

PLATAFORMA DE APLICAÇÃO DE CONTROLADORES DIGITAIS: UM INSTRUMENTO DE ENSINO EM ENGENHARIA DE CONTROLE

Paulo Renato da Costa Mendes¹; Carlos Mendes Richter²; Maurício Campelo Tavares³

¹ Universidade Católica de Pelotas, Curso de Engenharia Elétrica
Rua Félix da Cunha, 412
96010-000, Pelotas, RS
email: paulorc@hotmai.com

² Universidade Católica de Pelotas, Curso de Engenharia Elétrica
Rua Félix da Cunha, 412
96010-000, Pelotas, RS
email: richter@ucpel.tche.br

³ Universidade Católica de Pelotas, Curso de Engenharia Elétrica
Rua Félix da Cunha, 412
96010-000, Pelotas, RS
email: mtavares@ucpel.tche.br

Resumo: *O presente trabalho aborda o desenvolvimento e a implementação do software Plataforma de Aplicação de Controladores Digitais – PACD, cuja finalidade é facilitar o trabalho de projetar e testar controladores dedicados. O software foi desenvolvido para realizar duas funções principais: modelagem do sistema físico a ser controlado, e implementação e testes de controladores aplicados ao sistema físico. A motivação principal para a execução deste projeto é a sua utilização como um instrumento de aprendizado em aulas práticas das disciplinas de Sistemas de Controle, visando auxiliar o estudo de técnicas de compensação e proporcionar aos alunos uma fácil implementação de controladores digitais em tempo real. Para validação da metodologia e das implementações foram utilizados três setups de testes com base em equipamentos fabricados pela empresa Contronic Sistemas Automáticos Ltda. O primeiro setup teve base no estimulador calórico a água E96, o segundo se baseou no estimulador calórico a ar E107AR e o terceiro na cadeira rotatória CGM-4. Os três equipamentos são utilizados em exames de avaliação funcional do labirinto humano (eletronistagmografia). Foram realizados ensaios visando modelar os sistemas a partir de métodos clássicos e métodos de identificação. Posteriormente foi feita aplicação em tempo real dos controladores clássicos e adaptativos disponíveis no PACD visando analisar o desempenho do software perante a função proposta. Com os resultados obtidos foi possível constatar que tanto os métodos de modelagem e identificação quanto os controladores disponíveis no PACD funcionam perfeitamente, o que torna o software funcional para a aplicação proposta.*

Palavras-chave: *Ensino em Sistemas de Controle, Modelagem e Identificação de Sistemas, Controle Clássico, Controle Adaptativo, Eletronistagmografia*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da modelagem e do projeto de controladores para sistemas físicos é uma das áreas de maior importância e aplicabilidade na engenharia. Indústrias metalúrgicas, alimentícias, biomédicas, automotivas e de geração de energia, entre outras, mantêm processos complexos, onde na maioria das vezes são necessários sistemas de controle atuando para garantir a segurança e a qualidade do produto final.

Nos cursos de engenharia as disciplinas de sistemas de controle são vistas como um “tabu” por parte dos estudantes devido ao grande conhecimento matemático necessário para a compreensão das principais técnicas de análise e projeto. Outra grande dificuldade encontrada pelos estudantes é associar as técnicas matemáticas estudadas com as adversidades encontradas em um projeto prático de um sistema de controle real.

Com o objetivo de aproximar o estudante de engenharia da área de sistemas de controle foi criado um *software* intitulado Plataforma de Aplicação de Controladores Digitais (PACD), primeiramente desenvolvido em Mendes (2007a) e posteriormente ampliado em Mendes (2007b). Este *software* tem por característica principal uma interface amigável disponibilizando o uso de vários métodos para a modelagem e o controle de sistemas. A implementação prática destes métodos e a aplicação a um sistema físico se tornam relativamente fáceis, tendo em vista que o PACD foi desenvolvido para rodar em uma plataforma tipo PC (*Personal Computer*). A ação de controle é viabilizada com o uso de porta e protocolo de comunicação serial para comandar o sistema físico.

Neste artigo são apresentados os métodos de análise e projeto de sistemas de controle utilizados no PACD, bem como sua interface com o usuário. São mostrados testes práticos realizados com auxílio de *setups* de teste, os quais comprovam sua eficiência como uma ferramenta facilitadora para projetos de sistemas de controle em geral.

2. SOFTWARE PACD

O *software* PACD foi desenvolvido com a finalidade de facilitar o trabalho de projeto e teste de controladores dedicados. Nele são realizadas duas funções principais: modelagem do sistema físico a ser controlado, e implementação e testes de controladores aplicados ao sistema físico.

O PACD em suas duas primeiras versões contou com controladores clássicos e métodos de modelagem de sistemas lineares. Em sua última versão foram adicionados dois métodos de identificação de sistemas na parte de modelagem e quatro controladores adaptativos.

Na primeira versão, visando a validação do *software*, o PACD foi aplicado a um *setup* de testes baseado em um estimulador calórico, modelo E96. Posteriormente o *software* foi aplicado a um *setup* de testes baseado em outro estimulador calórico, modelo E107AR. Em sua última versão, o *setup* de testes utilizado foi baseado em uma cadeira rotatória, modelo CGM-4. Os equipamentos citados são fabricados pela Contronic Sistemas Automáticos Ltda, e têm por finalidade auxiliar no diagnóstico de patologias ligadas ao equilíbrio corporal durante a realização de um exame de eletroneuromiografia (Castagno *et al.*, 1994).

