



## **ROBÔ DE SEIS GRAUS DE LIBERDADE DE BAIXO CUSTO PARA PRÁTICAS DE TRAJETÓRIA POR PONTO A PONTO**

**José Alberto Naves Cocota Júnior**– cocota@em.ufop.br

**Tiago Pinheiro dos Santos**– tpinheirotalk@gmail.com

**Fernando Castro**– fernandoxico@gmail.com

**Flávio Barbosa**– flavio4958@yahoo.com.br

**Guilherme Machado**– guilhermemachado710@gmail.com

**Mário Carneiro**– mario.eqc64@gmail.com

**Victor Louzada**– vlouzada@yahoo.com.br

Dep. de Engenharia de Controle e Automação (DECAT)

Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto

35400-000 – Ouro Preto – Minas Gerais

***Resumo:** Uma importante parte no aprendizado da robótica básica é o estudo prático desta disciplina. Contudo, os manipuladores robóticos para fins educacionais disponíveis no mercado são onerosos. Este trabalho visou dar continuidade ao projeto de construção e controle de um robô antropomórfico de baixo custo, auxiliando na compreensão dos conceitos teóricos estudados na disciplina de Elementos de Robótica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Utilizou-se o Arduino e o MATLAB® para o controle do robô de seis graus de liberdade e interfaceamento homem-máquina (IHM), respectivamente.*

***Palavras-chave:** Robô seis graus de liberdade, antropomórfico, manipulador, cinemática, controle ponto-a-ponto.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Um robô antropomórfico recebe este nome devido à semelhança da configuração de seus elos e juntas com a anatomia de um braço humano (CARVALHO, 2009). É um tipo de robô muito utilizado na indústria, largamente empregado para transposição de cargas, nos processos de pintura e soldagem (ROSÁRIO, 2005). O robô antropomórfico, ou braço antropomórfico, apresenta seis graus de liberdade, e a sua movimentação é atribuída ao ajuste de suas juntas rotacionais. Os três primeiros graus de liberdade (próximos à base do robô) são responsáveis pela posição do elemento terminal, enquanto que as três últimas juntas determinam a orientação da ferramenta (SILVA, 1999).

Atualmente, pode-se encontrar no mercado alguns modelos de robôs manipuladores voltados para educação. Dentre a gama existente, destaca-se o sistema de treinamento ED-7220C, que é um braço robótico com cinco juntas de rotação, com capacidade de carga de 1 kgf, fabricado pela ED Corporation (ED CORPORATION, s.d.). Outro modelo de manipulador didático é o MOVEMASTER RV-E3J, robô com capacidade de carga de 3 kgf,



composto por cinco juntas de rotação, fabricado pela Mitsubishi (MITSUBISHI ELECTRIC, s.d.). Contudo, estes modelos necessitam de um alto investimento para serem adquiridos.

O manipulador utilizado neste trabalho possui seis juntas rotacionais (acionadas por seis servomotores) que devem ser controladas para que o robô movimente-se de maneira desejada. Para executar a leitura dos potenciômetros e o controle dos servomotores do robô experimental, criou-se um algoritmo utilizando a plataforma Arduino. O presente trabalho aprimorou a interface gráfica utilizada por Cocota *et al.*, (2013). Esta interface foi desenvolvida usando o software MATLAB<sup>®</sup>, e permitiu ao usuário operar o manipulador, explorando os conceitos de cinemática direta e cinemática inversa, além do controle ponto a ponto.

## 2. OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo aprimorar o projeto de robô de seis graus de liberdade de baixo custo, sugerido por Cocota *et al.*, (2013). Dessa forma, algumas melhorias no projeto mecânico do robô e na interface gráfica com o usuário foram efetuadas, com o intuito de apoiar as práticas de cinemática direta, cinemática inversa e de controle ponto a ponto que são realizadas com os discentes de graduação.

