto, por meio do Método de Tustin (Ibrahim, 2002), de acordo com a Equação 4. Assim, a saída discreta do controlador pode ser encontrada de acordo com a Equação 5. Desta forma, o controlador foi implementado no firmware do microcontrolador.

$$s = \frac{2z - 1}{Tz + 1} \quad (4)$$

Em que: s é a variável de Laplace; z é a variável de transformada Z; e T é o período de amostragem.

$$u(k) = u(k-1) + K_p \left(\frac{2T_i + T}{2T_i} \right) e(k) + K_p \left(\frac{-2T_i + T}{2T_i} \right) e(k-1) \quad (5)$$

Em que: k é o tempo de amostragem atual.

Por meio do Método de Ziegler-Nichols em Malha Aberta, foram obtidas as funções de transferência da planta e do controlador, de acordo com a Figura 5.

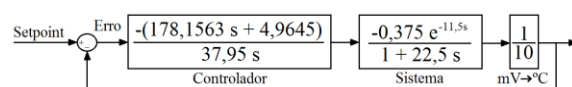


Figura 5 - Diagrama de blocos do sistema segundo o método de Ziegler-Nichols.

A Figura 6 mostra o fluxograma do controlador do sistema, desenvolvido em linguagem C.

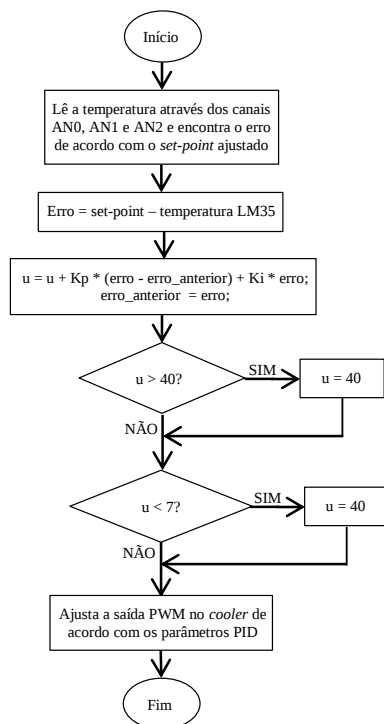


Figura 6. Fluxograma simplificado do controlador de temperatura

4 Resultados e Discussão

A Figura 7 mostra o resultado final do dispositivo eletrônico desenvolvido neste trabalho. Pode-se observar o túnel de vento montado em acrílico contendo os três sensores de temperatura, a resistência de aquecimento e o mini ventilador para a ventilação forçada.

Abaixo do túnel de vento se encontra a placa de circuito impresso do microcontrolador, que realiza a leitura da temperatura dentro do ambiente e da velocidade do cooler, estabelece a comunicação com o sistema supervisor via USB, e controla a velocidade do cooler e a potência dissipada pela resistência.



Figura 7. Sistema Túnel de Vento (vista lateral)

A Figura 8 apresenta uma visão da parte de trás do sistema, com destaque ao sistema de medição de velocidade, onde os sensores óticos de emissão e recepção dos sinais foram posicionados de forma alinhada na parte frontal e traseira do cooler.



Figura 8. Vista traseira do sistema

O resultado do sistema supervisor pode ser observado na Figura 9. Nesse programa o usuário pode visualizar diversas informações sobre o sistema em tempo real, tais como: sinal de saída do controlador de temperatura, erro da temperatura em relação ao set-point e resultado de medição das temperaturas nos três pontos distintos.

Para se validar o funcionamento do sistema, foi realizado um teste com a planta funcionando em modo automático, ou seja, com o controle digital em malha fechada ativado, utilizando os parâmetros de sintonia do controlador encontrados pelo método de Ziegler-Nichols. Então, o sistema foi ligado e o valor de referência (set-point) de temperatura desejada foi definido como 39 °C e, após alguns segundos, modificado para 33 °C e 36 °C, nessa ordem.

Observa-se na Figura 10 que o sistema respondeu de forma satisfatória, em que a temperatura se estabiliza em torno do valor desejado sem grandes oscilações (inferior a 0.5 °C). Como mostrado na Figura 11, o erro do sistema manteve-se muito baixo após o período transitório entre a mudança de valor de referência da temperatura.

