



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

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DIDÁTICO 'PÊNDULO ROTACIONAL' PARA PESQUISA E ENSINO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS

Marcus Ciro Martins Gomes – marcuscmg@yahoo.com.br

Cleison Daniel Silva - cleisond@yahoo.com.br

Rafael Suzuki Bayma – rafael_bayma@yahoo.com.br

Max Rothe-Neves – mrn@ufpa.br

Orlando Fonseca Silva – orfosi@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação.

Av. Augusto Corrêa, 01 – Campus Universitário do Guamá

CEP 66075-110 – Belém – Pará – Brasil

***Resumo:** Neste trabalho são descritas as etapas construtivas e alguns experimentos sobre um protótipo didático do tipo "Pêndulo Rotacional", visando o desenvolvimento de um elemento de incentivo ao ensino e à pesquisa em disciplinas relativas à Engenharia de Controle. O equipamento consiste de um pêndulo acoplado à extremidade de um braço que pode girar livremente em torno do eixo de um motor de corrente contínua. Em um primeiro momento a construção complementa a formação dos alunos, por exigir que lidem com habilidades diversas, tais como automação, eletrônica, programação e instrumentação. Por outro lado, coloca-se à disposição um equipamento de custo reduzido que pode ser utilizado como ferramenta importante de professores e pesquisadores.*

***Palavras-chave:** Protótipo didático, Pêndulo Rotacional, Sistemas de Controle, Microcontrolador.*

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta as informações sobre o processo construtivo do protótipo Pêndulo Rotacional, concebido a partir do objetivo de trabalhar com uma planta que, através de sua natureza não-linear complexa, incentive o ensino e a pesquisa em disciplinas relativas à Engenharia de Controle. Adicionalmente, este trabalho ofereceu aos alunos a oportunidade de consolidar conhecimentos em eletrônica e sistemas de controle, proporcionando ganho concreto para realização de experimentos.

Um dos elementos chave do projeto foi o uso de microcontroladores como alternativa de baixo custo para desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados. Por se tratar de um protótipo limitado em recursos, todas as etapas de aquisição de dados, desde o circuito de amostragem e condicionamento, até o programa para visualização e tratamento de dados foram desenvolvidos totalmente pelos alunos de graduação. Tal oportunidade caracterizou o impulso dado aos conhecimentos de eletrônica, instrumentação e programação.

Uma vez possível desfrutar desta infra-estrutura, os estudantes puderam aplicar técnicas de identificação de modelos, simulação e projeto de controladores simples, transpondo o plano teórico das aulas diante do protótipo que lhes proporciona um cenário com problemas adicionais em relação àqueles propostos na literatura básica de controle linear (OGATA, 1982 e CHEN, 1968), comumente usadas como ponto de partida no ensino de Engenharia de Controle e Automação. Ambiente de medição ruidoso e não-linearidades inerentes do atuador e do

próprio pêndulo são alguns dos elementos que podem ser citados neste contexto. Tais resultados fazem parte do conjunto de observações que têm sido defendidas em trabalhos como ROTH-NEVES (1999 e 2004), BAYMA (2004), LUIS (2003) e ISHIGAKI (2004).

O Pêndulo Rotacional apresenta dois modos de operação:

- Não-invertido, análogo ao “pêndulo simples”, em que é possível estudar determinados aspectos da planta como seus parâmetros de forma mais adequada, uma vez que, neste caso, a dinâmica é estável;
- Invertido, semelhante ao modelo clássico “*pendulum on a cart*” (FRANKLIN *et al.* 1998), em que o regime dinâmico é instável, sendo comumente usado para investigar problemas de regulação (equilíbrio do pêndulo).

O trabalho será apresentado da seguinte maneira: inicialmente mostrar-se-á na seção 2 a modelagem pela física do processo, explorando as equações dinâmicas para coletar informações em benefício dos aspectos físicos do protótipo. Em seguida, na seção 3, o sistema de aquisição será apresentado, explicitando suas vantagens e limitações. Já na seção 4 serão vistos os experimentos e resultados realizados com o protótipo. E finalizando o trabalho são apresentadas as considerações finais.

2. MODELAGEM DO PÊNDULO ROTACIONAL

O método de Lagrange foi utilizado para obtenção das dinâmicas que governam a planta. Tal abordagem foi escolhida por se tratar de uma metodologia considerada importante no desenvolvimento de modelos dinâmicos como visto em TENENBAUM (1997), além de já ter sido empregada em outros trabalhos sobre o pêndulo rotacional, como GONZÁLEZ (1996). Adicionalmente, uma análise preliminar do problema mostrou que o desenvolvimento do modelo através de funções de energia seria mais simples, se comparado a outro baseado em dinâmica de rotação.

