

## **METODOLOGIA PARA A CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS DIDÁTICOS PARA OS CURSOS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS**

**Max Rothe-Neves** – mrn@ufpa.br

**Orlando Fonseca Silva** – orfosi@ufpa.br

**José Augusto Lima Barreiros** – barreiro@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:** *Este trabalho apresenta uma metodologia para a construção de protótipos didáticos que vem sendo aplicada na Universidade Federal do Pará na forma de trabalhos de conclusões de curso. A aplicação dessa metodologia objetiva, entre outras coisas: 1) Disponibilizar equipamentos de custo reduzido, fácil manutenção, e que possam ser utilizados de forma presencial ou remota, 2) Formar alunos mais capacitados na área de controle e automação de sistemas, e também em matérias correlatas, tais como eletrônica e programação, 3) Permitir a inclusão de novas rotinas no programa de controle, tais como as que utilizam: controle clássico, controle moderno, controle adaptativo, técnicas de inteligência computacional, métodos de identificação de sistemas, entre outras, e 4) Disponibilizar equipamentos com diferentes características: ordem (baixa ou elevada), rapidez (rápido ou lento), atraso (presença ou ausência e magnitude), grau de linearidade em determinadas faixas de operação, grau de acoplamento de suas variáveis, número de entradas e saídas (mono ou multivariável), entre outras.*

**Palavras-chave:** *Metodologia, Protótipos Didáticos, Controle, Automação.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O uso de protótipos didáticos em ambientes educacionais dos cursos de controle e automação de sistemas é uma prática recomendável, seja do ponto de vista pedagógico para uma formação mais consistente dos alunos, quanto do ponto de vista de pesquisa, SILVA *et al* (2000).

Neste contexto, são considerados como ambientes educacionais tanto salas de aulas teóricas quanto práticas em cursos de graduação e pós-graduação. No primeiro caso, percebe-se que quando o professor utiliza apenas os recursos audiovisuais tradicionalmente disponíveis, tais como quadro e projetor, o aluno necessita de demasiado poder imaginativo para entender o significado não-matemático do conteúdo que lhe é apresentado. No segundo caso, percebe-se que quando atividades laboratoriais são desenvolvidas apenas na forma de simulações, impossibilitam que o aluno tenha acesso ou que tome conhecimento de problemas inerentes a sistemas reais. Em ambos os casos, o uso de protótipos didáticos facilita o processo de aprendizagem, pois o conceito teórico é aplicado a uma situação prática real,

visível aos alunos, permitindo que estes façam associações entre a teoria e a prática, conforme argumenta CUNHA *et al* (2000).

Do ponto de vista de pesquisa, os problemas encontrados no uso de tais protótipos justificam as suas utilizações para a validação de algoritmos de controle diante de tais problemas.

Há uma série de limitações na implementação de tal prática. Algumas delas foram observadas pelo grupo de controle de sistemas da Universidade Federal do Pará (UFPA), pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação (DEEC), considerando a sua situação particular:

- Custo – Os protótipos didáticos existentes no mercado são, em grande parte, de empresas estrangeiras e os seus custos são elevados.
- Manutenção – Tais equipamentos necessitam de manutenção constante. Quando isso ocorre, os manuais dos mesmos não fornecem informações suficientes para que alguns problemas sejam resolvidos na própria Universidade. Para tal, os mesmos devem ser transferidos ao fabricante, caracterizando sempre uma situação de dependência tecnológica.
- Montagem – Existem diferentes tipos de protótipos didáticos. Alguns deles foram projetados para que o controle seja implementado de forma analógica. Nesses casos, o funcionamento dos equipamentos depende das ligações elétricas entre diversos módulos, tais como: fontes de alimentação, unidades de tratamento de sinal, atuadores e plantas; e os parâmetros dos controladores são ajustados através de elementos passivos, tais como: potenciômetros e capacitores. Ou seja, os usuários necessitam de um tempo considerável para o término das montagens, por isso, a utilização destes equipamentos é apropriada só para ambientes laboratoriais presenciais.
- *Software* – Outros tipos de protótipos didáticos já foram projetados para a implementação de controladores digitais. Por uma questão comercial, o *software* desses equipamentos não possibilita que os usuários criem novos algoritmos de controle, apenas utilizem as leis de controle que foram fornecidas pelo fabricante, limitando o uso desses equipamentos.
- Portabilidade – A utilização de protótipos didáticos em aulas teóricas é possível em duas situações: quando o equipamento é deslocado para a sala de aula ou quando os alunos são deslocados para o laboratório onde o equipamento está montado. Como os laboratórios de aulas (para geralmente entre 10 e 20 alunos) não suportam a quantidade de alunos de uma disciplina teórica (geralmente em torno de 40 alunos), a portabilidade do equipamento é fundamental para o seu deslocamento às aulas teóricas.