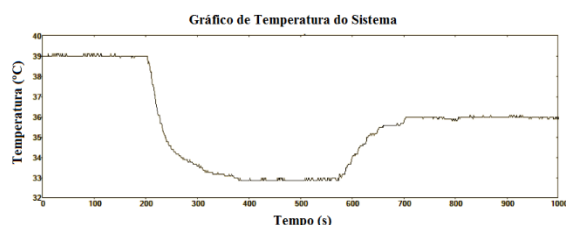


Figura 10. Curva da temperatura do sistema didático ao longo do tempo

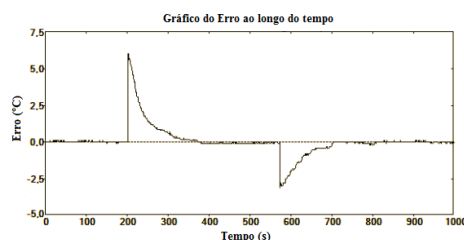


Figura 11. Curva do erro de temperatura do sistema didático ao longo do tempo

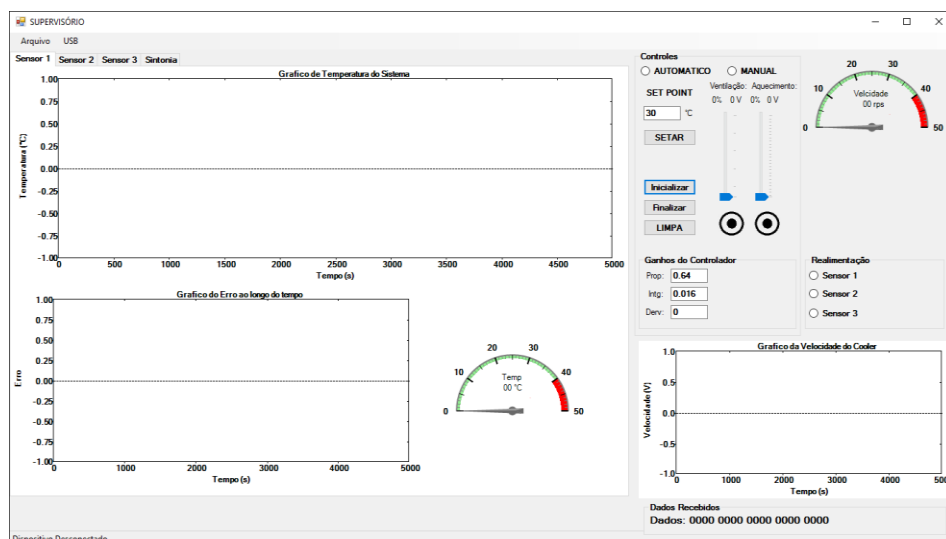


Figura 9. Sistema supervísório

4 Conclusão

Este trabalho consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta baixa para auxiliar no processo de ensino e aprendizagem de Teoria de Controle de Processos nos cursos de graduação em Engenharia. O sistema apresentou funcionamento satisfatório e despertou muito interesse dos discentes durante as aulas de Microcontroladores Aplicados à Engenharia de Controle e Automação, por possibilitar a visualização prática de conceitos vistos em outras disciplinas do curso.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer a Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, e a Fundação Gorceix pelo seu apoio científico e financeiro.

Referências Bibliográficas

- Bristol, E. H. (1985). An Industrial Point of View on Control and Theory, IEEE Control Systems Magazine 6(1), p.24-27, Jun.
- Cocota, J. A. N. J.; Fujita, H. S.; and Silva, I. J. (2012). A low-cost robot manipulator for education, IEEE Int. Conf. on Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), p. 164-169, Jun.
- Dorf, R.C. and Bishop, R. H. (2005). Modern Control Systems. 10ª Ed, 2005 New York: Prentice Hall. 881 p.
- Ferreira, D. V. M. (2014). Desenvolvimento de Sistema Educacional para Teoria de Controle de Sistemas. 2014. 48 p. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

- García, M. A. P.; Antón, J. C. A.; Rodríguez, J. C. C.; Martín, F. J. F.; and Ortega, G. J. G. (2002). Instrumentación Electrónica. Madrid: Ed. Thomson, 2004.
- Gimenez, S. P. Microcontroladores 8051. 1ª Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil.
- Ibrahim, D. (2002). Microcontroller Based Temperature Monitoring and Control. 1ª Ed. Newnes.
- Miyadaira, A. N. (2004). Microcontroladores PIC18: Aprenda e Programe em Linguagem C. São Paulo: Érica. 400p.
- National Datasheet LM35 (1999), National Semiconductor. Disponível em <<http://www.webtronico.com/documentos/LM35.pdf>>. Acesso em 20 Set. 2014.
- Nise, N. S. (2011). Engenharia de Sistemas de Controle. 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Rêgo Segundo, A. K.; Cocota, J. A. N. J.; and Ferreira, D. A. M. (2015). Development of an educational tool for Control Engineering, IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), p. 594-601, Mar 2015.
- Zhao, P.; Sun, B.; and Wen, Y. J. (2012). Experimental Teaching System of the Assembly Line Heating Furnance Temperature Control Based on LabVIEW, IEEE International Conference: System Science and Engineering (ICSSE), p. 578-581, Jun.