## 3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

### 3.1. Estrutura

Ao longo de três semestres, foram desenvolvidas três estruturas para o robô manipulador: a primeira estrutura foi confeccionada em PVC rígido, e por ter apresentado excesso de peso dos elos em relação à capacidade de torque dos servomotores que estavam disponíveis na ocasião, essa estrutura não foi utilizada no projeto; a segunda estrutura (Figura 1) foi efetuada no 2º semestre de 2012, utilizando o Depron como material para a confecção dos elos, conforme apresentada no trabalho de Cocota *et al.*, (2013); e a terceira estrutura (Figura 2) do robô foi concluída no 2º semestre de 2013, utilizando MDF e Depron para a fabricação dos elos do braço do robô. Essa última estrutura apresentou melhorias na união do elo do giro do corpo em relação a base, bem como do elo do braço em relação ao elo do giro do corpo. Além disso, reduziu-se a dimensão e o peso do punho esférico ao substituir a estrutura anterior, composta por Depron e três servomotores Futaba S3003, pelo kit SPT50 da ServoCity e três servomotores HS-5055MG. Outra alteração de destaque, foi a substituição do servomotor responsável pelo levantamento do braço do modelo TowerPro MG995 para HD-1501MG, que permitiu aumentar o torque dessa junta de 13 kg/cm para 17 kg/cm.

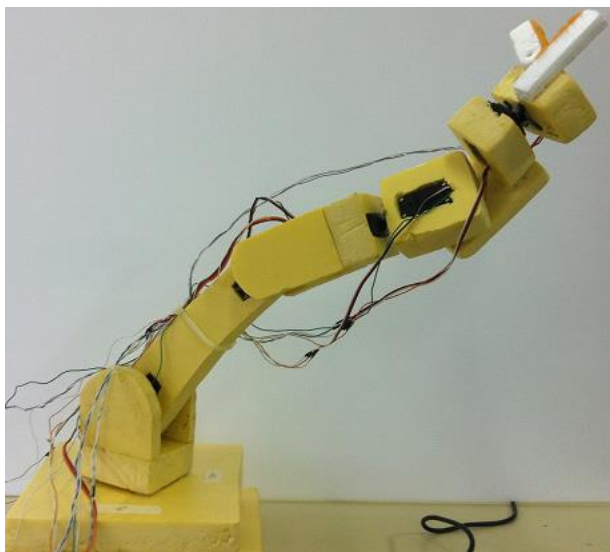


Figura 1. Segunda versão da estrutura do robô (2012/2)



Figura 2. Terceira versão da estrutura do robô (2013/2)

### 3.2. Calibração

A leitura de posição das juntas do robô experimental é feita pelo Arduino através de suas portas analógicas, que recebem medidas de tensão dos potenciômetros dos servomotores. Os sinais recebidos pelo Arduino variam de acordo com o ângulo das juntas, ou seja, determinadas posições das juntas do robô enviam ao Arduino uma tensão que pode variar de 0 a 5 V. Então o microcontrolador da plataforma Arduino Mega 2560 converte essa tensão de entrada em uma escala digital de 10 bits.

Para a calibração dos sinais analógicos dos potenciômetros dos servos em relação ao deslocamento angular de cada junta, foi necessário considerar os limites físicos do robô para cada servomotor. Eles foram acoplados aos elos em suas posições iniciais ( $0^\circ$ ). Após definidos os ângulos máximos e mínimos para o movimento de cada junta do robô, os servos foram posicionados nas posições de ângulo mínimo e foram realizadas três leituras do valor analógico correspondente àquele ângulo. Feito isso, variou-se as juntas do robô com incrementos de 5 graus até que ângulo máximo fosse atingido. A média das medições para cada posição angular foi considerada como medida válida para a obtenção da equação que relaciona os ângulos das juntas às medidas analógicas dos potenciômetros. Esse procedimento foi repetido para todas as juntas do robô. Os ângulos mínimo e máximo de cada junta estão apresentados na Tabela 1; já as curvas de calibração que relaciona ângulos das juntas em graus (no eixo da ordenada) com valores decimais da conversão de 10 bits das portas analógicas do Arduino (no eixo da abscissa), são ilustradas nas Figuras 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3f.

