

## **DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO ANTROPOMÓRFICO DIDÁTICO CONTROLADO POR COMPUTADOR**

**Marcel Ribeiro Mendonça, marcelribeiroceara@msn.com<sup>1</sup>**

**Daniel Henrique da Silva, danielh.silva@ig.com.br<sup>1</sup>**

**Rejane Cavalcante Sá, rejane\_sa@yahoo.com.br<sup>2</sup>**

**Antônio Themóteo Varela, themoteo@ifce.edu.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Av. Treze de Maio, 2081, CEP 60040-531, Bairro: Benfica, Fortaleza-CE

<sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará, Av. da Universidade, 2853, Bairro: Benfica, Fortaleza-CE

**Resumo:** *O estudo de robótica industrial nas instituições de ensino superior, em se tratando de situações práticas, está muitas vezes limitado ao planejamento de trajetórias e à definição de parâmetros de campo para o controle de um manipulador robótico. O planejamento de trajetórias é uma etapa fundamental para a execução das tarefas realizadas por um manipulador, porém o estudante raramente tem acesso a este, limitando-se o estudo prático à utilização de softwares de simulação autorais. Ainda voltado ao meio educacional, o estudante não tem acesso aos algoritmos e técnicas utilizadas por fabricantes de robôs para seu controle efetivo, dificultando o desenvolvimento de projetos que envolvam tais técnicas. Partindo para a questão estrutural, é importante ressaltar que a maior parte dos manipuladores possui custo elevado, impossibilitando para a maioria das instituições a compra de um robô com o objetivo de estudar a forma como este é construído. Este trabalho trata do desenvolvimento de um manipulador robótico antropomórfico para fins didáticos e de um software para posicionamento por seqüenciamento de posições, onde se torna possível utilizá-lo em sala de aula, agregando a prática de planejamento de trajetórias à teoria vista nos softwares de simulação.*

**Palavras-chave:** *Manipulador Robótico; Robôs Antropomórficos; Robôs Industriais; Robótica Educacional*

### **1. INTRODUÇÃO**

Manipuladores robóticos são dispositivos vastamente utilizados na indústria. A maioria destes tem grande capacidade de carga, podendo ser utilizados na transposição de objetos, execução de manobras de soldagem, pintura, montagem e ainda auxiliar no processo de inspeção de produtos (ROSÁRIO, 2005). Este tipo de robô é utilizado em aplicações que exijam boa repetibilidade e precisão (SANTOS, 2003). Sua estrutura física é composta por elos e juntas, formando uma cadeia cinemática aberta (PAZOS, 2002 *apud* SILVA, 2006). O desenvolvimento de unidades robóticas se encontra muito difundido, principalmente nos Tigres Asiáticos, na Europa e nos Estados Unidos. O Brasil, como uma potência em desenvolvimento, já investe em robótica, porém ainda não possui empresas especializadas na fabricação de robôs.

A maioria dos manipuladores robóticos é cara e de difícil acesso mesmo no meio acadêmico. O manipulador robótico desenvolvido neste trabalho possui então fins didáticos, ou seja, para testar modelos matemáticos e o planejamento de trajetórias para o mesmo, podendo ainda este ser utilizado em algumas aplicações mais simples das citadas anteriormente. Para o desenvolvimento da estrutura mecânica será necessário o estudo da estrutura cinemática do robô e de materiais a serem escolhidos para a construção do mesmo. A placa de controle fará a interface entre o computador e o manipulador, na qual estão incluídas as rotinas de comunicação e geração de PWMs. O desenvolvimento da interface gráfica permitirá o posicionamento e o controle de velocidade de atuação do manipulador, e tem como objetivo principal o desenvolvimento de um *software* gratuito para este controle, consequentemente uma redução nos custos de produção de um manipulador, quer seja ele industrial, quer seja didático.

### **2. MODELAGEM CINEMÁTICA DE MANIPULADORES ROBÓTICOS**

Um manipulador consiste em elos rígidos que são conectados através de juntas, que permitem um movimento relativo entre seus elos vizinhos. Usualmente, são agregadas a estas juntas sensores de posição angular, que permitem que a posição relativa entre os elos vizinhos seja medida. (CRAIG, 1986). Na extremidade do manipulador, é instalado

um atuador, que será utilizado pelo robô para executar suas tarefas. A escolha do melhor atuador garante a execução precisa e eficiente da tarefa. A base do robô é fixa, o que irá facilitar os cálculos necessários para encontrar as posições alcançáveis por este no eixo XYZ. A mobilidade desse tipo de robô depende do seu número de juntas.

O elo é o membro do robô: um corpo rígido que, quando ligado a outro através de uma junta, configuram um grau de liberdade. Já a junta, é exatamente o que liga os dois elos (MITTAL, 2006). É nas juntas onde acontece a variação de um dado ângulo ou comprimento que causará a alteração da posição do *end-effector*.

