

# PROJETO DE CONSTRUÇÃO E CONTROLE PID DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO PARA AUXÍLIO NA APRENDIZAGEM DE ALUNOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

Felipe Castro Teixeira de Carvalho

felipecarvalho50@gmail.com

Gabriela Lígia Reis

gabireis10@yahoo.com.br

Luis Fernando Freire de Souza

lnandoffs@hotmail.com

Márcio Falcão Santos Barroso

barroso@ufsj.edu.br

Laboratório de Estudos em Controle e Modelagem, Departamento de Engenharia Elétrica - DEPEL  
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36307-352,  
São João del-Rei, MG, Brasil

**Resumo:** Este artigo apresenta a montagem e o projeto de controle de um manipulador robótico construído com o kit educacional LEGO® modelo *Mindstorms*. Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizadas técnicas de controle PID integradas ao algoritmo genético. Um dos objetivos da construção desse manipulador robótico foi utilizá-lo futuramente como uma ferramenta de auxílio à aprendizagem de alunos de graduação em engenharia nas disciplinas de controle e modelagem de sistemas.

**Palavras Chaves:** Manipulador Robótico, LEGO®, Controle PID, Ensino de Engenharia.

**Abstract:** This text describes the construction and control, of robotic manipulators, built with educational kits LEGO® *Mindstorms* model. To development of this work were used PID control technics, integrated with a genetic algorithm. One goal of building this robotic manipulator was using it in the future as a tool to support the learning of undergraduate students on disciplines of control and modeling systems.

**Keywords:** Robotic Manipulators, LEGO®, PID Control, Engineering Education.

## 1 INTRODUÇÃO

Muitas definições já foram sugeridas para o que se chama de robô. A palavra robô considera diversos níveis de sofisticação tecnológica, desde uma máquina simples de manipulação de materiais até uma máquina avançada, como as idealizadas em livros e filmes de ficção científica. Segundo a (*International Organization for Standardization*, 1996), um robô industrial é definido como um manipulador multipropósito controlado automaticamente, reprogramável, programável em três ou mais eixos. No contexto da robótica geral, a maior parte dos robôs industriais seria categorizada como braços robóticos.

Com o surgimento dos computadores na metade do século passado, iniciaram-se especulações em termos da capacidade de um robô pensar e agir. No entanto, os robôs neste período foram desenvolvidos especialmente para executarem tarefas em ambientes insalubres, em situações repetitivas, difíceis e impossíveis para um ser humano. Por outro lado, eles não eram projetados com a capacidade de criar ou executar processos que não lhes foram ensinados ou programados. Assim sendo, foram as indústrias que mais se beneficiaram com o desenvolvimento da robótica, aumentando a produção e eliminando tarefas perigosas, antes executadas por seres humanos (Carrara, 2012).

No ambiente industrial, os robôs no formato humanoide e veículos autônomos são de pouca serventia. Neste setor, os mais comuns são os manipuladores robóticos, constituídos basicamente de três partes: base, braço e punho. Pelo fato de muitos destes robôs apresentarem certa semelhança com o braço humano, são chamados em algumas literaturas de braços robóticos. As aplicações típicas dos robôs industriais incluem fundição, pintura, soldagem, montagem, movimentação de cargas, inspeção de produtos, e testes (Tauile, 1986; Franchin & Marcelo, 2012), tudo realizado com uma precisão, velocidade, e robustez relativamente elevadas. Segundo Santos (2004), as aplicações práticas de nível mais elevado de manipuladores robóticos são verificadas nas indústrias, sobretudo nas indústrias automobilísticas. Neste setor, os principais trabalhos realizados pelos manipuladores são a pintura e a soldagem por resistência, onde as peças a processar são extremamente precisas.

Além dessas aplicações, os manipuladores robóticos são uma ótima ferramenta de auxílio à aprendizagem de alunos do curso de engenharia em laboratórios de controle (Horáček, 2000). Toda a complexidade cinemática e dinâmica presente nessa categoria de robôs permite a abordagem e o estudo de problemas singulares que não são adequadamente tratados por técnicas lineares de controle. A dinâmica e a cinemática dos manipuladores industriais é extremamente complexa, onde o movimento provocado por uma articulação afeta de forma

Artigo Submetido em xx/xx/xx

1a. Revisão em xx/xx/xx; 2a. Revisão em xx/xx/xx; 3a. Revisão em

xx/xx/xx; 4a. Revisão em xx/xx/xx;

Aceito sob recomendação do Ed. Consultor Prof. Dr. Yyyy

Yyyyyyyy yy Yyyyyyyy

significativa o movimento das outras articulações do sistema. Desta forma, esses mecanismos são uma excelente ferramenta de aprendizagem, sobretudo em disciplinas como modelagem e controle.