O método de Lagrange é fundamentado na aplicação da equação (1),

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (1)$$

em que a função L é denominada Lagrangiano e é definida como a diferença entre a energia cinética total T e a energia potencial total V , cada uma descrita em termos das coordenadas generalizadas (q_i). No caso do Pêndulo Rotacional, essas coordenadas correspondem a dois graus de liberdade: a posição do pêndulo (x_1) e a posição do braço (x_2).

O próximo passo seria aplicar as operações de derivação descritas pela equação (1). No entanto, a simplificação das expressões resultantes é complexa, o que exigiu a utilização de um *software* de processamento simbólico, descrito na sub seção 2.1.

2.1 – *Software* de processamento simbólico auxiliar

Com o *toolbox* de matemática simbólica do MATLAB (*symbolic*), o desenvolvimento analítico das equações dinâmicas do Pêndulo Rotacional foi concretizado de maneira rápida e eficaz, o que facilitou o processo de análise da planta através de parâmetros importantes, como massa e comprimento do pêndulo, raio de rotação do braço, etc.

Após o uso do *symbolic*, as seguintes equações de estado não-lineares foram estabelecidas:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ x_1 \\ \dot{x}_2 \\ x_2 \\ \dot{x}_3 \\ x_3 \\ \dot{x}_4 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ A^{-1}b \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde:

$$A = \begin{pmatrix} M_p^2 & M_p^1 R \cos(x_1) \\ M_p^1 R \cos(x_1) & J_{bph} + M_p^2 R \sin^2(x_1) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Sendo:

$$M_p^1 = m_p l + m_h \bar{y} \quad (4)$$

$$M_p^2 = m_p l^2 + J_h \quad (5)$$

$$J_{bph} = J_b + (m_p + m_h) R^2 \quad (6)$$

A Tabela 1 descreve a notação utilizada. As unidades adotadas são as do SI.

Tabela 1 – Significado dos símbolos

Parâmetro	Significado
$x1$	Posição angular do pêndulo
$x2$	Posição angular do braço
$x3$	Velocidade angular do pêndulo
$x4$	Velocidade angular do braço
l	Comprimento do pêndulo
R	Raio do braço
cb	Coefficiente de dissipação do braço
cp	Coefficiente de dissipação do pêndulo
$Jb, Jh e Jp$	Momento de inércia do braço, haste e pêndulo
Mp, Mh	Massa do pêndulo e da haste respectivamente

O *software* também foi utilizado para investigar os modelos linearizados do tipo

$$\dot{x} = Fx + Gu \quad (7)$$

onde as matrizes F e G são dadas, no modo não-invertido por (8) e (9)

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{J_{bph}M_p^1g}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & 0 & \frac{J_{bph}c_p}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & \frac{M_p^1Rc_b}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} \\ \frac{(M_p^1)^2 Rg}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & 0 & \frac{M_p^1Rc_p}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & \frac{M_p^2c_b}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{M_p^1R}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & \frac{M_p^2}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

e pela equação (10) e (11) para o modo invertido:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-J_{bph}M_p^1g}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & 0 & \frac{J_{bph}c_p}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & \frac{-M_p^1Rc_b}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} \\ \frac{(M_p^1)^2 Rg}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & 0 & \frac{-M_p^1Rc_p}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & \frac{M_p^2c_b}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{M_p^1R}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} & \frac{-M_p^2}{(M_p^1R)^2 - M_p^2J_{bph}} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

Uma última análise foi realizada, desprezando-se as perdas (isto é, coeficientes c_b e c_p nulos) e calculando-se os autovalores. Isto foi feito para se investigar como parâmetros importantes, como o comprimento do pêndulo, influem sobre a dinâmica da planta.

Adicionalmente, o MATLAB foi utilizado para o desenvolvimento de um simulador do sistema dinâmico, onde foi possível estudar outros aspectos como a especificação do atuador, limitações de projeto, etc. Todo este estudo preliminar foi entendido como parte fundamental do projeto, uma vez que permitiu:

1. Apresentar aos alunos uma metodologia de pré-projeto, que pode ser estendida a outros protótipos;
2. Ganhar um conhecimento aproximado sobre a planta que estava sendo construída.

3. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

O Pêndulo Rotacional consiste de elementos eletromecânicos (o processo físico) e eletrônicos (*hardware* de aquisição). Esta seção se propõe a descrevê-los com o intuito de apresentar o protótipo. As figuras 1 e 2 sintetizam os componentes mais importantes.

