

# DESENVOLVIMENTO DE EXPERIMENTOS LABORATORIAIS PARA O ENSINO DE MECATRÔNICA

**Gilva Altair Rossi<sup>1</sup>; José Maria Galvez<sup>2</sup>; Douglas Iceri Lasmar<sup>3</sup>**

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

Av. Antônio Carlos, 6627

CEP 31.270.901- Belo Horizonte – Minas Gerais

<sup>1</sup> gilva@demec.ufmg.br, <sup>2</sup> jmgalvez@ufmg.br, <sup>3</sup> douglaslasmar@georadar.com.br

**Resumo:** *Este artigo descreve o conjunto de experimentos realizados no Laboratório de Automação e Controle do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais com o objetivo de desenvolver uma bancada de teste para o ensino de automação e controle. A bancada utiliza dois tipos distintos de dispositivos de controle. O primeiro dispositivo é um controlador lógico programável (CLP) e o segundo é um micro-controlador (MC). Neste trabalho, os experimentos mais importantes são apresentados na mesma seqüência em que são apresentadas para os alunos nas aulas práticas da trajetória Mecatrônica do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.*

**Palavras-chave:** *Automação e Controle, Controle de Posição, CLP, Micro-Controladores.*

## 1 INTRODUÇÃO

A grade curricular do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais inclui a trajetória de Mecatrônica, onde os alunos têm a possibilidade de cursar disciplinas voltadas para a área de Eletrônica, Automação e Controle. Com estes conhecimentos, pode-se formar um profissional com um perfil muito requerido no mercado nacional, ou seja, um engenheiro mecânico que tenha conhecimentos de mecatrônica, que pode ser definido como uma linha de desenvolvimento interdisciplinar que envolve subáreas da Engenharia Mecânica, Elétrica, Eletrônica e Ciência da Computação. O sistema desenvolvido e apresentado neste artigo envolve estas áreas.

O principal objetivo deste projeto de ensino é o desenvolvimento de aulas práticas que possibilitem que os alunos de Engenharia Mecânica se familiarizem com as várias técnicas de automação e sejam capazes de desenvolver, analisar o desempenho destes sistemas, e também associar os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula com as atividades práticas desenvolvidas no Laboratório. Com os experimentos desenvolvidos neste projeto, o aluno poderá adquirir conhecimentos sobre maneiras diferentes de se obter um sistema automatizado. A planta a ser controlada é sempre a mesma, no entanto, utiliza-se dois tipos diferentes de elementos de controle, o controlador lógico programável e o microcontrolador. Isso possibilitará que o aluno do curso visualize o problema de formas diferentes e possa realizar uma análise comparativa das técnicas utilizadas avaliando as características de cada uma. Cabe mencionar que a escolha das técnicas acima citadas deveu-se ao fato delas serem atualmente muito utilizadas no nosso parque industrial.

## 2 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste sistema foi dividido em três fases. A primeira fase é o estudo da planta a ser controlada. A segunda fase é o desenvolvimento de um sistema de controle de posição que utiliza como elemento de controle um Controlador Lógico Programável (CLP). A terceira fase, o elemento de controle é substituído por um microcontrolador. A primeira fase consta das seguintes etapas:

- Estudo de cada componente que compõe a estrutura mecânica do sistema;
- Estudo do comportamento do encoder;
- Estudo do comportamento do motor.

Após a primeira fase, inicia-se o estudo dos elementos de controle. O primeiro elemento de controle a ser estudado é o CLP, e esta fase constará das seguintes etapas:

- Instalação e configuração do CLP;
- Ligação do encoder no CLP;
- Ligação do CLP no motor;
- Desenvolvimento do programa para controle de posição, na linguagem Ladder.

Na terceira fase, o elemento de controle é um kit baseado em microcontrolador, e consta das seguintes etapas:

- Estudo das principais características do kit e sua configuração;
- Ligação do encoder no kit;
- Ligação do kit no motor;
- Desenvolvimento do programa para controle de posição, na linguagem C.

O conteúdo gerado nas três fases será transformado em aulas das disciplinas de caráter prático da trajetória Mecatrônica e possibilitará que os alunos do Curso de Engenharia Mecânica estudem, etapa por etapa, o desenvolvimento destes tipos de sistemas de controle.

