

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**THIAGO DE MOURA SALLES MOREIRA**

**CONSTRUÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE  
DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO PLANAR DE  
DOIS GRAUS DE LIBERDADE**

**VIÇOSA  
2014**

**THIAGO DE MOURA SALLES MOREIRA**

**CONSTRUÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE  
DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO PLANAR DE  
DOIS GRAUS DE LIBERDADE**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão

VIÇOSA  
2014



**THIAGO DE MOURA SALLES MOREIRA**

**CONSTRUÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM  
MANIPULADOR ROBÓTICO PLANAR DE DOIS GRAUS DE  
LIBERDADE**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de agosto de 2014.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão - Orientador  
Universidade Federal de Viçosa

---

Eng. B.Sc. Rafael Iria Rodrigues - Membro  
Universidade Federal de Viçosa

---

Eng. B.Sc. Daniel Khéde Dourado Villa - Membro  
Universidade Federal de Viçosa

*Aos meus avós, Nena e José de Moura, que estão ao lado de Deus neste momento  
olhando por toda a família.*

# *Agradecimentos*

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Margarida e Antonio, que se empenharam durante todos esses anos em me dar uma boa educação, possibilitando com que este dia fosse possível. À minha irmãzinha, Mariana, que sempre foi a melhor irmã do mundo. Obrigado por tudo que vocês fizeram e fazem por mim.

À minha namorada, Fe, por ter tornado este ano ainda mais especial. Obrigado pela compreensão, por todas as palavras de apoio e pela ajuda ao longo desses meses.

Aos meus tios, Helder e Conceição, que me acolheram em sua casa do primeiro dia de aula até o último. O meu muito obrigado é pouco perto do que vocês fizeram.

Aos amigos da ELT pela amizade e companheirismo desde 2008. Obrigado pelos vários momentos de risadas e descontrações.

Aos professores do DEL pelos ensinamentos.

*“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.”*

***Thomas A. Edison***

# *Resumo*

O trabalho desenvolvido envolve o projeto, a construção, a instrumentação e o controle de um manipulador robótico planar de dois graus de liberdade. Como tal manipulador tem como característica o movimento linear de suas juntas, utiliza-se o conjunto corredeira/cremalheira/engrenagem e servo motores como atuadores para reproduzir este movimento. Potenciômetros multivoltas são usados para realizar o sensoriamento das variáveis articulares. Uma interface gráfica é projetada no *software* MATLAB, a fim de comandar o manipulador fornecendo o *set point* desejado da malha de controle para um microcontrolador PIC 18F4550 por comunicação serial. Na interface, é possível escolher entre as cinemáticas direta e inversa para o posicionamento do efetuador. Para a cinemática direta é utilizada uma malha de controle aberta, na qual os comandos são enviados através de botões (direita, cima, esquerda e baixo). Para a cinemática inversa usa-se uma malha de controle fechada, na qual o parâmetro de entrada é a posição desejada no espaço. Através de leituras sucessivas das tensões nos potenciômetros e da comparação com o *set point*, o microcontrolador habilita os servo motores para a correção caso a malha apresente erro. Por fim, a interface também disponibiliza a visualização em 3D e em tempo real do manipulador se movendo, bem como um gráfico que mostra a posição e trajetória do efetuador.

# *Sumário*

## **Lista de Figuras**

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                    | <b>9</b>  |
| 1.1      | Tipos de Juntas . . . . .                            | 10        |
| 1.2      | Efetuator . . . . .                                  | 11        |
| 1.3      | Espaço de Trabalho . . . . .                         | 12        |
| 1.4      | Geometria dos Manipuladores . . . . .                | 12        |
| 1.5      | Cinemática Direta . . . . .                          | 15        |
| 1.6      | Cinemática Inversa . . . . .                         | 17        |
| 1.7      | Precisão <i>versus</i> Repetibilidade . . . . .      | 18        |
| 1.8      | Objetivo Geral . . . . .                             | 18        |
| <b>2</b> | <b>Materiais e Métodos</b>                           | <b>20</b> |
| 2.1      | Projeto do Manipulador . . . . .                     | 20        |
| 2.2      | Construção e Instrumentação do Manipulador . . . . . | 21        |
| 2.3      | Interface Gráfica . . . . .                          | 23        |
| <b>3</b> | <b>Resultados e Discussões</b>                       | <b>27</b> |
| <b>4</b> | <b>Conclusões</b>                                    | <b>30</b> |
|          | <b>Referências</b>                                   | <b>31</b> |

# *Lista de Figuras*

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | A robótica como uma integração de diferentes áreas clássicas. . . . .  | 10 |
| 2  | Simbologia para as juntas. . . . .   | 11 |
| 3  | Manipulador de 6DOF com os possíveis movimentos (no punho) para orientação. . . . .                                  | 12 |
| 4  | Manipulador cartesiano. . . . .  | 13 |
| 5  | Manipulador cilíndrico. . . . .  | 13 |
| 6  | Manipulador esférico. . . . .  | 14 |
| 7  | Manipulador SCARA. . . . .   | 14 |
| 8  | Manipulador articulado. . . . .  | 15 |
| 9  | Problema da cinemática direta para um manipulador robótico planar. . .   | 16 |
| 10 | Convenção de DH para dois sistemas de coordenadas arbitrários. . . . .   | 17 |
| 11 | Problema da cinemática inversa para um manipulador robótico planar. . .  | 17 |
| 12 | Diferença entre precisão e repetibilidade. . . . .   | 18 |
| 13 | Esboço do manipulador no <i>software</i> MATLAB. . . . .   | 20 |
| 14 | Conjunto corredeira/cremalheira/engrenagem usado para converter movimento rotacional em linear. . . . .              | 22 |
| 15 | Eixo comum às corredeiras paralelas para garantir a transferência de torque do servo motor. . . . .                  | 23 |
| 16 | Adaptação do potenciômetro ao sistema para realizar o sensoriamento das variáveis articulares. . . . .               | 23 |
| 17 | Manipulador robótico planar de dois graus de liberdade. . . . .  | 23 |
| 18 | Interface gráfica criada no <i>software</i> MATLAB para comandar o manipulador através da cinemática direta. . . . . | 24 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 19 | Interface gráfica criada no <i>software</i> MATLAB para comandar o manipulador através da cinemática inversa. . . . . | 25 |
| 20 | Malha de controle fechada utilizada na cinemática inversa. . . . .  | 25 |
| 21 | Trajectoria realizada pelo efetuador. . . . .   | 27 |
| 22 | Esboço do manipulador ao final do posicionamento. . . . .   | 28 |
| 23 | Análise de precisão e repetibilidade no deslocamento de um ponto a outro. . . . .                                     | 29 |
| 24 | Análise de precisão e repetibilidade no deslocamento de uma sequência de pontos. . . . .                              | 29 |

# 1 *Introdução*

Desde a sua origem, o ser humano sempre fez uso de ferramentas e utensílios que o auxiliaram na realização de diversas atividades cotidianas relacionadas às suas necessidades de sobrevivência. Com o passar dos anos e com a sua evolução, o homem passou a se preocupar cada vez mais em aperfeiçoar esses instrumentos como também a criar outros que estivessem voltados não apenas para questões de sobrevivência [1].

A partir da formação das grandes civilizações, a demanda por tecnologia passou a estar presente e ser uma constante na vida das pessoas. Assim, o ser humano se deparou com a grande necessidade de desenvolver máquinas que pudessem substituí-lo na linha de produção com o intuito de otimizar o processo, e não apenas reproduzi-lo.

