



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/UFPG-UFPE

CONTROLE DE UM PÊNDULO INVERTIDO: UMA PROPOSTA PARA MOTIVAÇÃO DE EQUIPES DISCENTES

Janáina G. O. – janainoliveira_ufjf@yahoo.com.br

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Circuitos Elétricos.

Rua Benjamin Constant, 790 – Centro

36016.400 – Juiz de Fora – Minas Gerais

Tatiana O. C. – tatiana_oc@yahoo.com.br

Thiago C. C. – tccesar@ieee.org

Francisco J. G. – chico@jfnet.com.br

Resumo: *O presente artigo aborda o projeto e desenvolvimento de um módulo de Pêndulo Invertido, destinado ao ensino de controle e automação, ele será usado como uma ferramenta didática em uma disputa por equipes de alunos. O pêndulo invertido, um tipo de teste muito conhecido na área de educação em controle, foi desenvolvido de forma que as equipes tenham que desenvolver apenas os algoritmos de controle, visto que a estrutura física tem uma interface computacional que possibilita isto. Os algoritmos a serem desenvolvidos devem ser capazes de controlar o equilíbrio do pêndulo em torno de sua posição vertical, utilizando o movimento compensador do suporte, em forma de um "carrinho". O sistema é movido por um servo motor, telecomandado a partir de um ambiente computacional desenvolvido em Delphi. Na detecção do deslocamento angular do pêndulo em relação à posição vertical utilizou-se um sensor resistivo variável, conectado à uma placa analógico/digital, baseada no CI TLC0820. O sistema de acionamento do motor utilizou um microcontrolador PIC 16F628. O módulo se encontra em fase de testes, estando prevista sua utilização em novembro próximo, durante a segunda "Olimpíada de Robôs da UFJF", quando haverá também a competição de Controle do Pêndulo.*

Palavras-Chave: *Pêndulo Invertido, Controle de Processos, Ensino de Engenharia, Estabilidade.*

1. INTRODUÇÃO

A teoria e aplicabilidade dos sistemas de controle constituem, atualmente, suporte fundamental para os avanços da ciência e de diversas áreas da engenharia, não somente na engenharia elétrica, mas também mecânica, aeroespacial, nuclear, para citar algumas. A importância do controle para os projetos atuais é tão grande que muitos sistemas, como por exemplo as grandes aeronaves, simplesmente não conseguem se tornar operacionais sem a participação de sistemas de controle automático realimentados (OGATA 1993). Esta importância crescente coloca a necessidade de se utilizar novas ferramentas e novos procedimentos que possam não destacá-la para os alunos, mas também motivá-los e permitir que projetem e utilizem os diferentes algoritmos e estruturas de controle atualmente disponível.

Dentro deste contexto, o presente trabalho mostra a implementação de uma proposta de ensino e motivação para a área de controle e automação, que foi o desenvolvimento de um projeto de pêndulo invertido, envolvendo todas as etapas, envolvendo desde o projeto até a implementação final, abrangendo o desenvolvimento de componentes elétricos/eletrônicos, mecânicos e a infra-estrutura necessária ao controle, com o desenvolvimento de um ambiente apropriado. A proposta é utilizar o módulo em um sistema de competição entre equipes de alunos, que desenvolverão, cada qual, seu algoritmo de controle buscando estabilizar o pêndulo dentro de condições especificadas. Esta competição figurará como uma prova adicional da II Olimpíada de Robôs da UFJF (SANTOS, et all 2005) ocorrerá em novembro próximo.

Adotou-se o sistema Pêndulo Invertido por tratar-se de um dos mais clássicos "benchmarks" da área de controle de sistemas, dada a sua complexidade inerente. O sistema é constituído por uma base móvel sobre a qual oscila uma haste. Deslocando-se a base horizontalmente, através de uma ação de controle, cuja intensidade depende do deslocamento angular da haste móvel em relação à posição vertical, procura-se manter a estabilidade do sistema. O comportamento oscilante da haste tenta reproduzir problemas oscilatórios de sistemas instáveis, freqüentes em situações como controle da trajetória de um projétil, movimento de um satélite e mesmo, dentro de determinados condicionantes, a postura humana.

O trabalho desenvolvido permitirá aumento do conhecimento teórico e prático dos alunos, haja vista envolver as áreas de controle, eletrônica de potência, mecânica e programação, ao ser utilizado como meio de aprendizado e comprovação prática de teorias com as quais ele tem contato. Adicionalmente, a proposta de realização de competição de equipes para controle do módulo funcionará como importante motivador e um desafio prático para os estudantes, incentivando o aprendizado e despertando seu interesse para os sistemas de Controle e Automação.

