



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

“Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças”

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFCG-UFPE

KIT DE DESENVOLVIMENTO PARA MICROCONTROLADORES ADUC APLICADO AO ENSINO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Tomás Victor Gonçalves Pereira Araújo – tomas@dee.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG,

Departamento de Engenharia Elétrica – DEE,

Laboratório de Instrumentação e Controle – LIEC

Av. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó

58109-970, Campina Grande – PB

Carlos Alberto de Sousa Filho – calberto@dee.ufcg.edu.br

Antônio Marcus Nogueira Lima – amnlima@dee.ufcg.edu.br

Péricles Rezende Barros – prbarros@dee.ufcg.edu.br

***Resumo:** Objetivando o desenvolvimento de sistemas embarcados e de controle, foi desenvolvida uma plataforma programável. Controladores são implementados utilizando uma placa de desenvolvimento para microcontroladores da família ADuC. Através da comunicação serial é possível então fazer uma interface com o PC, de modo que o estudante possa observar o comportamento dinâmico de um sistema real na tela. Uma solução embarcada é viabilizada, possibilitando a implementação de um firmware dedicado para o controle do mesmo sistema. Um estudo de caso é feito a partir da implementação de um controlador com algoritmos ON/OFF, P e PI, sendo utilizados para controlar a temperatura de um modelo em escala reduzida de um secador de grãos.*

***Palavras-chaves:** Microcontrolador, Teoria de Controle, Sistemas Embarcados.*

1. INTRODUÇÃO

Uma das formas para facilitar o aprendizado da teoria de controle e de sistemas embarcados é incluir na programação destas disciplinas várias atividades de laboratório nas quais o estudante realize experimentos não virtuais relacionados com os assuntos estudados em sala de aula. Para que esta atividade prática seja efetiva, no que concerne aos assuntos específicos destas disciplinas, é necessário dispor de uma plataforma de estudos, ou seja, de um ambiente que, usualmente, é constituído de processos a serem controlados, sensores, atuadores, sistema de controle e interfaces de comunicação.

Várias configurações para este tipo de plataforma já foram propostas como as de Aström e Östberg (1986), Hurley e Wölfle (1997), Chen e Naughton (2000) e um exemplo recente é apresentado por Zilouchian (2003). De modo geral, as configurações das plataformas não contemplam a possibilidade de que o estudante possa de fato implementar o sistema de controle como um sistema embarcado que pode funcionar de modo independente do computador pessoal ou dos instrumentos de laboratório utilizados durante a realização dos experimentos. De fato, a visão de alto nível utilizada no projeto da lei de controle e a visão de baixo nível no projeto de sistemas embarcados são relativamente independentes. Entretanto, um estudante de engenharia elétrica ou de engenharia de controle e automação deve ser capaz de correlacionar estas duas visões e realizar estes dois tipos de projeto.

Este trabalho propõe uma plataforma para estudos da teoria de controle e de sistemas embarcados. Um diagrama de blocos da plataforma proposta é apresentado na figura 5. Antes disso, na configuração proposta, o processo a ser controlado representa um secador de grãos experimental, onde é possível controlar a temperatura do fluxo de ar aquecido que secará os grãos. Sua escolha é um dos aspectos importantes da plataforma em razão de seu funcionamento e da simplicidade de sua montagem física, elétrica e eletrônica.

O aquecimento do fluxo de ar do secador de grãos apresenta um comportamento linear de primeira ordem além de possuir uma dinâmica relativamente lenta. Essas características possibilitam a identificação mais facilitada dos parâmetros do sistema, e através da aquisição de dados o aluno poderá acompanhar visualmente o comportamento dinâmico e em regime permanente do secador de grãos. Analisadas as características do sistema o controlador é então projetado e implementado diretamente em um sistema embarcado baseado no microcontrolador ADuC832 da família ADuC (*Analog Devices micro Controller*).

Na seção 2 deste artigo é apresentada o Kit de Desenvolvimento para Microcontroladores ADuC (KIT-ADuC) com seus itens desenvolvidos. Um sistema de aquisição de dados de baixo custo interligado a um PC (*Personal Computer*) é implementado a partir de uma placa de desenvolvimento para os microcontroladores ADuC da *Analog Devices*. Para tal aplicação, um *firmware* específico foi criado, possibilitando a comunicação do PC com o microcontrolador que, por sua vez, possui o programa em questão gravado, estabelecendo assim uma interface de alto nível.

Na seção 3 é feita uma breve descrição sobre o secador de grãos e a forma de acionamento utilizada. Para o estudo de controle clássico, a não linearidade apresentada pelo circuito de acionamento da resistência de aquecimento baseado em TRIAC, representa uma dificuldade, uma vez que a definição dos parâmetros de controle é feita a partir de uma resposta linear do sistema. Esta não linearidade do sistema de acionamento é compensada através de uma aproximação linear, tornando-a transparente para a implementação do controlador.