Diante de tais limitações, o presente trabalho apresenta uma metodologia para a construção de protótipos didáticos que vem sendo aplicada na UFPA na forma de trabalhos de conclusões de curso, COELHO e LUÍS (2003), KURODA e ISHIGAKI (2004). A aplicação desta metodologia objetiva:

- Disponibilizar equipamentos de custo reduzido, fácil manutenção, que sejam portáteis (caso se necessite) e que possam ser utilizados de forma presencial ou remota (uma das tendências para os laboratórios de controle e automação citadas em BENCOMO (2002) e SILVA (2001)).
- Formar alunos mais capacitados na área de controle e automação de sistemas, mas também em matérias correlatas, tais como eletrônica e programação.
- Permitir a inclusão de novas rotinas no *software*, tais como as que utilizam: controle clássico, controle moderno, controle adaptativo, técnicas de inteligência computacional, métodos de identificação de sistemas, entre outras.

- Disponibilizar equipamentos com diferentes características: ordem (baixa ou elevada), rapidez (rápido ou lento), atraso (presença ou ausência e magnitude), grau de linearidade em determinadas faixas de operação, grau de acoplamento de suas variáveis, número de entradas e saídas (mono ou multivariável), entre outras.

## 2. MOTIVAÇÃO

A motivação para o trabalho surgiu a partir do uso de microcontroladores da família PIC, que dispõem de características de *hardware* e de *software* que facilitam a implementação de diversas aplicações. Em relação ao *hardware*, a principal característica desses microcontroladores é que possuem internamente ao seu invólucro módulos úteis para aplicações de controle, além de memórias de programa e de dados. Isso reduz a complexidade do circuito eletrônico que deve ser montado para as aplicações, e conseqüentemente, o tempo de implementação, a ocorrência de falhas no circuito, etc... Em relação ao *software*, a principal característica é que toda a programação do microcontrolador é realizada utilizando-se um total de 35 instruções. Isso permite que aplicações sejam desenvolvidas de forma sistemática, mesmo por alunos leigos no assunto, pois torna o aprendizado muito mais fácil e dinâmico, conforme comenta SOUZA (2002).

O uso desses microcontroladores substitui as placas de aquisição de dados (do tipo AD/DA) na arquitetura do sistema, reduzindo assim o custo de implementação. A única diferença é que o sinal gerado pelo microcontrolador, equivalente ao resultante da conversão DA, é do tipo PWM (sinal modulado por largura de pulso, do inglês “Pulse Width Modulation”).

## 3. METODOLOGIA

A metodologia a ser apresentada consiste basicamente em se partir de estruturas representativas abstratas simples e, progressivamente, ir aumentando o grau de complexidade das mesmas, respaldado sempre por fundamentações teóricas consistentes e utilizando *softwares* para auxílio em cada uma das etapas. Sempre que se fizer necessário, diante de dificuldades e resultados não desejáveis, o retorno a etapas anteriores deve ser efetuado fazendo-se uma revisão de todas elas. As etapas da metodologia são apresentadas da subseção 3.1 a 3.8.

### 3.1 Escolha da planta

A primeira etapa da metodologia proposta é a escolha da planta que será construída. Tal escolha deve considerar as aptidões do aluno relativas à modelagem matemática, programação, eletrônica, aspectos construtivos, e solução de problemas. Além disso, fatores como: tempo de dedicação, força de vontade e perseverança, devem ser considerados para que o trabalho seja efetivamente concluído.