Adicionalmente, há que se ressaltar que o ambiente desenvolvido possibilitará que o aluno de engenharia, mais especificamente o de Engenharia Elétrica, disponha de um modelo computacional de um sistema físico real, no qual poderá efetuar simulações confrontando os valores calculados matematicamente e os resultados obtidos com aqueles provenientes de um sistema físico real. Ao abrir a possibilidade do desenvolvimento, pelos próprios alunos, de diferentes algoritmos de controle permitirá também o desenvolvimento de sistemas para tempo real onde a eficiência do processamento e o tempo de atendimento as solicitações do sistema sejam críticos, tendo a oportunidade de verificar, na prática, todas as limitações impostas pelos sistemas para controle em tempo real, multiprocessamento com sincronização entre processos e controle de "hardware".

O trabalho está dividido como segue: a seção 2 trata dos conceitos dos conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do projeto enquanto a seção 3 apresenta os procedimentos necessários à sua implementação, divididos nas partes de: Sensoriamento, Conversão/Transmissão, Controle, Acionamento, Mecânica, Alimentação e Projeto Final. A seção 4 apresenta os resultados obtidos enquanto a 4 aborda as conclusões e considerações finais.

2. CONCEITOS TEÓRICOS: MODELAGEM

O módulo desenvolvido consiste de uma haste apoiada sobre um carro (base) motorizada, sobre a qual atuará a ação de controle. Considera-se o peso da haste desprezível e uma massa m concentrada na extremidade do pêndulo. A força realizada pelo motor é dada por F , θ sendo o ângulo formado da haste até a posição vertical na qual o pêndulo oscilará em torno, M a massa

da base de suporte, referenciados em coordenadas cartesianas. O desenho esquemático do problema é mostrado na Fig.1:

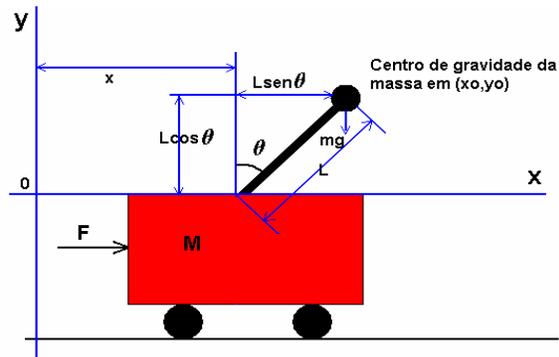


Fig.1 - Modelo Físico do Sistema

Sabendo-se que:

$$x_G = x + l \operatorname{sen} \theta \quad (1)$$

$$y_G = l \cos \theta \quad (2)$$

E aplicando-se a Lei de Newton na direção x do movimento:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + m \frac{d^2 (x + l \operatorname{sen} \theta)}{dt^2} = F \quad (3)$$

$$(M + m)x - ml(\operatorname{sen} \theta)\theta^2 + ml(\cos \theta)\theta = F \quad (4)$$

Equacionando-se o movimento de rotação da massa m em torno do eixo do pêndulo e utilizando-se a Segunda Lei de Newton, haja vista que a equação da massa na direção y não pode ser descrita, têm-se as equações 5 e 6 que seguem:

$$m \frac{d^2 (x + l \operatorname{sen} \theta)(l \cos \theta)}{dt^2} - m \frac{d^2 (l \cos \theta)(l \operatorname{sen} \theta)}{dt^2} = mgl \operatorname{sen} \theta \quad (5)$$

$$mx \cos \theta + ml\theta = mgl \operatorname{sen} \theta \quad (6)$$

Supor θ um ângulo pequeno, tal que $\operatorname{sen} \theta = \theta$, $\cos \theta = 1$ e $\theta^2 = 0$:

$$(M + m)x + ml\theta = F \quad (7)$$

$$mx + ml\theta = mg\theta \quad (8)$$

As equações 9 e 10 abaixo definem um modelo matemático do sistema do pêndulo invertido:

$$Ml\theta = (M + m)g\theta - F \quad (9)$$

$$Mx = F - mg\theta \quad (10)$$

O próximo passo segue abaixo, definindo as variáveis de estado x_1, x_2, x_3, x_4 :

$$x_1 = \theta \quad (11)$$

$$x_2 = \dot{\theta} \quad (12)$$

$$x_3 = x \quad (13)$$

$$x_4 = \dot{x} \quad (14)$$

$$y = x = x_3 \quad (15)$$

A partir da definição das variáveis de estado e das equações obtém-se:

$$x_1 = x_2 \quad (16)$$

$$x_2 = \frac{M+m}{Ml} gx_1 - \frac{1}{Ml} F \quad (17)$$

$$x_3 = x_4 \quad (18)$$

$$x_4 = -\frac{m}{M} gx + \frac{1}{M} F \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M+m}{Ml}g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{m}{M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{Ml} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} F \quad (20)$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Os sistemas de equações **20** e **21** obtidos mostram a modelagem do sistema pêndulo invertido no espaço de estados, utilizado nas equações de modelagem e simulação do ambiente desenvolvido.

3. IMPLEMENTAÇÃO

3.1 Sensoriamento

Uma das etapas iniciais no desenvolvimento do projeto foi o estudo e definição do sensor de posição a ser utilizado, componente crítica do sistema. Foram analisadas as possibilidades existentes levando-se em consideração fatores como custo, facilidades na implementação, menor interferência possível com o sistema (atrito entre a haste do pêndulo e sensor), resolução, precisão, entre outros. As últimas características citadas são fundamentais pois, tratando-se de um sistema instável, onde o ângulo θ terá uma faixa de variação muito reduzida, este deslocamento

deverá ser rapidamente transmitido ao sistema de controle, de forma precisa. Deve ser destacado que, se for ultrapassado um valor limite do ângulo, o pêndulo não mais oscilará em torno da sua posição vertical e o ângulo crescerá rapidamente, com o sistema perdendo a estabilidade. Percebe-se claramente tratar-se de sistema bastante sensível, onde os diversos componentes devem ser analisados criteriosamente para se chegar ao resultado pretendido.

A primeira possibilidade analisada foi a utilização de um “encoder”, transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma seqüência de pulsos elétricos. Os pulsos gerados pelo “encoder” podem ser utilizados para se determinar velocidade, taxa de aceleração, distância, rotação, posição ou direção. O sistema de detecção baseia-se em um disco (“encoder rotativo”), composto por janelas radiais transparentes e opacas alternadas, iluminadas perpendicularmente por uma fonte de luz infravermelha, ocasionando que as imagens das janelas transparentes sejam projetadas no receptor, que as converte em pulsos elétricos.

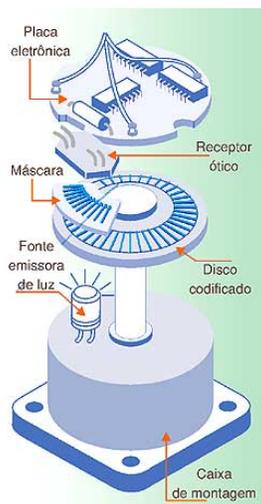


Fig. 2 - Princípio de funcionamento de um encoder rotativo.

Descartada a utilização do “encoder”, optou-se por um sensor resistivo variável, um potenciômetro, que apresenta implementação mais fácil, baixo custo e grande disponibilidade no mercado. O potenciômetro não apresenta a mesma resolução e confiabilidade do “encoder”, mas estas desvantagens podem ser parcialmente superadas adotando-se uma configuração em Ponte de Wheatstone, com resistores apropriados. Para montagem do sensor resistivo configurado em ponte, o eixo do potenciômetro foi acoplado à base da haste do pêndulo, possibilitando medir seu deslocamento angular. O sinal proveniente da ponte foi tratado por um CI conversor analógico/digital TLC0820, conforme descrito no item 3.2 a seguir.

3.2 Conversão

A conversão analógica-digital do sinal proveniente do sensor resistivo foi efetuada com o uso de um conversor TLC0820, um conversor paralelo com 8 bits de resolução, com dois modos de operação, *readonly* e *write-read* (Datasheet – TLC0820). Utilizou-se o modo *readonly* que inicia uma conversão na borda decrescente do pino /RD; quando a conversão é concluída ocorre uma borda decrescente no terminal /INT e a saída RDY vai para nível de alta impedância. Com este dispositivo utilizou-se o esquema para conversão mostrado na Figura 3.