Figura 1 – O protótipo Pêndulo Rotacional

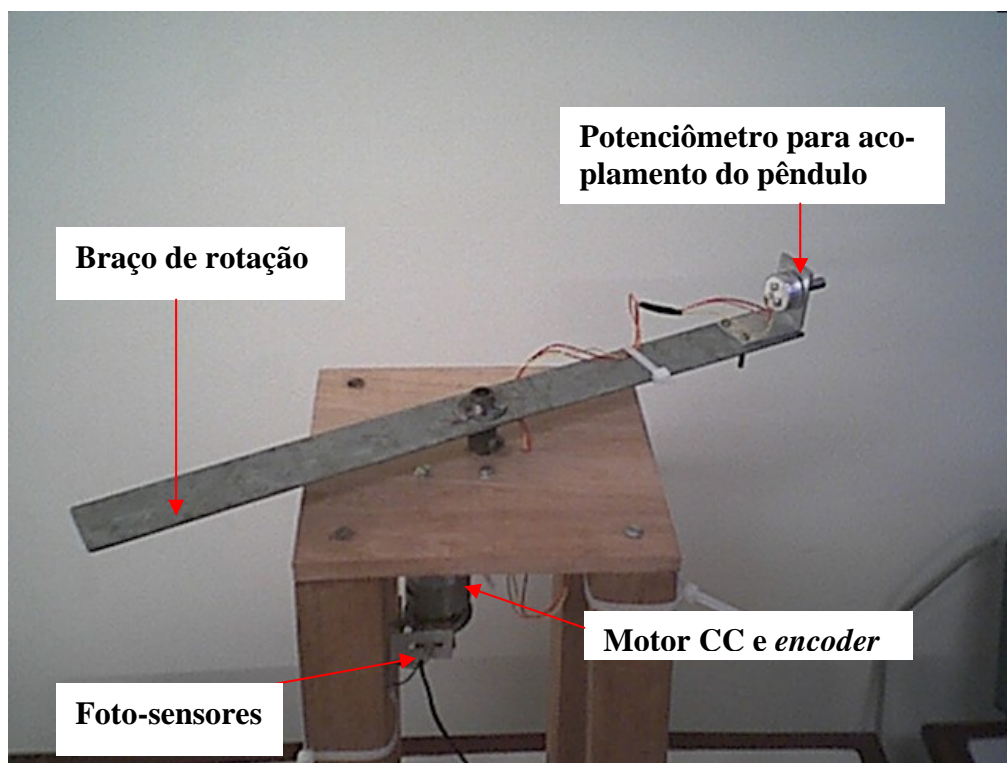
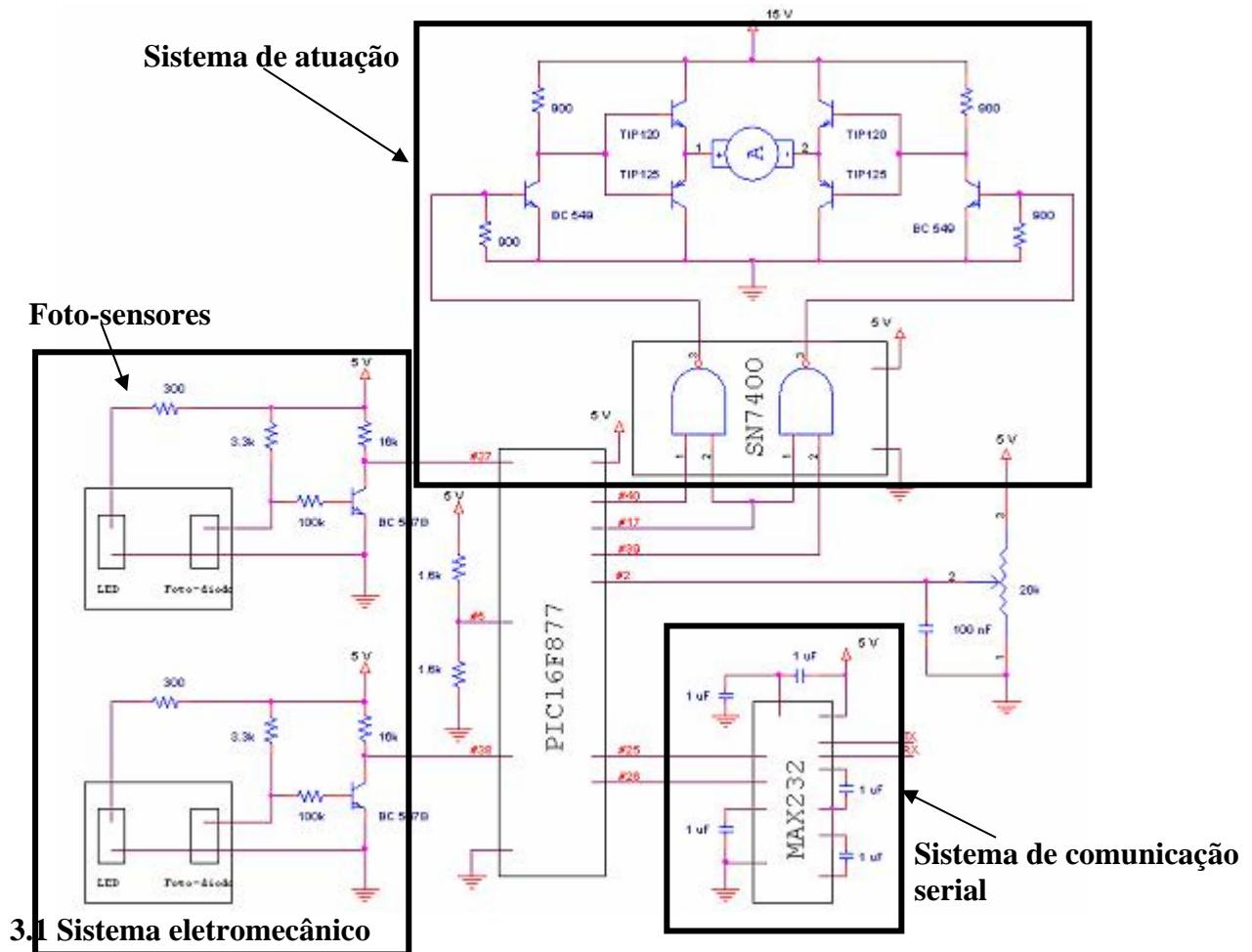