Para exemplificar a utilização de diferentes técnicas de controle, na seção 4 são utilizados controladores ON/OFF (Liga/Desliga), P (Proporcional) e PI (Proporcional Integrativo) num experimento comparativo. Nesta situação o estudante pode empregar regras de sintonia de controladores, como a de Ziegler-Nichols e cancelamento de pólos, além de comparar o desempenho dos controladores analisando a resposta a um degrau de temperatura ou a um perfil variável. Uma vez que o controlador será implementado na forma de um *firmware* gravado no microcontrolador, técnicas de discretização de sistemas devem ser utilizadas. Assim, ao passo que o controlador atua sobre o sistema, os gráficos dos sinais de referência e saída da planta são observados na tela do PC.

2. PLATAFORMA EXPERIMENTAL (PE)

Uma plataforma de desenvolvimeto para sistemas embarcados pode ser apoiada em diversos tipos de dispositivos, pois o controle de um sistema é feito a partir de uma unidade microprocessada que fará interações mediante uma programação estabelecida. Devido à disponibilidade de recursos de instrumentação, velocidade de processamento, e baixo custo, os microcontroladores da família ADuC (*Analog Devices*, 2003) se configuram como uma das melhores alternativas para o desenvolvimento de projetos de sistemas embarcados. A Placa de Desenvolvimento ADuC (PD-ADuC) foi projetada como um sistema didático e de desenvolvimento de sistemas embarcados de modo a caracterizar-se como uma solução eficiente para as atividades de pesquisa realizadas no Laboratório de Instrumentação e Controle (LIEC). A PD-ADuC possibilita ao usuário o acesso a todos os recursos do

microcontrolador ADuC montado na placa, de forma que a aplicação em estudo pode ser desenvolvida sem a necessidade de montagens adicionais.

Com os recursos de instrumentação facilmente acessíveis, um sistema de aquisição de dados utilizando o microcontrolador ADuC pode ser implementado sem maiores dificuldades. Utilizando a porta de comunicação serial (RS-232) do PC, é possível acessar os recursos internos do microcontrolador. Para tal, é necessário que o *firmware* gravado no microcontrolador seja capaz de interpretar e responder comandos seriais transmitidos pelo PC. Nesta situação é estabelecida uma interface de alto nível, pois a arquitetura interna e a seqüência de instruções para o acesso de cada um dos recursos do microcontrolador ficam omitidas ao usuário de modo que apenas lançando mão dos comandos seriais adequados o recurso desejado é acessado através do PC.

Esta interface de alto nível permite a criação do Módulo de Aquisição de Dados e Controle (MADC), que é constituído a partir da união da PD-ADuC com o *firmware* interpretador de comandos seriais (“Comandos BT”). Com o MADC conectado ao PC, com uma porta serial, é possível realizar operações de aquisição de dados e/ou de controle sobre o processo em estudo sem a necessidade de um desenvolvimento de programação de baixo nível. Os dados adquiridos e algoritmos de controle são executados e visualizados no PC.

Com a mesma placa, tem-se então duas plataformas: uma direcionada para o estudo e desenvolvimento de sistemas embarcados baseados nos microcontroladores ADuC, onde o aluno fará programação de baixo nível (liguagem C ou *assembly*), explorando as características da arquitetura e recursos periféricos. A outra plataforma se caracteriza como um sistema de aquisição de dados e controle através do PC, onde os algoritmos são implementados em alto nível.

Nos experimentos de controle, ao passo que os algoritmos são refinados e um conhecimento mais profundo do sistema é feito, uma estrutura para o desenvolvimento de uma aplicação embarcada totalmente autônoma (*stand alone*) é constituída. Os algoritmos de controle desenvolvidos em ferramentas como o MATLAB ou LabVIEW, podem ser convertidos para um *firmware* dedicado através de compiladores como o KEIL (Analog Devices, 2001), por exemplo, e gravados na PD-ADuC, que não precisará mais do PC para controlar o sistema em estudo.

2.1 Placas de Desenvolvimento ADuC (PD-ADuC)

A maioria das atividades de pesquisa no LIEC está focada no desenvolvimento de técnicas e equipamentos para sistemas de instrumentação, controle de processos e sistemas embarcados. Devido à necessidade da criação de protótipos para várias pesquisas em andamento, a PD-ADuC se apresenta como uma alternativa viável, pois é flexível e de baixo custo.

Os recursos do microcontrolador ADuC montado estão disponibilizados para qualquer sistema externo através de uma placa de uso geral, nomeada PD-ADuC. A PD-ADuC é compatível com: ADuC812, ADuC816, ADuC824, ADuC832, ADuC841 e ADuC842, de forma que a escolha do microcontrolador é feita face à necessidade da aplicação. Com a PD-ADuC o estudante pode realizar diversos experimentos que utilizam os microcontroladores da linha ADuC. A placa possui comunicação serial RS-232 que conectada ao PC, possibilita a gravação do *firmware*, além de permitir aplicações de aquisição de dados, onde os valores lidos no conversor A/D são transferidos ao PC.

Todos os recursos do ADuC832 estão acessíveis através de conectores (figura 1) utilizados de acordo com as necessidades do projeto em estudo. A PD-ADuC possibilita ao estudante identificar as características da arquitetura e exercitar a utilização dos recursos dos microcontroladores. Como a placa é de uso universal, a criação de protótipos embarcados

torna-se de fácil execução, de forma que o usuário concentrará seus esforços em desenvolver o *firmware* apropriado antes da elaboração do projeto final.