2.1 Telas

O PACD apresenta cinco telas. A tela inicial, mostrada na Figura 1, apresenta as opções de controle e modelagem, sendo que cada botão corresponde a uma interface gráfica própria, e as interfaces não podem ser executadas simultaneamente.



Figura 1. Tela Inicial do PACD

A interface de controle clássico, mostrada na Figura 2, tem como característica principal a possibilidade de implementação e monitoramento, de forma simples e rápida, de controladores digitais em Avanço de fase, Atraso de fase, Atraso-Avanço, Duplo Avanço, PI, PID e Avanço em cascata com PI.

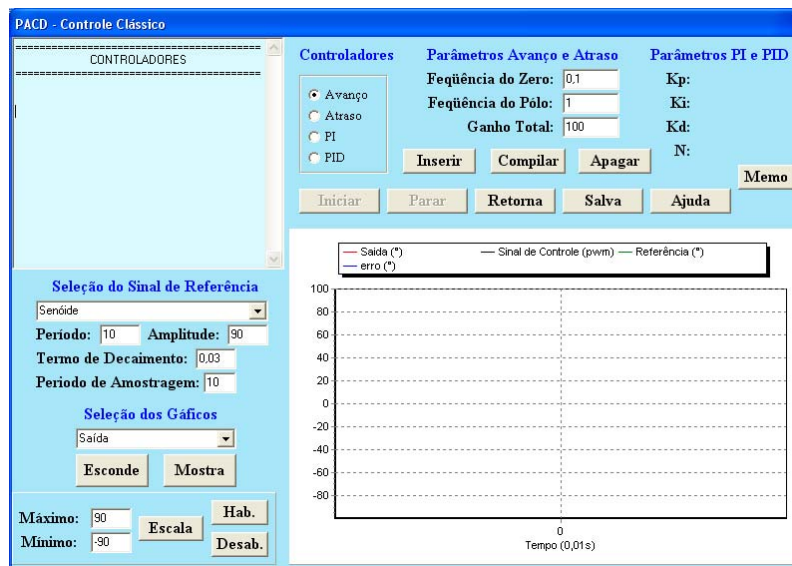


Figura 2. Tela de Controle Clássico do PACD

A estrutura interna do bloco de controle clássico do PACD utiliza realimentação negativa e unitária, e permite aplicar até dez controladores de cada tipo por ensaio, sendo possível mesclar os diversos controladores de uma só vez utilizando configuração em cascata. Esta característica possibilita a realização de inúmeras configurações de controladores, sendo possível analisar o desempenho das mesmas e escolher a que melhor atende os requisitos de controle determinados pelo projetista. Duas das configurações em cascata mais utilizadas são o controlador Atraso-Avanço e o controlador Duplo-Avanço. A implementação é feita colocando em cascata, no primeiro caso, um controlador atraso seguido de um controlador avanço e, no segundo caso, dois controladores avanço seguidos.

A interface de controle adaptativo, mostrada na Figura 3, tem como característica principal a possibilidade de implementação e monitoramento de controladores adaptativos. Os controladores disponíveis são Alocação de Pólos, *Deadbeat*, RMRAC, Variância Mínima e PID *Self-Tuning*.

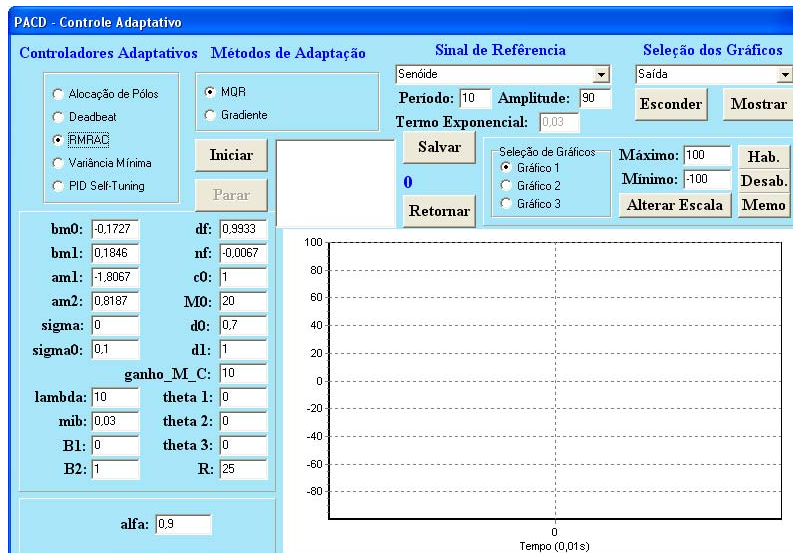


Figura 3. Tela de Controle Adaptativo do PACD

A interface de modelagem, mostrada na Figura 4, tem como característica principal a possibilidade de realização do ensaio de resposta ao degrau do sistema e a modelagem automática através dos métodos citados anteriormente.