A história da automação industrial é caracterizada por períodos de rápidas mudanças. Seja como uma causa ou, talvez, um efeito, estas mudanças nas técnicas de automação parecem estar intimamente ligadas à economia mundial [2]. A máquina a vapor desenvolvida por James Watt no século XVIII propiciou um progresso elevado na mecanização dos processos produtivos, e contribuiu para a chamada revolução industrial.

No início do século XX, Henry Ford com o sistema de linha de produção denominado fordismo fez uso da chamada automação rígida. Sua principal característica é a fabricação em massa de produtos de um mesmo gênero [3]. Cada componente do sistema possui uma função específica ou um conjunto limitado de funções, sem uma possível modificação de forma simples.

Com o crescente avanço tecnológico das últimas décadas, as indústrias passaram a buscar uma maior flexibilidade, produtividade e qualidade, menores custos operacionais, saúde e segurança em seus processos [4]. Desta forma, surgiu a chamada automação flexível, na qual uma máquina (por exemplo, um manipulador) pode ser facilmente programada e alterada, possibilitando uma maior variedade na produção.

O termo “robô” foi inicialmente introduzido pelo dramaturgo tcheco Karel Capek em 1920 em sua peça *Rossum’s Universal Robots*. Deriva da palavra tcheca *robota* que

significa “trabalho forçado”.

O Instituto de Robótica da América, em inglês *Robot Institute of America* (RIA), define um robô como um manipulador reprogramável multifuncional, projetado para movimentar material, ferramentas ou dispositivos especializados através de movimentos programáveis variados para desenvolver uma variedade de tarefas. Entretanto, esta definição não faz referência aos robôs móveis, ou seja, robôs que possuem uma base variável.

Basicamente, um manipulador robótico é um robô controlado por computador, composto por membros rígidos conectados em série por juntas em uma cadeia cinemática aberta. Uma das extremidades da cadeia é fixada em uma base de suporte, enquanto a outra é equipada com um efetuador, e livre para se movimentar e executar alguma tarefa [5].

A robótica (termo criado pelo escritor Isaac Asimov na década de 40) é o campo da ciência que se dedica ao estudo dos robôs, e envolve a integração de diferentes áreas clássicas [6]. São elas a engenharia elétrica, teoria de controle, ciência da computação e engenharia mecânica (Figura 1).

## 1.1 Tipos de Juntas

Conforme mencionado anteriormente, as juntas são responsáveis por conectar dois membros. Elas podem ser rotacionais ou prismáticas, como ilustrado na Figura 2. Assim, o movimento relativo entre dois membros é de rotação para uma junta rotacional (cujas variáveis associadas são ângulos) e de translação (ou linear) para uma junta prismática (cujas variáveis associadas são deslocamentos).

As juntas são usualmente instrumentadas com sensores de posição, que permitem a

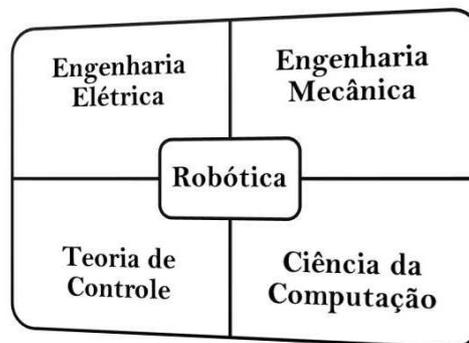


Figura 1: A robótica como uma integração de diferentes áreas clássicas.

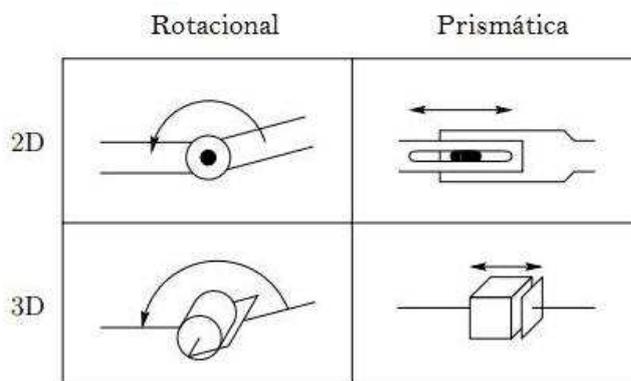


Figura 2: Simbologia para as juntas.

medição da posição relativa entre dois membros adjacentes [2].

O número de graus de liberdade, em inglês *degrees of freedom* (DOF), é igual ao número de variáveis independentes que são especificadas, a fim de posicionar e orientar todos os membros do manipulador. Em outras palavras, o número de juntas determina o número de DOF. Quanto maior é o número de DOF, mais complicadas são a cinemática, a dinâmica e o controle [7].

Para que um manipulador em um espaço tridimensional possa atingir todos os pontos em seu espaço de trabalho com uma orientação arbitrária, é necessário que o mesmo possua 6DOF independentes, sendo 3DOF para posicionamento e 3DOF para orientação (normalmente no punho - *Roll*, *Pitch* e *Yaw*), como ilustrado na Figura 3.

Um manipulador é dito redundante quando apresenta mais de 6DOF, ou quando apresenta mais DOF que o necessário para definir uma postura, dependendo da aplicação.

## 1.2 Efetuador

O efetuador é o elemento que permite a interação (ou que faz a interface) entre o manipulador e o meio que o cerca. Pode ser do tipo garra ou ferramenta [8].

A garra tem como função principal pegar um determinado objeto, transportá-lo até uma posição pré-estabelecida e, após atingir tal posição, soltá-lo. Já a ferramenta realiza uma ação sobre uma peça sem necessariamente manipulá-la [1].

É importante esclarecer que o efetuador não adiciona grau de liberdade ao manipulador.

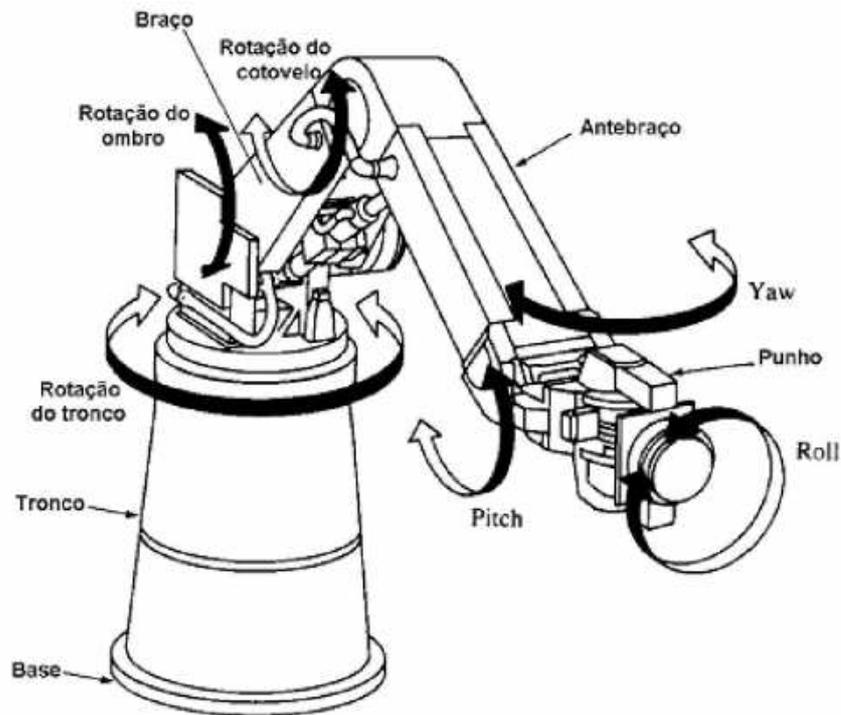


Figura 3: Manipulador de 6DOF com os possíveis movimentos (no punho) para orientação.