Tendo em vista todos esses aspectos e as limitações ainda existentes, nota-se que o estudo desses mecanismos é de extrema importância. As inúmeras aplicações revelam aspectos ainda inexplorados e a necessidade de se obter manipuladores cada vez mais eficientes. Diversos trabalhos estão sendo realizados nesta linha, dando ênfase ao estudo do controlador. Dentre os controladores de malha fechada mais comuns destacam-se técnicas envolvendo redes neurais (Ferreira, 1996), lógica fuzzy (Sooraksa & Chen, 2012; Anh & Anh, 2011) e o controle PID (Alvarez-ramirez & Cervantes, 2003; Dieulot & Colas, 2008; Cervantes & Alvarez-Ramirez, 2001). Neste trabalho optou-se por desenvolver um projeto de um controlador PID para um manipulador robótico com dois graus de liberdade construído com peças do kit LEGO® modelo *Mindstorms* aplicado na movimentação e separação de cargas.

A utilização de peças desse kit para montagem do manipulador robótico permite uma grande versatilidade em demonstrações, uma vez que sua estrutura pode ser alterada facilmente para atender a especificidade de um determinado estudo, sem sacrificar a complexidade ou inviabilizar a modelagem e controle dos manipuladores robóticos montados. Além disso, o projeto elaborado neste trabalho possui um custo relativamente baixo em comparação com manipuladores industriais, tornando-se assim uma ótima ferramenta no auxílio à aprendizagem dos alunos de graduação em engenharia.

## 2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho foram feitos ensaios com os robôs do tipo LEGO® modelo *Mindstorms*. Tais robôs são compostos de blocos com unidades de processamento, partes móveis e de instrumentação que podem ser acopladas das mais diversas formas (Ferrari *et al.*, 2002).

Por isso, este projeto teve início pela montagem do manipulador robótico. Posteriormente foi obtido o modelo, adquirindo-se a função de transferência, por meio da qual foram obtidos os parâmetros do controlador PID.

Desta forma, o projeto foi dividido basicamente em três etapas, sendo estas: montagem, modelagem e implementação do controle PID.

### 2.1 Montagem

Na primeira etapa foi idealizada toda a estrutura necessária para a execução desse trabalho. Primeiramente foi definido o tipo de carga a ser utilizada, como seriam construídos a estrutura do braço robótico, o armazenamento e o cenário no qual ele seria inserido. Essa montagem teve como principal objetivo se aproximar, em escala, ao máximo de uma planta industrial real. Uma vez idealizado o projeto, foi feita a montagem do manipulador robótico e de toda a estrutura, utilizando-se somente peças provenientes do kit educacional da LEGO®.

### 2.2 Modelagem

Subsequente à montagem do cenário idealizado, realizaram-se ensaios a fim de se obter as características dinâmicas do sistema. Por meio desses ensaios foi possível determinar a melhor forma de se obter a função de transferência das juntas que correspondem a base e o ombro do manipulador robótico.

Contudo, optou-se na garra desse manipulador, utilizar o controlador do tipo *on-off*, a fim de realizar o movimento de abrir e fechar. Para isso foi utilizada uma base de tempo a qual apresentou um desempenho satisfatório, não havendo assim a necessidade de se obter um modelo para representar o efetuator.

A fim de se obter uma orientação espacial tridimensional do manipulador robótico, nessa etapa também foram realizadas medições na estrutura do braço, para desta forma determinar um modelo cinemático para compor uma interface virtual para o usuário.

## 2.3 Implementação do controle PID

Segundo (Pacheco, 2012 & Liden, 2012), o algoritmo genético é um modelo computacional inspirado na evolução biológica. Resolvendo problemas de otimização por meio de uma busca paralela e adaptativa, baseada no princípio da sobrevivência e reprodução dos mais aptos. Neste trabalho o algoritmo genético teve como variáveis de busca os parâmetros do controle PID paralelo e como função *fitness* o índice de *performance* ITAE (*Integral of Time x Absolute Error*) (Seborg *et al.*, 2012) da resposta ao degrau do sistema, onde quanto menor for este índice mais rápido será a acomodação e menor o sobressinal.