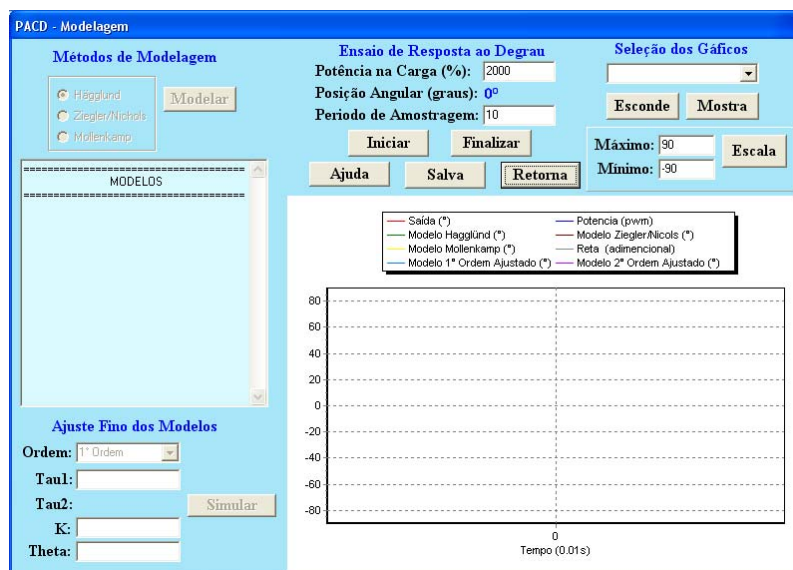


Figura 4. Tela de Modelagem do PACD

A interface de identificação, apresentada na Figura 5, permite a realização de modelagem do processo pelos métodos de identificação por Mínimos Quadrados Recursivo e por Gradiente.

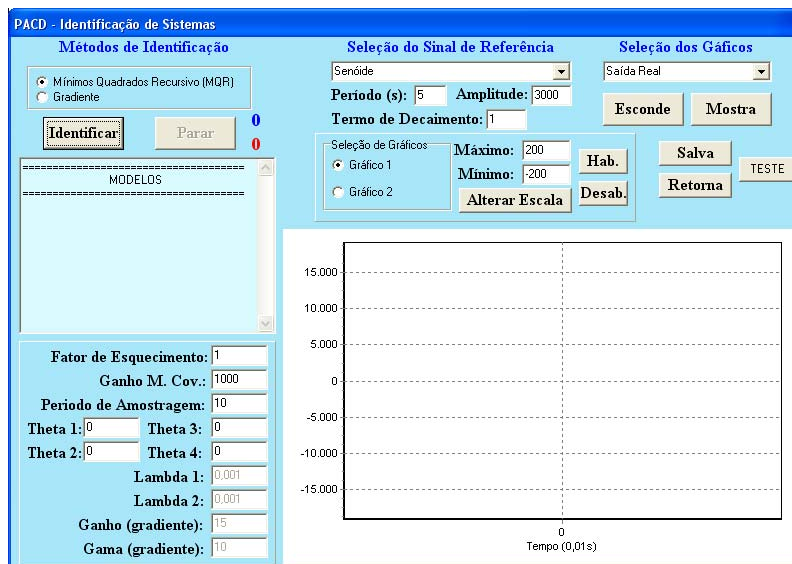


Figura 5. Tela de Identificação do PACD

2.2 Métodos Utilizados

Com o objetivo de entender e controlar sistemas complexos deve-se obter modelos matemáticos quantitativos destes sistemas, sendo necessário analisar as relações entre as variáveis do sistema e obter um modelo matemático. Como os sistemas considerados são de natureza dinâmica, as equações descritivas são geralmente equações diferenciais ou, no domínio frequência, funções de transferência.

Na análise e no projeto de sistemas de controle deve-se adotar uma base de comparação entre os sistemas avaliados. Esta base pode ser obtida especificando-se os sinais particulares de entrada e comparando-se as respostas dos sistemas. Os sinais de teste de entrada comumente utilizados são impulso, degrau, rampa e senóide.

Foram utilizados três métodos clássicos de modelagem de sistemas dinâmicos lineares com base no ensaio de resposta ao degrau, conforme descrito em Coelho (2004). Os métodos de Hägglund e Ziegler-Nichols resultam em modelos de primeira ordem e o método de Mollenkamp adota modelos de segunda ordem. A única não-linearidade admitida para estes modelos é um atraso de transporte.

As técnicas de identificação de sistemas são utilizadas para obtenção do modelo matemático de um sistema com base em ensaios de entrada e saída. Estas são muito úteis quando a tarefa de modelar o sistema com o uso das leis da física, devido à complexidade do sistema, é inviável. Algumas técnicas de identificação, por permitirem um ajuste dos parâmetros do modelo, são amplamente utilizadas em controladores adaptativos.

A aplicação de algoritmos de identificação é interessante para vários propósitos, tais como supervisão, rastreamento de parâmetros variantes para controle adaptativo, filtragem, previsão, processamento de sinais, detecção e diagnóstico (Coelho, 2004). Na implementação de um controlador adaptativo em tempo real o algoritmo do estimador de parâmetros deve ser iterativo, com atualização do modelo do sistema a cada período de amostragem, quando novas medidas estão disponíveis.

Os métodos de identificação podem ser divididos em métodos *on-line* e métodos *off-line*. Os métodos *on-line* são aqueles que são aplicados com a planta em operação e os métodos *off-line* são aplicados com a planta fora de operação.

A identificação *on-line* é um procedimento iterativo via computador. Muitas vezes são

necessários métodos recursivos que utilizem pouca memória e que sejam capazes de atualizar a estimação dos parâmetros do modelo a cada período de amostragem.