## 3 O SISTEMA DE POSICIONAMENTO

A estrutura mecânica do sistema de posicionamento, apresentada na figura 1, é constituída por um fuso de esferas recirculantes, guia de deslizamento de barras cilíndricas e uma mesa de posicionamento. A guia de deslizamento tem a função de manter o carro de posicionamento deslocando em apenas uma direção e o fuso tem a função de transmitir o movimento para a mesa. O curso do fuso é de 1000 mm.

O acoplamento entre o fuso, o encoder e o motor é feito por meio de correia e polias. O encoder é montado diretamente no eixo do fuso sendo que desta maneira ele não sofre o efeito de deslizamento da polia. O passo do fuso é de 5 mm e o encoder emite 1440 pulsos por volta, ou seja, a cada 5 mm de deslocamento linear o encoder emite 1440 pulsos. É utilizado um motor de corrente contínua, com tensão nominal de 48V e rotação máxima de 1200 rpm, para acionamento do fuso, e o encoder é o responsável pela informação de posição para o elemento de controle. (ALVES, 2003).

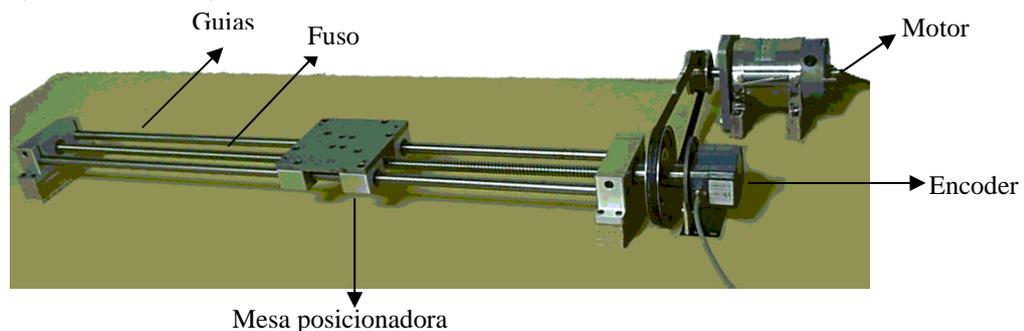


Figura 1 : Sistema de Posicionamento

O encoder utilizado fornece dois pulsos quadrados defasados em 90°, que são chamados de canal A e canal B. A leitura de somente um canal fornece o deslocamento em um só sentido, enquanto que a leitura dos dois canais possibilita a obtenção do sentido do movimento. Um outro sinal chamado de Z ou zero também está disponível. E neste caso, é emitido 1(um) pulso por volta. A Figura 2 exemplifica os pulsos emitidos por um encoder.

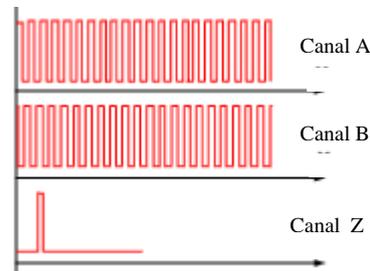


Figura 2 : Pulsos emitidos pelo Encoder

O desenho esquemático do sistema de posicionamento é apresentado na Figura 3, ressaltando as posições das chaves de fim de curso, situadas nas extremidades do eixo. Estas chaves são conectadas nas entradas digitais do elemento de controle de tal forma que, quando a mesa atinge o fim de curso, a chave é acionada e envia um sinal para o programa de monitoração. Este programa é desenvolvido de tal forma que, quando isto ocorre, o motor que aciona a mesa irá parar. Além das chaves de fim de curso, a chave de emergência também faz parte deste sistema de monitoramento dos itens de segurança.

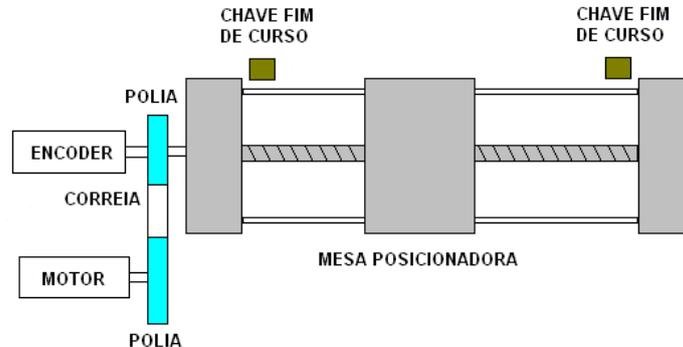


Figura 3: Desenho Esquemático do Sistema de Posicionamento

Nesta fase deste projeto de ensino, o principal ponto é que o aluno entenda qual é o tipo de sinal de saída do encoder e qual é o tipo de sinal que o motor precisa receber. Estes aspectos são importantes para as etapas de controle.