## 1.3 Espaço de Trabalho

O espaço de trabalho é o volume total que indica os limites alcançáveis pelo efetuador. É definido pela configuração geométrica do manipulador e pelas restrições físicas das juntas [9].

## 1.4 Geometria dos Manipuladores

A maioria dos manipuladores industriais atuais possuem 6DOF ou menos. Estes manipuladores são usualmente classificados em relação à sua cinemática, tomando como base as suas três primeiras juntas (usadas para o posicionamento). Por sua vez, o punho (usado para a orientação) é descrito separadamente. Desta forma, os tipos geométricos são:

### **Cartesiano**

A geometria cartesiana (Figura 4) é formada por três juntas prismáticas, cujos eixos são mutualmente ortogonais. Esta estrutura apresenta uma boa rigidez mecânica. A precisão de posicionamento do punho é constante em todo o espaço de trabalho (que é um

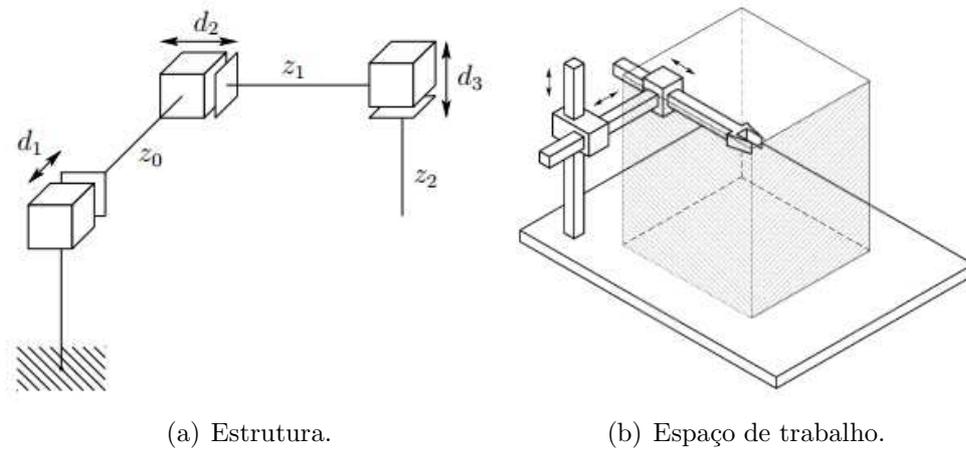


Figura 4: Manipulador cartesiano.

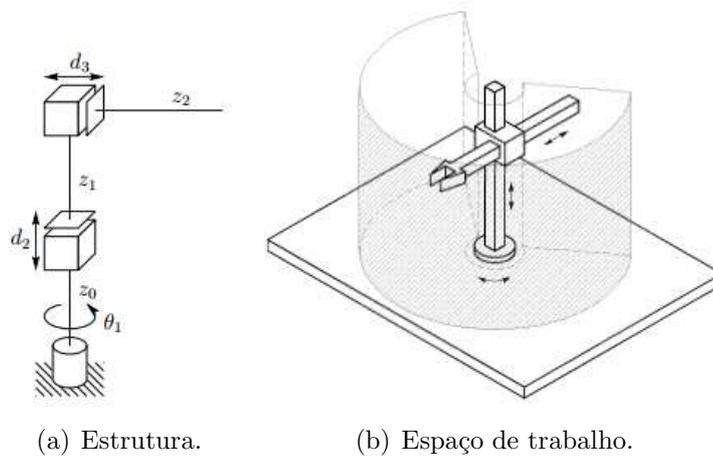


Figura 5: Manipulador cilíndrico.

paralelepípedo retangular). Como oposição à elevada precisão possui uma baixa destreza, uma vez que todas as juntas são prismáticas.

Para o presente trabalho, esta é a geometria escolhida para a construção do manipulador.

### Cilíndrico

A geometria cilíndrica (Figura 5) difere-se da cartesiana apenas na primeira junta, a qual é substituída por uma junta rotacional. Esta estrutura também apresenta uma boa rigidez mecânica. A precisão de posicionamento do punho decresce com o aumento do traço horizontal (movimento da junta com eixo paralelo ao plano na Figura 5). Seu espaço de trabalho é a porção de um cilindro oco.

### Esférico

A geometria esférica (Figura 6) difere-se da cilíndrica apenas na segunda junta, a qual

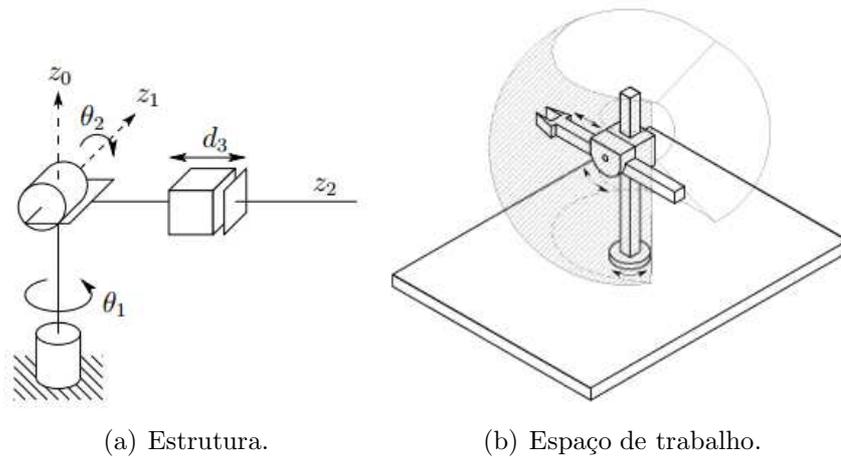


Figura 6: Manipulador esférico.

é substituída por uma junta rotacional. Esta estrutura apresenta uma rigidez mecânica menor do que as estruturas anteriores e uma construção mais complexa. A precisão de posicionamento do punho decresce com o aumento do traço radial (movimento da junta com eixo paralelo ao plano na Figura 6). Seu espaço de trabalho é uma esfera oca.

### SCARA - *Selective Compliance Assembly Robot Arm*

A geometria especial SCARA (Figura 7) é formada por duas juntas rotacionais e uma prismática, de forma que todos os eixos de movimento são paralelos. Esta estrutura apresenta uma elevada rigidez mecânica para cargas verticais. A precisão de posicionamento do punho decresce à medida em que a distância do mesmo para a primeira junta aumenta.

### Articulado ou Antropomórfico

A geometria articulada (Figura 8) é formada por três juntas rotacionais. O eixo rotacional da primeira junta é ortogonal aos eixos das outras duas, que são paralelos entre si. Em virtude da sua similaridade com o braço humano, a segunda junta é denominada

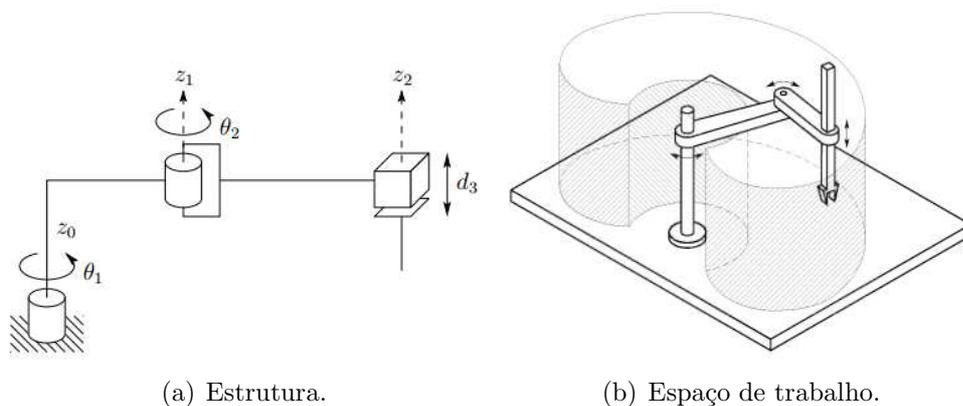


Figura 7: Manipulador SCARA.