Tabela 1 - Limites Mínimo e Máximo das Juntas do Robô

Junta	Ângulo Mín.	Ângulo Máx.
$\theta_1$	$-90^\circ$	$90^\circ$
$\theta_2$	$0^\circ$	$90^\circ$
$\theta_3$	$0^\circ$	$180^\circ$
$\theta_4$	$-90^\circ$	$90^\circ$
$\theta_5$	$-55^\circ$	$90^\circ$
$\theta_6$	$-90^\circ$	$90^\circ$

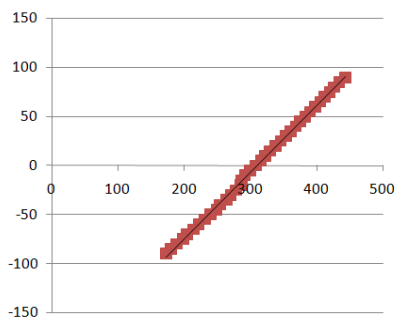


Figura 3a. Curva de Calibração da Junta 1

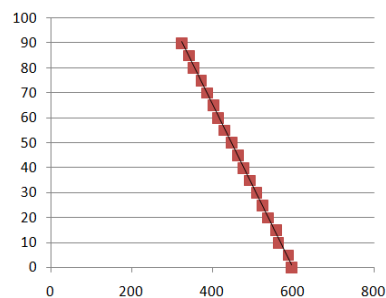


Figura 3b. Curva de Calibração da Junta 2

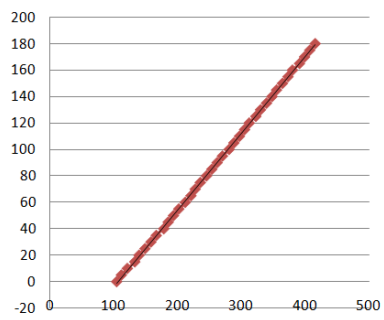


Figura 3c. Curva de Calibração da Junta 3

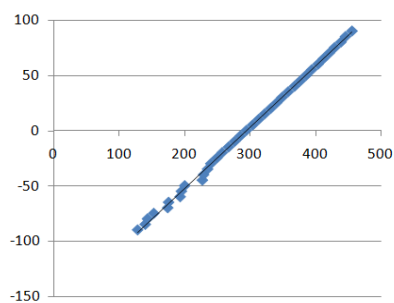


Figura 3d. Curva de Calibração da Junta 4

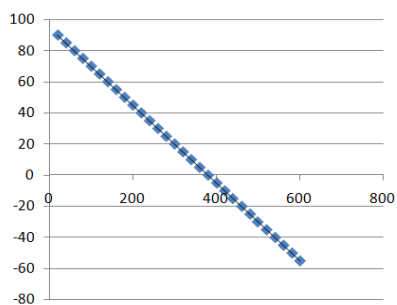


Figura 3e. Curva de Calibração da Junta 5

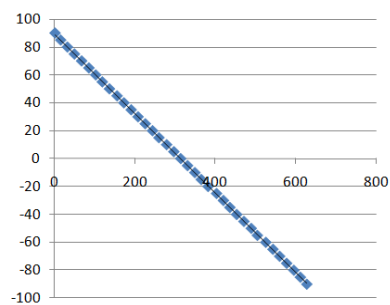


Figura 3f. Curva de Calibração da Junta 6

### 3.3. Arduino

Assim que o Arduino é inicializado ele carrega as variáveis do programa, configura e inicializa as portas analógicas, preparando a comunicação serial entre o Arduino e os servomotores, ou seja, definem-se as posições iniciais de cada servo ( $0^\circ$ ). Então se inicia a comunicação entre Arduino e MATLAB<sup>®</sup>. Caso o usuário deseje obter a posição em que o efetuador do robô se encontra no espaço, o Arduino realiza a leitura de suas portas analógicas, converte o sinal analógico para digital, executa um cálculo de conversão desse valor digital para valores angulares (em radianos) através de uma equação característica para cada junta do robô, e envia esses dados para o MATLAB<sup>®</sup>, que realiza o cálculo da cinemática direta e exibe a posição do efetuador no espaço, assim como as posições angulares de cada junta do robô. O fluxograma do código do Arduino encontra-se ilustrado na Figura 4.

Caso o usuário deseje que o robô execute movimentos ponto a ponto, o usuário deve informar a velocidade angular de cada junta e a sequência de pontos desejados na interface com o usuário. Nesse caso, com o uso da cinemática inversa, determina-se a posição angular de cada junta do robô para que o mesmo alcance cada ponto desejado. Essas posições angulares são enviadas do computador para o Arduino, que executa o movimento do robô por ponto a ponto.