A fim de se obter soluções diversas o algoritmo foi executado várias vezes com parâmetros como tamanho da população, taxa de mutação, taxa de reprodução e tipos de cruzamento. Desta forma, foram feitos diversos testes com os diferentes parâmetros obtidos, sendo escolhido aquele que apresentou melhor desempenho quando aplicado ao sistema físico.

## 3 RESULTADOS

Os resultados obtidos foram divididos de acordo com cada etapa da metodologia, como segue.

### 3.1 Montagem

A primeira parte do projeto a ser montada foi o manipulador robótico. Para tal finalidade foram utilizados três motores, formando as juntas da base, do ombro e da garra, além de engrenagens a fim de se obter um torque maior e peças para compor a estrutura do robô, como mostra a Figura 1.

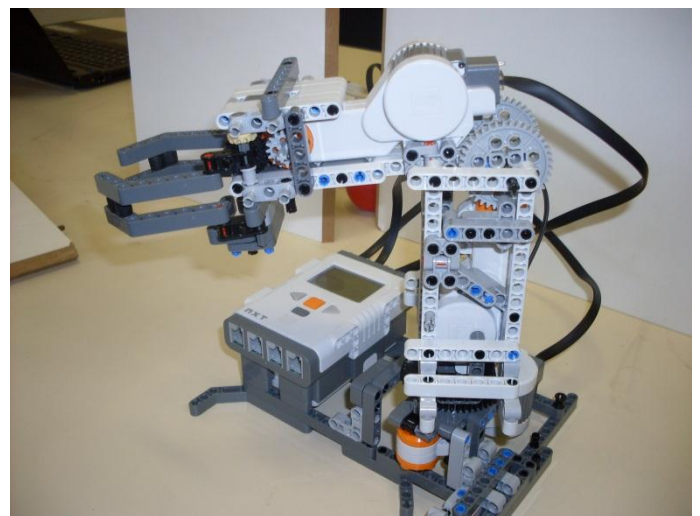


Figura 1: Montagem do braço robótico.

Com o manipulador montado, foi possível definir o cenário ao qual ele seria inserido, sabendo-se previamente de suas limitações. Desta forma, definiu-se primeiramente que as cargas seriam bolinhas de plástico provenientes dos próprios

kits, nas cores vermelha e azul. Para facilitar o projeto, optou-se por montar um reservatório de bolinhas e uma rampa, por meio da qual a bolinha pudesse chegar ao ponto onde o braço deveria pegá-la. Para isso, foi montado um segundo robô destinado apenas a empurrar as bolinhas, uma por vez, cada vez que uma bolinha era alocada pelo braço. Desta forma, ao invés do braço procurar a localização da carga, optou-se por fornecer as coordenadas para o mesmo, o que facilitou o trabalho e reduziu o número de sensores a serem utilizados.

Sendo assim, foram necessários apenas dois sensores de cor, um para o microprocessador responsável por controlar o manipulador robótico identificar a cor da bolinha e outro para o robô de chute determinar o momento certo para atuar, não havendo assim a necessidade de estabelecer uma comunicação entre os robôs. Tais sensores foram colocados no final da rampa a qual a bolinha deveria percorrer. Além disso, foram montadas duas caixas para alocar as bolinhas. A Figura 2 mostra o cenário montado conforme a descrição.

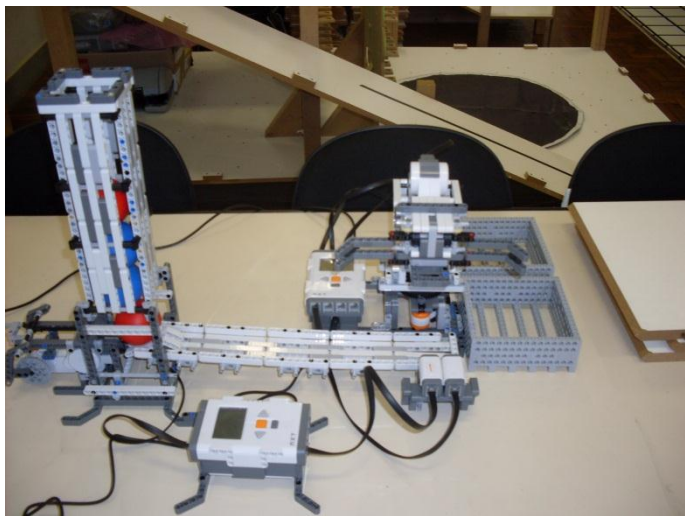


Figura 2: Montagem completa do cenário.

