

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO** 

ESCOLA DE MINAS

COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA

DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



# FILIPE AUGUSTO SANTOS ROCHA

# COMPARAÇÃO ENTRE DINÂMICAS DE CONTROLES EM MALHA ABERTA E EM MALHA FECHADA DE UM MANIPULADOR PRISMÁTICO BIDIMENSIONAL

Ouro Preto, 2016

# FILIPE AUGUSTO SANTOS ROCHA

# COMPARAÇÃO DAS DINÂMICAS DE CONTROLE MALHA ABERTA E MALHA FECHADA EM UM MANIPULADOR PRISMÁTICO BIDIMENSIONAL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior

**Ouro Preto** 

Escola de Minas - UFOP

março de 2016

#### R672c

Rocha, Filipe Augusto Santos.

Comparação entre dinâmicas de controles em malha aberta e em malha fechada de um manipulador prismático bidimensiona [manuscrito] / Filipe Augusto Santos Rocha. - 2016.

60f.: il.: color; grafs.

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Robótica. 2. Robos - Sistemas de controle. 3. Sistemas de controle por realimentação. I. Cocota Júnior, José Alberto Naves. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 681.5

Catalogação: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 11 de março de 2016, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:

Prof. M.Sc. José Alberto Naves Cocota Júnior - Orientador NOV Vie

Prof. M.Sc. João Carlos Vilela de Castro – Professor Convidado

Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas – Professor Convidado

# AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por sempre terem me fornecido suporte, em todas as áreas, para que esse sonho pudesse ser alcançado.

Aos professores que muito me ajudaram a trilhar este caminho e pelas excelentes oportunidades a mim concedidas: Cocota, Adilson, Joca e Ronilson.

À gloriosa República Tonteria, por terem propiciado um excelente ambiente de vivência, tanto academicamente quanto socialmente.

Sem a ajuda de todos vocês, não teria sido possível de travar esta batalha.

"O futuro tem muitos nomes. Para os fracos é o inalcançável. Para os temerosos, o desconhecido. Para os valentes é a oportunidade."

(Victor Hugo)

### **RESUMO**

Sistemas como CNC, impressoras bidimensionais, mesas posicionadoras, dentre outros similares, são muito importantes na indústria atual por aumentarem a precisão e a eficiência em processos como corte a laser, perfuração, montagem de placas eletrônicas e etc. Nesta linha de equipamentos existem as mesas XY, que são manipuladores robóticos bidimensionais de juntas prismáticas. Este trabalho tem como objetivo implementar técnicas de controle em malha aberta e em malha fechada para uma mesa XY que passou por um processo de renovação tecnológica. Posteriormente colher dados de trajetórias utilizando ambas as abordagens propostas e enfim realizar uma discussão sobre os resultados obtidos, comparando os dois métodos de controle. Ao final do trabalho são explicitadas as conclusões referentes ao desenvolvimento de tal projeto e são levantadas ideias para posterior melhoria do trabalho.

Palavras-chave: manipulador robótico bidimensional, retrofit, controle feedforward, MATLAB, Arduino

### ABSTRACT

Systems like CNC, bi-dimensional printers, positioning tables, and others similar, are very important in industry because they increase the precision and efficiency in processes like laser cutting, drilling, electronic-boards assembling and etc. In this kind of equipment, utilizing a bi-dimensional prismatic robotic manipulator called XY table that has been retrofitted, this paper aims to implement open and closed loops control techniques for this table. Further, some data are gathered from equivalent trajectories tests utilizing both of the control methods and a discussion about the obtained results is realized, comparing the two control methods. At the end of the paper some conclusions about the development of the project and ideas for future work are explained.