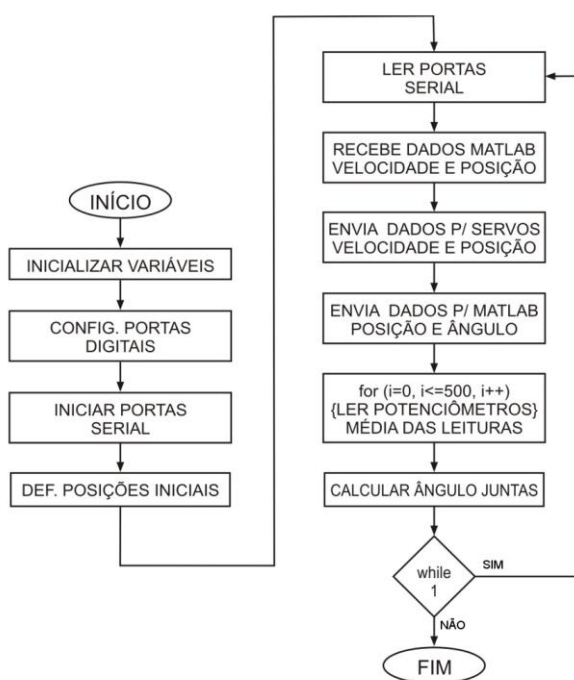


Figura 4. Fluxograma do código no Arduino

### 3.4. Interface com o Usuário

Através da interface criada no MATLAB<sup>®</sup> (Figura 5) o usuário pode realizar os comandos de cinemática direta, cinemática inversa e controle ponto a ponto.



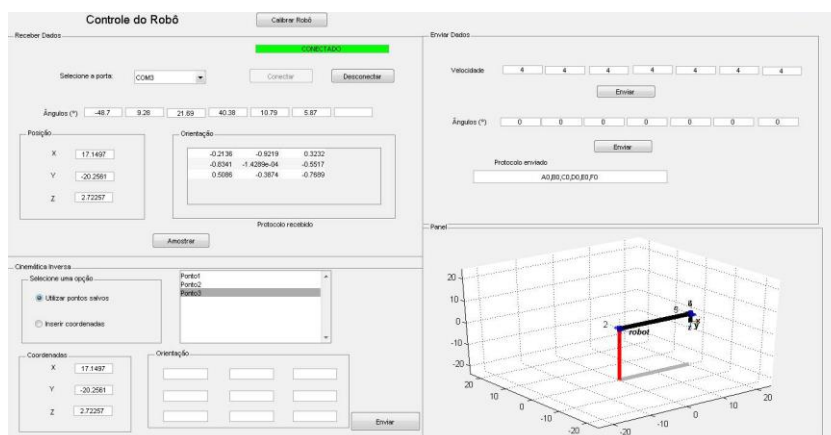


Figura 5. Interface com o usuário implementada no MATLAB®

O botão “Conectar” é responsável pela conexão entre o PC e o Arduino. O botão realiza a conexão através da porta serial selecionada pelo usuário.

O botão “Amostrar” realiza a comunicação com a plataforma Arduino, para obter os valores dos ângulos das juntas em radianos, que posteriormente são convertidos para graus. Em seguida, o MATLAB® realiza os cálculos necessários, através do método de Denavit-Hartenberg *standard* (DENAVIT & HARTENBERG, 1955), para a obtenção da matriz de rotação e o vetor posição.

No painel “Enviar Dados” é possível configurar as velocidades e os ângulos de cada junta para o posicionamento do robô e uma nova configuração no espaço.

A interface gráfica com o usuário também possibilita a visualização do robô em uma representação tridimensional, conforme apresentado na parte inferior à direita da Figura 5.

O fluxograma da interface criada no MATLAB® encontra-se representado na Figura 6.