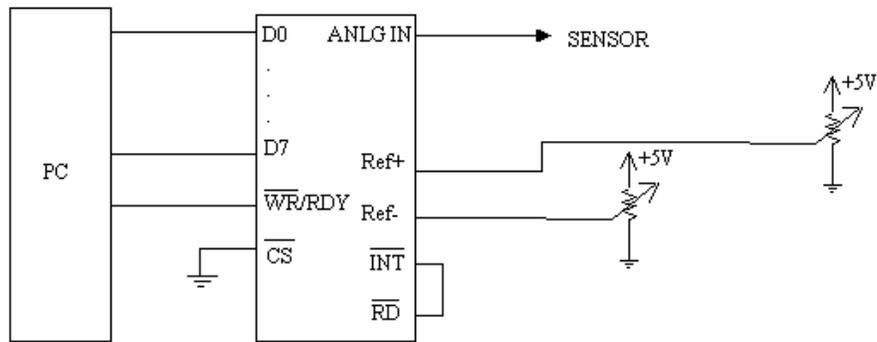


Figura 3 – Esquema para a conversão

O /CS foi mantido no nível baixo para que o CI operasse de modo contínuo. A interligação dos pinos /INT e /RD possibilitam o início de nova conversão, ao término da anterior. O pino RDY foi conectado ao computador e quando for necessária uma leitura do conversor o programa deverá esperar que este bit esteja em estado alto.

O ajuste dos pinos de referência foi efetuado por um potenciômetro permitindo ajustar a faixa de valores. O tempo de conversão máxima é de $2,5\mu\text{s}$ e a resolução de 255 pontos, suficientes para as necessidades do projeto. A comunicação com o computador foi feita através da porta paralela, usando o modo EPP (*Enhanced Parallel Port*), os bits D0 a D7 foram ligados aos pinos bidirecionais, configurados como entradas e usou-se um pino do registro de status para ler o pino RDY do conversor.

3.3 Acionamento

Outra etapa importante do projeto envolveu a escolha do motor para acionamento da base do pêndulo. A escolha de um motor ideal envolve vários fatores como potência, torque, velocidade e consumo. Estes fatores devem ser criteriosamente ponderados para que se consiga resultados efetivos no módulo final, haja vista que os movimentos realizados pelo pêndulo, mesmo que apresentem variação reduzida, necessitam ser corrigidos com rapidez e precisão para se conseguir a estabilidade do módulo. Foram selecionados, inicialmente, três tipos de motores: motor de passo, motor CC e servomotor utilizado em antena parabólica.

Os motores de passo são alimentados por uma seqüência de pulsos elétricos, girando seu eixo de um ângulo fixo, preciso, a cada pulso da seqüência. A utilização do motor de passo, inclusive, abria a possibilidade não se utilizar o sensor convencional, pois o controlador teria informação, pelo próprio motor, da posição do pêndulo e, ao controlar o tempo entre um pulso e o seguinte, poderia controlar a velocidade de giro do motor diretamente. Verificou-se que a relação entre o torque e o volume do motor, quando em movimento, é menor do que a dos motores CC, mas têm a vantagem que, se estacionados em determinada posição, detêm um alto torque de retenção, impedindo o movimento. Os testes realizados, porém, mostraram que devido ao pequeno torque apresentado pelo motor de passo ensaiado, seria impossível o controle efetivo do sistema em altas velocidades, razão pela qual esta opção para o acionamento foi descartada.

Analisou-se, como segunda possibilidade, a utilização de um motor de corrente contínua (www.actionmotors.com.br). Seu movimento é, geralmente, suave e contínuo e, com uma redução mecânica apropriada, podem desenvolver torques elevados em volumes reduzidos. As principais desvantagens consistem na dificuldade para o controlador conhecer a posição exata do

eixo e a velocidade de rotação que depende fortemente da carga, o que exige a escolha dos sensores apropriados. O acionamento do motor CC exige o desenvolvimento de um *driver* de acionamento, com a finalidade de adequar os ganhos dos sinais provenientes do controlador como também para fazer a inversão de giro do motor, dependente da posição do pêndulo. Os testes realizados mostraram a necessidade de se trabalhar com transistores de maior potência caracterizando um consumo elevado para a concepção de alimentação utilizada no módulo (ver item 4.4). Buscou-se, assim, uma terceira alternativa, representada pelos servomotores.