### 3.2 Modelagem

Nesta etapa foram obtidas as funções de transferência referentes à base e ao ombro do manipulador robótico. Como não estavam disponíveis os dados do motor e não se tinha acesso à velocidade, apenas à tensão e ao ângulo de posição, devido às limitações do próprio motor, foi necessário obter então a relação tensão x ângulo. Para isso, optou-se pela modelagem utilizando identificação de sistemas. Esta foi a técnica escolhida neste trabalho, entretanto, há outras formas de se levantar os modelos, que poderão ser estudadas posteriormente pelos alunos de graduação em engenharia.

Sendo assim, para desenvolver o trabalho por meio desta técnica, primeiramente foi aplicado um valor de entrada no bloco “motor” e posteriormente foi plotada a curva de resposta da rotação para cada motor, a fim de se estimar o tempo em que os motores estão em regime transitório.

Pela resposta do sistema, observou-se que o período transitório desses motores dura aproximadamente 0,32 segundos. Assim, foram realizados diversos ensaios aplicando-se valores aleatórios na entrada e obtendo-se a resposta em ângulo de rotação, sendo que os valores de potência mudavam em intervalos de 0,32 segundos, ou seja, após o período transitório os motores mudavam esses valores. Os resultados destes ensaios podem ser vistos nas Figuras 3 e 4.

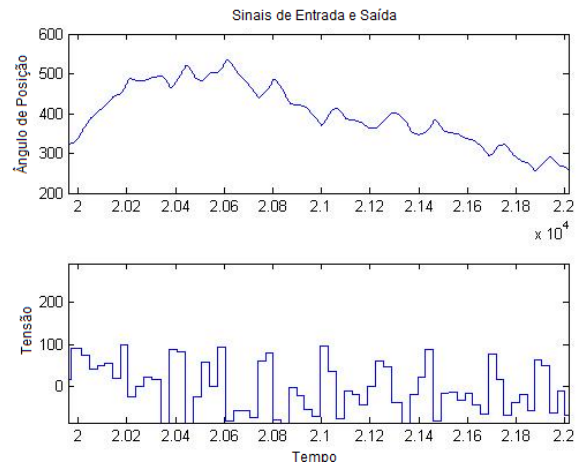


Figura 3: Amostra do ensaio realizado aplicando-se uma tensão no motor A e armazenando a resposta do sistema.

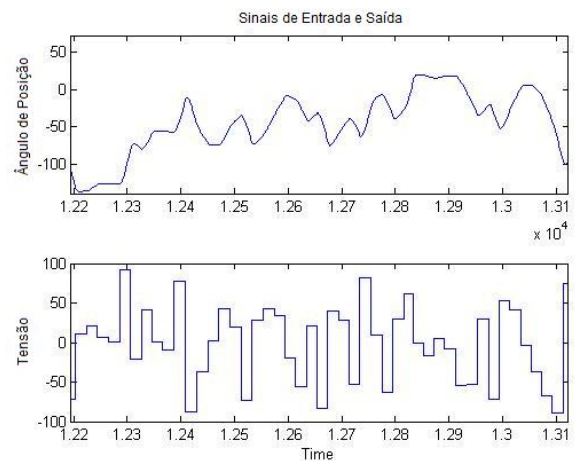


Figura 4: Amostra do ensaio realizado aplicando-se uma tensão no motor B e armazenando a resposta do sistema.

De posse desses dados, por meio do comando *ident* do *Matlab*<sup>®</sup> levantou-se e validou-se um modelo *ARX221* obtendo-se as funções de transferência em malha aberta dos motores:

- Função de transferência do sistema, obtida pelos ensaios realizados com tensão aplicada ao motor A:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-1,404 s + 303,3}{s^2 + 303,3 s - 0,3289} \quad (1)$$

A Resposta ao Degrau do sistema, obtido por meio da função de transferência encontrada, podem ser visualizados nas Figuras 5.