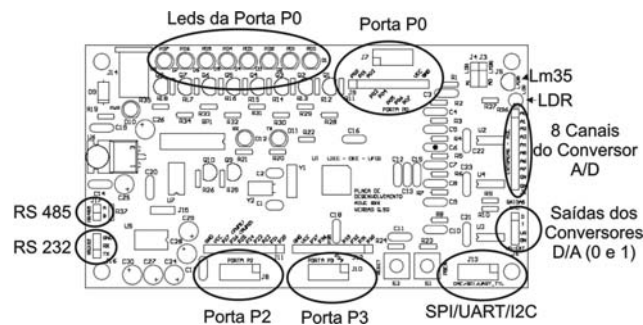


Figura 1 - Disposição dos recursos da PD-ADuC.

Cada um dos oito canais do conversor A/D possui um pré-condicionamento de sinal, sendo este composto por um *buffer* externo que minimiza o erro de carregamento no ponto de medição. Além disso, possui um filtro passa-baixas destinado a eliminar ruídos de alta frequência. Um sensor de temperatura LM35 e um sensor de luminosidade com LDR estão conectados aos canais 0 e 1 respectivamente do conversor A/D do microcontrolador.

Objetivando a possibilidade de expansão, todas as conexões externas da placa estão padronizadas, de forma que equipamentos adicionais quando conectados à PD-ADuC, aumentam sua gama de aplicações. Os oito pinos de cada uma das portas de E/S (Entrada/Saída) do microcontrolador estão disponíveis em conectores individuais juntamente com a tensão de alimentação (5V e GND). Deste modo, as placas suplementares se conectam a PD-ADuC sem a necessidade de alimentação externa. Estas placas adicionais (compatíveis com a PD-ADuC) constituem o que designamos de KIT-ADuC. A seguir são listadas as placas que o compõem:

- Placa de Leds: permite a visualização dos valores das portas de E/S;
- Placa de Relés: quatro relés para conexão em qualquer uma das portas;
- *Driver* PWM: Amplifica os sinais PWM com nível TTL produzidos pelo microcontrolador, podendo acionar cargas de até 80W;
- Placa de *Encoders*: possibilita a alimentação e a leitura dos sinais de dois *encoders* ópticos;
- Mux Analógico: permite a conexão de 32 canais de entrada analógicos com o qual são multiplexados e transferidos à PD-ADuC;
- Módulo de RF, onde a comunicação serial sem fios é estabelecida entre duas ou mais PD-ADuC ou o PC.

2.2 Transformando a Placa ADuC no Controlador

Como descrito até então a PD-ADuC se caracteriza apenas por ser uma plataforma de estudo e desenvolvimento de aplicações cujos elementos primordiais são os microcontroladores ADuC. Devido à disponibilidade de recursos de *hardware* para aquisição de dados e controle, foi programado um *firmware* com a finalidade de transformar a PD-ADuC em uma interface com sistemas externos para o PC. O *firmware* criado juntamente com a PD-ADuC formam uma nova ferramenta denominada Módulo de Aquisição de Dados e Controle ou MADC (figura 2).

A necessidade de comunicação serial direta entre o MADC e o PC culminou na criação dos “Comandos BT”. A origem do nome BT é uma referência para comandos básicos

para interface “*Basic Transmission*”. As letras **T** e **V** demarcam o início e o fim de um quadro de comando, respectivamente.

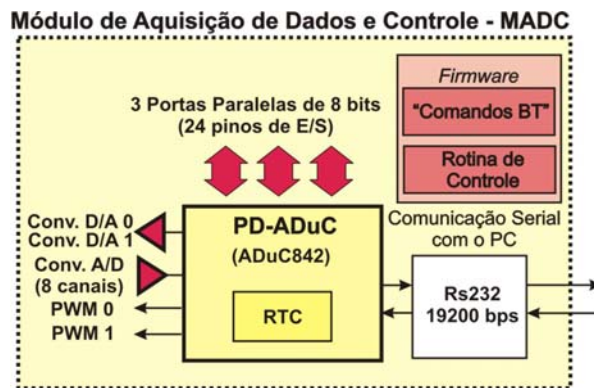


Figura 2 - Firmware dos “Comandos BT” gravado na PD-ADuC formando o MADC.

O quadro de um “Comando BT” é formado por uma seqüência de até dez caracteres ASCII (*American Standard Code for International Interchange*) que são interpretados pelo MADC. Como cada caractere possui oito bits, o quadro de um comando BT pode ter até 80 bits. O quadro de um “Comando BT” é apresentado na figura 2.

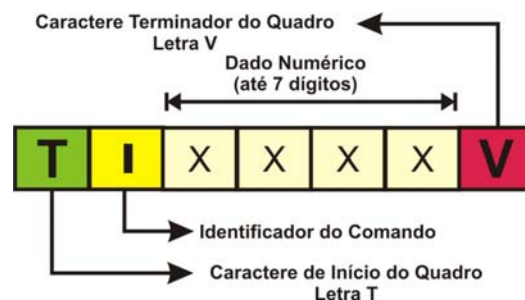


Figura 3: Quadro de um “Comando BT”.

Os “Comandos BT” utilizam caracteres ASCII para facilitar a criação de aplicações através de *softwares* como o MATLAB e o LabVIEW, nos quais operações com *strings* podem ser realizadas diretamente na porta serial do PC. Assim, vários sistemas podem ser implementados de forma que o processamento dos sinais de entrada e de saída ficará com o PC.