No PACD estão disponíveis o método dos mínimos quadrados recursivo (Coelho, 2004) e o método do gradiente (Sastry, 1989), tanto para a modelagem do sistema quanto para a adaptação dos controladores adaptativos.

Os sistemas de controle são projetados para realizar determinadas tarefas. Os requisitos impostos aos sistemas de controle são denominados, normalmente, especificações de desempenho. Quando o sistema em malha fechada não atende os requisitos de projeto em termos de desempenho em regime e transitório desejados, deve-se modificar a função de transferência através do uso de um controlador. Este controlador deve ter as propriedades adequadas para modificar as características do sistema, para que as especificações de desempenho sejam atingidas.

No projeto de um sistema de controle, o projetista deverá decidir pela utilização de um ou mais controladores. Esta escolha depende de vários fatores. O sistema em malha fechada, com o controlador projetado, deve apresentar algumas características básicas de desempenho tanto em regime permanente quanto em regime transitório. O desempenho transitório envolve a estabilidade, o amortecimento, o sobrenível percentual e o tempo de acomodação. O desempenho em regime permanente se refere aos erros em regime a diversos sinais padrão.

Os controladores clássicos disponíveis no PACD são os controladores em avanço de fase, em atraso de fase, em atraso-avanço, em duplo avanço, PI, PID e avanço em cascata com PI. Os controladores podem ser projetados utilizando métodos com base na resposta em frequência ou no lugar das raízes da planta, de acordo com Ogata (1982) e Dorf (2001).

Um controlador adaptativo tem como principal característica a sintonia automática de seus parâmetros a partir de uma mudança paramétrica no sistema ocasionada por uma mudança de ponto de operação ou uma perturbação, de forma a obter o desempenho desejado para o sistema em malha fechada. A concepção de um algoritmo adaptativo pode ser dividida numa parte referente à identificação e outra referente ao projeto do controlador.

As técnicas de controle adaptativo disponíveis no PACD são apresentadas em Åström (1989), Ioannou (1996), Hemerly (1996), e Wu (1988), tais como os controladores por Alocação de pólos, Variância Mínima, *Deadbeat* e *PID Self-Tuning*.

2.3 Setups de Testes

Como mencionado anteriormente, o *software* PACD foi aplicado a três *setups* de testes. O primeiro *setup* foi baseado na estrutura do estimulador calórico E96. A finalidade deste equipamento é manter água aquecida a duas temperaturas pré-determinadas (geralmente 30 °C e 44 °C), nos reservatórios, e dispensá-la para o exame vestibular através das saídas frontais. Em cada uma das duas cubas existe uma resistência blindada de 700 W responsável pelo aquecimento.

O E96 utiliza um microcontrolador N87C196KB12 da Intel. O sensor de temperatura é um LM35DZ (National), acompanhado por um circuito de ajuste da tensão de saída, já que esse sensor apresenta erro absoluto de até 1,5 °C na faixa de temperatura da aplicação (0 °C a 50 °C). Para comunicação serial com o PC externo foi acrescentado um adequador MAX232, que converte os níveis TTL da UART do microcontrolador para níveis compatíveis com RS-232C. O aquecimento de cada reservatório é feito por meio de uma resistência elétrica.

Foi criada uma versão especial para o *software* interno do E96 (linguagem C, compilador IAR), desabilitando o controlador de temperatura original e a amostragem periódica de temperatura. A amostragem e o controle passam a ser exercidos pelo PC externo, de acordo com o protocolo de dois comandos mostrado na Tabela 1. Dessa forma, o *software* do PC pode mudar livremente a taxa de amostragem da temperatura.

Tabela 1 - Protocolo de comunicação entre PC e *setup* de testes E96.

Comando	PC para <i>Setup</i>	<i>Setup</i> para PC
Temperatura Requerida	Envia 'T'	Retorna 2 <i>bytes</i> contendo temperatura x 10 (MSB primeiro)
Potência Enviada	Envia 'P' e um segundo <i>byte</i> contendo a potência (0% a 100%)	Nada

O controle da potência entregue ao aquecedor é determinado por PWM (*Pulse Width Modulation*), com acionamento em ciclo integral para não introduzir harmônicos na rede elétrica. O período do PWM corresponde a 50 ciclos da rede elétrica de 60 Hz. Obteve-se, portanto, uma resolução de 2 % no acionamento que pode variar de 0 % a 100 %.

O segundo *setup* de teste utilizado foi baseado na estrutura do estimulador calórico E107AR. A finalidade deste equipamento é a mesma do E96, porém a estimulação calórica vestibular é feita com ar aquecido, ao invés de água. As partes principais do sistema são compostas por um microcontrolador ADuC841 (Analog Devices); um sensor resistivo de precisão NTC usado para medir a temperatura do ar; uma bomba de ar que provê fluxo de ar de 4 a 12 litros/minuto; um módulo aquecedor/resfriador de ar formado por um dispositivo de efeito Peltier. Por tratar-se de controle da temperatura do ar em movimento, e também pela capacidade de aquecer e resfriar, a dinâmica deste sistema é muito mais rápida do que a do E96.

O *software* interno do E107AR foi modificado para inibir o controlador de temperatura original e a amostragem periódica de temperatura. Essa alteração possibilita fixar a frequência de amostragem através do PACD, além de controlar o fluxo de ar e a potência necessária para aquecê-lo ou resfriá-lo. O protocolo de comunicação para esta aplicação é mostrado na Tabela 2.