Figura 2 – Circuito de intervenção sobre a planta



Consiste do elemento atuador, um motor de corrente contínua, o pêndulo, o braço de rotação e a estrutura de sustentação.

Braço de Rotação foi o termo escolhido para denominar a estrutura que interliga o pêndulo ao motor, trata-se de uma chapa de zinco de dimensões 40 x 4 x 0,5 cm, perfurada no centro geométrico onde se encontra soldada uma peça destinada ao acoplamento com o eixo do motor como mostra a Figura 1.

O *Pêndulo* consiste do conjunto massa e haste acoplada à extremidade do braço de rotação por meio de um potenciômetro de precisão de 20 kΩ, fixo através de uma estrutura em “L” de alumínio. A haste é feita de alumínio possuindo um formato aproximadamente cilíndrico, de diâmetro 5,0 mm e comprimento 22 cm. A massa pendular é um pequeno cilindro de latão, de diâmetro 2,5 cm e comprimento 2,0 cm. Uma das extremidades da haste possui formato *rosca* para que possa ser acoplada ao potenciômetro por meio de uma peça de alumínio projetada para este fim.

O principal elemento de atuação sobre a planta é o *motor de corrente contínua* cujo eixo encontra-se acoplado ao braço de rotação. Trata-se de um motor de 12 V / 0,4 A, com rotação nominal 50 rpm e capacidade máxima de torque de 13 Kgf cm. O eixo principal está ligado a uma caixa de redução que é responsável pela elevada capacidade de torque. O controle é feito mediante tensão de armadura.

Ensaio preliminares foram realizados sobre o motor, permitindo levantar alguns parâmetros importantes, listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do motor levantados em ensaio

Parâmetro	Símbolo	Valor
Constante de tempo	T	0,15s
Zona morta	-	-1 V a 1,5 V
Ganho DC de velocidade	K	0,23 rad/V.s
Corrente de rotor bloqueado (4V)	I_{ab}	0,4340 A
Constante de força contra-eletromotriz	K_b	3,8766 V.s
Resistência de armadura	R_a	9,2166 Ω
Coefficiente de atrito viscoso	B_m	0,6109 N.m.s
Momento de inércia equivalente (eixo após redução)	J_m	0,3362 Kg.m ²

3.2 Sistema de aquisição

As informações mais relevantes para a intervenção sobre a planta são posição e velocidade angular do pêndulo e braço de rotação. Dois sensores encontram-se instalados sobre o protótipo para medir a posição angular do pêndulo e a velocidade do braço, sendo necessário o uso de estimação para os demais estados. O elemento chave do sistema de aquisição é o microcontrolador PIC 16F877, que assume funções de leitura dos sensores, comando do motor e transmissão de dados para o computador.