A junta rotacional vista na Fig. (1) é facilmente implementável devido à possibilidade de transmitir o movimento do motor (com caixa de redução) diretamente ao eixo de rotação da junta, sem a utilização de cremalheiras. Os manipuladores construídos com juntas rotacionais normalmente têm uma cinemática computacionalmente mais complexa, visto que devem ser considerados os pontos alcançados pelos elos, que vão depender de parâmetros do mesmo e do ângulo de rotação da junta, incluindo no cálculo termos trigonométricos.

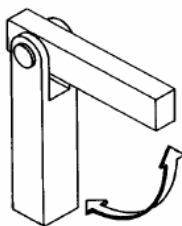


Figura 1. Junta rotacional.

Os manipuladores classificam-se de acordo com o tipo de suas três primeiras juntas, contando-se da base para a garra, podendo ser estes cartesianos, cilíndricos, esféricos, de articulação horizontal e vertical. Para representar o robô, podem-se utilizar letras que representem cada tipo de junta, iniciando-se a nomeação a partir da junta mais próxima à base. As juntas podem ser classificadas em rotacionais (R), prismáticas (P) ou esféricas (S) (ROSÁRIO, 2005).

Cada tipo de estrutura cinemática possui um espaço de trabalho diferenciado. Estruturas cinemáticas com mais juntas prismáticas possuem espaço de trabalho reduzido, porém elevada rigidez mecânica, levando a uma boa repetibilidade. Robôs com juntas rotacionais possuem espaços de trabalho maior, porém seu controle é mais complexo, devido à inclusão de termos trigonométricos nas equações que o definem e ainda às variações de momento de inércia (ROSÁRIO, 2005).

Para extrair o modelo cinemático de um manipulador, é necessário recorrer à representação de Denavit-Hartenberg, que propõe uma metodologia sistemática para obter os sistemas de coordenadas e as transformações associadas a cada elo do manipulador. Para representar o robô, utilizam-se os eixos coordenados ortogonais e diretos (SANTOS, 2003). Para utilizá-lo, todos os parâmetros relativos às disposições físicas de elos e juntas do robô devem estar definidos.

É possível representar qualquer posição no espaço em um vetor de três valores, onde cada valor indica uma coordenada X, Y ou Z, desde que se tenha em mente que, para representar qualquer ponto no espaço, além de suas coordenadas, é necessário que seja indicada a referência pela qual estes pontos se orientam.

Para Santos (2003), as transformações geométricas podem ser rotação e de translação. Toda transformação geométrica linear pode ser representada de forma matricial. Esta matriz engloba todas as coordenadas referentes a um elo, e é chamada de matriz de transformação. Uma matriz de transformação geométrica tem locais definidos para representar cada tipo de transformação. A Fig. (2) mostra os componentes da matriz homogênea de transformação a três dimensões. Os fatores de projeção, representados na linha 4, colunas 1 a 3 representam a perspectiva, ou seja, o ângulo de visão do robô, e na linha 4, coluna 4, está o fator de escala global. Este tipo de transformação tem seus conceitos utilizados tanto em robótica como em processamento digital de imagens, porém a robótica não utiliza o conceito de perspectiva nem de fator de escala global, visto que os robôs possuem dimensão fixa.

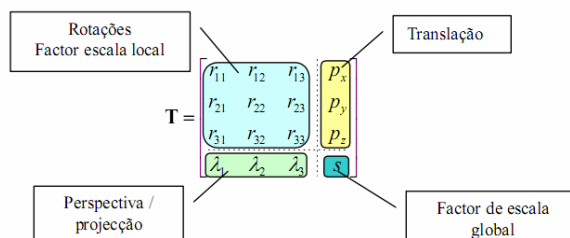


Figura 2. Componentes da matriz de transformação a 3 dimensões.

## 2.1. Cinemática Direta de Manipuladores

A partir dos modelos cinemáticos, é possível determinar a posição e a orientação do manipulador a partir das disposições das suas juntas e inversamente, determinar as disposições de juntas necessárias para se atingir uma

determinada posição. Estes são respectivamente os problemas da cinemática direta e da cinemática inversa. Através dela, é possível relacionar as posições, velocidades e aceleração de seus eixos (SANTOS, 2003).

Arelação entre o referencial de origem e o referencial da extremidade do manipulador é dada por uma transformação  ${}^R T_H$  que, todavia, não dá qualquer indicação sobre as relações entre os elos intermédios (SANTOS, 2003). Desse modo, para fazer um estudo da cinemática, e outros, é necessário definir sistemas de coordenadas associados a cada elo, ou seja, atribuir-lhe referenciais. A Fig. (3) mostra o esquema físico do manipulador desenvolvido, que define-se como um manipulador antropomórfico com três graus de liberdade. Para determinar a posição da garra em relação à origem do robô, deve-se fazer o produto das matrizes características de cada junta a fim de obter a matriz homogênea  ${}^R T_H = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$  do robô.