O circuito de comando da bomba de ar utiliza uma técnica de controle que entrega tensão alternada à bomba de acordo com a tensão presente na saída do conversor D/A do microcontrolador. O dispositivo de efeito Peltier é acionado por uma ponte H que é controlada pela saída de modulação por largura pulso (PWM) do microcontrolador ADuC841.

Tabela 2 - Protocolo de comunicação entre PC e *setup* de testes E107AR.

Comando	PC para <i>Setup</i>	<i>Setup</i> para PC
Envia fluxo de ar	Envia '200' e um segundo <i>byte</i> contendo o valor do fluxo de ar (4 a 12 l/min)	Nada
Liga/Desliga o sistema de aquecimento/resfriamento	Envia '202' e um segundo <i>byte</i> contendo '1' (ON) ou '0' (OFF)	Nada
Temperatura Requerida	Envia '208' (1 <i>byte</i>)	Retorna 2 <i>bytes</i> com temperatura x 10 (MSB primeiro)
Potência Enviada	Envia '220' e um Segundo <i>byte</i> contendo a potência (0% to 100%)	Nada

O terceiro *setup* de teste é composto por uma cadeira rotatória e um módulo de controle eletrônico com processador dedicado. O Sistema é conhecido como CGM-4 e pode ser visto na Figura 6. Trata-se de um sistema complexo formado por partes mecânicas, eletrônicas e um programa interno ao DSP. Também é utilizado para provocar estímulos no labirinto humano, por rotação, visando o diagnóstico de problemas vestibulares.



Figura 6. Cadeira rotatória, módulo de controle e *Software* PACD em execução no PC.

O sistema eletro-mecânico é formado por um motor DC de 4 pólos (Imobrás, modelo 14.001.12), alimentado com tensão proveniente do módulo de controle. A rotação nominal do motor é de 2700 RPM@12V. Entre o eixo do motor e o eixo da cadeira foi montado um mecanismo para redução de velocidade (64 x), composto por quatro conjuntos engrenagem-polia dentada.

Considerando que a tensão sobre o motor pode atingir até 18 V, a velocidade de giro da cadeira pode ser ajustada linearmente desde zero até 60 RPM. O movimento é monitorizado em dois pontos da estrutura mecânica. Sobre o eixo do motor foi posicionado um *encoder* magnético modelo AS5040 (Austria Microsystems). Um segundo *encoder* magnético, modelo AS5045, foi posicionado no eixo da cadeira.

O módulo de controle foi projetado em torno do controlador digital de sinais (DSC) MC 56F8013 da Freescale. Este controlador apresenta uma arquitetura que une as características de velocidade de processamento de um DSP de uso geral (arquitetura Harvard dupla, acumuladores de 36 bits, *hardware looping controller* e múltiplos barramentos internos), com os periféricos típicos de microcontroladores, como *timers*, portas UART, SPI e I²C, PWM e conversor A/D. O chip contém ainda 16 kB de memória FLASH para programa e 4kB de memória RAM.

O controle da tensão que será aplicada ao motor é feito através de uma ponte H montada com quatro transistores MOSFET. A interface entre o DSC e a ponte é formada por isoladores óticos HCNW4503 (1 Mbit/s) e por dois controladores de meia-ponte. Este circuito é acionado através das saídas PWM complementares PWM0 e PWM1 do MC56F8013.

A comunicação com o computador externo utiliza a UART interna com DSC, à qual foi acrescentado um adaptador para níveis de tensão RS-232, modelo MAX3232 (Texas Instruments).

O *software* do DSC foi desenvolvido em linguagem C, na ferramenta CodeWarrior 8.0 da Freescale. O *software* original foi modificado a fim de tornar o módulo de controle escravo do *software* PACD.

A comunicação entre o módulo de controle e o computador externo é feita segundo um protocolo onde cada comando é enviado através de três bytes consecutivos. Os comandos suportados no protocolo estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Protocolo de comunicação entre PC e *setup* de testes

Função (comentário)	PC envia	Módulo CGM4 responde
Realinha cadeira para a frente (usando algoritmo de controle interno)	1 <i>byte</i> com valor 0 (0x00)	1 <i>byte</i> com valor 'F' assim que o posicionamento estiver concluído
Atribui valor de PWM	1 <i>byte</i> com valor 6 (0x06) seguido por 2 <i>bytes</i> com o valor que será escrito no PWM. O <i>byte</i> MSB deve ser enviado primeiro.	nada
Requisita posição angular atual da cadeira	1 <i>byte</i> com valor 15 (0x0F)	2 <i>bytes</i> (MSB primeiro) que contêm a posição angular na escala do sensor (0 a 4095). O valor 1024 corresponde a -90°. O valor 2048 corresponde a 0° (cadeira para frente). O valor 3072 corresponde a +90°.

3. VALIDAÇÃO DO PACD E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais obtidos com o PACD perante os três *setups* de testes. Primeiramente serão mostrados os testes de modelagem no *setup* E96 e no *setup* CGM4, e posteriormente será determinado o melhor controlador aplicado a cada *setup*.