Keywords: bi-dimensional robotic manipulator, retrofit, feed-forward control, MATLAB, Arduino

# LISTA DE FIGURAS

| Figura 2.1 - Representação simbólica das juntas de um robô                                              | 6             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura 2.2 - Posição e orientação de um corpo rígido em relação a uma base ortonormal O-xyz             | 8             |
| Figura 2.3 - Manipulador "Braço Esférico" com sistemas de coordenadas fixados de acordo com a           |               |
| convenção de Denavit-Hartenberg standard                                                                | 12            |
| Figura 2.4 - Malha de Controle Cinemático                                                               | 16            |
| Figura 2.5 - Exemplificação de acurácia e repetibilidade                                                | 18            |
| Figura 3.1 - Mesa XY utilizada                                                                          | 27            |
| Figura 3.2 - Driver do Motor de Passo                                                                   | 28            |
| Figura 3.3 - Sinais gerados pelo <i>encoder</i> de um eixo                                              | 29            |
| Figura 3.4 - Aiuste de curva do eixo X                                                                  | 32            |
| Figura 3.5 - Aiuste de curva do eixo Y                                                                  | 32            |
| Figura 3.6 - Esquema da malha de controle utilizada                                                     | 33            |
| Figura 3.7 - Curva de reação do motor do eixo X da mesa (azul) e sinal degrau aplicado (vermelho).      | 35            |
| Figura 3.8 - Obtenção dos parâmetros L e T. Curva de reação experimental (linha azul), reta tangen      | ite           |
| ao ponto de inflexão (linha vermelha). Le Texplicitados,                                                | 36            |
| Figura 3.9 - Diagrama de lógica programática e de protocolo da comunicação MATLAB e Arduino             | 37            |
| Figura 4.1 – Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul)      | 57            |
| nara a trajetória retilínea com o sistema em malha aberta                                               | 37            |
| Figura 4.2 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no      | <i>ر</i><br>۲ |
| tempo em cada eixo na operação em malha aberta da trajetória retilínea. Em (a) trajetória no eixo       | ,<br>X        |
| e (b) trajetória no eixo V                                                                              | 28            |
| Figura 4.3 - Erros no eixo X (azul) e no eixo X (vermelho) nara a trajetória retilínea em malha aberta  | 38            |
| Figura 4.4 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul)      | 100           |
| nara a trajetória circular com o sistema em malha aberta                                                | 20            |
| Figura 4 5 - Posição deseiada (linha traceiada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no      | , , ,         |
| tempo em cada eixo na operação em malha aberta da trajetória circular. Em (a) trajetória no eixo (      | ,<br>X        |
| (b) trajetória no eixo V                                                                                | 20            |
| Figure 4.6 - Erros no eixo X (azul) e no eixo X (vermelho) nara a trajetória circular em malha aberta   | <u> </u>      |
| Figura 4.7 Trajetéria desoiada (linha trasoiada em vormelhe) e ofetuada (linha contínua em azul)        | 40            |
| nara a traintória comicircular com o sistema om malha aborta                                            | 11            |
| para a trajetoria serificircular com o sistema em mana aberta                                           | 41            |
| Figura 4.8 - Posição desejada (inna tracejada em vermeino) e eletuada (inna continua em azul) no        | )             |
| tempo em cada eixo na operação em maina aberta da trajetoria semicircular. Em (a) trajetoria no         | 4.4           |
| eixo X e (b) trajetoria no eixo Y                                                                       | 41            |
| Figura 4.9 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermeino) para a trajetoria semicircular em maina      |               |
|                                                                                                         | 42            |
| Figura 4.10 - Trajetoria desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha continua em azu       | I)            |
| para a trajetoria retilinea com o sistema em malha fechada                                              | 43            |
| Figura 4.11 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) n      | 10            |
| tempo em cada eixo na operação em malha fechada da trajetória retilínea. Em (a) trajetória no eix       | οХ            |
| e (b) trajetória no eixo Y                                                                              | 43            |
| Figura 4.12 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória retilínea com o sistema o | em            |
| malha fechada                                                                                           | 44            |