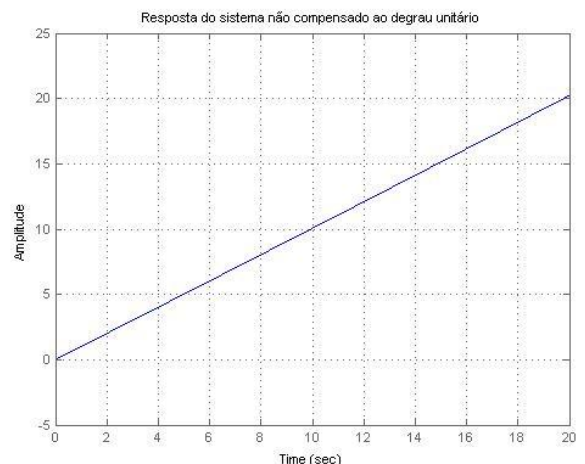


Figura 5: Resposta ao degrau do sistema não compensado

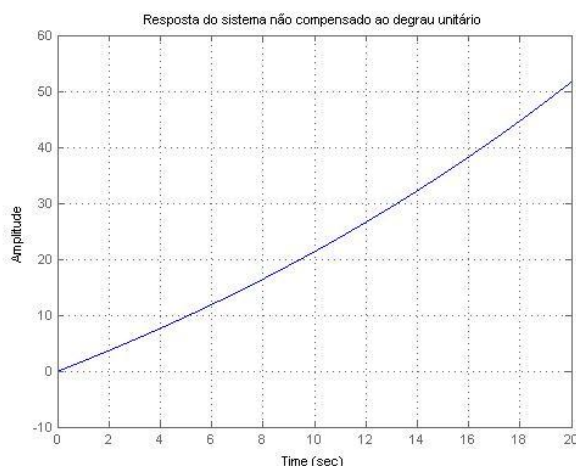


Conforme esperado, nota-se que para um degrau unitário a resposta do sistema não converge para um determinado valor, caracterizando a instabilidade. Isto porque para um valor finito de tensão aplicado no motor A, a resposta em ângulo de posição não converge para um determinado valor, ou seja, o sistema tende a continuar girando enquanto o valor de entrada estiver sendo aplicado.

- Função de transferência do sistema, obtida pelos ensaios realizados com tensão aplicada ao motor B:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-0,08182s + 43,99}{s^2 + 24,6s - 0,8632} \quad (2)$$

A Resposta ao Degrau do sistema, obtido por meio da função de transferência encontrada, podem ser visualizados nas Figuras 6.



**Figura 6: Resposta ao degrau do sistema não compensado dada**

Assim como no primeiro caso, nota-se que para um degrau unitário a resposta do sistema não converge para um determinado valor, caracterizando a instabilidade deste sistema.

### 3.3 Implementação do controle PID Matlab®

De posse das funções de transferências obtidas por meio da modelagem foi possível então, executar o algoritmo genético para buscar os melhores parâmetros do controlador PID paralelo, através da minimização do índice de *performance* ITAE.

A cada vez que se executava o algoritmo, foram salvos os cinco melhores parâmetros do PID encontrados. Assim, estes foram testados no sistema real, sendo apresentados abaixo aqueles que obtiveram o melhor desempenho.

Os parâmetros do algoritmo que obtiveram o melhor desempenho foram: Tamanho da população = 100, Número de Gerações máxima = 100, Taxa de mutação = 1%, Método de seleção da Roleta, Cruzamento Uniforme e Codificação Real.

- Para o sistema com entrada no motor A:

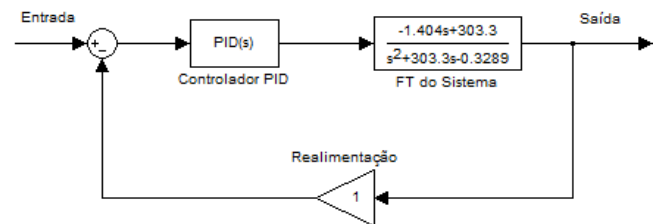
$$C = 51,44997 \times \frac{(1 + 0,19821s)}{s} \quad (3)$$

Comparando-se com a função de transferência do controlador PID paralelo, tipo de controlador utilizado em LabVIEW®, tem-se:

$$PID = 10,1979 \times \left(1 + \frac{1}{0,19821s}\right) \quad (4)$$

Onde,  $K_p = 10,1979$ ,  $T_i = 0,19821s$  e Índice ITAE = 0.13715

Assim, o diagrama de blocos para o sistema em malha fechada pode ser visto na Figura 7.