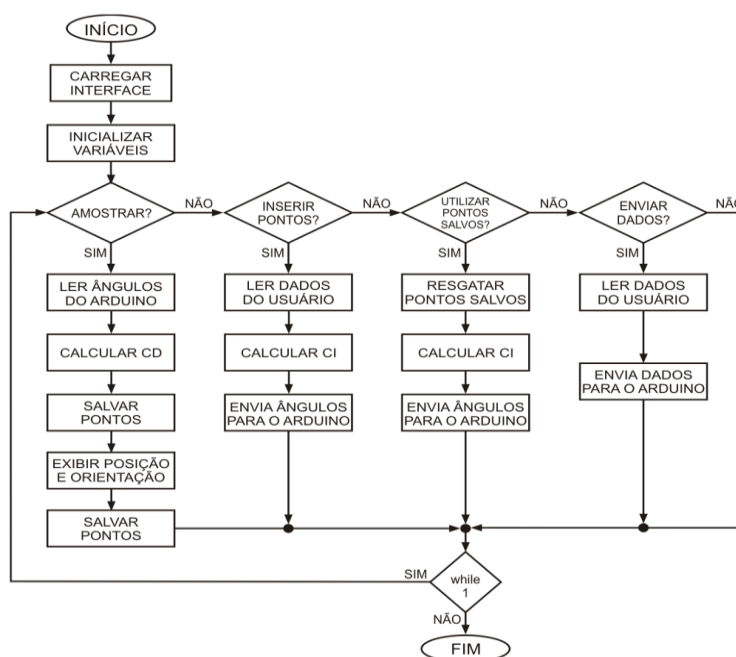


Figura 6. Fluxograma do código criado no MATLAB®

## 4. CINEMÁTICA DO ROBÔ

### 4.1. Cinemática Direta

A cinemática direta permite, através das variáveis das juntas do robô, obter a posição e orientação do efetuador. Para realizar isso, faz-se necessário fixar um sistema de coordenadas em cada elo do robô. Utilizou-se para a análise, a versão *standard* da convenção de Denavit-Hartenberg (DH). Os parâmetros de DH (Tabela 2) foram extraídos da geometria do robô (Figura 7), e consistem em um conjunto de quatro quantidades, que descrevem a posição e orientação de um sistema de coordenadas de um elo em relação ao sistema de coordenadas do elo precedente ao longo da cadeia cinemática.

Os parâmetros de DH *standard* são definidos como:

$a_i$ : distância entre  $z_{i-1}$  e  $z_i$  ao longo de  $x_i$ ;

$\alpha_i$ : ângulo entre  $z_{i-1}$  e  $z_i$  ao redor de  $x_i$ ;

$d_i$ : distância entre  $x_{i-1}$  e  $x_i$ , ao longo de  $z_{i-1}$ .

$\theta_i$ : ângulo entre  $x_{i-1}$  e  $x_i$  ao redor de  $z_{i-1}$ ;

Tabela 2 - Tabela de Denavit-Hartenberg

Elo	$a_i$ [cm]	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$90^\circ$	0	$\theta_1$
2	19.2	0	0	$\theta_2$
3	0	$90^\circ$	0	$\theta_3$
4	0	$-90^\circ$	10.8	$\theta_4$
5	0	$90^\circ$	0	$\theta_5$
6	0	0	8.5	$\theta_6$

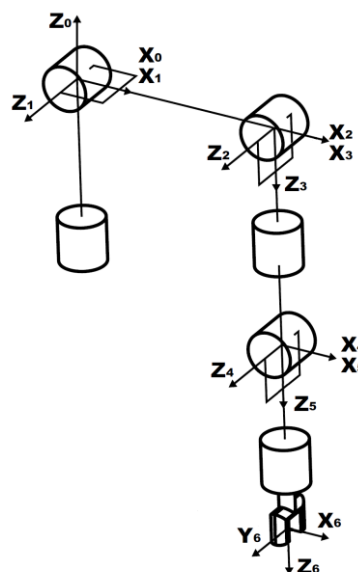


Figura 7. Representação do Robô Antropomórfico com Seis Graus de Liberdade

### 4.2. Cinemática Direta

A cinemática inversa é utilizada para a determinação das variáveis das juntas em função da posição e orientação do efetuador. O conhecimento da solução do problema de cinemática inversa é de suma importância para a realização do controle de trajetória ponto a ponto. É possível utilizar o método de desacoplamento cinemático (Figura 8), quando a posição do centro do efetuador não se altera com o movimento das juntas, possibilitando a

divisão do problema da cinemática inversa em dois problemas mais simples, o da cinemática inversa de posição (em função das juntas do braço) e o da cinemática inversa de orientação (em função das juntas do punho).