#### 4 O SISTEMA DE CONTROLE

A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático do sistema de controle de posição e de monitoramento dos itens de segurança. A saída do elemento de controle é utilizada para acionar o driver do motor CC, que utiliza a técnica PWM (*pulse Wave Modulation*). Os sinais de pulsos enviados pelo encoder são conectados na entrada apropriada (previamente definida) para o encoder. Outras entradas do elemento de controle são utilizadas para monitorar os sinais de fim de curso e os sinais de emergência, provenientes da planta.

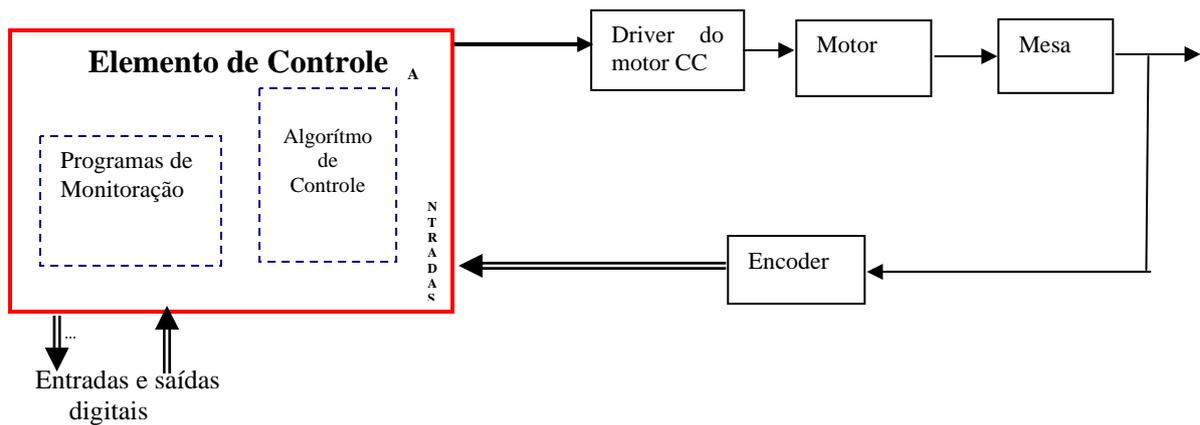


Figura 4: Diagrama Esquemático do Sistema de Controle de Posição e Monitoramento

O elemento de controle, o encoder e motor são elementos que compõem uma malha de controle e devem-se adequar tais elementos de forma a se obter uma malha fechada de controle. Ou seja, é necessário configurar o encoder, especificando o tipo de sinal que será enviado (por exemplo: em quadratura ou paralelo), e o tipo definido tem que estar de acordo com o sinal que o elemento de controle está configurado para receber. Também com relação ao acionamento do motor, o tipo do sinal enviado pelo elemento de controle deve ser compatível com o tipo de sinal que o motor está apto a receber. Estas adequações dos tipos de sinais são realizadas na etapa de configuração do elemento de controle.

Os dados provenientes do encoder são enviados ao algoritmo de controle, cuja estrutura deverá ser implementada no elemento de controle. É necessário definir os valores de cada ganho do controlador. Estes são alguns dos aspectos relevantes que devem ser especificados antes de se colocar o posicionador em operação.

## 5 O CLP COMO ELEMENTO DE CONTROLE

O CLP utilizado é fabricado pela HI Tecnologia, modelo ZAP500 série II. Conforme documento da HI Tecnologia, (HITECNOLOGIA, 2003) o encoder deve ser conectado ao CLP nos pinos previamente designado para isso, conforme a Figura 5. Além disso, a configuração do CLP ZAP500 como leitor de encoder é feita através de três jumpers (J1, J2, J3), localizados no CLP. O valor enviado pelo encoder é armazenado numa posição fixa na memória do CLP. Tal valor será utilizado, posteriormente, no algoritmo de controle de posição (LASMAR, 2005). O CLP utilizado tem uma função especial denominada PID. Esta função permite implementar com facilidade a estratégia de controle Proporcional-Integral-derivativa.