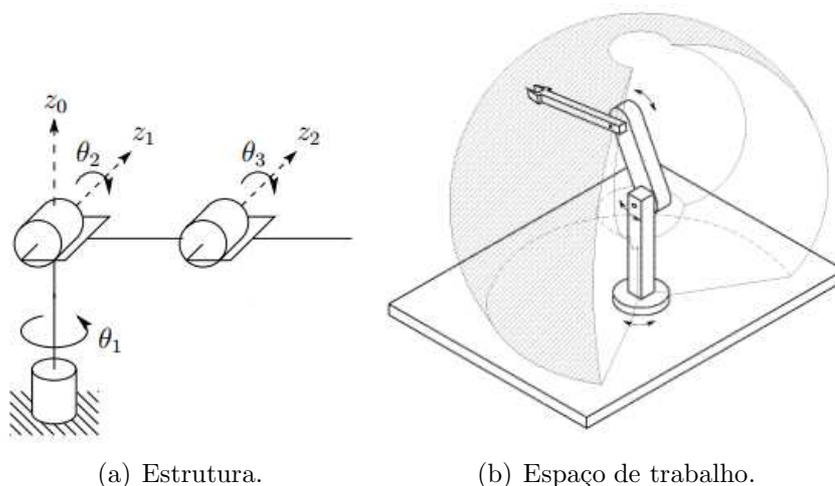


Figura 8: Manipulador articulado.

de junta do ombro e a terceira junta é denominada de junta do cotovelo, pois a mesma conecta o braço ao antebraço. Esta é a estrutura de maior destreza, uma vez que todas as juntas são rotacionais. Seu espaço de trabalho é a porção de uma esfera oca.

Os manipuladores descritos anteriormente possuem membros conectados em série em uma cadeia cinemática aberta. Uma classe distinta de manipulador é o **paralelo**, no qual os membros estão conectados em uma cadeia cinemática fechada. Entende-se por cadeia cinemática fechada quando duas ou mais cadeias cinemáticas independentes estão conectadas à base do efetuador. Assim, esta característica pode resultar em uma maior rigidez estrutural e, portanto, em uma maior precisão com relação aos manipuladores de cadeia cinemática aberta [10].

## 1.5 Cinemática Direta

O problema da cinemática direta envolve a determinação da posição e orientação do efetuador dados os valores das variáveis das juntas.

Para realizar tal análise adota-se um sistema fixo de coordenadas, no qual o manipulador é referenciado. A Figura 9 ilustra um manipulador robótico planar com seu respectivo sistema de referência.

Representar a posição e orientação do efetuador na Figura 9 não é uma tarefa muito difícil. Entretanto, esta representação pode se tornar bastante complexa para um manipulador com mais graus de liberdade. Para contornar este problema, um conjunto de convenções, denominado de Denavit-Hartenberg (DH), foi desenvolvido a fim de fornecer

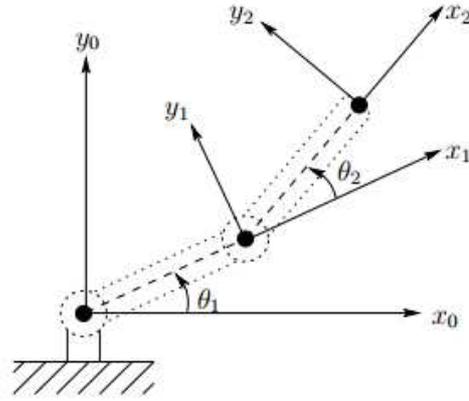


Figura 9: Problema da cinemática direta para um manipulador robótico planar.

um procedimento sistemático de solução.

A convenção de DH visa apresentar uma transformação homogênea  $A_i$  para cada junta. Uma transformação homogênea combina as operações de rotação e translação em uma única matriz de multiplicação, e é composta pelo conjunto de quatro transformações básicas. A partir da Figura 10 tem-se que

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (1.1)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i}C_{\alpha_i} & S_{\theta_i}S_{\alpha_i} & a_iC_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i}C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i}S_{\alpha_i} & a_iS_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1, \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

onde  $a_i$ ,  $d_i$ ,  $\alpha_i$  e  $\theta_i$  são parâmetros de DH, e indicam o comprimento, a excentricidade, a torção e o ângulo de rotação da junta, respectivamente.

Sabe-se que não é possível representar uma transformação homogênea arbitrária usando somente quatro parâmetros. Daí, supõe-se que existe uma única matriz de transformação  $A$  que leva o sistema de coordenadas 1 ao sistema de coordenadas 0, desde que

**DH1:** o eixo  $x_1$  seja perpendicular ao eixo  $z_0$ .

**DH2:** o eixo  $x_1$  intercepte o eixo  $z_0$ .

Estas duas propriedades, ilustradas na Figura 10, garantem que existem valores únicos de  $a$ ,  $d$ ,  $\alpha$  e  $\theta$  que satisfazem (1.2).

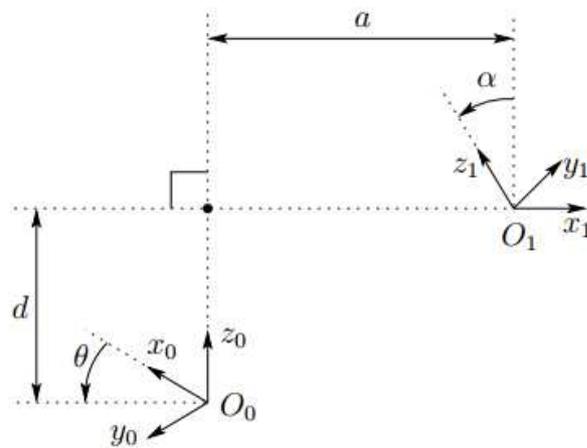


Figura 10: Convenção de DH para dois sistemas de coordenadas arbitrários.

## 1.6 Cinemática Inversa

O problema da cinemática inversa envolve a determinação dos valores das variáveis das juntas dados a posição e orientação do efetuador.

Uma vez que as equações da cinemática direta são não lineares, uma solução para a cinemática inversa não é fácil de ser encontrada e, geralmente, não existe uma única solução. Tomando como exemplo o manipulador robótico planar da Figura 11, existem duas soluções possíveis. No caso, são denominadas de cotovelo para cima e cotovelo para baixo.

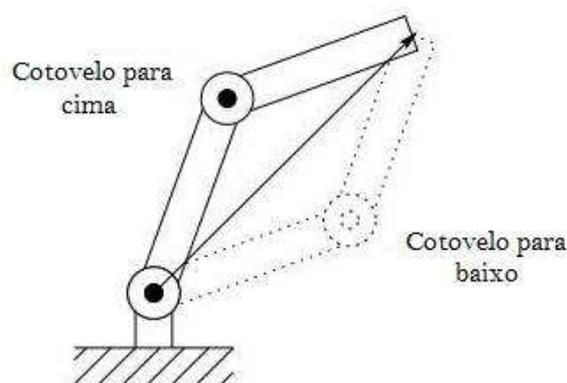


Figura 11: Problema da cinemática inversa para um manipulador robótico planar.