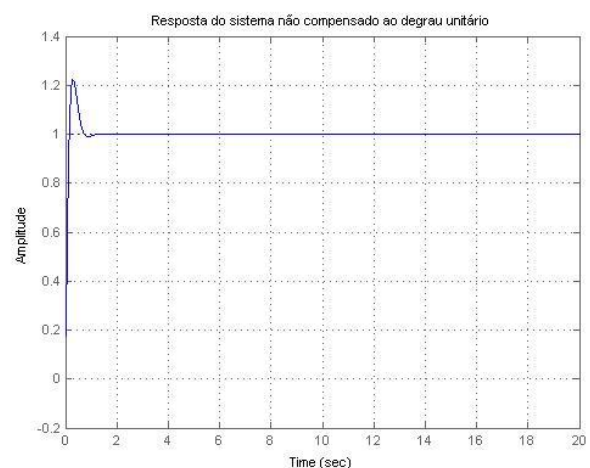


**Figura 7: Diagrama de blocos para o sistema compensado**

Resolvendo o diagrama de blocos, obtém-se a função de transferência em malha fechada do sistema compensado dada por:

$$FTMF = \frac{-14,3178s^2 + 3020,787 + 15604,7781}{s^3 + 288,982s^2 + 3020,4584s + 15604,7781} \quad (5)$$

Por meio da FTMF foi obtida a resposta ao degrau para o sistema compensado, mostrada na Figura 8.



**Figura 8: Resposta ao degrau do sistema compensado**

Para confirmar se os resultados foram satisfatórios, realizaram-se testes no próprio manipulador, implementando-se o PID por meio de uma interface USB no LabVIEW®, fechando-se a malha em tempo real pelo computador. Nestes testes foram utilizados como setpoints os valores desejados na própria tarefa a ser realizada pelo robô, ou seja, 75° se a bolinha for azul e 120° caso a bolinha seja vermelha.

Pelos valores medidos por meio do sensor de rotação, observou-se que o sistema convergiu para os setpoints desejados, apresentando um erro de 0,07° no primeiro caso e um erro de 0,1° no segundo, sendo que os máximos sobressinais foram de 0,208° e 0,222° respectivamente, ou seja, aproximadamente 0,2% do valor desejado. Analisando estes valores, observa-se que os resultados apresentam consistência e robustez para a utilização do manipulador na aplicação deste projeto.

- Para o sistema com entrada no motor B:

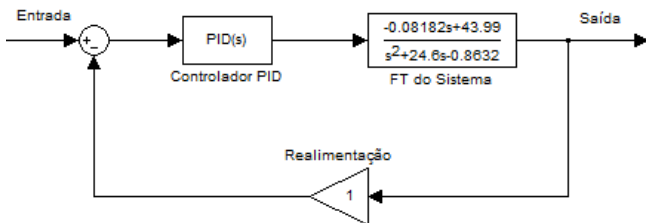
$$C = 10,0319 \times \frac{(1 + 0,73472s)}{s} \quad (6)$$

Comparando-se com a função de transferência do controlador PID paralelo, tem-se:

$$PID = 7,3707 \times \left(1 + \frac{1}{0,73472s}\right) \quad (7)$$

Onde,  $K_p = 7,3707$ ,  $T_i = 0,734721s$  e Índice ITAE = 0.22899

Com estes resultados, o diagrama de blocos para o sistema em malha fechada pode ser visto na Figura 9.

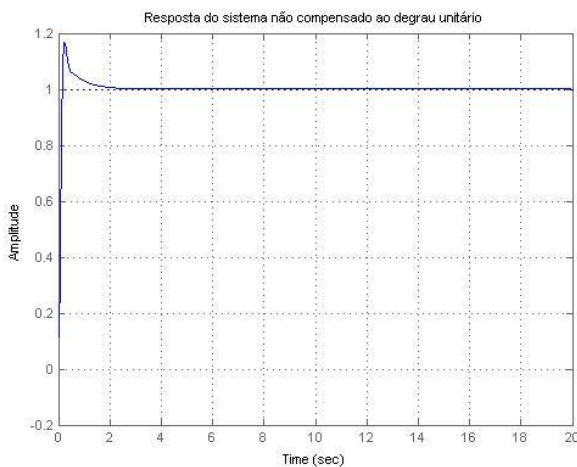


**Figura 9: Diagrama de blocos para o sistema compensado**

Assim, a função de transferência em malha fechada do sistema compensado é dada por:

$$FTMF = \frac{-0,6031s^2 + 323,4163s + 441,3070}{s^3 + 23,9969s^2 + 322,5531s + 441,3070} \quad (8)$$

Por meio da FTMF foi obtida a resposta ao degrau para o sistema compensado, mostrada na Figura 10.