Os servomotores (ou servos) são motores especiais que incorporam um sistema interno de realimentação controle de sua posição. O eixo de um servo. Tipicamente, gira entre 0° e 90°, ou entre 0° e 180° e necessitam de uma alimentação que varia, tipicamente, entre 4,5 e 6,5 volts, com a corrente necessária dependendo da potência do servo. No caso de um servo, sua posição é controlada por um trem de impulsos, que varia tipicamente entre 1ms e 2ms, com uma frequência de cerca de 50Hz. Se o servo recebe impulsos de 1.5ms, a sua engrenagem de saída gira até se estabilizar, no centro do intervalo de rotação, nos 90°. Se receber impulsos de 1ms, rodará no sentido horário até atingir o limite do intervalo de rotação correspondente a 0°. Se receber impulsos de 2ms, rodará no sentido anti-horário até atingir o outro limite do intervalo de rotação correspondente a 180°. Impulsos ente 1ms e 1.5ms farão com que o servo gire no sentido horário para posições intermédias entre 0° e 90°, enquanto que impulsos entre 1.5ms e 2ms farão com que o servo rode no sentido anti-horário para posições intermédias entre 90° e 180°. Estas características do servo permitiram a programação de um microcontrolador PIC gerando o trem de pulsos necessário para que o sistema interno de realimentação posicione o servo em determinada posição em resposta a uma determinada ação do controlador.

Os testes realizados recomendaram a utilização do servo motor de antena parabólica para o módulo de acionamento, comandado por uma PIC 16F628, como a melhor solução para o projeto.

3.4 Alimentação

Para minimizar o uso de condutores e conferir maior mobilidade ao módulo optou-se por um sistema de alimentação utilizando baterias. Dentro das possibilidades disponíveis no mercado foram analisadas três opções: NiMH (Níquel-metal-hidreto), NiCd (Níquel-cádmio) e Íon Lítio (www.minamoto.com). A análise para seleção de melhor opção levou em conta as características de capacidade, ciclo de vida, efeito memória e custo.

As baterias de NiCd apresentam baixa capacidade de carga (200Ah/kg), são afetadas pelo efeito memória - depois determinadas recargas passam a não fazer mais a recarga completa -, seu ciclo de vida é em torno de 500 recargas, mas seu custo é baixo, quando comparada às outras. As baterias de Ni-MH apresentam boa capacidade de carga (3100Ah/kg), não possuem efeito memória considerável e como apresentam um ciclo de vida alto, de até 1000 recargas, seu custo final também passa a ser competitivo. As baterias de Íon Lítio apresentam as melhores características em todos os quesitos avaliados, como uma densidade de carga de 3800Ah/kg, mas apresentam também custo muito mais elevado.

Estudando a relação custo benefício das opções analisadas concluiu-se que a melhor opção seria a de Ni-MH, mesmo com custo mais elevado. Estas baterias são, atualmente, facilmente acessíveis, pois são amplamente utilizadas principalmente em telefones celulares.

Cada célula utilizada possui uma tensão de 1,25V e uma capacidade de carga de 1Ah. Foi usado dois conjuntos de 6 baterias em série obtendo um valor de 7.5V. A capacidade de corrente se manteve a mesma para o caso de apenas uma célula. A carga obtida foi satisfatória, dando

mais de uma hora de autonomia, visto que o servo-motor e o circuito eletrônico são de baixo consumo. As baterias do motor foram ligadas diretamente, mas para o restante do circuito foi utilizado um circuito regulador com o CI 7805.

3.5 Mecânica

O próximo passo realizado foi a montagem do protótipo, com a concepção utilizada na figura 4:

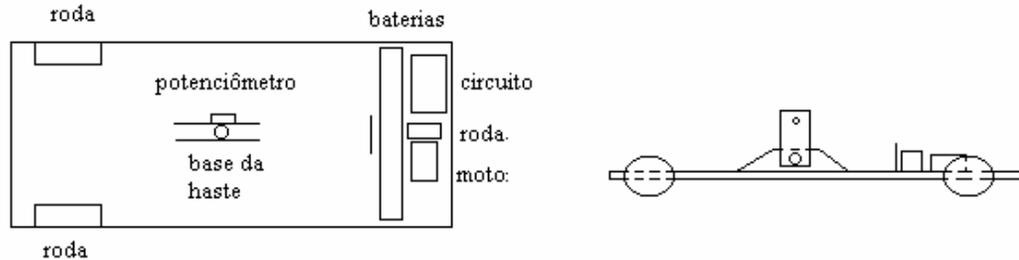


Figura 4 – Vistas superior e lateral da concepção do protótipo

O esquema mais simples encontrado para locomoção foi o esquema tripé, utilizando como base para o módulo uma fina chapa de alumínio. Para o sistema de tração, com ligação entre o servo-motor e a roda dianteira, utilizou sistemas de engrenagens e uma caixa de redução. As baterias para alimentação do sistema foram localizadas na parte posterior da roda dianteira.