Microcontrolador PIC

O PIC 16F877 (SOUZA, 2000) é uma peça fundamental para a aquisição de dados e atuação sobre o Pêndulo Rotacional, constituindo a principal interface entre a planta e o microcomputador, provendo a leitura dos sensores e fornecendo os sinais de controle ao atuador. Sua utilização inspirou-se nos trabalhos de ISHIGAKI *et al* (2004), ROTHE-NEVES (2004) e LUIS *et al* (2003).

Base de sustentação

O pêndulo encontra-se sustentado por uma estrutura de madeira, que compreende uma base maciça de 60 cm x 60 cm, onde estão fixos quatro pés de 30 cm de altura. Os quatro pés sustentam uma base menor, 20 cm x 20 cm, onde o motor encontra-se parafusado, pronto para o acoplamento com o braço.

Medição da posição angular do pêndulo

A posição angular do pêndulo é medida através do desvio angular sobre o eixo do potenciômetro de 20 k Ω , que é posto em configuração de divisor de tensão alimentado com 5 V. Este sensor foi calibrado de forma que as oscilações do pêndulo produzam na saída do circuito pequenas variações de tensão concentradas na faixa [0; 2,5] V, sendo vantajoso por manter a linearidade do sensor e permanecer dentro de limites seguros de conversão AD do microcontrolador.

A saída do divisor ainda é ligada a um filtro RC até o canal “0” do conversor AD do PIC. O sinal é convertido em uma palavra binária de 8 *bits*, a uma taxa de aproximadamente 16 ms, sendo o nível lógico “0” ajustado para 0 V e o nível “255” para 2,5 V.

Medição da velocidade angular do braço

É realizada através de um *encoder* posicionado no eixo principal do motor. Dois pares foto-sensitivos (LED de infravermelho e foto-diodo), localizados na parte superior de um dos pés de sustentação da base, foram utilizados para gerar os pulsos de contagem do *encoder*. Os sinais provenientes da saída dos foto-diodos são recondicionados através de transistores de modo a proporcionar formas de onda razoavelmente quadradas. Os foto-sensores foram ajustados para que os pulsos de cada par estejam defasados de 90°, proporcionando, através de uma lógica implementada no PIC, uma medida adequada de velocidade do eixo.

3.3 Comunicação com o computador

Para que o aspecto didático do protótipo pudesse ser mais bem aproveitado, o sistema de aquisição foi desenvolvido de forma a disponibilizar dados em formato robusto, de maneira que pudesse ser utilizado em diferentes plataformas.

No caso específico da aquisição baseada no PIC, a estratégia traçada foi a de utilizar o microcontrolador como primeiro nível de uma interface com o usuário, onde é possível analisar os dados apenas de forma qualitativa, através de equipamentos de medição como multímetro e osciloscópio. Estas informações são postas em formato adequado à visualização em um segundo nível de interface com o usuário, o microcomputador (PC).

Os dados que fluem entre o PIC e o PC trafegam em um canal de comunicação serial de 19200 *bps*. Este tipo de comunicação foi escolhido por ser de uso simples, uma vez que o microcontrolador conta com módulos avançados de transmissão e recepção, com programação amigável. Além disso, a porta serial está disponível em grande maioria dos microcomputadores do mercado, tornando o sistema relativamente barato se comparado a equipamentos de aquisição mais sofisticados.

É importante mencionar o fato de o PIC trabalhar com sinais seriais de padrão TTL, enquanto que o PC utiliza o formato RS232. Para efetuar a compatibilização é utilizado o circuito integrado MAX232, que, nessas condições, é parte fundamental do circuito de aquisição.

A disponibilidade da informação no computador torna o aspecto didático do protótipo mais atraente porque permite que dados sejam interpretados em tempo real ou *off-line*. No caso das aplicações iniciais, que dizem respeito à identificação dos parâmetros da planta, a segunda alternativa mostra-se bastante eficaz.

Leitura dos sensores

A informação que trafega da planta para o computador compreende dois *bytes* de dados, que representam, nesta ordem, a posição do pêndulo (posição em relação à referência inicial, atribuída no momento em que o sistema é energizado) e a velocidade do braço (módulo e sentido). A posição do pêndulo é informada em absoluto, isto é, a palavra binária transmitida corresponde exatamente à leitura do sensor, que neste caso foi calibrado para a faixa $[-30^\circ ; +30^\circ]$. O *byte* de velocidade do braço contém duas informações que devem ser extraídas por *software*: o bit mais significativo da palavra corresponde ao sentido de rotação, enquanto que os sete restantes, ao módulo da velocidade (contagem do *encoder*).