A partir da posição e da orientação do efetuador, é possível determinar a posição do centro do punho ( $p_c$ ), como demonstrado pela Equação (1).

$$p_c = p_e - d_6 z_6 \quad (1)$$

Conhecendo a posição do centro do punho ( $p_c = [p_x, p_y, p_z]$ ), é possível, por cinemática inversa de posição, definir as variáveis de junta do braço responsáveis pela posição do efetuador, que são as três primeiras juntas a partir da base (Fig. 8). Sendo expressas por:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{atan2}(p_y, p_x) \\ \theta_2 &= \text{atan2}(\pm\sqrt{1 - D^2}, D) \\ \theta_3 &= \text{atan2}(p_z, r) \mp \text{atan2}(a_3 s_3, a_2 + a_3 c_3) \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $D = \frac{r^2 + p_z^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3}$ ;  $s_3 = \text{sen}(\theta_3)$ ;  $c_3 = \text{cos}(\theta_3)$ .

A orientação do cotovelo (acima ou abaixo) deve ser definida respeitando os limites dos deslocamentos angulares de  $\theta_2$  e  $\theta_3$ . Esses limites podem ser observados na Tabela 1.

Uma vez encontrada a orientação do centro do punho em relação à base ( $R_{03}$ ), a partir das variáveis de junta do braço ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$ ), pode-se determinar a orientação do efetuador em relação ao centro do punho ( $R_{36}$ ), desde que conhecida a orientação do efetuador em relação a base ( $R_{06}$ ), pela seguinte relação:

$$R_{36} = R_{03}^T R_{06} \quad (3)$$

Sendo a matriz de rotação  $R_{36}$  expressa por:

$$R_{36} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & c_4 s_5 \\ \cdot & \cdot & s_4 s_5 \\ -s_5 c_6 & s_5 s_6 & c_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para que a representação do robô pela cinemática direta e cinemática inversa apresente a mesma configuração, é necessário acrescentar  $90^\circ$  sobre o valor da variável da junta 3 ( $\theta_3 = \theta_3 + 90^\circ$ ) para realizar o cálculo da matriz de orientação  $R_{03}$ .

Segundo Sciavicco e Siciliano (2009), se as juntas do punho esférico estão na configuração dos ângulos de Euler (ZYZ), como é o caso deste robô, as variáveis destas juntas podem ser determinadas por cinemática inversa de orientação através das relações:

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \text{atan2}(r_{23}, r_{13}) \\ \theta_5 &= \text{atan2}\left(\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}\right) \\ \theta_6 &= \text{atan2}(r_{32}, -r_{31}) \end{aligned} \quad (5)$$



onde  $r_{ij}$  são os elementos da linha  $i$ , coluna  $j$  de (4). Deve-se atentar para as singularidade que envolvem  $\theta_5$ , que ocorrem quando  $s_5 = 0$ , ou seja, quando  $\theta_5 = 0, \pm 180^\circ, \dots$

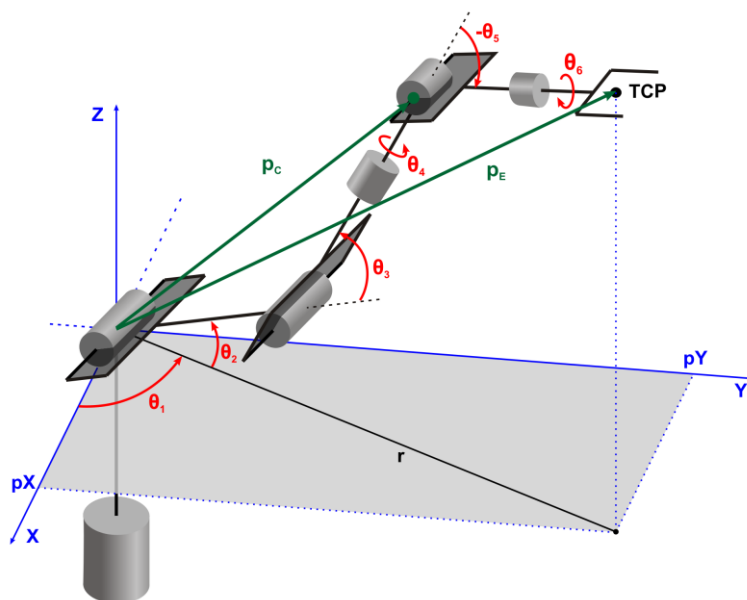


Figura 8. Desacoplamento Cinemático

### 4.3. Controle Ponto a ponto

De acordo com Spong, Hutchinson & Vidyasagar (2005), a forma mais comum de controle de um robô é o controle ponto a ponto. Neste tipo de controle, é ensinado ao robô um conjunto de pontos no espaço de trabalho pelos quais o efetuador deve passar, porém não há um controle de trajetória entre um ponto e outro, ou seja, não são regulados o caminho nem a velocidade com a qual o robô deverá atingir os pontos desejados.