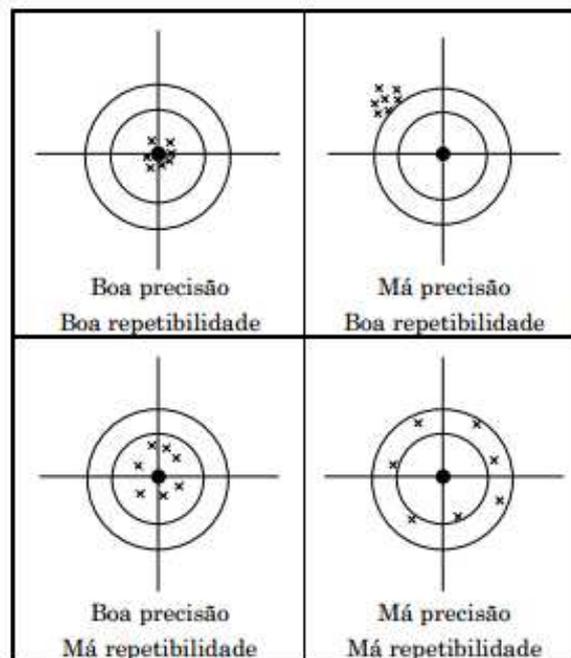


Figura 12: Diferença entre precisão e repetibilidade.

## 1.7 Precisão *versus* Repetibilidade

**Precisão** é a capacidade de um robô de atingir uma posição desejada no espaço de trabalho com respeito a um sistema de referência fixo. Em outras palavras, é uma medida da eficiência com que um robô realiza os movimentos inerentes a uma tarefa.

**Repetibilidade** é a capacidade de um robô de atingir uma posição desejada no espaço de trabalho partindo de uma mesma condição inicial. Em outras palavras, é a capacidade de um robô realizar um mesmo movimento.

A Figura 12 ilustra a diferença entre os dois conceitos.

## 1.8 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo controlar um manipulador robótico planar de dois graus de liberdade através das cinemáticas direta e inversa a partir de uma interface gráfica. Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Projetar e construir um manipulador robótico planar de dois graus de liberdade;
- Instrumentar o manipulador, a fim de obter o valor das variáveis articulares;

- 
- Representar o manipulador através da cinemática direta utilizando a convenção de DH;
  - Desenvolver uma interface gráfica para comunicação entre um PC e o manipulador;
  - Propor uma estratégia de controle em malha aberta para a cinemática direta;
  - Propor uma estratégia de controle em malha fechada para a cinemática inversa; e,
  - Validar experimentalmente o manipulador desenvolvido.

## 2 *Materiais e Métodos*

### 2.1 Projeto do Manipulador

Visando obter uma compreensão primária acerca das tarefas que precisam ser desenvolvidas, inicialmente são feitas representações gráfica e matemática do manipulador.

A representação gráfica é feita com o auxílio da função “*patch*” no *software* MATLAB. Primeiro, para cada face de cada objeto são indicados todos os seus vértices. Então, o comando “*patch*” é executado para ligar tais vértices e formar a face em questão. O conjunto de faces representa o objeto tridimensional. A Figura 13 ilustra o esboço do manipulador obtido. As diversas partes mecânicas que o compõem estão explicadas, detalhadamente, na seção seguinte.

Com base na Figura 13 é possível representar o manipulador através da cinemática direta utilizando a convenção de DH. É importante observar que as duas condições de DH são satisfeitas. Assim, chega-se na Tabela 1.

A partir de (1.2) e da Tabela 1 obtêm-se

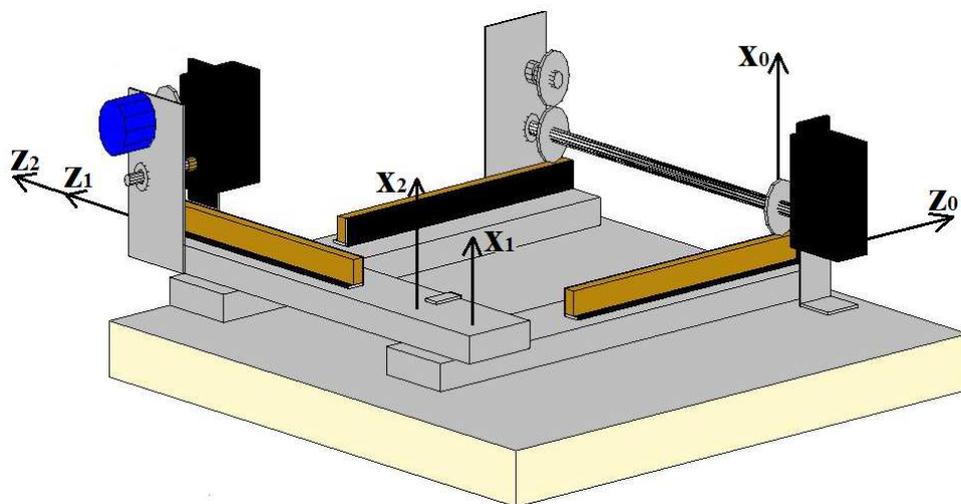


Figura 13: Esboço do manipulador no *software* MATLAB.

Tabela 1: Parâmetros de DH do manipulador.

|   | $a_i$ | $d_i$   | $\alpha_i$  | $\theta_i$ |
|---|-------|---------|-------------|------------|
| 1 | 0     | $d_1^*$ | $-90^\circ$ | $0^\circ$  |
| 2 | 0     | $d_2^*$ | $0^\circ$   | $0^\circ$  |

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$A_2^0 = A_1^0 A_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

## 2.2 Construção e Instrumentação do Manipulador

Para a construção e instrumentação do manipulador são utilizados os seguintes materiais:

- Uma base de madeirite de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ ;
- Uma placa de alumínio de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ ;
- Três corrediças telescópicas de  $250 \text{ mm}$ ;
- Três cremalheiras de  $150 \text{ mm}$  com espaçamento entre os dentes de  $1 \text{ mm}$ ;
- Três engrenagens de com espaçamento entre os dentes de  $1 \text{ mm}$ ;
- Um eixo de  $220 \text{ mm}$  e diâmetro de  $5 \text{ mm}$ ;
- Um eixo de  $50 \text{ mm}$  e diâmetro de  $5 \text{ mm}$ ;

- Dois servo motores towerpro mg995; e,
- Dois potenciômetros multivoltas de  $10\text{ k}\Omega$ ;

A base de madeirite juntamente com a placa de alumínio formam o alicerce do projeto. Como o manipulador é do tipo cartesiano, necessita-se de um sistema que converta movimento rotacional (natural do servo motor) em movimento linear. Desta forma, é utilizado o conjunto corredeira/cremalheira/engrenagem, como ilustrado na Figura 14. Vê-se que a cremalheira é fixada sobre a corredeira, a fim de poder se movimentar livremente à medida que o servo motor gira. Este último, por sua vez, é fixo em relação ao eixo em que ele origina o movimento.

O movimento no eixo de baixo (de acordo com a Figura 14) é realizado por duas corredeiras paralelas de modo a fornecer suporte para o outro eixo. Devido ao comprimento e peso do conjunto corredeira/cremalheira no eixo de cima existiria um momento considerável de seus pontos mais extremos para somente uma corredeira no eixo de baixo. Portanto, é necessário um eixo comum às corredeiras paralelas para transferir, igualmente, o torque do servo motor. Isto pode ser visto na Figura 15.