### 3.2 Revisões

Num primeiro momento, a revisão bibliográfica deve concentrar-se em referências sobre o sistema a ser construído, especificamente, na busca de um modelo matemático para o mesmo. Textos complementares das ciências básicas são importantes para dar suporte ao entendimento do modelo, sua origem, sua determinação e confirmação. Este é um aspecto crítico, a consistência e a validade do modelo, pois todas as etapas posteriores dependerão dele.

As demais referências podem vir a posteriori, de acordo com a etapa específica a ser desenvolvida.

### 3.3 Recursos de software

Um ambiente de *software* que permita: a) a simulação de sistemas dinâmicos, b) disponha de ferramentas convenientes para projeto de controladores e c) interface amigável com recursos gráficos, é a situação ideal para diversas fases da construção. Mas, independente do *software* escolhido, ou mesmo desenvolvido, vale dizer que o mais importante é ter-se domínio sobre o uso do mesmo e, ainda, que preferencialmente seja o único a ser usado para as finalidades a) e b).

Além deste, é necessário o uso do ambiente de programação do microcontrolador (MPLab), que pode ser conseguido gratuitamente no site do fabricante ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)).

### 3.4 Determinação de um modelo simplificado

Em alguns casos, os modelos obtidos em 3.2. são modelos não lineares, o que torna a análise mais complexa, então antes de se trabalhar diretamente com eles, é conveniente determinar modelos mais simples, lineares, para que se ganhe sentimento sobre os sistemas em si, mesmo que de uma forma aproximada. Para tanto, existem técnicas de linearização que permitem a obtenção destes modelos mais simples de forma sistemática e, portanto, facilmente implementáveis via *software*.

### 3.5 Obtenção dos parâmetros do modelo

Nesta etapa surgem as primeiras especificações em relação ao protótipo final.

Os valores numéricos dos parâmetros, quando incorporados no modelo obtido em 3.4, possibilitam que o aluno crie um significado físico em relação ao sistema, no que diz respeito a variáveis como tempo, aceleração, velocidade, torque, etc... A partir daí, os componentes do protótipo podem ser escolhidos de forma que atendam as especificações de projeto.

Os valores numéricos dos parâmetros do modelo podem ser obtidos analiticamente e/ou através de procedimentos experimentais. Porém, independente da forma de como será obtido, é importante sempre comparar a ordem de grandeza desses valores com a dos valores fornecidos em publicações como livros ou artigos. Quando ocorrer qualquer discrepância entre esses valores, os procedimentos de obtenção dos mesmos devem ser revistos.

Um procedimento experimental simples é verificar a resposta natural do sistema (ou de parte do sistema), como ilustra a Figura 1. Nela, um aluno faz um teste para medir parâmetros de um modelo matemático de um Pêndulo Simples de 2ª ordem para a construção de um Pêndulo Invertido de 4ª ordem.



Figura 1 – Aluno efetua testes para obter parâmetros para a construção de um Pêndulo Invertido de 4ª ordem.

### 3.6 Simulação do modelo e do controlador

De posse dos parâmetros do modelo simplificado, outras especificações em relação ao protótipo podem ser definidas, considerando-se os sinais de entrada e de saída. Para isso, é necessária a simulação de um controlador para o modelo.

Um controlador pode ser projetado utilizando diversas técnicas existentes. Porém, deve-se definir qual ou quais as variáveis do sistema estarão disponíveis através de sensores. Em uma primeira análise, pode-se considerar que todas as variáveis do sistema serão medidas. Assim, um controlador pode ser projetado utilizando-se o conceito de realimentação de estados, isto é, uma combinação linear do vetor de estados  $X(t)$  com ganhos de ponderação  $K$ , da forma:

$$u(t) = -K \cdot X(t) \quad (1)$$

onde  $u(t)$  é o sinal de controle calculado.

Essa técnica de projeto é totalmente sistemática, sendo o vetor  $K$  obtido por uma única fórmula, ÅSTROM e WITTENMARK (1997), que depende diretamente dos parâmetros do modelo obtidos anteriormente, além da especificação dos pólos de malha fechada (o conceito de pólos permite uma correlação imediata com o comportamento do sistema em malha fechada).

Analisando-se a resposta desse controlador, é possível especificar o atuador que será utilizado para controlar o sistema, ou, o sistema pode ser modificado, para se adequar a um determinado atuador. Nesse caso, deve-se retornar à etapa 3.5.