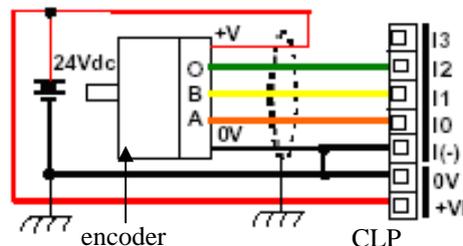


Figura 5 : Ligação entre encoder e CLP

## O Algoritmo de Controle

O programa foi desenvolvido utilizando a linguagem Ladder, e obedeceu a seguinte seqüência:

- 1- Inicialmente, é feita a leitura do valor de posição enviado pelo encoder. O procedimento adotado foi baseado no manual de programação do CLP. A linguagem de programação Ladder possui uma função específica para realizar contagem de pulsos, que pode ser empregada para obter o deslocamento através da contagem dos pulsos enviados pelo encoder. Para isso, basta configurar as entradas do CLP para receber sinais de encoder (A,B). Feito isso, os sinais em forma de pulso, que chegam nesta entrada, são interpretados como sendo pulsos de deslocamento. No programa, o contador informa quantos pulsos são recebidos em cada giro do eixo. Após a contagem do número de pulsos, e com as informações sobre o número de pulsos por rotação e o passo do fuso, obtém-se o deslocamento linear da mesa.
- 2- Na seqüência, implementa-se o PID, utilizando funções específicas da estrutura da linguagem Ladder. É necessário definir valores para os ajustes dos ganhos  $K_P$  (proporcional),  $K_D$  (derivativo) e  $K_I$  (integral);
- 3- E por fim, implementa-se a malha fechada, onde é necessário: (a) calcular o erro de posicionamento, que é a diferença entre o valor de referência e o valor lido pelo encoder e (b) calcular o comando do motor, que é a saída do bloco PID. Este valor deve ser enviado para os terminais de saída do CLP, com a finalidade de acionar o motor. Estas etapas são repetidas continuamente.

Nesta última etapa desta fase do projeto, o PID foi sintonizado experimentalmente. A tela gráfica de apresentação também é obtida facilmente utilizando uma função fornecida pelo fabricante do CLP. Na figura 6, a curva roxa representa a posição desejada e a curva azul representa a posição medida.

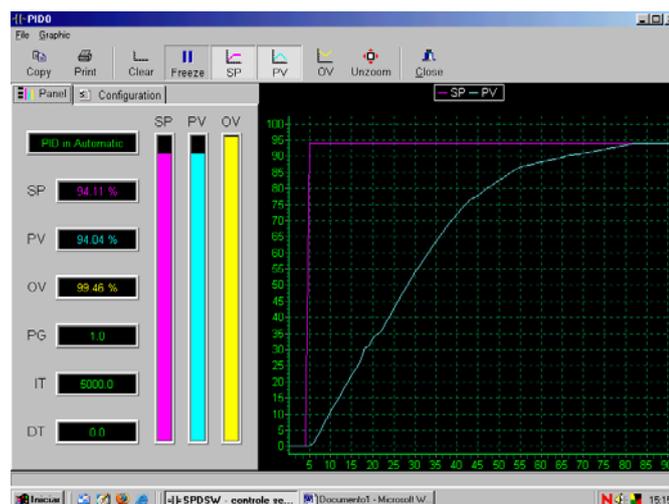


Figura 6: Tela de Apresentação – Controle utilizando CLP

## 6 O MICROCONTROLADOR COMO ELEMENTO DE CONTROLE

O microcontrolador utilizado é o PIC18f452 (MICROCHIP, 2002) e tem a função de controlar a posição e monitorar os itens de segurança do sistema de posicionamento. Para atingir estes objetivos, é necessário que o hardware tenha a capacidade de fazer a adaptação e interligação dos sinais das chaves fim de curso, motor e encoder. O hardware contém um display de 2 linhas com 16 caracteres cada e um teclado de 12 teclas, que servirão como interface homem-máquina, bem como uma saída serial para carregamento de programas diretamente do computador. O software de controle da mesa posicionadora, foi desenvolvido utilizando um compilador C que já possui rotinas para programação do microcontrolador PIC18f452. Este kit foi desenvolvido por estagiários, no Laboratório de Automação e Controle [LASMAR, 2007].