Intervenção sobre a planta

O controle da planta é realizado mediante a especificação do ciclo de trabalho de uma onda PWM gerada pelo módulo CCP do PIC, conforme será discutido no item 3.5. Sabe-se que o valor médio do sinal é proporcional ao ciclo de trabalho, sendo, portanto, um meio adequado para o controle do atuador.

No que diz respeito à informação necessária para intervir sobre o protótipo, dois *bytes* de dados são necessários: o primeiro contém informações sobre o ciclo de trabalho do PWM e o segundo, informação complementar sobre o ciclo de trabalho e a polaridade de excitação. O microcomputador, então, recebe a informação do usuário de qual deve ser a tensão média de armadura, determina o valor do ciclo de trabalho correspondente e desdobra estes dados em dois *bytes*: o primeiro contém os 8 *bits* mais significativos do PWM; o segundo contém os 2 *bits* restantes e mais o sinal da polaridade. É importante notar que a informação de intervenção é transmitida somente após o recebimento da leitura dos sensores.

3.4 Interface com o usuário

As informações provenientes do microcontrolador, bem como a geração dos dados que devem ser encaminhados para atuação sobre a planta são todos acessíveis através de um programa desenvolvido no ambiente da National Instruments, LABVIEW 6.i.

Esta ferramenta foi escolhida porque proporciona o desenvolvimento de aplicações de aquisição de forma bastante eficaz, graças à facilidade de uso de seus módulos de acesso ao *hardware*. Além disso, as funcionalidades do LABVIEW proporcionam diversas possibilidades de modularização do programa, tornando-o organizado e robusto à pequenas manutenções corretivas ou inclusão de novas telas.

A oportunidade de trabalhar com este ambiente de programação certamente contribuiu de forma diferencial para a formação dos envolvidos com o trabalho, uma vez que o desenvolvimento de programas de aquisição tem se restringido, no contexto desta instituição, à linguagens de programação convencionais (como C++).

3.5 Sistema de atuação

A principal via de controle do pêndulo é o torque sobre o braço de rotação, que é função da tensão de armadura, neste caso, controlada através de *Modulação por Largura de Pulso* (PWM).

Módulo CCP

É o módulo do microcontrolador que foi utilizado para gerar sinais PWM a partir da formação do ciclo de trabalho. Para sua utilização, basta que sejam definidos: o período da onda (4,09 ms para esta aplicação) e seu respectivo ciclo de trabalho, manipulado através de um par de registradores (resolução total de 10 bits) e um contador interno. A saída do módulo é um sinal PWM, responsável pelo acionamento do circuito de potência principal.

Circuito de acionamento

Um circuito tipo ponte H foi utilizado para fornecer potência ao motor a partir de uma fonte distinta daquela dos circuitos de medição. O sinal PWM fornecido pelo PIC é aplicado a um estágio de amplificação baseado em transistores até chegar à ponte, onde efetivamente controlará a tensão de armadura. O circuito intermediário foi necessário porque foram observados problemas de polarização que promovia aquecimento assimétrico e conseqüente danificação de componentes

4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A constituição do protótipo possibilitou discussões acerca do projeto em si, bem como diversos aperfeiçoamentos que já estão sendo postos em prática. No que diz respeito à pesquisa, alguns trabalhos foram desenvolvidos em ambiente real e simulado.

Simulações

As experiências em simulações (utilizando o MATLAB) permitem o estudo do comportamento dinâmico do pêndulo em seus dois modos de operação distintos e a influência de seus aspectos construtivos sobre ele.

Do ponto de vista didático, dois experimentos básicos têm sido estudados em simulação:

1. Alocação de pólos via realimentação de estados
2. Identificação de modelos lineares contínuos.

O primeiro problema tem sido explorado através do uso das equações linearizadas (7)-(11). Estes modelos são utilizados para demonstrar todo o procedimento de controle digital

via realimentação de estados, que deverá ser empregado sobre o sistema real. A metodologia apresentada ao aluno consiste de:

1. Fornecer as equações lineares contínuas;
2. Discretizar o modelo;
3. Projetar o controlador de realimentação de estados;
4. Projetar um observador de estados;
5. Fechar a malha de simulação.

O segundo problema proposto é o de identificação de modelos lineares contínuos para o modo não-invertido. Trata-se de uma abordagem cujas intenções se voltam mais à pesquisa

A análise dos modelos linearizados (7)-(11) revela que existe uma relação estrita entre a dinâmica dos dois modos de operação, uma vez que as matrizes de estado apresentam elementos que são idênticos em módulo. O mesmo não ocorre para o caso discreto.