O processo de aprendizagem dos pontos desejados é chamado *teach and playback*, e é muito utilizado para a programação de pontos em robôs industriais que não apresentam controle de trajetória (SPONG *et al.*, 2005). No caso do robô descrito neste trabalho, este processo foi feito da seguinte forma: foram desconectadas as portas digitais que são responsáveis por enviar sinais de controle para as placas controladoras dos servomotores, possibilitando que o robô pudesse ser manipulado manualmente. Depois de configurada a posição e a orientação desejada, realizou-se a amostragem dos ângulos das juntas através da interface do MATLAB®, que armazena essas informações para uma execução futura. Depois de amostradas as diferentes configurações que o robô deve aprender, as portas digitais, que outrora haviam sido desconectadas, foram reconectadas para habilitar o controle dos servos pelo Arduino, para que o robô pudesse repetir as posições e orientações armazenadas.

## 5. RESULTADOS

O principal resultado deste trabalho foi o aumento da motivação dos alunos pela prática do projeto, construção e programação de um robô de seis graus de liberdade, auxiliada pelo conteúdo da disciplina de Elementos de Robótica que foi apresentado em sala de aula.

Para a análise do desempenho da plataforma de robótica que foi desenvolvida, foram realizados dez ensaios de posicionamento do robô para um determinado ponto e orientação no espaço. O robô do presente trabalho apresentou melhor repetibilidade e precisão (Figura 9) em relação ao trabalho anterior (COCOTA *et al.*, 2013).

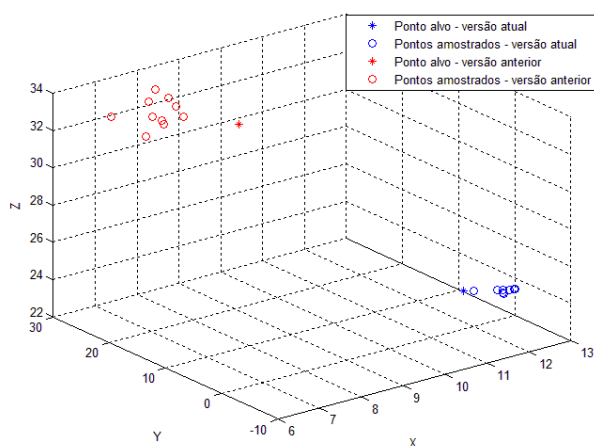


Figura 9. Gráfico Comparativo de Repetibilidade

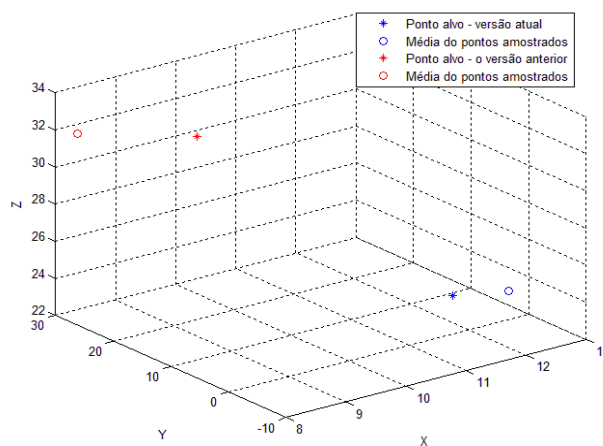


Figura 10 - Gráfico Comparativo de Precisão

Embora o ponto programado para a avaliação da repetibilidade e precisão dos robôs não tenha sido o mesmo, notou-se uma significativa melhora na repetibilidade do robô ao observou-se a redução na dispersão dos pontos que foram alcançados pelo robô durante os ensaios, conforme apresentado na Figura 9.