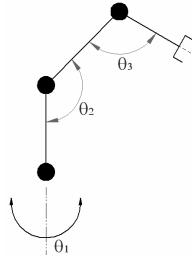


Figura 3. Esquema físico de um manipulador antropomórfico com três graus de liberdade.

Após a definição dos sistemas de coordenadas, pode-se definir que para um determinado manipulador série, existem dois espaços de variáveis: o espaço das variáveis de junta e o espaço das variáveis cartesianas, ou operacionais.

Implementar a cinemática direta de um manipulador significa determinar as relações que exprimem um ponto no espaço cartesiano, em função de um ponto no espaço de juntas (SANTOS, 2003). Uma transformação associada a um elo pode ser decomposta em quatro operações elementares (MITTAL, 2006).

Para determinar corretamente as matrizes cinemáticas, Santos (2003) afirma que é fundamental definir corretamente os parâmetros referentes a cada conjunto de elos e juntas que formam o robô. Definidos estes parâmetros, pode-se dizer, para uma abordagem genérica, que para uma junta prismática, o parâmetro variável é a distância entre elos e para uma junta rotacional, o parâmetro variável é o ângulo de junta (SANTOS, 2003). Assim, pode-se compor a matriz de transformação associada a um eixo da seguinte forma:

$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i \cdot C\alpha_i & S\theta_i \cdot S\alpha_i & a_i \cdot C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i \cdot C\alpha_i & -C\theta_i \cdot S\alpha_i & a_i \cdot S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matematicamente, é possível aproximar as juntas como pontos e os elos como retas. Estes pontos irão unir as retas, e ainda nestes pontos, pode haver apenas alguns movimentos limitados (limitações mecânicas do robô). A Tabela 1 resume o levantamento dos parâmetros de elos e juntas associados às três juntas rotacionais do manipulador.

Tabela 1. Parâmetros de elos e juntas do manipulador.

ELO	ÂNGULO DE JUNTA ( $\Theta_i$ )	ÂNGULO DE TORÇÃO ( $A_i$ )	COMPRIMENTO DO ELO ( $L_i$ )	DISTÂNCIA ENTRE JUNTAS ( $D_i$ )
1	$\Theta_1$	90°	0	0
2	$\Theta_2$	0	$L_2$	0
3	$\Theta_3$	0	$L_3$	0

A partir da Eq. (2), é possível representar a matriz de transformação associada a cada elo. O produto das três matrizes resultará na matriz  ${}^R T_H$  característica, que é utilizada para na cinemática direta do manipulador.

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} C\theta_1 \cdot C\theta_{23} & -C\theta_1 \cdot S\theta_{23} & S\theta_1 & C\theta_1 (L_3 \cdot C\theta_{23} + L_2 \cdot C\theta_2) \\ S\theta_1 \cdot C\theta_{23} & -S\theta_1 \cdot S\theta_{23} & C\theta_1 & S\theta_1 (L_3 \cdot C\theta_{23} + L_2 \cdot C\theta_2) \\ S\theta_{23} & C\theta_{23} & 0 & L_3 \cdot C\theta_{23} + L_2 \cdot S\theta_2 + L_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 2.2. Cinemática Inversa de Manipuladores

Formalmente, o problema da cinemática inversa é determinar todos os conjuntos de disposições das variáveis de juntas para atingir uma posição e orientação específica do *end-effector*. Através do modelo cinemático inverso do manipulador, é possível determinar os ângulos de junta necessários para que o manipulador possa atingir a posição. A dificuldade da cinemática inversa é maior que a da direta por que não há procedimentos sistemáticos para sua solução. A cinemática inversa de cada manipulador deve ser resolvida separadamente.

De forma geral, a matriz homogênea de um manipulador possui a seguinte expressão:

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & d_x \\ n_y & o_y & a_y & d_y \\ n_z & o_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Nesta expressão, estão contidos todos os parâmetros relativos à orientação e posição do *end-effector*. Estes parâmetros serão modificados pelas variáveis de junta. Então, o objetivo da cinemática inversa é, na forma matemática, encontrar uma expressão para os ângulos de junta em função da posição do *end-effector*. Tomando o modelo da cinemática direta mostrado na Eq. (3) e da forma geral como é mostrado na Fig. (2), pode-se então concluir que as posições  $x$ ,  $y$  e  $z$  do manipulador são dadas por:

$$P_W = \begin{bmatrix} P_{Wx} \\ P_{Wy} \\ P_{Wz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_1(L_3.C\theta_{23} + L_2.C\theta_2) \\ S\theta_1(L_3.C\theta_{23} + L_2.C\theta_2) \\ L_3.C\theta_{23} + L_2.S\theta_2 + L_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

O ângulo de junta da base deste manipulador pode ser calculado, partindo da Eq. (4), da seguinte forma:

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_{Wy}}{P_{Wx}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{C\theta_1(L_3.C\theta_{23} + L_2.C\theta_2)}{S\theta_1(L_3.C\theta_{23} + L_2.C\theta_2)}\right) \quad (5)$$

Considerando agora a Eq. (4) como um vetor, reescrevendo-a passando o comprimento do elo A ( $L_A$ ) para o outro membro da equação e finalmente extraindo o módulo deste vetor (elevando cada um de seus termos ao quadrado), obtém-se a seguinte equação:

$$P_{Wx}^2 + P_{Wy}^2 + (P_{Wz} - L_A)^2 = (C\theta_1(L_3.C\theta_{23} + L_2.C\theta_2))^2 + (S\theta_1(L_3.C\theta_{23} + L_2.C\theta_2))^2 + (L_3.C\theta_{23} + L_2.S\theta_2)^2 \quad (6)$$

O desenvolvimento da Eq. (6) levará, finalmente, à Eq. (7), de onde é possível extrair o valor do ângulo de junta mais distante da origem para as posições  $x$  e  $y$  requisitadas.

$$\theta_3 = \pm \arccos\left(\frac{P_{Wx}^2 + P_{Wy}^2 + (P_{Wz} - L_A)^2 - L_B^2 - L_C^2}{2.L_B.L_C}\right) \quad (7)$$

Ainda da Eq. (4), podemos resolver as expressões em ordem a  $S_2$  e  $C_2$ . Primeiramente, utilizando como artifício o cálculo do raio do ponto  $x, y$  à origem e ainda decompondo a expressão referente ao ponto  $P_{Wz}$ , obtém-se o sistema:

$$\begin{cases} \sqrt{P_{Wx}^2 + P_{Wy}^2} = L_B C_2 + L_C C_{23} = L_B C_2 + L_C C_2 C_3 - L_S S_3 \\ P_{Wz} - L_A = L_C S_2 C_3 + L_C C_2 S_3 + L_B S_2 \end{cases} \quad (8)$$

A partir da Eq. (8), após uma série de manipulações e substituições, com o intuito de isolar os termos referentes ao segundo ângulo de junta, chega-se à expressão final para este:

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{(L_B + L_C C_3)(P_{Wz} - L_A) - L_C S_3 \sqrt{P_{Wx}^2 + P_{Wy}^2}}{(L_B + L_C C_3) \sqrt{P_{Wx}^2 + P_{Wy}^2} + L_C S_3 (P_{Wz} - L_A)}\right) \quad (9)$$

A Eq. (7) mostra o que é possível constatar observando o esquema da Fig. (3). Note que a variação no ângulo de junta mais distante da base irá alterar as coordenadas do *end-effector* independente da variação do anterior, porém a recíproca não é verdadeira. Além disto, o fato desta equação possuir dois resultados nos mostra matematicamente a existência da redundância de posições, mostrando que uma determinada posição pode ser representada por mais de um conjunto de disposições das variáveis de junta.

Em resumo, através das Eqs. (5), (7) e (9) é possível extrair o valor dos ângulos no espaço das variáveis de junta para uma determinada posição no espaço cartesiano.

### 3. CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA

#### 3.1. Modelagem Tridimensional

O manipulador desenvolvido é do tipo antropomórfico com três graus de liberdade, sendo uma junta rotacional na base e duas juntas no braço do robô. Este tipo de robô é muito versátil quando se trata de seu espaço de trabalho alcançável. Em um modelo teórico, um robô desse tipo alcança qualquer ponto em uma esfera, cujo raio máximo é igual à soma do comprimento de seus dois membros mais distantes da base.

A fim de prever as principais dificuldades que seriam encontradas no projeto no momento da montagem, tornou-se necessário modelar a estrutura física do manipulador. Também, é importante lembrar que por este ser um projeto desenvolvido para fins didáticos, deve ter uma montagem documentada, a fim de facilitar e viabilizar a operação de montagem para o aluno, e ainda com materiais ao seu alcance.

Para construir a estrutura do manipulador, foi utilizado um perfil de alumínio em “L”, conforme a Fig. (5).

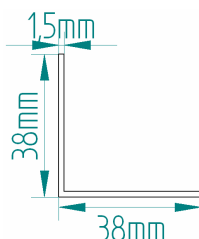


Figura 4. Detalhe do perfil de alumínio utilizado para a construção do manipulador.

O alumínio tem por características uma densidade relativamente baixa, em comparação com o aço, condutividade elétrica e térmica elevadas, e uma resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente. (CALLISTER, 2002). O perfil utilizado mostrou-se adequado, primeiramente por ser uma opção barata e de fácil acesso, e segundo por ser um metal ao mesmo tempo leve, dúctil e razoavelmente rígido.