Nestas condições, é proposto aos alunos que sejam investigadas maneiras, por exemplo, as propostas em AGUIRRE (2000), de obter modelos contínuos para o modo invertido através de ensaios com o não-invertido. Trata-se de um problema desafiador, uma vez que são observadas no sistema real algumas adversidades, como ruído e efeitos não modelados pelas equações de Lagrange, tais como não-linearidades do atuador.

Ensaaios com o sistema real

Embora tenha sido criada entre os alunos certa expectativa diante do problema de regulação do modo invertido, as soluções propostas em simulação ainda não puderam ser executadas sobre o protótipo. A razão de existência desta lacuna é a indisponibilidade de um modelo numericamente confiável para ambos os modos de operação, justificada na atual dificuldade de medição dos parâmetros de perdas nos eixos do braço e do potenciômetro.

A solução inicialmente proposta é a de executar os ensaios em modo não-invertido, identificar modelos contínuos e estabelecer a transformação para o modo invertido, utilizando as relações teóricas (troca de sinal de determinados elementos da matriz de estados) entre os dois modelos, como sugerem as equações (2) e (4). Este é um assunto que ainda está em pauta, basicamente devido a duas questões:

- É observada demasiada quantidade de ruído sobre os sinais de velocidade do eixo do motor. Ainda não se chegou a uma conclusão precisa sobre a real influência deste problema sobre a obtenção do modelo não invertido.
- Discute-se qual seria a melhor alternativa para obter o modelo: forçar o estimador paramétrico a fornecer um conjunto de equações diferenciais diretamente dos dados coletados, ou estabelecer relações discretas para então convertê-las em contínuas.

Os esforços de melhoria do protótipo têm sido concentrados na solução do primeiro problema, uma vez que um sistema de medição confiável é indispensável para que conclusões sejam estabelecidas acerca dos métodos de identificação. Foram aplicados procedimentos para minimização do espaço ocupado pelos circuitos, desenvolvimento de trilhas e contatos mais bem elaborados e revisão geral dos componentes visando eliminar quaisquer problemas relacionados à medição.

Atenção especial tem sido voltada à proposta de se obter modelos contínuos diretamente dos dados, ao invés de passar pela representação discreta e conversão (através de funções matriciais – KAILATH, 1980). Métodos alternativos têm sido trabalhados neste sentido.

Experimentos com o protótipo e aprendizado do aluno

O principal benefício da concepção do protótipo Pêndulo Rotacional é a incorporação de um novo objeto de estudo à infra-estrutura do Laboratório de Controle de Sistemas, proporcionando aos alunos do curso um novo ambiente para complementação dos conhecimentos

desenvolvidos no âmbito teórico. Sua particular complexidade é um ponto forte para utilização em atividades que envolvam, por exemplo, assimilação ou validação de técnicas de controle avançado. Na área de pesquisa, é possível citar projetos envolvendo investigação ou aprimoramento de novas técnicas de controle. Frisa-se que as ferramentas de software desenvolvidas facilitam o processo de comunicação com a planta, restando aos usuários apenas a preocupação com o projeto do sistema de controle. Alguns dos experimentos que já podem ser realizados são: controle por realimentação de estados e alocação de pólos (polinomial RST – vide ASTROM) com compensadores de até quarta ordem.

Não se deve deixar de mencionar o ganho concreto agregado pelos alunos envolvidos no projeto de constituição do protótipo. Mais que finalizar a planta, este trabalho mostrou que a metodologia de construção de protótipos proporciona também uma oportunidade de consolidar conhecimentos desenvolvidos durante o período de graduação, como eletrônica básica, programação, etc.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do protótipo Pêndulo Rotacional proporcionou diversos benefícios aos alunos envolvidos com o projeto porque abordou diversos aspectos que podem contribuir para sua formação em Controle e Automação. Sobre o ponto de vista didático dos resultados obtidos, as seguintes considerações devem ser feitas.