A sustentação da haste do pêndulo foi efetuada por uma pequena haste soldada a duas chapas em forma trapezoidais permitindo a sua mobilidade. No eixo de rotação da base foi acoplado o sensor resistivo. A haste do pêndulo foi encaixada e parafusada na base. Esta foi a maneira mais prática para se colocar o pêndulo, e a que permitiu o uso de pêndulos de diferentes tamanhos.

3.6 Controle

A proposta que norteou o desenvolvimento do módulo foi a possibilidade de se utilizar diferentes algoritmos de controle, de acordo com a opção efetuada pelos usuários, inclusive com a realização de Olimpíadas de Controle do Pêndulo, associadas às Olimpíadas de Robô da UFJF (SANTOS, et all 2005). Dentro desta perspectiva, a proposta foi desenvolver um ambiente computacional que incorporasse algum algoritmo básico de controle para estudo de caso e demonstração, mas que principalmente, oferecesse a possibilidade, em forma fácil e amigável, de acoplamento de diferentes algoritmos, para que outros usuários pudessem desenvolvê-los e implementá-los, de forma amigável.

Utilizou-se, como algoritmo padrão, um controlador de três modos P + I + D, onde o usuário pode efetuar a sintonia dos diferentes ganhos do controlador, verificando as dificuldades inerentes a este processo, avaliando os resultados no controle do pêndulo, inicialmente por simulação e, a seguir, no modelo real.

Contudo, a parte mais importante do projeto é constituída pelo módulo que possibilita a inserção de algoritmos diferenciados para controle, de acordo com o projeto do usuário. Para isto, o ambiente computacional desenvolvido incorpora um componente responsável por interfacear o sistema físico com o algoritmo de controle.

5. RESULTADOS OBTIDOS

O projeto final desenvolvido resultou em um módulo com as seguintes características básicas:

- Sensor resistivo variável como sensor de posição;
- Conversor Analógico-Digital e comunicação paralela com o ambiente computacional,
- Módulo de controle padrão Proporcional Integral Derivativo;
- Módulo de inserção de algoritmos de controle customizado;
- Acionamento através de Servo Motor controlado por uma PIC;
- Alimentação com baterias NiMH;

Foi desenvolvido um ambiente computacional gráfico amigável, utilizando-se a linguagem Delphi, que permite simulação do pêndulo e controle do módulo físico, em tempo real, com algoritmos de controle customizados. O ambiente incorpora diferentes saídas gráficas descrevem o comportamento do pêndulo, tanto em malha aberta como fechada, disponibilizando a variação do ângulo do pendulo (em radianos) versus o tempo (em segundos), podendo-se obter-se uma visão clara de sua dinâmica.



Figura 5 - Tela principal do programa

Na tela principal do programa o usuário escolhe simplesmente se quer controlar o pêndulo físico, ou simular o controle de um pêndulo.