A forma como o robô irá girar sobre o seu próprio eixo também foi uma preocupação no projeto. Fixar o servomotor diretamente ao eixo de rotação do manipulador não é uma boa opção, visto que o peso do manipulador irá incidir completamente sobre o servo. Para resolver este problema, foi utilizado um rolamento como eixo de rotação, tendo hastes de metal como guias para o servomotor transmitir o movimento.

Desta forma, foi possível idealizar o mecanismo do robô, para que este pudesse ser modelado. A Fig. (6) mostra a forma como foi feito o encaixe do servomotor à estrutura montada com dois pares de cantoneiras, formando um conjunto de dois elos e uma junta do manipulador, um detalhe do encaixe do disco de rotação onde ficará preso o manipulador e finalmente a forma final adquirida pela estrutura. Vale ressaltar que a garra não foi modelada, pois esta foi adquirida separadamente.

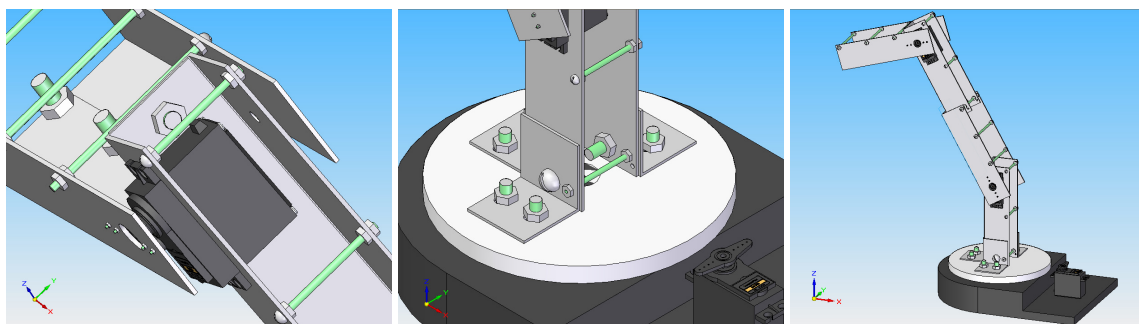


Figura 5. Detalhe do encaixe do servomotor com os elos (esquerda), do encaixe do disco de rotação (centro) e da forma final que a estrutura, sem a presença da garra (direita).

#### 3.2. Construção e Montagem

A modelagem tridimensional facilitou o trabalho de montagem do manipulador. A Fig. (6) mostra a forma final adquirida pela estrutura, montada, e com a garra instalada, porém ainda sem a placa de controle. Nestas, o robô ainda aparece invertido, pois o dorso do robô é exatamente a parte fechada de alumínio. Há uma pequena estrutura de alumínio que mantém o robô nesta posição. Esta estrutura será posteriormente utilizada para a fixação dos contrapesos do robô. O perfil de alumínio foi utilizado na confecção dos membros e dos apoios do manipulador no disco de rotação.

Em duas das chapas foram feitos os furos para fixar os servomotores. Os parafusos que ligam uma chapa a outra servem para manter a estabilidade destas, evitando que venham a flambar, caso algum parafuso afrouxe.

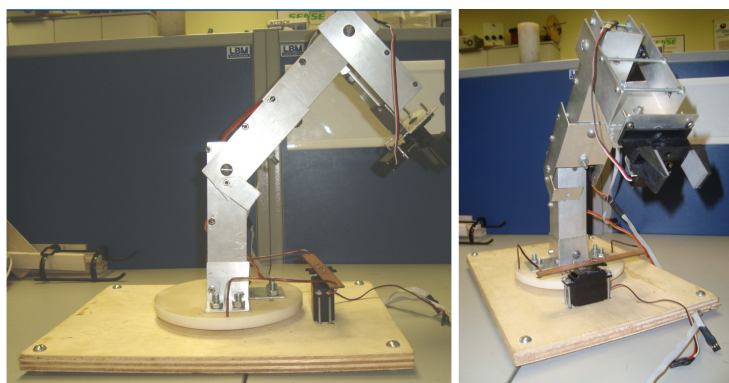


Figura 6. Forma final adquirida pela estrutura em vista lateral (esquerda) e em perspectiva (direita).

A base do manipulador foi alterada da forma como foi mostrada na modelagem tridimensional. Como pode ser visto ainda na Fig. (6), o pedestal do robô foi confeccionado apenas em madeira, e em um único nível, eliminando o “degrau”, onde foi fixado o servomotor no modelo. A haste que liga o servomotor ao disco de rotação foi dobrada, evitando a utilização do degrau. O disco de rotação foi confeccionado em *tecnil*, que é um material polimérico, semelhante ao *nylon*. Sua maior limitação provavelmente é o preço e a necessidade de tornear a peça. Este disco possui seis furos com rebaixo, onde foram encaixados os parafusos que o fixam à estrutura do manipulador, dois furos, para inserir as hastes, que são feitas de um fio de cobre utilizado em instalações elétricas, e finalmente um furo central, onde foi fixado o rolamento.