### O Algoritmo de Controle

O programa para controle de posição foi elaborado utilizando linguagem C e algumas bibliotecas disponíveis do compilador PCWC 3.19. Na Figura 7 é apresentado o fluxograma do software cujos principais aspectos são comentados a seguir.

- 1- Inicialmente é necessário configurar microcontrolador, pois cada modelo possui características próprias. Neste caso específico, além de informar o número de entradas e saídas também se utilizou os periféricos de comunicação serial e I2C. Em seguida, é necessário inicializar bibliotecas externas, que permitem utilizar sub-rotinas prontas. As sub-rotinas utilizadas foram as LCD.C (que prepara as informações para serem impressas no display LCD), KBD.C (que verifica qual dos botões do teclado foram pressionados) e MATH.H (que permite realizar operações como cálculo de valor absoluto, raiz quadrada, logaritmo, entre outros).
- 2- Após estas configurações, inicia-se o procedimento para referenciar a mesa numa posição inicial. Para isso, pode-se utilizar a combinação da chave de fim de curso e do sinal de referência do *encoder*. O sinal de referência do encoder, embora seja preciso e com repetitividade, não é único. O interruptor, embora único, tipicamente possui alta incerteza, não possuindo boa repetitividade. Usando a combinação lógica dos dois, pode-se obter uma posição de referência única e com menor incerteza e repetitividade. Neste caso, o sinal de referência do sistema de medição é ligado fisicamente ao pino de entrada adequado do elemento de controle, e então, é necessário um programa que faça com que a mesa seja deslocada até que a chave de fim de curso seja acionada. Quando isso ocorrer, o motor inverte o sentido de deslocamento, e o ponto em que o sinal de referência (“Z”) do encoder for encontrado pela primeira vez, será considerado como sendo a posição inicial da mesa. Esta operação é necessária porque, com o encoder incremental, tem-se somente a opção de medir o deslocamento relativo entre uma posição e outra.

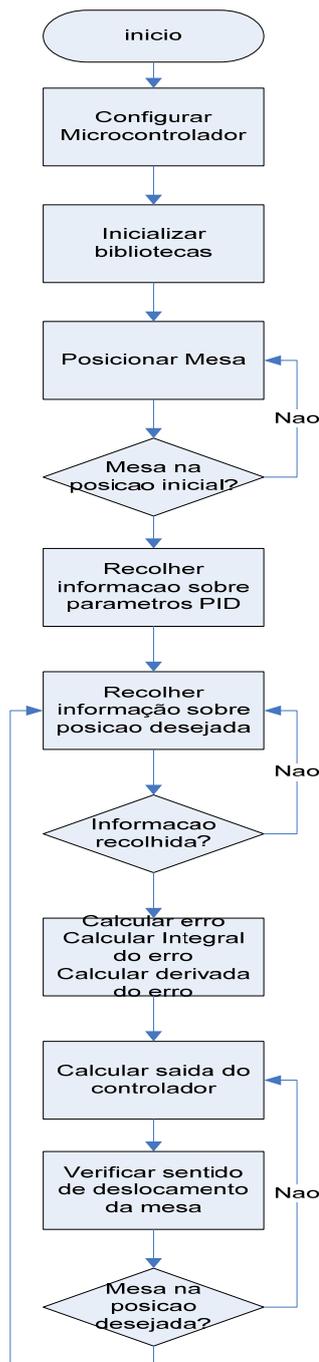


Figura 7 : Fluxograma de Funcionamento do Software

- 3- O próximo passo do programa é armazenar a posição de referência, que o usuário digita no teclado do kit. E em seguida, o programa calcula o erro de posicionamento que é a diferença entre a posição de referência e a posição medida pelo encoder. O dado enviado pelo encoder é enviado e armazenado continuamente pelo programa.
- 4- Em seguida, o programa executa a sub-rotina que implementa a ação de controle PID. O cálculo da saída do controlador foi realizado conforme equação (1). Utilizou-se o módulo da equação, pois a informação do erro maior ou menor a zero será processada no bloco “Posição desejada maior que posição atual?”. Este recurso é necessário para que possibilite realizar a inversão da rotação do motor. As constantes