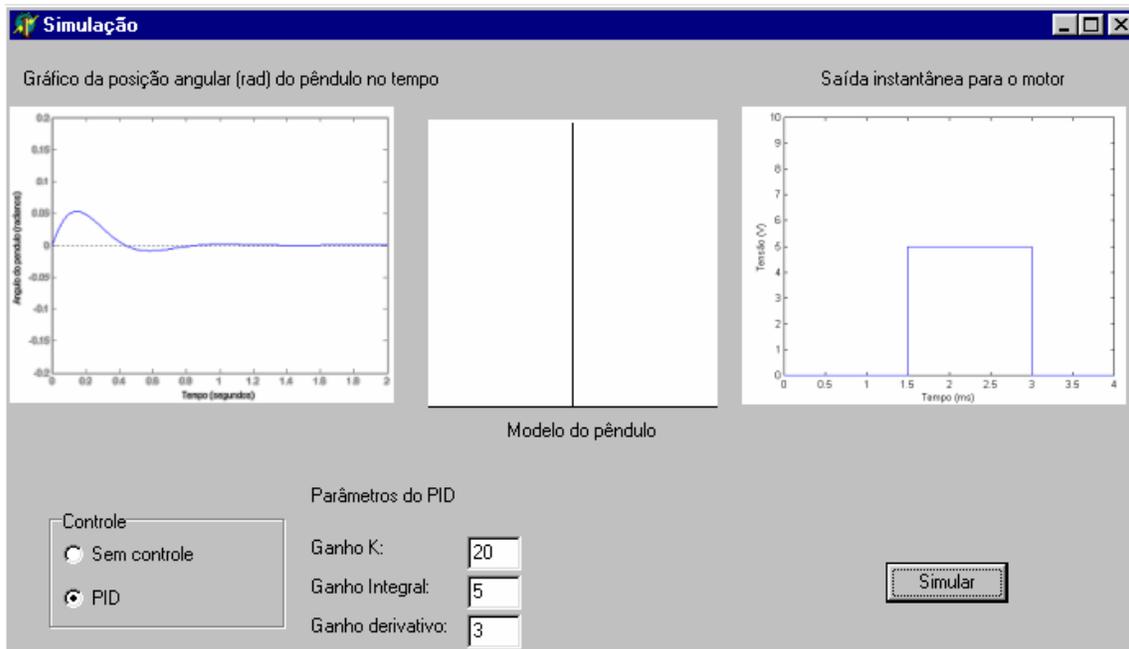


Figura 6 – Ambiente de simulação do pêndulo

A tela acima o usuário pode definir se deseja ver o movimento do pêndulo com ou sem o controle. O tipo de controle implementado foi o PID, seus parâmetros de ganho podem ser configurados. Ao clicar em simular o gráfico do deslocamento angular do pêndulo no tempo é gerado, pode-se visualizar o estado do pêndulo através de um modelo simplificado que é desenhado no ambiente. Também se tem o gráfico da forma de onda que é enviada para o servomotor.

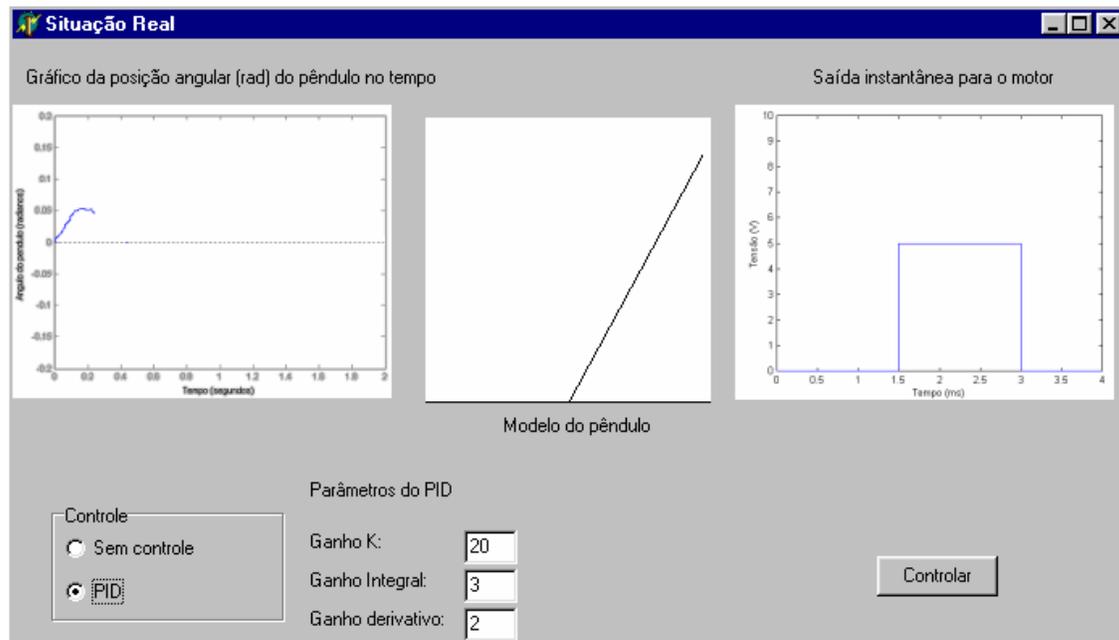


Figura 7 – Ambiente para controle real do pêndulo

Ao clicar no botão *controlar* da tela principal abre-se a janela acima. Assim como na simulação, o usuário pode configurar se quer o controle e neste caso, seus parâmetros. À medida que os dados são obtidos do sensoriamento do pêndulo os gráficos de deslocamento angulares no tempo são gerados, assim como o desenho simplificado. A saída para o motor é gerada da mesma forma.

Nos gráficos acima se pode verificar os instantes iniciais do controle do pêndulo, a curva do deslocamento começa a se aproximar da curva que foi simulada.