**Figura 10: Resposta ao degrau do sistema compensado**

Para confirmar se os resultados foram satisfatórios, assim como no caso do motor A, realizaram-se testes no próprio manipulador, implementando-se o PID por meio de uma interface USB no LabVIEW®, fechando-se a malha em tempo real pelo computador. Nestes testes foram utilizados como setpoints o valor desejado na própria tarefa a ser realizada pelo robô (45° no sentido horário) e o valor de 90° no sentido anti-horário.

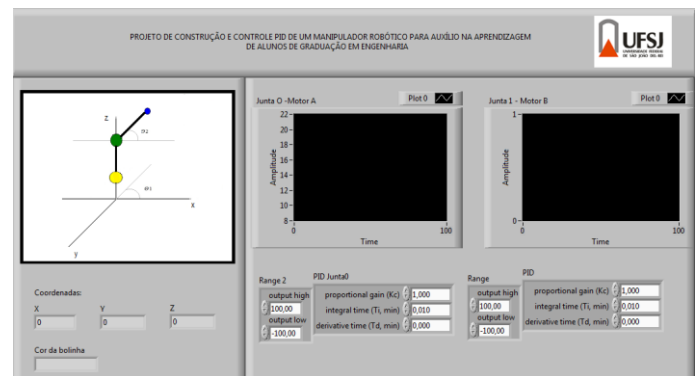
Pelos valores medidos por meio do sensor de rotação, observou-se que o sistema convergiu para os valores de setpoint desejados, apresentando um erro de 0,06° no primeiro caso e um erro de 0,09° no segundo, sendo que os máximos sobressinais foram de 0,055° (0,1% do valor desejado) e 0,549° (0,61% do valor desejado) respectivamente, ou seja, aproximadamente 0,2% do valor desejado. Analisando estes valores, observa-se que os resultados apresentam consistência e

robustez para a utilização do manipulador na aplicação deste projeto.

### 3.4 Algoritmo final e interface para o usuário

Uma vez realizada a sintonia do controlador PID, foi possível então programar o algoritmo para o manipulador realizar a tarefa proposta neste trabalho. Por meio deste algoritmo o robô conseguiu realizar tal tarefa de maneira bastante satisfatória, apresentando uma precisão elevada para a atividade desempenhada, com erros menores que 1°.

Paralelo a isso, foi desenvolvida uma interface virtual, para que os alunos dos cursos de controle possam ao utilizar este programa definir os parâmetros do controlador PID, bem como visualizar a posição do robô no espaço dada em coordenadas x, y e z, bem como analisar o desempenho do controlador graficamente, como mostra a Figura 11.



**Figura 11: Interface virtual para o usuário do manipulador.**

## 4 CONCLUSÃO

Diante do exposto, pode-se observar que a primeira etapa do desenvolvimento do manipulador robótico, ou seja, a montagem, apresenta uma dificuldade relativamente baixa e uma versatilidade elevada. Devido às suas propriedades de montagem, nota-se que o manipulador construído pode se adequar a vários tipos de ambientes simulados, não somente para separação de cargas, mas também como pegar diversos tipos de objetos em inúmeras situações, contanto que sejam feitas as devidas alterações em sua garra e na estrutura.

No exemplo de separação de cargas, o qual foram destinadas as tarefas a serem executadas com o manipulador robótico, para que este apresentasse um bom desempenho dinâmico, foi necessário que empregasse um controlador, sendo neste escolhido o controlador PID. Por haver esta necessidade, todas as dificuldades inerentes a uma boa implementação do controlador se mostraram desafiadoras no quesito de fundamentos teóricos, necessários para tal fim. Neste caso, apresentando características singulares de um sistema real, onde situações e condições especiais não previstas para sistemas simulados podem ser relevantes no bom desempenho do manipulador.