Por sua vez, o potenciômetro multivoltas é adaptado de forma que todo o movimento linear da junta (no caso, o conjunto corredeira/cremalheira) pode ser transferido ao seu eixo. Para isto, fixa-se uma engrenagem em tal eixo que interage com a engrenagem no eixo do servo motor, como ilustrado na Figura 16.

Por fim, é importante esclarecer que os servo motores utilizados na verdade se comportam como motores de corrente contínua. Tais servos são “destravados” para rotacionarem 360 graus, e seus potenciômetros internos bem como os circuitos de controle são retirados.

A Figura 17 ilustra o manipulador construído e devidamente instrumentado.



Figura 14: Conjunto corredeira/cremalheira/engrenagem usado para converter movimento rotacional em linear.

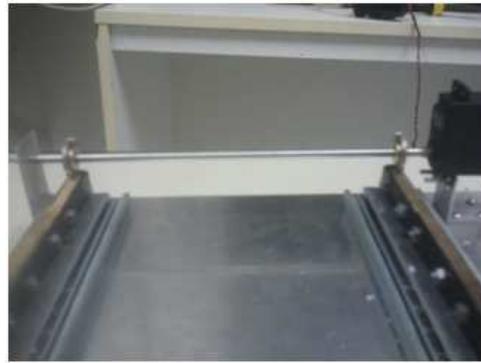


Figura 15: Eixo comum às corredeiras paralelas para garantir a transferência de torque do servo motor.

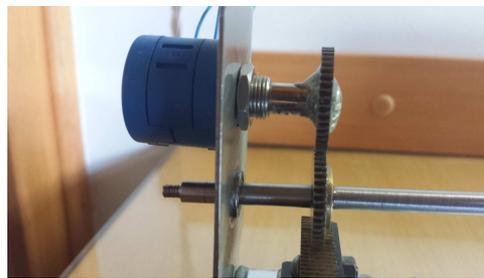


Figura 16: Adaptação do potenciômetro ao sistema para realizar o sensoriamento das variáveis articulares.

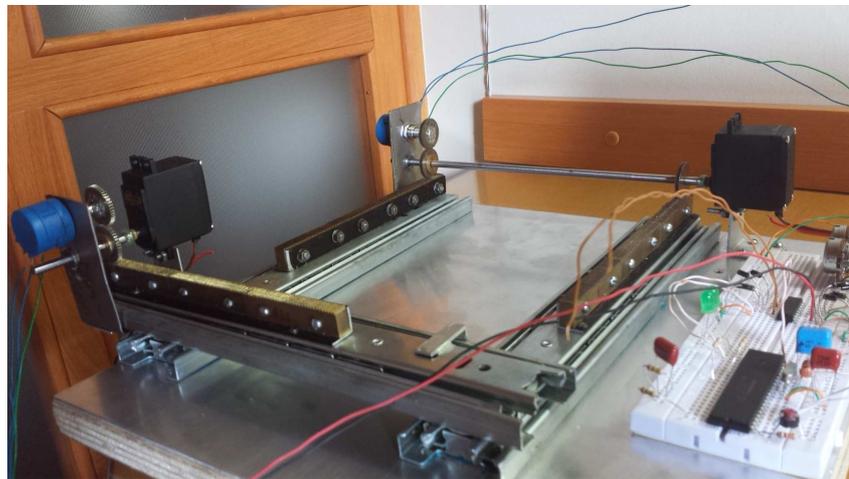


Figura 17: Manipulador robótico planar de dois graus de liberdade.

## 2.3 Interface Gráfica

A parte final do trabalho envolve a criação de uma interface gráfica no *software* MATLAB em um computador, a fim de comandar o manipulador fornecendo o *set point* desejado da malha de controle para um microcontrolador PIC 18F4550 por comunicação serial.

A comunicação serial utilizada é a RS-232 padrão. Entretanto, devido ao fato de alguns computadores não possuírem uma porta serial, a mesma é “emulada” em uma porta USB. Assim, esta comunicação também é denominada de USB CDC (USB *communications device class*). Do ponto de vista prático, o dispositivo quando plugado na porta USB é conectado a uma linha de comunicação RS-232 e reconhecido pelo computador como uma porta RS-232 tradicional.

A Figura 18 ilustra a interface gráfica desenvolvida. Basicamente, ela é dividida em três regiões (indicadas na Figura 18). A região indicada por “1” representa o setor de avisos, que permite a interação da interface com o operador do sistema. Este setor é controlado pelo menu, o qual é usado para selecionar a cinemática desejada. A região indicada por “2” representa o setor de configurações. Como falado, através do menu seleciona-se o modo de posicionamento desejado do efetuador, seja através da cinemática direta ou cinemática inversa. Desta forma, um conjunto apropriado de ferramentas é habilitado de maneira a permitir o envio de algum comando ao manipulador. No caso, a Figura 18 mostra a configuração para a cinemática direta. A aparência da interface direcionada para a cinemática inversa pode ser vista na Figura 19. Uma ferramenta útil que está sempre disponível é a opção de visualizar em tempo real a posição do efetuador (indicada pela letra “A” na Figura 18), auxiliando seu posicionamento. Isto somente é possível através da função “*timer*” do MATLAB. Com tal função um evento pode ser tratado a cada período de tempo (ou ciclo de *scan*). Para a interface desenvolvida é utilizado um período de 40 *ms*.

Para a cinemática direta é utilizada uma malha de controle aberta, na qual os co-

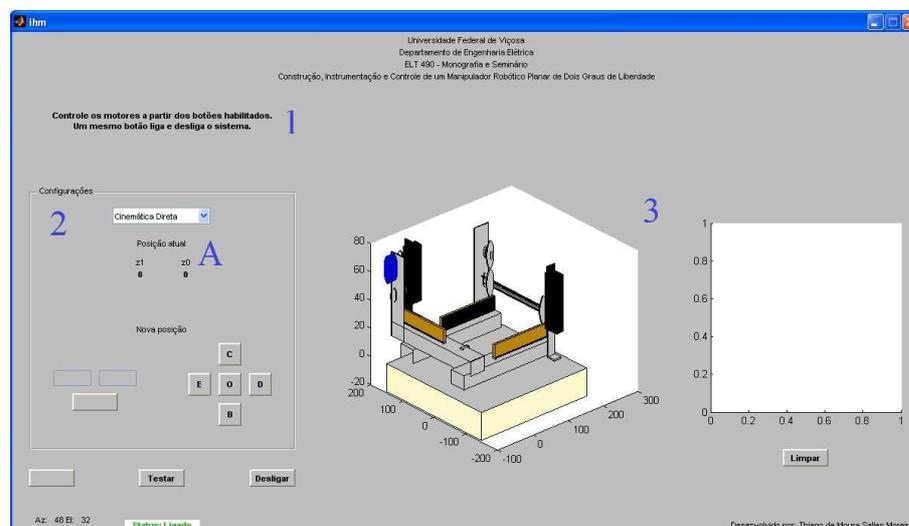


Figura 18: Interface gráfica criada no *software* MATLAB para comandar o manipulador através da cinemática direta.