Caso alguma variável não seja medida, deve-se incorporar as devidas modificações na malha de controle. Da mesma forma, pode-se acrescentar nesta etapa aspectos não simulados anteriormente relativos ao modelo simplificado utilizado.

### 3.7 Montagem experimental e programação

Esta etapa consiste na montagem experimental do protótipo, considerando tanto a parte de *hardware* quanto a parte de *software*.

Caso o resultado da etapa 3.6 tenha sido satisfatório, essa etapa inclui a montagem da planta propriamente dita, ou seja, da parte do protótipo que define a sua dinâmica (eletromecânica, térmica, etc...). Caso os resultados não tenham sido satisfatórios, é necessário o retorno às etapas anteriores, porém o aluno pode começar a trabalhar de forma paralela na montagem do circuito eletrônico e do programa para o controle.

Via de regra, o aluno, quando começa a montar esse tipo de equipamento, não domina o uso de microcontroladores. Então, um estudo da folha de dados do componente ou de outra literatura especializada, como SOUZA e LAVINIA (2002), juntamente com simulações no ambiente de programação MPLab, devem ser realizados.

Testes com os sinais de entrada e de saída do dispositivo ajudam a conhecer melhor o microcontrolador.

A parte de programação para o algoritmo de controle pode iniciar com a comunicação entre o microcomputador e o microcontrolador. Com a montagem experimental concluída, ou seja, a planta com os sensores para leitura dos sinais, os circuitos para tratamento dos sinais, o microcontrolador, o circuito de potência e o atuador, testes em malha aberta devem ser realizados, pois ajudam a verificar a validade dos programas, tanto do que está sendo executado no microcomputador quanto do que está gravado no microcontrolador. Além disso, os testes em malha aberta auxiliam na verificação e/ou na medição dos parâmetros do modelo utilizado.

A Figura 2 ilustra um ensaio em malha aberta para a medição de parâmetros de um modelo matemático de um sistema não linear do tipo *Fan Plate*.

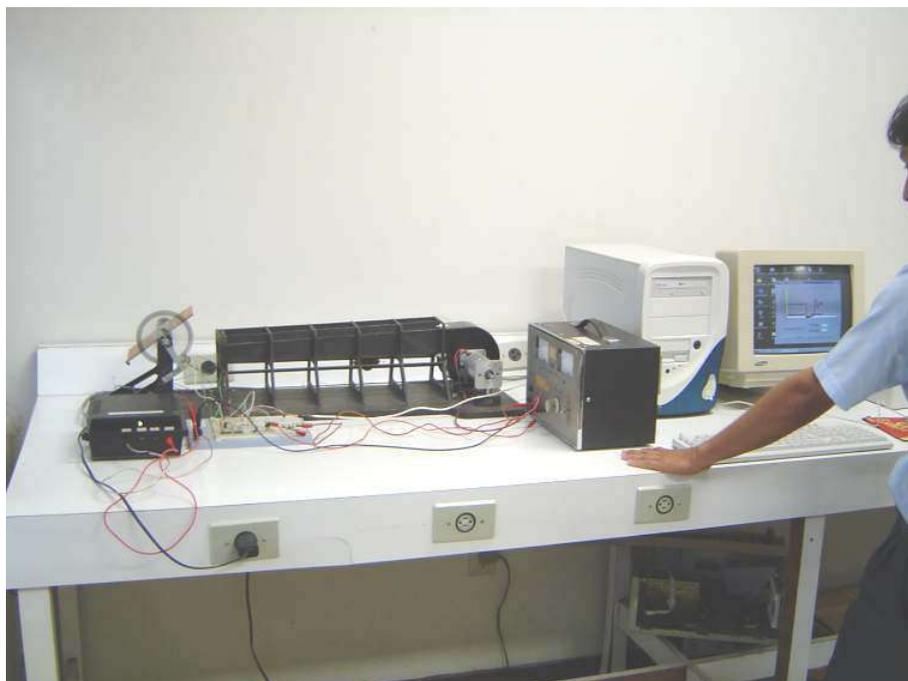


Figura 2 – Aluno efetua testes em malha aberta para a medição de parâmetros de um sistema não linear do tipo *Fan Plate*.