O propósito MADC é o apoio didático e à pesquisa, cuja sua instalação é mais adequada em ambiente de laboratório. Assim, devido à curta distância (aproximadamente 1m) entre o PC e o MADC, o que minimiza a possibilidade de erros, não foi implementado nenhum protocolo de correção, tornando o desenvolvimento da aplicação mais simplificado.

O conjunto de “Comandos BT” listado na tabela 1, permite acesso aos dispositivos de *hardware* existentes no MADC e leitura dos valores das variáveis internas do sistema de controle (referência, erro, sinal de controle e saída do sistema) de modo que valores numéricos também são transmitidos como caracteres ASCII. Os comandos que solicitam a leitura de determinado recurso ou variável, como o conversor A/D ou o porta de E/S, recebem como resposta uma seqüência de caracteres numéricos ASCII com o valor correspondente a leitura solicitada. Estes são seguidos de um caractere de controle (**n**) sinalizando para o PC o final da transmissão da resposta.

Tabela 1 – Lista dos “Comandos BT”

“Comando BT”	Id	Função	Faixa de Valores
TAxV	A	Leitura do canal x do Conversor A/D	0 a 9
TBxxxxV	B	Escrita do valor xxxx em mV no Conversor D/A 0	0000 a 2499
TCxxxxV	C	Escrita do valor xxxx em mV no Conversor D/A 1	0000 a 2499
TDyxxxV	D	Escreve o valor xxx na porta de E/S y	xxx – 000 a 255 y – 0 a 3
TEyV	E	Leitura do valor da porta de E/S y	y – 0 a 3
TFzyxV	F	Escrita do valor binário x no bit y da porta z	x – 0 ou 1 y – 0 a 7 z – 0 a 3
TGzyV	G	Leitura do valor binário do bit y da porta x	y – 0 a 7 z – 0 a 3
THhhmmV	H	Acerta o RTC do MADC	hh – 00 a 23 mm – 00 a 59
THORAV	I	Leitura do RTC do MADC	-
TPxxxxV	P	Escrita do valor xxxx no gerador PWM	xxxx – 0000 a 9999
TRxxxxxV	R	Escrita da referência para o controlador do MADC na forma Normalizada	xxxxx – 00000 a 10000
TrxxxxxV	r	Escrita da referência para o controlador do MADC no valor da grandeza em controle (no caso, temperatura)	xxxxx – 00000 a 99999
TIxV	I	Solicita a leitura do valor de uma variável do sistema de controle (Resposta do MADC dada em valores normalizados compreendidos entre 0 e 1)	x = R - Referência para o controlador; x = E - Sinal de erro; x = U - Sinal de controle; x = Y - Saída do sistema.
TIxV	I	Solicita a leitura do valor de uma variável do sistema de controle (A resposta do MADC dada em valores na grandeza em controle, no caso em questão a resposta é dada em °C)	x = r - Referência para o controlador; x = e - Sinal de erro; x = y - Saída do sistema.

Na figura 4 é mostrado um diagrama em blocos do sistema de controle do MADC, onde as variáveis internas do controlador embarcado: r (referência), e (erro), u (sinal de controle) e y (saída do sistema), são visualizados através dos “Comandos BT”. O Controlador embarcado no MADC, no caso C(s) é programado em uma rotina específica que fará o controle do sistema H(s).

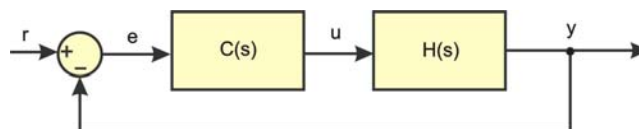


Figura 4 – Sistema de controle implementado no MADC e suas variáveis internas.

2.3 Montagem Experimental

Para construir uma PE, inicialmente conecta-se a porta de comunicação serial RS-232 do MADC em alguma porta serial do PC que possua o MATLAB 6 instalado ou algum outro *software* possibilite a transmissão de caracteres ASCII. Um diagrama de conexão básico pode ser configurado conforme mostrado na figura 4. Caso o sistema a ser controlado seja analógico, sua entrada será alimentada pela saída de algum dos conversores D/A da MADC. Por sua vez, a saída do sistema é ligada à entrada de algum canal do conversor A/D. O controlador embarcado no MADC atua sobre o sistema mediante ao estabelecimento do *set point*, que será dado diretamente no MATLAB. Além disso, as variáveis internas do sistema de controle podem ser observadas (adquiridas) em um mesmo gráfico, de modo que seja possível um acompanhamento simultâneo de seus valores. Uma condição para tal é que a aplicação desenvolvida faça referência às entradas e saídas do MADC e as variáveis internas utilizando os “Comandos BT” correspondentes para o acesso a seus valores.

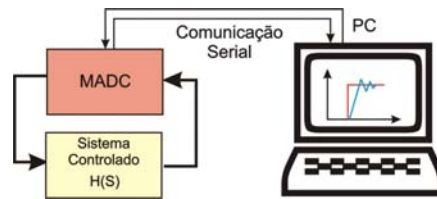


Figura 4: Montagem experimental com o MADC.