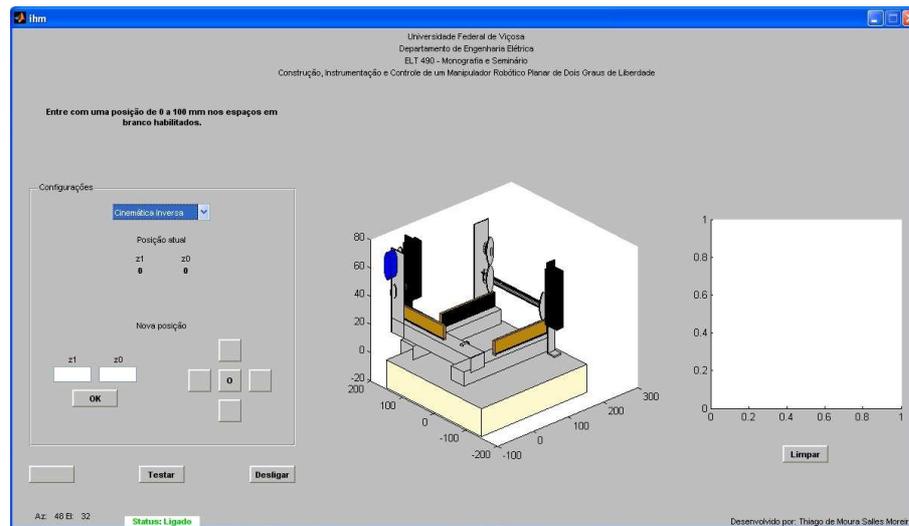


Figura 19: Interface gráfica criada no *software* MATLAB para comandar o manipulador através da cinemática inversa.

mandos são enviados através de botões (D - direita, C - cima, E - esquerda e B - baixo). Como falado na Seção 1.5, a posição e orientação do efetuador são determinados a partir das variáveis articulares. Portanto, o operador liga os motores, posiciona o efetuador (escolhendo as variáveis articulares) e depois desliga os motores. Um mesmo botão liga e desliga os mesmos, de acordo com o sentido desejado.

Para a cinemática inversa usa-se uma malha de controle fechada (Figura 20), na qual o parâmetro de entrada é a posição desejada no espaço. Como falado na Seção 1.6, as variáveis articulares são determinadas a partir da posição e orientação do efetuador. Portanto, uma vez escolhida uma nova posição, o microcontrolador compara o *set point* com as tensões nos potenciômetros e habilita os motores de acordo com o erro. Se pelo menos um dos motores estiver em movimento, o microcontrolador realiza este procedimento até que o erro seja nulo, caracterizando que a posição desejada foi atingida. O controle utilizado nesta cinemática é do tipo proporcional com ganho unitário.

A região indicada por “3” representa o setor de gráficos. Neste setor é possível analisar visualmente o comportamento do manipulador como um todo. O primeiro gráfico (localizado no centro da interface) permite uma visualização em 3D do manipulador, e

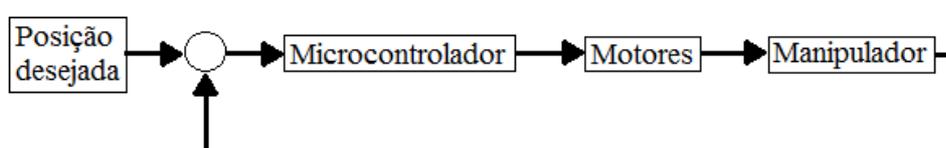


Figura 20: Malha de controle fechada utilizada na cinemática inversa.

---

movimenta-se em tempo real com o mesmo (também através da função “*timer*”). O segundo gráfico funciona como um *zoom* do espaço de trabalho do esboço do manipulador. Nele pode-se ver a posição e trajetória em tempo real do efetuador.

### 3 *Resultados e Discussões*

Para validar experimentalmente o manipulador foi planejado um percurso, a fim de testar sua construção, instrumentação e controle. Assim, a cinemática inversa foi utilizada uma vez que somente esta fazia uso de uma malha de controle fechada, utilizando os potenciômetros para sensoriar as variáveis articulares.

O percurso escolhido foi definido pelos lados de um quadrado bem como uma das suas diagonais, formando a sequência de pontos no espaço, em *mm*, (5, 5), (95, 5), (95, 95), (5, 95), (5, 5) e (95, 95). As Figuras 21 e 22 ilustram os resultados obtidos na interface gráfica.

Previamente, na etapa de projeto do manipulador, já era conhecido que o posicionamento do mesmo ficaria limitado pelo passo das engrenagens e, no caso da cinemática inversa, também existiria a restrição da resolução máxima do conversor analógico digital (conversor AD) do microcontrolador PIC. Ou seja, o conversor AD definiria a tensão mínima distinguível, restringindo o erro mínimo possível do controle proporcional. Portanto,

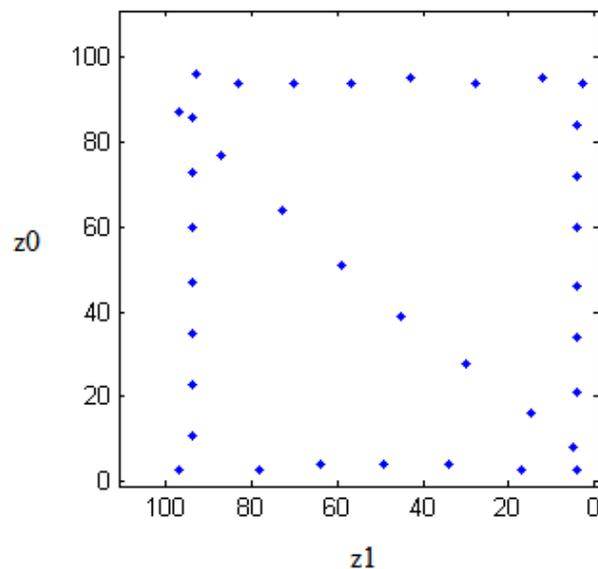


Figura 21: Trajetória realizada pelo efetuador.

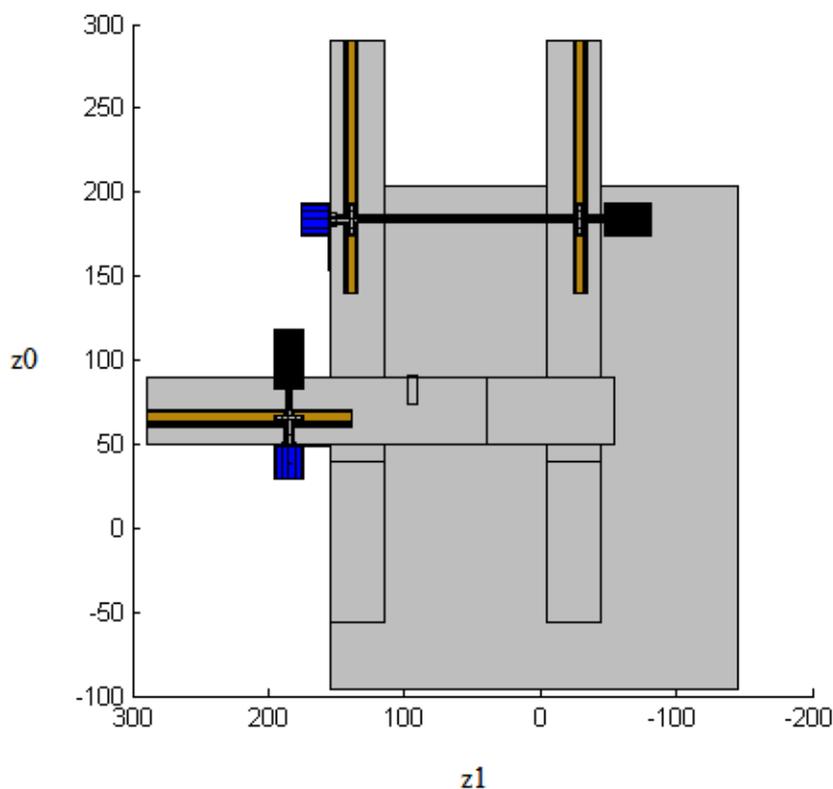


Figura 22: Esboço do manipulador ao final do posicionamento.

tal controle foi definido considerando esses dois fatos. Se somente a limitação mecânica fosse considerada, poderia haver perda de precisão. Caso somente fosse considerado o erro mínimo, poderia ocorrer do passo ser grande o suficiente para tornar o erro imperceptível ao microcontrolador.