Após a realização dos testes em malha aberta e comprovação do modelo obtido, testes em malha fechada devem ser realizados, para comparar os resultados obtidos no sistema real e na simulação. É importante notar que a estrutura dos programas desenvolvidos em 3.6 será totalmente utilizada nessa etapa.

A Figura 3 compara os resultados obtidos de testes em malha fechada para o controle proporcional de posição de um Servomotor e do seu modelo não linear, para um degrau de referência igual a 45°. O diagrama de blocos construído para a simulação é apresentado na Figura 4.

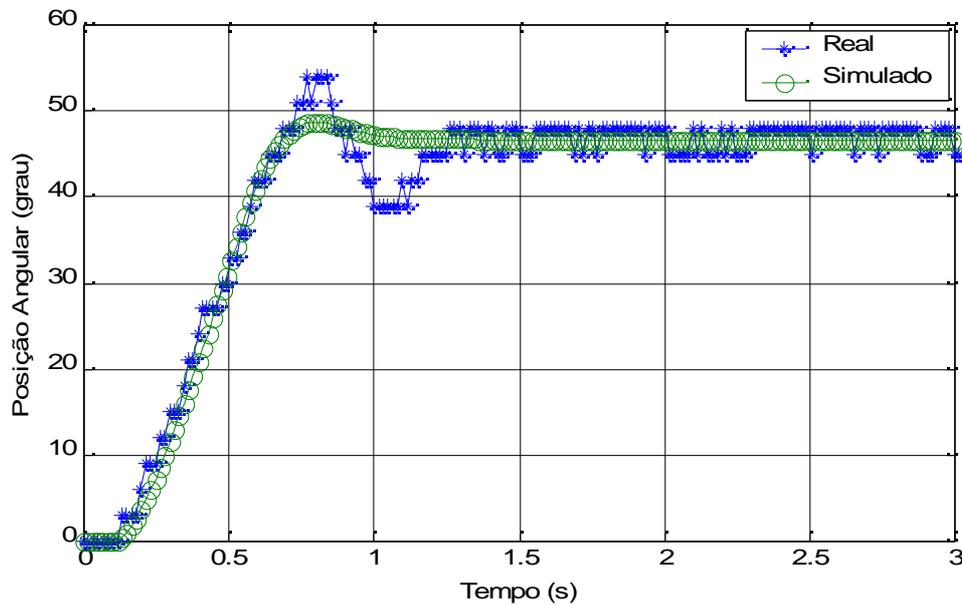


Figura 3 – Comparação entre dados reais e simulados de um Servomotor.

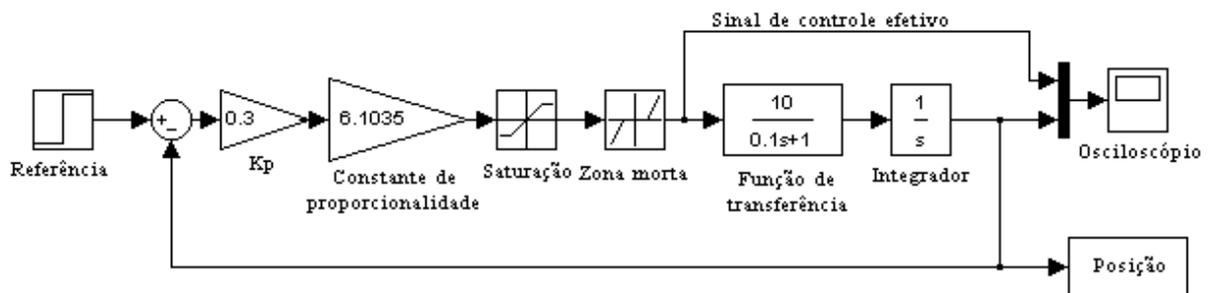


Figura 4 – Diagrama de blocos para o controle proporcional de posição de um Servomotor.

A comparação entre dados reais e simulados de um sistema pode ou não indicar a necessidade de ajustes na montagem experimental, ou mesmo no modelo matemático utilizado. A superposição entre as curvas obtidas nem sempre pode ser conseguida. Primeiro porque existem diversos fatores que normalmente não são modelados, tais como variância no tempo, coeficientes de atritos seco e viscoso, histerese, etc... Segundo, porque geralmente deseja-se que tais protótipos sejam construídos com o menor custo possível. Dessa forma, os componentes utilizados na montagem podem não ter uma qualidade suficiente para conseguir tal superposição. Mesmo assim, a existência de qualquer fenômeno não modelado é um atrativo a mais para o uso desses protótipos por alunos de iniciação científica ou por alunos da pós-graduação, para investigações e pesquisas adicionais.