Há ainda uma pequena estrutura de alumínio que mantém o robô na posição mostrada na figura. Esta estrutura será posteriormente utilizada para a fixação dos contrapesos do robô. Os contrapesos foram itens não previstos no projeto, e atuam equilibrando o peso incidente sobre o eixo do servomotor. O segundo e o terceiro membro do robô, depois de montados, pesam cerca de 400 g. O valor exato dos pesos dos contrapesos foi determinado empiricamente. Durante os primeiros testes do robô, a corrente média sem carga deste, enquanto estava em sua posição zero, era da ordem de 2 A. Com a instalação dos contrapesos, esta corrente caiu para cerca de 50% este valor.

#### 4. CONTROLE E COMUNICAÇÃO COM O COMPUTADOR

Para controlar o robô, foi desenvolvida uma placa de controle e uma interface gráfica com o computador. A placa de controle irá atuar gerando os valores de PWM para alcançar determinado ângulo de junta do manipulador. Já a interface realizará a parametrização destes valores. Um diagrama simplificado das funções realizadas pela placa e pela interface pode ser visto na Fig. (7).

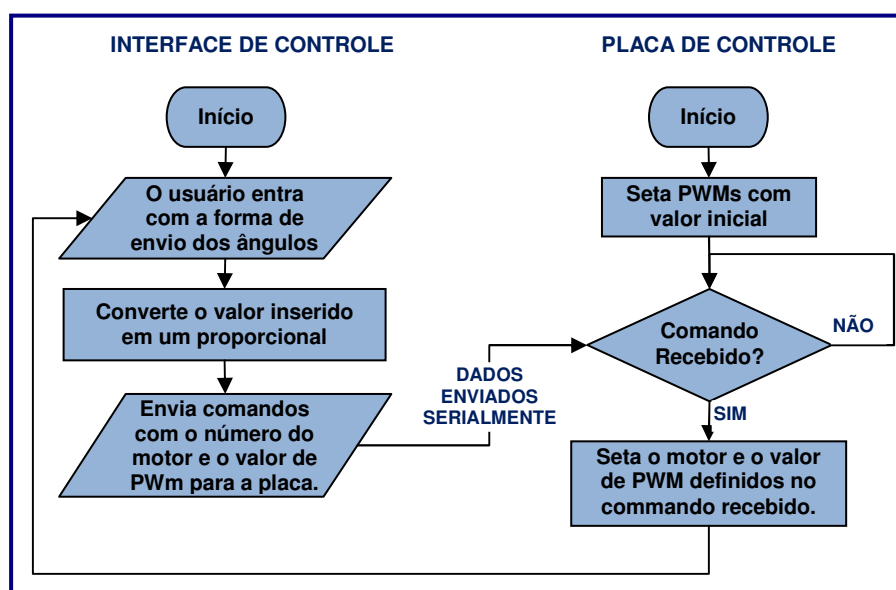


Figura 7. Fluxograma com uma visão geral do funcionamento do controle do manipulador.

Os sinais de PWM são utilizados para controlar os servomotores. Este tipo de servo, por padrão, deve ser receber pulsos com frequência fixa de 50Hz e um ciclo ativo que varie entre 5 e 10%. Em valores absolutos, um ciclo deve ocorrer a cada 20 ms, com um ciclo ativo que varia entre 1 e 2 ms. Usualmente, a variação do ciclo ativo de 1 a 2 ms causa uma variação no ângulo do servomotor de 0 a 180° (TowerPro, 2009). A diversidade de modelos e fabricantes existentes e o fato da dificuldade de se fabricar componentes com especificações iguais a do outro (ex.: motores com exatamente as mesmas características) faz com que haja variações no tempo de ciclo ativo.

A placa de controle é um hardware dotado de uma interface de comunicação serial com o computador. Esta interface, conforme mostrado na Fig. (7), irá receber uma sequência de comandos, que serão discernidos sobre a qual motor o comando se refere e posteriormente será executado, posicionando o elo na posição indicada pela interface. Na mesma interface há funções de nível mais elevado. O usuário não insere apenas o valor do ângulo de junta, mas pode posicionar este ângulo de acordo com uma régua de valores mostrada na tela do computador e ainda gravar estas posições, para que o programa faça o seqüenciamento destas, interpretada pelo operador como as “tarefas” que o robô irá executar.