Entretanto, também foi observado que a tensão de referência (ou VDD) não estava completamente estável. Desta forma, com qualquer pequena variação, a tensão nas portas analógicas do microcontrolador também variavam. Portanto, a sua lógica interna acabava por fazer uma conversão “equivocada” de tensão para posição, a qual era utilizada pela interface gráfica para gerar os resultados.

Vale a pena lembrar que os dados eram enviados do microcontrolador para a interface gráfica com um período de tempo pré-definido através da função “*timer*”, como explicado na Seção 2.3. Como também falado, esta mesma função era a responsável por esboçar o manipulador em tempo real. Certamente, esta tarefa contribuiu consideravelmente para o aumento do tempo gasto durante a execução da função “*timer*”, antes da mesma poder ser executada novamente em um novo ciclo de *scan*.

Ainda assim, ao final da simulação, a posição “atual” do manipulador mostrada na interface gráfica era de  $(94, 96) \text{ mm}$  (a posição final desejada era de  $(95, 95) \text{ mm}$ , como

falado no início desta seção).

Também, a fim de testar a precisão e repetibilidade do manipulador foram propostos outros dois percursos, como ilustrados nas Figuras 23 e 24. A Figura 23 mostra o deslocamento do ponto  $(0, 0)$  ao  $(50, 50)$  *mm* por quinze vezes consecutivas. Em uma primeira análise observa-se que esta se assemelha a uma curva de histerese. Tal característica é evidenciada em função da velocidade do servo motor no eixo  $z_1$  ser maior que no eixo  $z_0$ . Devido ao fato do ponto final desejado ser  $(50, 50)$  *mm* vê-se que o manipulador não é preciso, porém repetitivo. Já a Figura 24 mostra o deslocamento entre a sequência de pontos, em *mm*,  $(0,0)$ ,  $(50,0)$ ,  $(0,50)$ ,  $(50,50)$  e  $(0,0)$  por cinco vezes sobrepostas. Observe-se que este percurso apresenta desvios entre as repetições, porém é possível verificar a repetibilidade do manipulador.

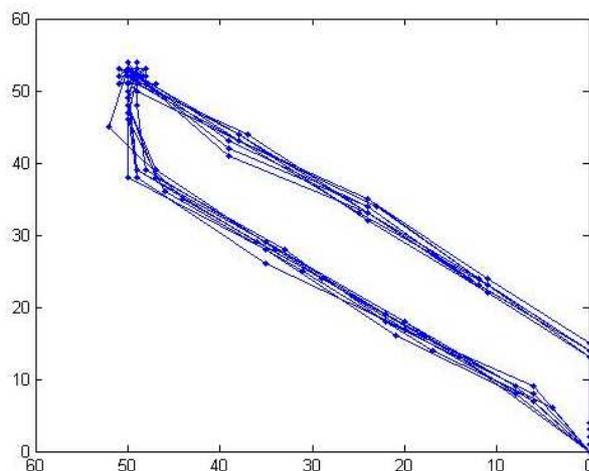


Figura 23: Análise de precisão e repetibilidade no deslocamento de um ponto a outro.

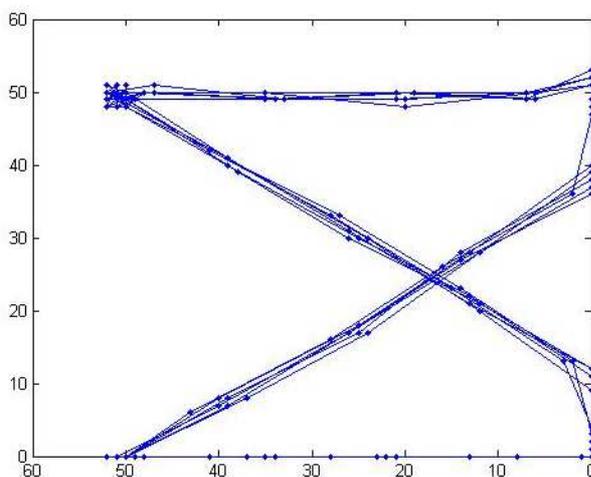


Figura 24: Análise de precisão e repetibilidade no deslocamento de uma sequência de pontos.

## 4 *Conclusões*

Apesar da “simplicidade” no princípio de funcionamento do manipulador, sua construção foi dispendiosa em função da necessidade de converter movimento rotacional (natural do servo motor) em linear. Como falado na Seção 2.2, existia uma preocupação com o momento desenvolvido pelas partes do eixo z1 em relação ao eixo z0 (Figura 22). O peso da cremalheira era considerável a ponto de criar um torque em relação ao ponto fixo na engrenagem, que fazia essa se curvar levemente à medida que o manipulador caminhava no sentido da posição final. Também, foi difícil encontrar uma maneira de manter os eixos dos motores firmes.

A interface gráfica se mostrou completa a ponto de possuir vários recursos de interação com o manipulador. Entretanto, o fato da mesma necessitar de ser atualizada em tempo real com o movimento do efetuador, e principalmente por ter que “redesenhar” constantemente o manipulador, o uso computacional era bastante elevado a ponto de travar o sistema operacional algumas vezes.

Este trabalho alcançou o objetivo de construir, instrumentar e controlar um manipulador robótico, uma vez que o mesmo não foi projetado para uma aplicação específica.

Para trabalhos futuros, seria interessante apurar o controle de posição e implementar um controle de velocidade para fins didáticos e, possivelmente, para alguma aplicação específica. O controle de velocidade serviria para realizar a tarefa de posicionamento, por exemplo, no menor tempo possível, evitando os efeitos indesejados dos desvios de canto. Se o manipulador estivesse realizando uma tarefa de corte em alguma indústria, estes efeitos provavelmente fariam com que as peças fossem perdidas, causando prejuízos.

## *Referências*

- [1] ROMANO, V. F. *Robótica industrial - Aplicação na indústria de manufatura e de processos*. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- [2] CRAIG, J. J. *Introduction to robotics - Mechanics and control*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [3] SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. *Modelling and control of robot manipulators*. São Paulo: Springer Verlag, 2000.
- [4] PIZETTA, I. H. B. *Identificação das posições articulares de um manipulador robótico utilizando processamento digital de imagens*. Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- [5] FU, K. S.; GONZALEZ, R. C.; LEE, C. S. G. *Robotics - Control, sensing, vision and intelligence*. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill, 1987.
- [6] NOF, S. Y. *Handbook of industrial robotics*. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons, 1985.
- [7] SHABANA, A. A. *Computational dynamics*. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons, 2001.
- [8] MURRAY, R. M.; LI, Z.; SASTRY, S. S. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. Florida, EUA: CRC Press, 1994.
- [9] SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. *Robot modeling and control*. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons, 2005.
- [10] SANTOS, J. A. S. *Controle de posição de um braço robótico redundante de quatro graus de liberdade utilizando algoritmos genéticos*. Universidade Federal de Viçosa, 2010.