### 3.8 Construção final

O produto final da etapa anterior é uma montagem experimental operacional, pronta para ser utilizada em experiências de automação e controle, porém susceptível a diversos problemas devido a não robustez da montagem. Os trabalhos de conclusão de curso (TCCs) desenvolvidos na UFPA utilizando essa metodologia, normalmente chegam até a essa etapa do processo de construção, pois a confecção de placas de circuitos impressos, bem como de um projeto de acabamento mais robusto para os protótipos consomem um tempo geralmente não disponível pelo aluno nesse período letivo (geralmente o último).

Normalmente, os TCCs apontam algumas sugestões para trabalhos futuros que trariam contribuições significativas caso fossem implementadas, o que é comum em um processo produtivo, mesmo a nível industrial. Essas sugestões podem ser tanto estéticas quanto operacionais, considerando tanto a parte de *hardware* quanto a parte de *software*. Como exemplo disso, a Figura 5 ilustra dois protótipos de um mesmo sistema, um construído durante o desenvolvimento de um TCC e o outro após. O Servomotor da esquerda foi desenvolvido durante o TCC de COELHO e LUÍS (2003), e o da direita foi construído incluindo as modificações sugeridas na construção da primeira versão.

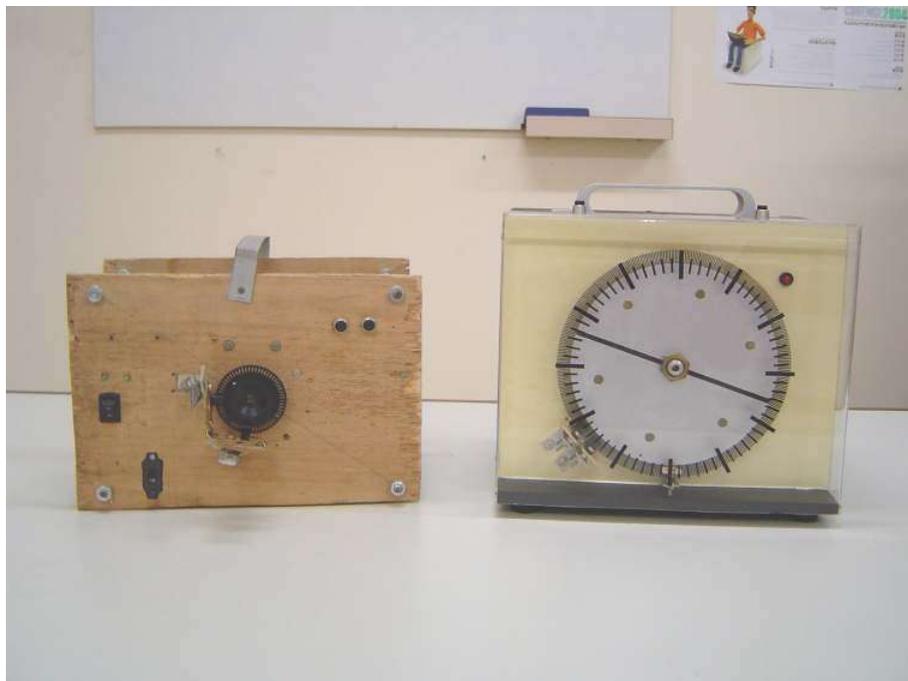


Figura 5 – Duas versões de um mesmo sistema.

#### 4. CONCLUSÃO

Atualmente, três protótipos estão sendo construídos aplicando-se a metodologia proposta nesse trabalho: o Pêndulo Invertido de 4ª ordem (Figura 1), um Sistema Térmico e um Mini Robô para aplicação de algoritmos de inteligência computacional.