Os modelos matemáticos deduzidos no item 3.1 foram utilizados em maior parte nesta interface. Como pode-se observar na Fig. (8), a interface consta de vários mostradores na parte superior e de caixas de edição em diversas partes do programa. Na guia “Controle por cinemática direta”, O manipulador é enviado para um conjunto de posições de ângulos de junta, e os valores para os quais ele foi enviados são aplicados à matriz homogênea da Eq. (2), para extrair desta as posições  $x$ ,  $y$  e  $z$  mostradas no canto superior direito da interface. Da mesma forma, na guia “Controle por cinemática inversa”, os valores inseridos são na verdade valores de posição no plano cartesiano. A partir das Eqs. (5), (7) e (9), é possível calcular quais os ângulos de junta necessários para atingir esta posição e enviá-los. As régua para controle escalar são utilizadas caso o operador necessite movimentar individualmente cada ângulo de junta ou cada eixo cartesiano. Finalmente, a guia “Gravar Posição” possibilita ao usuário gravar a posição atual e definir um intervalo de tempo entre uma execução e outra. Desta forma, é possível para o manipulador executar as “tarefas” programadas pelo operador.

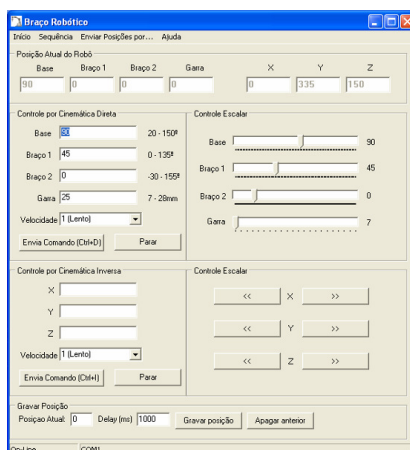


Figura 8. Interface de comunicação entre o computador e a placa de controle.

## 5. RESULTADOS

O manipulador robótico em questão, além de suas finalidades principais como robô, descritas no item 1, possui ainda fins didáticos. Por este motivo, o resultado deste experimento será dividido em duas partes, sendo uma referente à montagem e outra referente aos testes realizados em sala.

### 5.1. Resultados da montagem

Com a montagem do manipulador concluída, foram realizados testes. A primeira grande observação a ser feita é em relação à montagem, que deve ser executada com o maior cuidado possível, visando reduzir a quantidade de folgas no mecanismo. Um mecanismo com muitas folgas torna o posicionamento complicado, visto à grande variação de posição causada por estas. A interface de comunicação prevê em uma de suas funções a calibração dos servomotores do robô de acordo com os valores que serão definidos no programa. Note que, na Fig. (6) já é possível visualizar que cada manipulador possui uma determinada faixa de variação de valores de ângulos de junta. Estes valores foram medidos, anotados e a interface de comunicação foi alimentada com estes valores. Além disso, foram capturados os valores de PWM necessários para se atingir estas posições. Desta forma, através de uma interpolação linear, foi possível calcular o valor de PWM para qualquer ângulo de junta definido na interface.

Tendo os valores devidamente anotados e calculados, foram realizadas medições, a fim de ter uma noção do erro de posicionamento em malha aberta do manipulador. Os dados coletados são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2. Demonstrativo do erro de posicionamento em malha aberta do manipulador.**

Carga	Posição Enviada ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )	Posição Medida ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )	Erro ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )
Sem carga	135°, 45°, 45°	134°, 40°, 41°	0,7%, 11,1%, 8,9%
	90°, 90°, 180°	91°, 82°, 170°	-1,1%, 8,9%, 5,6%
	45°, 180°, 90°	44°, 174°, 86°	2,2%, 3,3%, 4,4%
250g	135°, 45°, 45°	132°, 36°, 39°	2,2%, 20,0%, 13,3%
	90°, 90°, 180°	91°, 74°, 163°	-1,1%, 17,8%, 9,4%
	45°, 180°, 90°	44°, 170°, 76°	2,2%, 7,8%, 15,6%

A partir dos dados da Tabela 2 é possível visualizar erros de posicionamento bastante acentuados, principalmente em posições nas quais o manipulador está com centro de massa mais distante da origem. Estes erros ocorrem devido à própria característica do servomotor, de funcionar como um sistema de malha aberta. Como o circuito de controle não obtém nenhuma informação sobre a real posição do manipulador, não há como fechar a malha de controle.

Apesar do manipulador ter um erro de malha aberta considerável, estes erros não o tornam inutilizável para algumas de suas aplicações mencionadas. Por exemplo, em operações de transposição, o erro poderia ser acrescentado no momento em que o operador programasse o manipulador para a carga em questão. Outro ponto importante é que o erro de malha aberta para este manipulador varia de acordo com o peso do contrapeso selecionado. Ou seja, é possível selecionar o melhor contrapeso para a carga em questão. Finalmente, como o robô possui primeiramente fins didáticos, não é necessário trabalhar com o robô com carga, reduzindo consideravelmente o erro.

## 5.2. Resultados das práticas de planejamento de trajetórias

Conforme mostrado na Fig. (8), a interface de comunicação possui uma opção para a gravação da posição atual do manipulador. Com ela, é possível realizar práticas com o planejamento de trajetórias. Atualmente, as práticas são realizadas utilizando um simulador (*RoboCell*), que foi adquirido pela instituição de ensino juntamente com um manipulador industrial. O manipulador, juntamente com o simulador custaram em média R\$ 120.000,00 para a instituição, já o manipulador deste trabalho custou cerca de R\$ 300,00.