Para que outros alunos possam desenvolver seu próprio algoritmo de controle para o pêndulo, foi desenvolvido um componente para a linguagem *Delphi* que possibilita qualquer um que use este ambiente de desenvolvimento interagir com o dispositivo sem precisar ter conhecimento dos protocolos utilizados para a entrada e saída de dados. Desta forma o projeto aqui desenvolvido se torna uma excelente ferramenta e de fácil utilização para a prática das teorias de controle

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que os avanços na teoria e na prática de controle propiciam meios para se atingir melhor desempenho em sistemas dinâmicos e melhoria na produtividade, uma forma de evitar operações repetitivas entre outros, os engenheiros e cientistas em sua maioria necessitam ter um bom desempenho neste campo.

O trabalho vem apresentando ótimos resultados, respondendo às expectativas do grupo, com um ambiente computacional que permite uma interface amigável além de permitir a aluno um aprendizado dinâmico e consciente em muitas das diversas áreas que a Engenharia oferece, desde a mecânica até o desenvolvimento de algoritmos.

Os próximos passos consistem em utilizar rádio frequência para transmissão do sinal (ou comunicação via Infravermelho ao invés de comunicação paralela entre o circuito eletrônico e o computador). Também se tenciona possibilitar ao usuário tentar fazer o controle do pêndulo utilizando outros tipos de algoritmos que não parte do controle proporcional integral derivativo, dando aos alunos uma abertura maior no que se refere ao desenvolvimento de outras formas de controle na tentativa de obter-se uma maior estabilidade do sistema.

O uso do ambiente como ferramenta de apoio didático já está programado na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (ressaltando a Olimpíada de Controle do pêndulo, a ser realizada durante a II Olimpíadas de Robôs da UFJF), como diretriz de trabalho do Programa de Ensino Tutorial. De acordo com o resultado e retorno requerido aos alunos ao fim do seu uso, o mesmo poderá ser adotado definitivamente no processo educacional.

Agradecimentos

Ao Programa de Ensino Tutorial – PET/SESu/UFJF. Ao Prof. Dr. Francisco José Gomes pela sua orientação neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<http://www.actionmotors.com.br>

<http://www.seattlerobotics.org/guide/servos.html>

<http://www.minamoto.com>

<http://www.rogercom.com>

<http://paginas.fe.up.pt/~sam/PSTFC/propostas/propodoc.html>

<http://www.mecatronicaatual.com.br/artigos/cnc/>

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Ed. Prentice-Hall do Brasil, 1993.

RASHID, Muhammad H. **Power Eletronics: Circuits, Devices and Applications**. Second Edition. Prentice Hall.

TOCCI, Ronald J. **Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações**. Prentice Hall. 8ª Edição.

Data Sheet – *PIC16F62X*. *Microship*.

Datasheet – *TLC0820, High-Speed 8-Bit A-to-D Converters Using Modified Flash Techniques*. *Texas Instruments*.

BRAGA, Henrique A. C., Tutorial de Baterias para a *I Olimpíadas de Robôs da UFJF*, 2004

POPOV, V. **Electrical Measurements**. Editorial Mir. 1982

BORSATO, Alan et all. Análise de Controle de dinâmica de um Pêndulo Invertido. Petrópolis, 2001. Relatório.

ARAÚJO, Armando et al. *SISCOPI – Sistema de Controlo de Pendulo Invertido*. Relatório.

SANTOS, Ana; CARVALHO, Hélvia; OLIVEIRA, Janaína; HONORATO, Lílian; MARCATO, André. Olimpíadas de Robôs: Elementos de Motivação no Ensino de Engenharia Elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 33, 2005, Campina Grande, Paraíba, (Artigo submetido).

CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM: A PROPOSAL FOR MOTIVATION OF LEARNING TEAMS

Abstract: *This article focuses on the design and development of a Inverted Pendulum module for control and automation educational purposes, to be utilized as a didatic tool for students teams competition. The inverted pendulum, an well known benchmark in the control area education, was developed in such a way that the students teams have only to develop the control algorithms software, since the hardware structure has an interface with an computational environment that allows this procedure. The algorithms to be developed have to be able to control the balance around its vertical position, using the compensating movement of the support, in form of a "stand". The system is motorized by a servo motor, controlled from a computational environment in Delphi. In the detention of the angular displacement of the pendulum in relation to the vertical position a resistive sensor was utilized, interfaced with an analógico/digital conversor, based in the CI TLC0820 and the driving system of the engine utilizes a microcontroller PIC 16F628. This educational kit is now under tests and will be utilized in the second "Olimpíada de Robôs da UFJF", scheduled for november, when the students teams will participate of an "Inverted Pendulum Control Competition".*

Key-words: *Inverted Pendulum, Processes Control, Engineering Education, Stability.*