3.1 Ensaios de Modelagem

O ensaio de resposta ao degrau aplicado ao sistema E96 foi realizado com a cuba com água pela metade. O ensaio teve uma duração de aproximadamente 4380s. Na Figura 7 é apresentada a resposta ao degrau do Modelo de Ziegler/Nichols. A equação (1) representa a função de transferência Modelo de Ziegler/Nichols.

$$G(s) = \frac{2,652}{(1179s + 1)} e^{-24s} \quad (1)$$

O ensaio de modelagem do sistema CGM-4 foi realizado através do método de identificação por mínimos quadrados. A função de transferência do modelo obtido é apresentada na equação (2) e o gráfico relativo ao ensaio com o estimador MQR é mostrado na Figura 8.

$$G(z) = \frac{b_0z + b_1}{z^2 + a_1z + a_2} = \frac{-0,0020357z + 0,002177}{z^2 - 0,710519z - 0,28989} \quad (2)$$

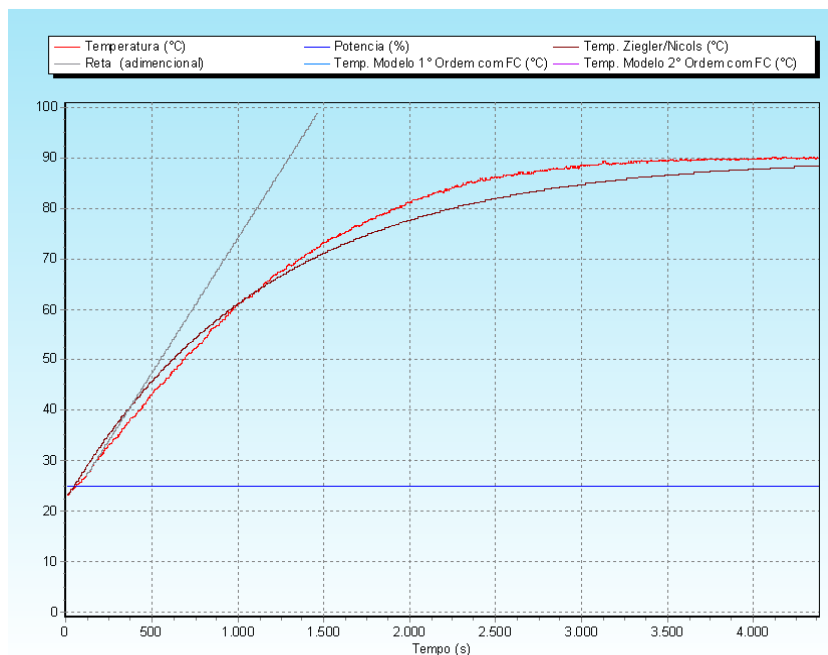


Figura 7. Modelo de Ziegler/Nichols

Analisando a Figura 8, é possível verificar que a saída estimada praticamente se sobrepõe à saída do sistema real, o que indica que o modelo representa muito bem a dinâmica do sistema físico.

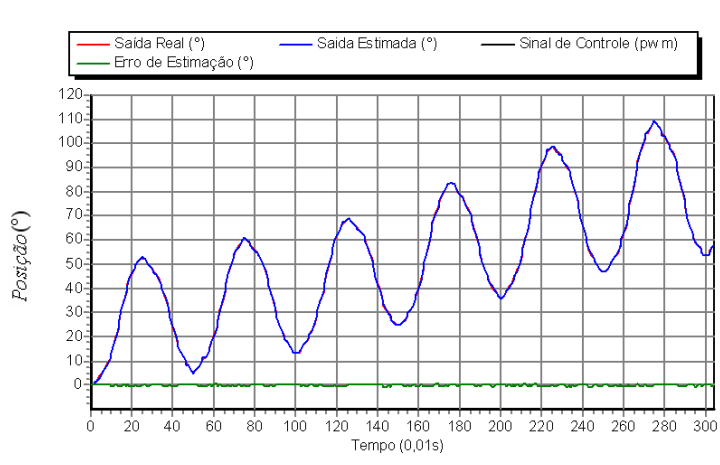


Figura 8. Respostas do Sistema Físico e Estimado

3.1 Ensaios de Controle

Com base no modelo apresentado na equação (1) foi projetado um controlador Avanço+PI (avanço em cascata com PI) cuja função de transferência é representada pela equação (3). É apresentado na Figura 9 o gráfico do ensaio envolvendo o controlador Avanço+PI e o sistema E96. Analisando esse gráfico pode-se observar o desempenho do controlador com 0% de sobrenível percentual, 100 segundos de tempo de acomodação e erro estacionário de $\pm 0,01$ °C.