Os alunos foram solicitados a programar o manipulador, utilizando a interface de comunicação, a realizarem uma tarefa, que era, na ocasião, de empilhar três pequenas caixas de papelão. Quando a prática foi feita utilizando o simulador, os alunos não se preocuparam em “soltar” as cargas exatamente uma sobre a outra, pois o simulador não possui modelos para as caixas, fazendo com que este não considere questões de peso, atrito, rigidez, entre outras variáveis presentes na atividade real e que não são levadas em conta no simulador. Ou seja, alguns dos alunos, ao posicionar a segunda caixa sobre a primeira a uma determinada altura, simplesmente a soltaram, fazendo com que esta acabasse por não atingir o ponto solicitado.

## 6. CONCLUSÕES

A principal observação que pode ser feita quanto a este trabalho é que pode-se modularizar o processo de confecção, montagem e implementação de um manipulador robótico simples e prático, podendo este processo ser desenvolvido por alunos de cursos técnicos ou de graduação. Ferramentas com maior dificuldade de implementação, como o próprio *software* de controle podem ser desenvolvidas por estudantes de graduação, ou em último caso, utilizar o próprio *software* do professor.

Conclui-se também que o exercício das definições vistas em classe, sobre os diversos tópicos sobre manipuladores robóticos, é mais vantajoso quando se utiliza um manipulador real, pois além das variáveis relativas ao próprio manipuladores, os estudantes também precisam ficar atentos às variáveis do próprio ambiente onde este se encontra.

Este trabalho também abre portas para diversos outros, como a implementação de um *software* completo, com uma interface mais sofisticada, de modo a permitir a edição das posições gravadas, facilitando a utilização pelo usuário, a construção de um modelo com mais graus de liberdade ou ainda a implementação das diversas técnicas de modelagem e controle existentes para diversos fins, porém não implementadas para esta aplicação específica.

## 7. REFERÊNCIAS

- Craig, J. J., 1986, “Introduction to Robotics Mechanics and Control”, Addison Wesley Longman, EUA, 450 p.
- Callister, W. D., 2002, “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução”, LTC, São Paulo-SP, pp. 258.
- Inprise Co., 2000, “Borland C++ Builder 5 for Windows 2000/98/95/NT Developer’s Guide”, Disponível em <[http://www.4shared.com/get/79839526/c5c27cd4/Ebook\\_-\\_Borland\\_C\\_Builder\\_5\\_De.html](http://www.4shared.com/get/79839526/c5c27cd4/Ebook_-_Borland_C_Builder_5_De.html)>. Acesso em 20 set. 2009
- Mittal, R. K. 2006, “Robotics and Control”, Tata McGraw-Hill, Nova Delhi, Índia, 489 p.
- Rosário, J. M., 2005, “Princípios de Mecatrônica”, Pearson Prentice Hall, São Paulo-SP, 371p.
- Santos, V. M. F., 2003, “Apostila - Robótica Industrial”, Universidade de Aveiro, Aveiro-Portugal, 166 p.
- Silva, J. C. S., Linder, M., Irmão, M. A. S., Silva R. P., 2006, “Modelagem Cinemática de um Robô Manipulador”, XXXIV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Passo Fundo – MG.
- TowerPro Inc, “MG995 Servo specification”. Disponível em: <<http://www.towerpro.com.tw/viewitem1.asp?sn=601&área=50&cat=163>>. Acesso em 23 set. 2009.



## DEVELOPMENT OF AN DIDACTICAL ANTROPOMORPHIC MANIULATOR ROBOT CONTROLLED BY COMPUTER

**CÓDIGO DO RESUMO: CON10-1174**

First Author's Name, e-mail<sup>1</sup>

Second Author's Name, e-mail<sup>2</sup>

Third Author's Name, e-mail<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institution and address for third author

<sup>2</sup>Institution and address for third author

**Abstract.** *The study of industrial robotics in higher education institutions, when it comes to practical situations is often limited to tracks planning and the definition of field parameters to control a manipulator robot. The track planning is a critical step for the implementation of the tasks performed by a manipulator, but the student rarely have access to this, so they have to use copyrighted simulation software to train. Still focused in the educational environment, the student does not have access to algorithms and techniques used by manufacturers of robots for its effective control, difficulting the development of projects that involve such techniques. Assuming for the structural issue, it is important to note that most manipulator have high cost, making it impossible for most institutions buying a robot only to study how it is built. This work deals with the development of a anthropomorphic manipulator robot for didactical purposes, and a software for your control and sequencing of positions, which makes it possible to use it in the classroom, aggregating the cross-country tracks planning theory vista software simulation.*

**Keywords:** *Manipulator Robots; Antropomorphic Robots; Industrial Robots; Educational Robotics.*