Para a implementação do controlador é necessário que a rotina dos algoritmos de controle seja incorporada no *firmware* do MADC, que é elaborado em linguagem de baixo nível a partir de uma ferramenta de desenvolvimento para microcontroladores, como o KEIL (Analog Devices, 2001). A PD-ADuC com o *firmware* de controle embarcado desenvolvido, passa a ser o controlador do sistema de forma que o PC será apenas uma interface de visualização dos valores do sistema e definição de *set-points* caracterizando-o como apenas uma Interface Homem Máquina (IHM).

3. EXPERIMENTO DE CONTROLE DE TEMPERATURA

3.1 Secador de grãos

Um sistema de secagem de grãos é empregado na agricultura para o controle da umidade e no tratamento das sementes armazenadas. Seu funcionamento é baseado em um fluxo de ar quente que diminui a umidade das sementes em função da temperatura e da velocidade do fluxo. Um sistema que represente um secador de grãos foi implementado (figura 5), de forma que o controlador embarcado no MADC fará o controle da temperatura do fluxo de ar de saída. Através de um pequeno ventilador, o ar frio (temperatura ambiente) é sugado para o duto de ar interno, em um fluxo constante.

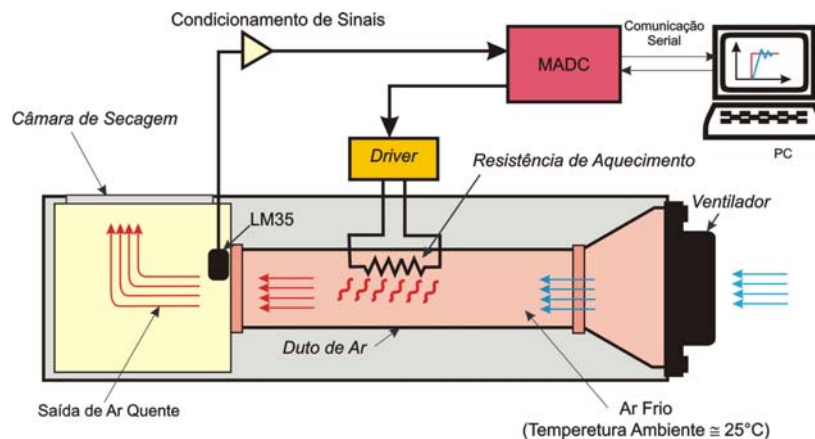


Figura 5 – Secador de Grãos conectado ao sistema de controle no MADC.

O ar que entra é aquecido através de uma resistência elétrica com uma potência nominal de 30W (220Vac). O ar quente é direcionado para a câmara de secagem e tem sua temperatura medida através de um sensor de temperatura LM35. O Controlador, de posse da leitura da temperatura do fluxo de ar quente e da referência estabelecida, fará o cálculo da saída de controle de modo que a potencia elétrica entregue à resistência de aquecimento produza erro nulo.

Um modelo matemático de sistema é obtido a partir do princípio da conservação de energia. A variação total de energia (1) é dada pela energia de entrada (2) fornecida ao sistema pelo efeito Joule na resistência de aquecimento menos as perdas por condução nas paredes de alumínio e pela massa de ar quente que sai do secador (3), onde C_{al} é a capacidade calorífica do alumínio. O calor perdido para o exterior (4) é proporcional à diferença de temperatura.

$$\frac{d}{dt} Ei = C \frac{d}{dt} (T - T_0) (J/s) \quad (1)$$

$$P = \frac{V^2}{R} (J/s) \quad (2)$$

$$Q_p = C_{al} (T - T_0) (J) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} Q_e = K (T - T_0) \quad (4)$$

Assim, de forma simplificada, pode-se definir do modelo do secador de grãos em questão em um sistema de primeira ordem apresentado em (5).

$$C \dot{T} = \frac{V^2}{R} - C_{al} \dot{T} - K (T - T_0) (J/s) \quad (5)$$

3.2 Acionamento da resistência de aquecimento e compensação de não linearidade

A resistência de aquecimento utilizada no secador de grãos montado para o experimento é alimentada diretamente a partir da rede elétrica, e a energia de entrada do sistema será proporcional ao valor médio da tensão de alimentação (2). A variação do valor médio da tensão de alimentação é obtida através de um circuito de acionamento bidirecional monofásico utilizando um TRIAC (TIC206D) como chave (Rashid, 1997), mostrado na figura 6a.

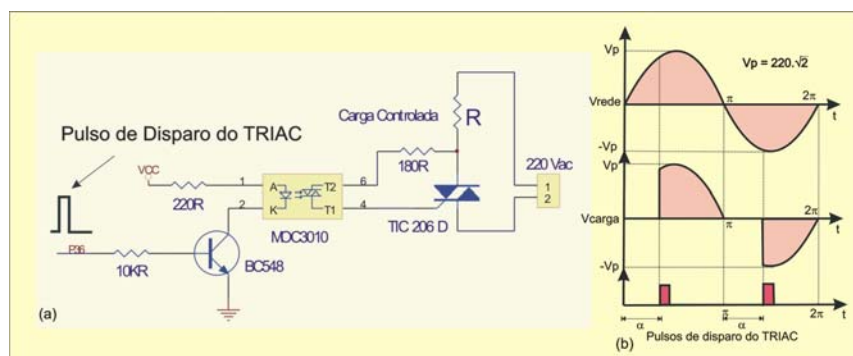


Figura 6 – (a) Circuito de acionamento; (b) Variação da tensão média na resistência de aquecimento em função do ângulo de disparo.