$K_p$ ,  $T_I$  e  $T_D$  são escolhidas pelo usuário dependendo das características de controle desejada (saída amortecida, sub-amortecida, com sobre sinal, entre outros).

$$Saida = \left| K_p \cdot (Erro(t) + \frac{1}{T_I} \int Erro(t) - T_d \frac{d(posição)}{dt} \right| \quad (1)$$

O software permanece em um loop infinito até que a posição desejada seja igual à posição atual. Os valores de posição de referência e posição medida são armazenados em um arquivo e podem ser posteriormente traçados em forma gráfica. A Figura 8 apresenta um dos resultados experimentais obtidos (deslocamento medido), para diferentes ajustes dos parâmetros do PID, quando a referência de posição é submetida a uma variação do tipo degrau de deslocamento.

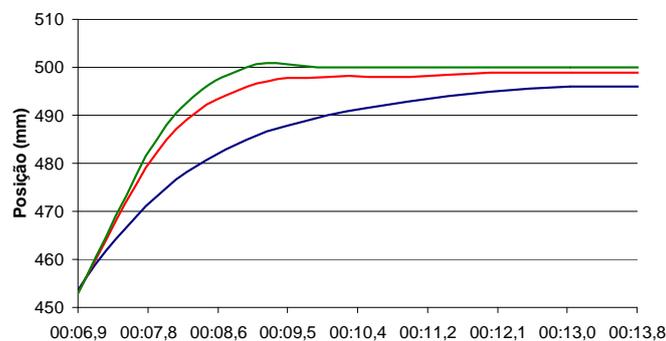


Figura 7. Ensaios Preliminares – Resposta ao Degrau.

## 7 CONCLUSÃO

O estudo das principais etapas envolvidas no desenvolvimento de um sistema de controle de posição em malha fechada, utilizando uma bancada experimental, possibilita ao aluno vivenciar a aplicação do conhecimento adquirido em aulas teóricas. A bancada experimental possibilita aprofundar o aprendizado e o fato de ter sido desenvolvida no Laboratório de Automação e Controle do Curso de Engenharia Mecânica, todas as fases do desenvolvimento estão documentadas e são disponibilizadas para os alunos do curso. Novos algoritmos de controle poderão ser implementados no CLP ou no microcontrolador. O CLP utilizado é um sistema mais amigável, pois, a linguagem de programação Ladder é de simples compreensão. O microcontrolador é um sistema mais aberto, possibilita uma maior flexibilidade, como por exemplo, implementar estratégias de controle mais complexas, no entanto, exige maior experiência em programação quando comparada com a programação do CLP.

## 8 REFERÊNCIAS

ALVES, D. B. **Desenvolvimento de um Sistema de Controle de Posição e Velocidade de um Eixo**. 2003. Monografia de Fim de Curso. Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, p.89.

LASMAR, D.I., . **Utilização do Microcontrolador PIC18f452 para Automação de uma Mesa Posicionadora**. 2007. Monografia de Fim de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, p.93

LASMAR, D., MOTTA, L. P. G. **Relatório de Implementação do Posicionador: Controlador Liga Desliga e PID.** Relatório de circulação interna do Laboratório de Automação e Controle. Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Hi-Tecnologia. **CLP ZAP 500. Manual de Instalação e Programação.** <http://www.hitecnologia.com.br>. Acessado em abril de 2003.

MICROCHIP. **PIC18FXX2 Data Sheet, 2002.** Disponível em: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39564b.pdf> . Acessado em 05 Fev.2007.

## **DEVELOPMENT OF LABORATORY EXPERIMENTS FOR TEACHING MECHATRONICS**

***Abstract:** This paper describes the set of experiments developed at the Automation and Control Laboratory of the Mechanical Engineering Program of the Federal University of Minas Gerais with the objective of developing a test bench for automation and control. The test bench utilizes two types control elements. The first one is a programmable logic controller (CLP) and the second one is a micro-controller (MC). The most important experiments are presented here in the same sequence as they are presented to the students of the Mechatronics area of the Mechanical Engineering program at the Federal University of Minas Gerais.*

***Keywords:** Automation and Control, Positioning Control, CLP, Micro-Controller.*