$$G_c(s) = 45 \frac{(s+0,5)(12s+2)}{(s+1)s} \quad (3)$$

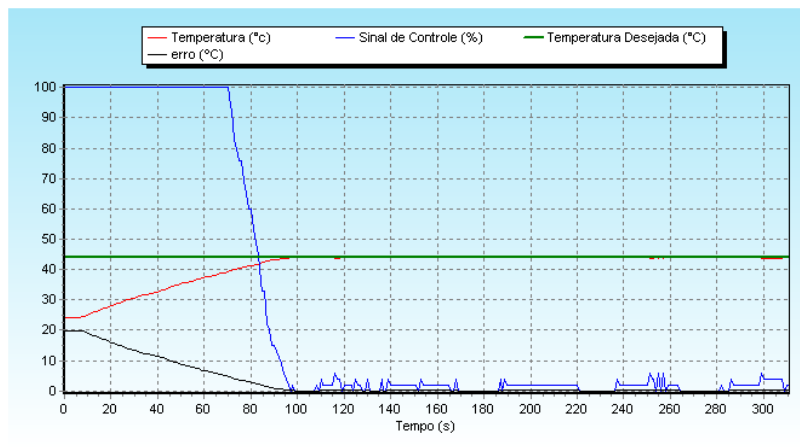


Figura 9. Ensaio com Controlador Avanço+PI no sistema E96

Para controlar o sistema E107AR foi projetado um controlador Avanço+PI cuja função de transferência é representada na equação (4). São apresentadas na Figura 10 as variáveis envolvidas neste ensaio. Analisando o gráfico pode-se observar o desempenho do controlador com 1,8 % de sobrenível percentual, 45 segundos de tempo de acomodação e erro estacionário de $\pm 0,31$ °C.

$$G_c(s) = 25 \frac{(s+0.5)(12s+2)}{(s+1)s} \quad (4)$$

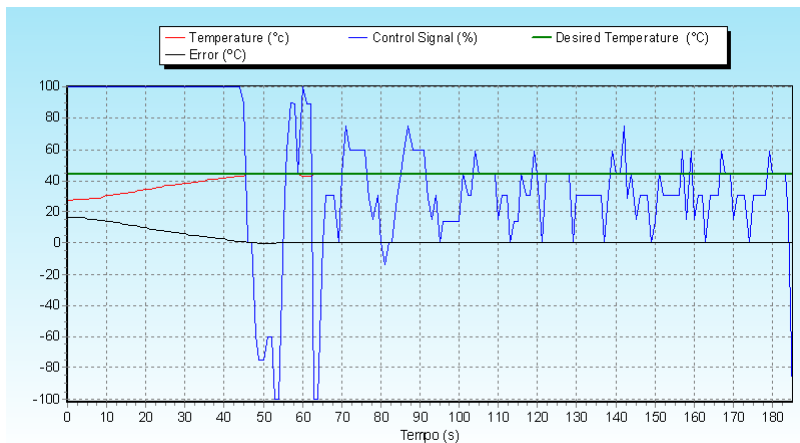


Figura 10. Ensaio com controlador Avanço+PI no sistema E107AR

Para os ensaios realizados com o sistema CGM-4 o sinal de referência utilizado foi uma senóide. O movimento senoidal consiste em fazer a cadeira oscilar entre os ângulos -90° e $+90^\circ$ de forma periódica senoidal. Na Figura 11 fica evidente que -90° significa giro para a esquerda e $+90^\circ$ giro para a direita.

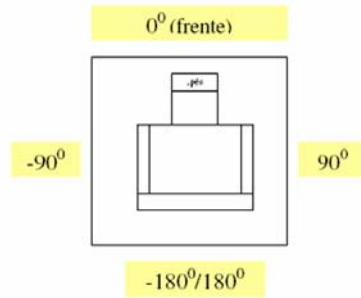


Figura 11. Movimento da Cadeira Rotatória

A fim de obter o controlador com melhor desempenho, foi realizada uma análise qualitativa com base no gráfico obtido no ensaio, e foram utilizados dois índices para uma análise quantitativa dos resultados. O primeiro índice é a taxa de distorção harmônica (THD) a qual relaciona o valor RMS das componentes harmônicas e a fundamental de um sinal senoidal. A THD pode ser obtida pela equação (5).

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} H_n^2} / H_1 \quad (5)$$

O segundo índice é o erro quadrático calculado com a equação (6).

$$Q = \sqrt{\sum e(t)^2 / Na} \quad (6)$$

A THD serve para indicar o quão próxima de uma senóide pura está a resposta de posição da cadeira. O erro quadrático possibilita uma noção do maior ou menor distanciamento da posição real da cadeira em relação à referência.

O controlador utilizado para controlar o *setup* CGM-4 foi o controlador PID *Self-Tuning* cujos valores iniciais dos parâmetros de projeto são apresentados na equação (7).

$$u(k) = \frac{-TsK_i}{(1+r_1z^{-1})(1-z^{-1})} (r(k) - y(k)) + K_p y(k) + \frac{K_d(1-z^{-1})}{Ts(1+r_1z^{-1})} y(k) \quad (7)$$

onde

$$\begin{aligned} K_p &= -2349,18 & K_i &= -24423,3 \\ K_d &= -128,095 & r_1 &= 0,485812 \end{aligned}$$

São apresentados na figura 12 o sinal de referência senoidal e a posição angular da cadeira. Pode-se notar que a cadeira segue aproximadamente a referência atingindo os ângulos de +90° e -90°. A THD obtida neste ensaio é de 9,3806% e o erro quadrático 6,873306°.