A forma de onda da tensão de alimentação na resistência de aquecimento (figura 6b) possui seu valor médio em função do valor do ângulo de disparo α (6), de forma que a potência entregue ao sistema (2) é dada por (7). A dedução detalhada de (6) e (7) podem ser encontradas em Rashid (1997).

$$V_{0RMS} = \frac{V_P}{2\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha)} \quad (6)$$

$$P_{0RMS} = \frac{\left(\frac{V_P}{2\sqrt{\pi}}\right)^2 \cdot 2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha)}{R} \quad (7)$$

O ângulo de disparo α é controlado pelo sinal normalizado i , da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \alpha = 0 &\rightarrow i = 1; \\ \alpha = \pi &\rightarrow i = 0. \end{aligned}$$

Fazendo $\alpha = \pi(1 - i)$, tem-se que a potência de aquecimento para o secador de grãos em função da variável u será expressa por (8).

$$P_{0RMS}(i) = \frac{P_{NOMINAL}}{2\pi} \cdot [2\pi \cdot i + \text{sen}(2\pi - 2\pi \cdot i)] \quad (8)$$

A expressão apresentada em (8) possui um comportamento não linear, assim o cálculo da potência torna-se computacionalmente pesado para um microcontrolador de 8 bits. Tendo em vista esta limitação é feita uma aproximação linear a partir de semi-retas (AB, BC, CD, DE e EF) sobrepostas ao gráfico de $P(u)$ (figura 7).

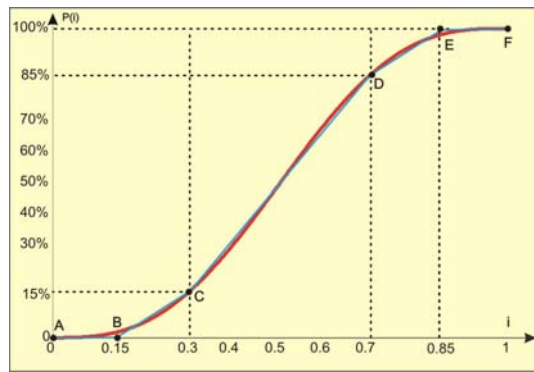


Figura 7 – Aproximação do gráfico de $P(i)$ à semi-retas.

A expressão (9) forma o conjunto de equações de reta que exprimem o valor da potencia aplicada ao secador de grãos $P(i)$.

$$P_{0RMS}(i) = \begin{cases} 0 \rightarrow (0 \leq i < 0,15) \\ P_{NOMINAL} \cdot (i - 0,15) \rightarrow (0,15 \leq i < 0,3) \\ P_{NOMINAL} \cdot (1,75i - 0,375) \rightarrow (0,3 \leq i < 0,7) \\ P_{NOMINAL} \cdot (i + 0,15) \rightarrow (0,7 \leq i < 0,85) \\ P_{NOMINAL} \rightarrow (0,85 \leq i \leq 1) \end{cases} \quad (9)$$

A expressão (8) apresenta uma não linearidade que, inevitavelmente, seria incorporada ao sistema em controle (planta), fato que dificultaria o projeto de um controlador adequado. Porém tomando a função inversa de (9), pode-se então, determinar o valor de u em função da potência a ser aplicada na planta (sinal de controle), calculada pelo controlador. Neste caso a não linearidade apresentada pelo sistema de acionamento da resistência de aquecimento ficará transparente ao controlador, uma vez que a expressão (10) realiza esta compensação. Nesta

situação a potência entregue à resistência é normalizada da seguinte forma: $p=1$, quando $P(i)=100\%$ e $p=0$, quando $P(i)=0\%$;

$$i(p) = \begin{cases} p + 0,15 \rightarrow (0 \leq p < 0,15) \\ 0,57143 \cdot p + 0,2143 \rightarrow (0,15 \leq p < 0,85) \\ p - 0,15 \rightarrow (0,85 \leq p \leq 1) \end{cases} \quad (10)$$

A expressão (10) é incorporada diretamente na rotina de controle fazendo a correção do valor de i , de forma que o pulso de disparo do TRIAC possui o ângulo de disparo α adequado para a potência do sinal de controle $u(t)$.

4. EXPERIMENTO DE CONTROLE DE TEMPERATURA

O problema de controle que será empregado para demonstrar a utilização da plataforma de estudo é o controle da temperatura do fluxo de ar quente do secador de grãos. A modificação do valor de temperatura é dado justamente com a variação do ângulo do pulso de disparo do TRIAC. Para a sincronia com a rede elétrica um circuito de detecção de passagem por zero gera pulsos para o microcontrolador que identifica o início e o término de cada semi-ciclo. A temperatura do fluxo de ar quente é informada ao controlador através do sensor LM35, localizado imediatamente após o duto de ar (figura 5). Um circuito de condicionamento de sinal amplifica a tensão de leitura produzida pelo do LM35 para que os limites dos valores de temperatura do secador de grãos (23 a 83°C) correspondam à faixa de leitura do conversor A/D (0 a $2,5\text{V}$).