Para a análise de precisão, calculou-se a média das magnitudes dos vetores obtidos entre o ponto desejado e os pontos amostrados, conforme expresso por:

$$\frac{\sum_{i=1}^{10} \|[X_d, Y_d, Z_d] - [X_i, Y_i, Z_i]\|}{10} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \{\sqrt{(X_d - X_i)^2 + (Y_d - Y_i)^2 + (Z_d - Z_i)^2}\}}{10} \quad (6)$$

Observou-se que o robô do presente trabalho apresentou a precisão de 1,09 cm contra a precisão de 3,00 cm do robô anterior. A precisão pode ser melhor observada na Figura 10, onde encontra-se representado a comparação entre a média dos pontos alcançados em relação aos pontos desejados.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho relatamos a experiência do desenvolvimento de um robô antropomórfico com punho esférico com alunos de graduação na disciplina de Elementos de



Robótica. A execução desse trabalho possibilitou explorar conceitos básicos de robótica com os alunos de graduação, e.g., cinemática direta, cinemática inversa, programação de trajetória por ponto a ponto, precisão e repetibilidade de manipulador. O custo do robô foi de aproximadamente R\$ 650,00 (incluindo a plataforma *Arduino Mega 2560*).

A precisão e a repetibilidade do robô foram melhoradas de forma significativa. Para alcançar esse resultado, foram fundamentais as contribuições relacionadas à substituição do servomotor que apresentou maior erro no posicionamento angular na versão anterior do trabalho, e as alterações que foram executadas no projeto mecânico.

Em trabalhos futuros, deseja-se implementar o controle cinemático de posição e orientação do efetuador para uma dada trajetória a ser efetuada pelo robô.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, Renon Steinbach; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Departamento de Engenharia Mecânica. Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade, 2009. 5p. Dissertação (Mestrado).

COCOTA, José Alberto Naves Jr. *et al.* Desenvolvimento de um robô antropomórfico com punho esférico para práticas de robótica com alunos de graduação. SBAI/DINCON, Fortaleza, 2013.

DENAVIT, Jacques; HARTENBERG, Richard. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, ASME J. on Applied Mechanics, 1955. p. 215-221.

ED CORPORATION. **5 joint arm-robot trainer: ED-7220C**. Disponível em: <[http://www.ed.co.kr/eng/02\\_product/view.asp?topNum=2&pageNum=3&code=A05&idx=184&sproduct=>](http://www.ed.co.kr/eng/02_product/view.asp?topNum=2&pageNum=3&code=A05&idx=184&sproduct=>)>. Acesso em: 10 fev. 2014.

MITSUBISHI ELECTRIC. **MOVEMASTER Industrial Robot: Specification Manual**. Disponível em: <[https://my.mitsubishi-automation.com/downloads/view/doc\\_loc/2328/RV-E2\\_3J\\_SpecificationManual.pdf?id=2328&saveAs=0&form\\_submit=View+now>](https://my.mitsubishi-automation.com/downloads/view/doc_loc/2328/RV-E2_3J_SpecificationManual.pdf?id=2328&saveAs=0&form_submit=View+now>)>. Acesso em: 10 fev. 2014.

ROSÁRIO, João Maurício. Princípios de Mecatrônica. 1 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 356 p.

SCIAVICCO, Lorenzo; SICILIANO, Bruno. Modelling and Control of Robot Manipulators. London: Springer. 2009. 632 p.

SILVA, Joaquim Norberto Cardoso Pires da; FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA, Departamento de Engenharia Mecânica. Realização de Controlo de Força em Robôs Manipuladores Industriais, 1999. 2p. Tese (Doutorado).

SPONG, Mark W. *et al.* Robot Modeling and Control. New York: John Wiley & Sons. 2005. 407 p.



## **A LOW COST SIX DEGREE OF FREEDOM ROBOT FOR PRACTICES OF POINT-TO-POINT TRAJECTORY CONTROL**

**Abstract:** *An important part in learning basic robotics is the hands-on study in this course. However, robotic manipulators for educational purposes are quite expensive. This project focused on continuing the construction and control of a low-cost anthropomorphic robot, which helped on learning theoretical concepts studied during Elements of Robotics course at Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Arduino was used to control the six-degrees-of-freedom robot while MATLAB® is used for human-machine interface (HMI).*

**Key-words:** *Six degrees of freedom robot, anthropomorphic, manipulator, kinematics, point-to-point control*