Pelos resultados obtidos foi possível concluir que o modelo levantado conseguiu representar bem os sistemas descritos pelos motores A e B, uma vez que algumas características destes sistemas foram identificadas por meio das análises gráficas e também por proporcionar a obtenção de parâmetros para os controladores que atenderam às necessidades do projeto.

Por meio do trabalho realizado, notou-se que o estudo dos manipuladores robóticos é bastante complexo e envolve o conhecimento de diversas áreas, dentre elas podem-se citar a mecânica, a eletrônica, a modelagem, o controle e a programação. Sendo assim, os manipuladores robóticos podem ser utilizados como uma ferramenta pedagógica em diversos cursos de engenharia. Neste sentido, o trabalho realizado pode ser utilizado na universidade a fim de enriquecer os conhecimentos obtidos em sala de aula pelos alunos de graduação.

Portando, diante destas considerações destaca-se que uso manipuladores robóticos montados com esse Kit, se destinados a aprendizagem e estudo de alunos de graduação de disciplinas de Controle e ou Modelagem, se tornam uma excelente ferramenta de estudo e de custo relativamente baixo se comparado com outros kits existentes no mercado, podendo ser uma ótima oportunidade para tais alunos, aplicarem os conhecimentos adquiridos em sala de aula.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro, à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) pelo apoio logístico e infraestrutura física e aos alunos de graduação da UFSJ pelo auxílio durante a execução desse projeto.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Alvarez-Ramirez, J. and CERVANTES, I. (2003). Semiglobal stability of saturated linear PID control for robot manipulators. *Automatica*, vol. 39, pp. 989-995.
- Anh, H. P. H. and Anh, K. K. (2011). Hybrid control of a pneumatic artificial muscle (PAM) robot arm using inverse NARX fuzzy model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. vol. 24, pp. 697-716.
- Carrara V. (2012). Apostila de Robótica. Universidade Braz Cubas. Disponível em: [http://www2.dem.inpe.br/val/homepage/cursos/rb\\_apostila.pdf](http://www2.dem.inpe.br/val/homepage/cursos/rb_apostila.pdf). Acesso em: 26 ago. 2012.
- Cervantes, I. and Alvarez-ramirez, J. (2001). On the PID tracking control of robot manipulators. *Systems & Control Letters*, vol. 42, pp. 37-46.
- Dieulot, J.-Y. and Colas, F. (2008). Robust PID control of a linear mechanical axis: A case study. *Mechatronics*. vol. 19, pp. 269-273.
- Franchin, M. N. (2005). Princípios de Robótica. Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <http://www.dee.feb.unesp.br/~marcelo/robotica/conteudo.html#P1>. Acesso em: 26 ago. 2012.
- Ferrari M., Ferrari, G. and Hempeli, R. (2002). Building Robots With Lego Mindstorms, United States of America: Syngress Publishing, pp. 279-310.
- Ferreira, A. P. L. (1996). Uma Proposta de Controle Neural Adaptativo para o Posicionamento de um Braço Mecânico. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, RS, Brasil.
- Horáček, P. (2000). Laboratory Experiments for Control Theory Courses: A Survey. *Annual Reviews in Control*, vol. 24, pp. 151-162.

International Organization for Standardization. ISO 8373: Manipulating Industrial Robots – Vocabulary. United States, 1996.

Liden, R. (2012). Algoritmos Genéticos, 3.ED Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda.

Pacheco, M. A. C. (1999). Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações. Disponível em: <http://www.ica.ele.puc-rio.br/downloads/38/ce-apostila-comp-evol.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2012.

Santos V. M. F. (2004). Robótica Industrial. Universidade de Aveiro. Disponível em: <http://www2.mec.ua.pt/activities/disciplinas/RoboticaIndustrial/Apontamentos/v2003-2004/RoboticaIndustrial-Sebenta2003-2004-v2a.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2012.

Seborg, D. E.; Mellichap, D. A. Edgar, T. F. and Doyle, F. J. (1989). *Process Dynamics and Control*, John Wiley & Sons.

Sooraksa, P. and Chen, G. (1998). Mathematical Modeling and Fuzzy Control of a Flexible-Link Robot Arm. *Mathematical Computing Modeling*. vol. 27, nº 6, pp. 73-93.

Tauile, J. R. (1986). Microeletrônica e automação: A nova fase da indústria automobilística brasileira. *Revista de Economia Política*, vol. 25, nº 3, pp. 69-81.