Os valores das variáveis intermediárias são visualizados no PC, já que um programa implementado no MATLAB faz a comunicação com o MADC, plotando os valores adquiridos na tela, fazendo o papel de um osciloscópio.

Nas disciplinas de controle tanto analógico como digital, o estudo de controladores ON/OFF, P e PI se faz presente, desta forma um experimento analisando o comportamento de cada um deles foi realizado. Utilizando o primeiro método das regras de Ziegler-Nichols (Ogata, 2003) para sintonia de controladores (figura 8a) determinou-se os parâmetros dos controladores P e PI (figura 8b).

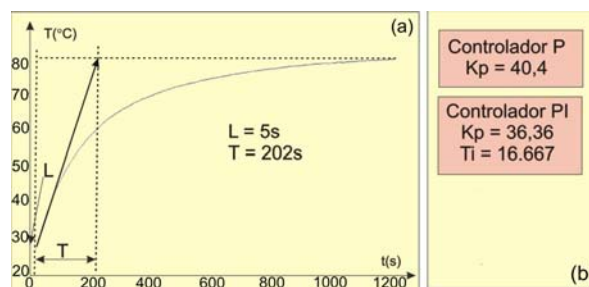


Figura 8 – (a) Resposta do secador de grãos a um degrau de 83°C ; (b) Parâmetros dos controladores P e PI para o secador de grãos.

O sistema do controlador deve ser discretizado para a implementação sob a forma de equações de diferenças para os controladores P (11) e PI (12) na rotina de controle gravada no MADC. Para que o sistema em questão utilizou-se a aproximação de Tustin e um tempo de amostragem de 20ms .

$$u(z) = 40,4 \cdot e(z) \quad (11)$$

$$u(z) = u(z-1) + 36,38 \cdot e(z) - 36,34 \cdot e(z-1) \quad (12)$$

Na figura 9 demonstra-se a resposta do secador de grãos a entradas em degrau e os respectivos erros para os controladores ON/OFF, P e PI implementados no experimento. Um perfil de temperatura senoidal também é aplicado ao sistema (figura 10). Nesta avaliação o estudante pode perceber que na para o projeto em questão, mesmo para uma entrada senoidal o erro obtido com o controlador PI é desprezível (figura 9f e figura 10f).

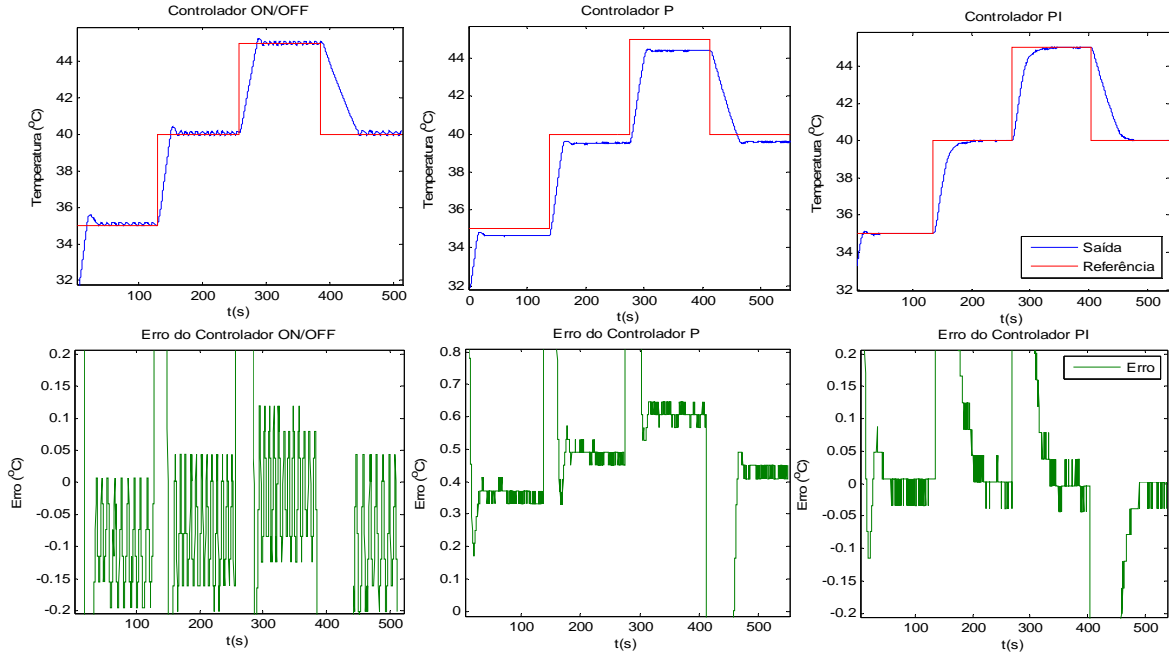


Figura 9 – Respostas do secador de grãos a entradas em degraus: (a) Controlador ON/OFF; (b) Controlador P; (c) Controlador PI. Sinais de erro: (d) Controlador ON/OFF; (e) Controlador P; (f) Controlador PI.