Pode-se dizer que o uso dos recursos explorados durante o trabalho para que se chegasse ao protótipo serviu a um propósito muito importante: *mostrar alguns dos tipos de ferramentas que podem ser utilizadas em um projeto de automação*. Neste caso, é possível citar:

- Microcontrolador (PIC), que foi capaz de realizar diversas funções importantes como amostragem (conversão AD), transmissão e recepção de dados e geração de sinais de intervenção sobre o processo (PWM), muitas vezes de forma bastante simples (através dos módulos especializados)
- Instrumentação de baixo custo (comunicação serial). Foi mostrado que é possível contar com equipamentos de medição, dentro de certas limitações (dependendo da precisão necessária e da taxa de amostragem), sem se voltar para soluções sofisticadas de alto investimento. Deve-se frisar que o objetivo deste trabalho foi experimentar a idéia de constituir o hardware de custo reduzido, o que contrasta, à primeira vista, com o uso de ferramentas sofisticadas como o MATLAB e o LABVIEW. Todavia, a utilização destes pacotes de software se deu exclusivamente pela disponibilidade na instituição.
- Ambientes de desenvolvimento de software e simulação (MATLAB, LABVIEW) mostraram-se importantíssimos para este trabalho em particular. Especificamente, foi possível executar procedimentos exaustivos de tentativa e erro em simulação, permitindo entender com maior profundidade a dinâmica do processo, em benefício da construção do protótipo. O uso de ambientes sofisticados de desenvolvimento de aplicativos provê meios de facilmente acessar o *hardware* do computador, mantendo o foco do trabalho longe da compreensão de componentes específicos da linguagem e bibliotecas de *drivers* complexas.

É preciso mencionar também que o fruto mais concreto do trabalho, o protótipo, proporciona um ganho de longo prazo para a infra-estrutura do curso, constituindo um elemento de incentivo à pesquisa, como já tem se mostrado, na figura do trabalho de regulação do modo invertido, a partir de modelos levantados em modo não-invertido.

Este tipo de resultado torna-se um grande incentivador à cultura de construção de equipamentos na instituição, difundindo a motivação entre outros alunos para que trabalhos seme-

lhantes, ou prosseguimento deste mesmo, dêem continuidade ao aprimoramento do ensino em Controle e Automação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas**. Editora UFMG, 2000.

ASTROM, K. J. ; WITTENMARK, B. , Computer controlled systems theory and design. Prentice hall, New Jersey, 1984.

BAYMA, R. S. **Construção de protótipo didático para laboratório de ensino e Pesquisa: Pêndulo Rotacional**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Pará, Belém.

CHEN, C., HAAS, I. **Elements of Control Systems Analysis**. Prentice Hall, 1968.

FRANKLIN, G. F., POWEL, J. D., WORKMAN, M. **Digital Control of Dynamic Systems**. 3rd Ed. Addison Wesley Longman Inc, 1998.

GONZÁLES, O. R.; TORRES-POMALES, W.; **Nonlinear Control of Swing up Inverted Pendulum**. In: IEEE International, 9, 1996, Dearborn, MI.

ISHIGAKI, F. M.; KURODA, W. S.; GOMES, M.C.M.; NEVES, M. R. SILVA, O. F. **Inclusão do Protótipo Didático *Fan Plate* em Laboratório de Experimentação Remota**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 9, 2004, Brasília. **Anais**: Brasília: UNB, 2004.

KAILATH, T. **Linear Systems**. Prentice Hall 1980.

LUIS, D.A. B.B., COELHO, E.M. **Construção de protótipo portátil para Ensino e Pesquisa: Servomotor CC**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Pará, Belém.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice Hall do Brasil, 1982

ROTHER-NEVES, M. **Construção de protótipo para laboratório de ensino e Pesquisa: Sistema Ball-Beam**. 1999. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Pará, Belém.

ROTHER-NEVES, M., SILVA, O. F., BARREIROS, J. A. L. **Metodologia de Construção de Protótipos Didáticos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 9, 2004, Brasília. **Anais**: Brasília: UNB, 2004.

SOUZA, D.J. **Desbravando o PIC**. Editora Érica, 2000.

TENENBAUN, R.A. **Dinâmica**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.

CONSTRUCTION OF A ‘ROTATIONAL PENDULUM DIDACTIC’ PROTOTYPE FOR TEACHING AND RESEARCH IN CONTROL AND AUTOMATIC SYSTEMS

***Abstract:** This paper presents construction steps and some experiments for a didactic prototype, the “Rotational Pendulum”, basically aiming the development of a motivating element for teaching and researching on disciplines related to Control Engineering. The equipment consists of a pendulum attached to the end of free rotating arm, which is connected to the axis of a DC motor. At first, the construction complements students’ graduation, because it requires them to deal with many different skills, such as automation, electronics, computer programming and instrumentation. On the other hand, low cost equipment is available and it can be used as an important tool by teachers and researchers.*

***Key-words:** Didactic prototype, Rotational pendulum, Control systems, microcontroller.*