A construção de um *Fan Plate* (Figura 2) encontra-se já na sua última etapa, como comentado em (3.8). Este protótipo será incorporado ao Laboratório de Experimentação Remota, gerenciado pelo Laboratório de Controle e Sistemas (LACOS) da UFPA, para atender aos alunos da área de controle. Um outro TCC está em fase de desenvolvimento, incluindo rotinas no programa de controle para identificação paramétrica de modelos matemáticos discretos, através da injeção de uma Sequência Binária Pseudo-Aleatória (SBPA).

A primeira versão do Servomotor mostrado na Figura 5, foi utilizada durante o segundo semestre de 2003 em turmas de Laboratório de Sistemas de Controle. O objetivo principal era

apresentar os diversos problemas relacionados ao controle em uma planta real, e, a partir daí, utilizar ferramentas computacionais para análise, identificação, projeto e simulação de controladores. O protótipo foi utilizado basicamente para comprovação dos resultados teóricos. Mesmo assim, os alunos se mostraram bastante motivados com a utilização de tal equipamento.

Para avaliar quantitativamente tal motivação, a segunda versão do Servomotor mostrado na Figura 5, está sendo apresentada em aulas teóricas de disciplinas de controle, para a solução de diversos problemas relacionados à engenharia. Após a sua apresentação, está sendo realizada uma pesquisa entre os alunos. Entre os alunos já pesquisados, 85% consideraram que a sua motivação na aula aumentou com a utilização do protótipo, 94% consideraram que o uso do protótipo facilita o aprendizado de diversas matérias do curso e 77% gostariam de saber construir tal equipamento.

Com a construção de novos protótipos, e a multiplicação dos já existentes, pretende-se aplicar novas metodologias pedagógicas no ensino de controle e automação de sistemas, como a do tipo “aprender fazendo”, buscando sempre preparar da melhor forma possível os alunos para o futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÅSTROM, K.J.; WITTENMARK, B. **Computer Controlled Systems – Theory and Design**. 3<sup>th</sup> Edition, Prentice Hall Inc, 1997.

BENCOMO, S.D. Control learning: present and future. In: 15<sup>th</sup> IFAC World Congress on Automatic Control, 2002, Barcelona.

COELHO, E.M.; LUÍS, D.A.B.B. **Construção de protótipo portátil para ensino e pesquisa**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Pará, Belém.

CUNHA, F.M.; LEÃO, J.A.; LIMA, E.N.C. Metodologia para aulas de laboratório: uma experiência com circuitos elétricos. In: ICECE’2000 – CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ENSINO DE ENGENHARIA E COMPUTAÇÃO, 2000, São Paulo. **Anais**. São Paulo: SENAC, 2000.CD-ROM.

KURODA, W.S.; ISHIGAKI, F.M. **Recuperação e inclusão do protótipo didático Fan Plate em laboratório de experimentação remota**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Pará, Belém.

SILVA, O.F. **Mídias e tecnologias instrucionais para o ensino/aprendizado de sistemas de controle**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, O.F.; ROTHE-NEVES, M.; ALVES, J.B. da. Metodologia para a construção de protótipos didáticos: um estudo de caso. In: ICECE’2000 – CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ENSINO DE ENGENHARIA E COMPUTAÇÃO, 2000, São Paulo. **Anais**. São Paulo: SENAC, 2000.CD-ROM.

SOUZA, D.J. de; **Desbravando o PIC**. Ed. ÉRICA, 2000.

SOUZA, D.J.; LAVINIA, N.C; **Conectando o PIC – Explorando Recursos Avançados**. Ed. JJCAROL, 2002.

## **METHODOLOGY TO BUILT DIDACTIC PROTOTYPES FOR CONTROL AND AUTOMATION SYSTEMS COURSES**

**Abstract:** *This work presents a methodology for the design and the making of didactic prototypes wich are being used at Federal University of Pará by students as part of their final examinations. The use of this methodology has many objectives: 1) To put available low cost equipments, easy to maintain and able to be used both locally or remotely; 2) To improve the education of students in the area of control and automatic systems, and also in areas with correlation such as electronic circuits and computer programming; 3) To allow the use of several different control techniques such as classical control, modern control, adaptative control, intelligent control, system identification and others; 4) To put available equipment with different characteristics: low or high order, slow or fast response, with or without delay, different degrees of linearity and of coupling among the variables, single or multi inputs and/or outputs, and so on.*

**Key-words:** *Learning Methodologies, Didactic Prototypes, Automation and Control Systems.*