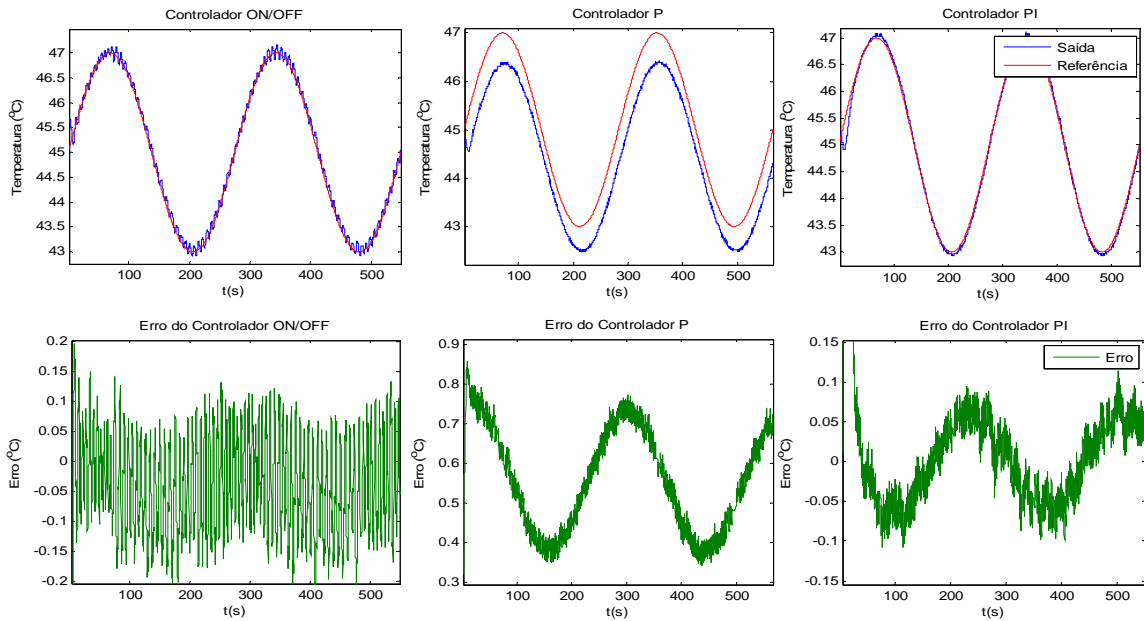


Figura 10 – Respostas do secador de grãos a um perfil senoidal: (a) Controlador ON/OFF; (b) Controlador P; (c) Controlador PI. Sinais de erro: (d) Controlador ON/OFF; (e) Controlador P; (f) Controlador PI.

5. CONCLUSÃO

O MADC desenvolvido apresenta-se como um recurso de capacidades híbridas, pois permite o desenvolvimento de controladores através do PC, sistemas embarcados (*stand alone*) e sistemas de aquisição de dados. Equipamentos de laboratório como osciloscópio e multímetro podem ser dispensados dos experimentos desenvolvidos, pois os sinais de entradas, saídas e variáveis intermediárias são observados diretamente na tela do PC.

Este recurso permite que o estudante perceba a essência da técnica de controle em estudo, abrangendo visões de alto e baixo nível, como a escolha dos parâmetros do controlador e percepção das restrições temporais do sistema, respectivamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelo financiamento das pesquisas, e em especial ao técnico Simões Soares Toledo, que com habilidade de artesão confeccionou e montou as placas desenvolvidas para este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Analog Devices (2001). MicroConverter Technical Note – uC002 Developing in C with the Keil u Vision 2, ver 2.0 edition.

Analog Devices (2003). ADuC841/ ADuC842/ ADuC843, Microconverter, 12-bit ADCs with Embedded 62 kB Flash MCU.

Aström, K. J. e Östberg, A. B. (1986). A Teaching Laboratory for Process Control. *IEEE Control Systems Magazine*, October 1996, pp. 37-42.

Chen e Naughton (2000). An Undergraduate Laboratory Platform for Control System Design, Simulation, and Implementation. *IEEE Control System Magazine*, June 2000, pp. 12-15.

Hurley, W. G. e Wölfle, W. H. (1997). Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 40, No. 2, pp. 124-130.

Ogata, K. (2003). Engenharia de Controle Moderno. Quarta edição, Prentice-Hall do Brasil.

Rashid, M. H. (1997). Power Electronics, Circuits, Devices and Applications. 2nd. Edition, Prentice-Hall.

Zilouchian, A. (2003). A novel intelligent control laboratory for undergraduate students in engineering. *Proceedings of the American Control Conference 2003*. Vol. 1, pp. 633–638.

DEVELOPMENT KIT FOR ADUC MICROCONTROLLERS APPLIED TO AUTOMATION AND CONTROL TEACHING

Abstract: *Aiming at developing control and embedded systems, there was created a programmable platform. Controllers are implemented by utilizing an ADuC board of development for microcontrollers. As a result of serial communication, it is possible to build an interface with the PC, allowing the student to observe on the screen the dynamic behaviour of a real system. An embedded solution is viable, permitting the implementation of a firmware which is responsible for the control of the own system. A case study is carried through having as a starting point the implementation of a controller with algorithms ON/OFF, P and PI, utilized in order to control the temperature of a hot air flow in a grain drier reduced size model.*

Key Words: Microcontroller, Control Theory, Embedded Systems.