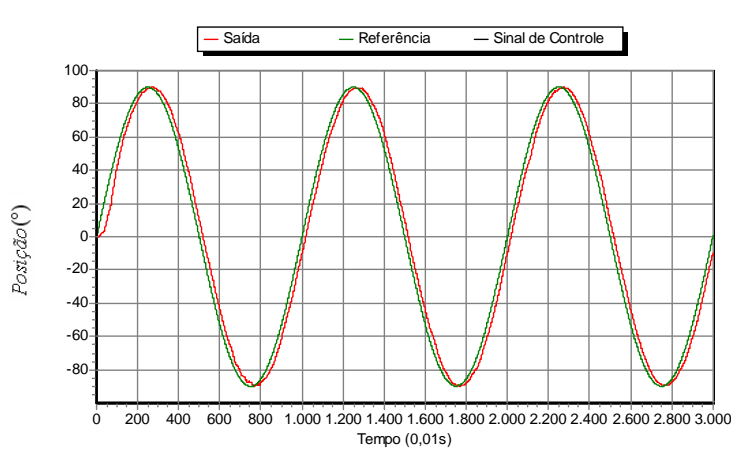


Figura 12. Resposta do sistema CGM-4 e referência

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo descreveu a metodologia adotada para o desenvolvimento de um *software* educacional que tem por objetivo facilitar o aprendizado no ensino de sistemas de controle. O PACD conta com uma interface gráfica amigável e de fácil uso, contendo todos os dados necessários para a monitorização dos ensaios de modelagem, identificação e controle do sistema físico.

Posteriormente foram apresentados os cinco métodos para a modelagem de sistemas dinâmicos presentes no *software*. Os métodos de Hägglund, Ziegler-Nichols e Mollenkamp são aplicados *off-line* a partir da curva de resposta ao degrau do sistema físico. Os métodos de identificação por MQR e Gradiente possibilitam a estimação *on-line* de um modelo para o sistema.

Na seqüência foram discutidos os controladores clássicos possíveis de serem implementados no PACD, que são Avanço de Fase, Atraso de Fase, Atraso-Avanço, Duplo Avanço, PI, PID e Avanço+PI (avanço em cascata com PI). Nos ensaios práticos foram utilizadas técnicas baseadas na resposta em frequência e na análise do lugar das raízes do sistema para o projeto dos controladores em questão. A seguir, técnicas de controle adaptativo foram apresentadas. Quatro controladores adaptativos estão presentes no *software*, sendo eles Alocação de Pólos, Variância Mínima, *Deadbeat* e *PID Self-Tuning*.

Desde sua primeira versão o *software* PACD vem se mostrando um instrumento de grande utilidade tanto na compreensão dos sistemas físicos como no projeto de controladores. A adição de novos métodos de modelagem e de novos controladores veio a tornar o PACD mais útil ao projetista de sistemas de controle e aumentar as possibilidades de ensaios, sempre visando o melhor desempenho do sistema como um todo. De acordo com os resultados provenientes dos ensaios apresentados neste artigo, visando tanto a modelagem como o controle dos três sistemas de teste, é possível afirmar que o PACD obteve resultados favoráveis, o que o torna uma grande ferramenta tanto para o estudante como para o profissional de engenharia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Contronic Sistemas Automáticos pelo fornecimento dos *setups* de teste E96, E107AR e CGM-4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÅSTRÖM, K. J. & Wittenmark, B. **Adaptive Control**. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1989.

CASTAGNO, L. A., TAVARES, M. C., RICHTER, C. M. *et al.*: Sistema Computadorizado de Eletronistagmografia e Vectonistagmografia “UCPel/Castagno” (Versão 3.0). In: Anais do IV CBIS, p. 26-31, 1994.

COELHO, Antônio Augusto R.; COELHO, Leandro S.. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2004.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H.. **Sistemas de Controle Modernos**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

HERMERLY, Elder; **Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1996.

IOANNOU, P. A. & Sun, J. **Robust Adaptive Control**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1996.

MENDES, P.R.C. **Plataforma para aplicação de controladores digitais voltados ao controle de temperatura da água**. 2007. Monografia (Disciplina de Engenharia Computacional II) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Católica de Pelotas, Pelotas.

MENDES, P.R.C. **Projeto e Implementação de Controladores Clássicos e Adaptativos para uma Cadeira Rotatória usada em Exames de Eletronistagmografia**. 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Católica de Pelotas, Pelotas.

OGATA, Katsuhiko; **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

SASTRY, S. & Bodson, M. **Adaptive Control – Stability, Convergence, and Robustness**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1989.

WU, C., Hsu, Y. **Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizer for Multimachine Power Systems**. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 3, No. 3, August 1988.

PLATFORM FOR IMPLEMENTATION OF DIGITAL CONTROLLERS: A TOOL OF EDUCATION IN CONTROL ENGINEERING

Abstract: *The present work approaches the development and the implementation of the software Platform for Implementation of Digital Controllers – PACD (Plataforma de Aplicação de Controladores Digitais), whose purpose is to make easy the work of projecting and testing dedicated controllers. The software was developed to accomplish two main functions: modelling of the physical system to be controlled, and implementing and testing the controllers applied to the physical system. The main motivation for the execution of this project is its utility as a learning instrument in practice classes of Control Systems disciplines, seeking to help study of compensation techniques and providing to the students an easy implementation of digital controllers in real time. For validation of the methodology and the implementations three setups for tests were used based in equipments manufactured by the company Contronic Automatic Systems. The first setup was based on the water caloric stimulator E96, the second was based on the air caloric estimator E107AR and the third on the rotary chair CGM4. All equipments are used in electronystagmography exams. Assays were made using classic methods and identification methods aiming to model the system. Later it was made applications in real time of the classic and adaptive controllers available in PACD seeking to analyze the software performance. Results were obtained where it became clear that the modelling and identification methods, as much as the available controllers in PACD, work perfectly, and so the software is functional for the proposed application.*

Key-words: *Education in Control Systems, Systems Modeling and Identification, Classic Control, Adaptive Control, Electronystagmography*