| Figura 4.13 - Sinais de saída dos controladores no eixo X (azul) e eixo Y (vermelho) para a trajetória   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| retilínea com sistema em malha fechada 44                                                                |
| Figura 4.14 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul)      |
| para a trajetória circular com o sistema em malha fechada 45                                             |
| Figura 4.15 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no      |
| tempo em cada eixo na operação em malha fechada da trajetória circular. Em (a) trajetória no eixo X      |
| e (b) trajetória no eixo Y 46                                                                            |
| Figura 4.16 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória circular com o sistema em  |
| malha fechada                                                                                            |
| Figura 4.17 - Sinais de saída dos controladores no eixo X (azul) e eixo Y (vermelho) para a trajetória   |
| circular com sistema em malha fechada 47                                                                 |
| Figura 4.18 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul)      |
| para a trajetória semicircular com o sistema em malha fechada 48                                         |
| Figura 4.19 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no      |
| tempo em cada eixo na operação em malha fechada da trajetória semicircular. Em (a) trajetória no         |
| eixo X e (b) trajetória no eixo Y 48                                                                     |
| Figura 4.20 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória semicircular com o sistema |
| em malha fechada 49                                                                                      |
| Figura 4.21 - Sinais de saída dos controladores no eixo X (azul) e eixo Y (vermelho) para a trajetória   |
| semicircular com sistema em malha fechada 49                                                             |
| Figura 4.22 - Teste de acurácia em malha fechada. Posição desejada (X), baricentro dos pontos            |
| alcançados (o) e vetor de erro médio (linha tracejada em vermelho)                                       |
| Figura 4.23 - Teste de repetibilidade em malha fechada. Posição desejada (X) e pontos alcançados (o)     |
|                                                                                                          |
| Figura 4.24 - Teste de acurácia em malha aberta. Posição desejada (X), baricentro dos pontos             |
| alcançados (o) e vetor de erro médio (linha tracejada em vermelho)                                       |
| Figura 4.25 - Teste de repetibilidade em malha aberta. Posição desejada (X) e pontos alcançados (o)      |
|                                                                                                          |

# SUMÁRIO

| 1. INT       | RODUÇ            | ÃO                                                                                           | . 1       |
|--------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.1.         | Descr            | ição da Mesa XY                                                                              | . 1       |
| 1.2.         | Objet            | ivo                                                                                          | . 2       |
| 1.3.         | Organ            | ização do Trabalho                                                                           | . 3       |
| 2. REV       | /ISÃO B          | IBLIOGRAFICA                                                                                 | . 4       |
| 2.1.         | Manip            | puladores Robóticos                                                                          | . 4       |
| 2.2.         | Carac            | terísticas de um Manipulador Robótico                                                        | . 5       |
| 2.3.         | Mode             | lagem Matemática da Cinemática de Robôs                                                      | . 6       |
| 2.3.<br>base | 1. F<br>e refere | Representação matricial de posição e orientação de um corpo rígido em relação a ur<br>encial | na<br>. 7 |
| 2.3.         | 2. т             | ransformada homogênea                                                                        | 10        |
| 2.3.         | 3. 0             | Cinemática                                                                                   | 11        |
| 2.3.         | .4. C            | Cinemática diferencial                                                                       | 14        |
| 2.4.         | Contr            | ole Cinemático                                                                               | 15        |
| 2.5.         | Acurá            | cia e Repetibilidade                                                                         | 16        |
| 3. IMP       | PLEMEN           | ITAÇÃO                                                                                       | 27        |
| 3.1.         | Mate             | riais e Equipamentos                                                                         | 27        |
| 3.1.         | 1. A             | A mesa XY                                                                                    | 27        |
| 3.1.         | 2. N             | Aotor de passo e sistema de acionamento                                                      | 28        |
| 3.1.         | .3. E            | ncoders                                                                                      | 29        |
| 3.1.         | 4. C             | Chaves de fim de curso                                                                       | 30        |
| 3.2.         | Contr            | ole                                                                                          | 31        |
| 3.2.         | 1. N             | Aalha aberta                                                                                 | 31        |
| 3.2.         | 2. N             | Aalha fechada                                                                                | 33        |
| 3.2.         | .3. S            | intonia do controlador pelo método de Cohen-Coon                                             | 35        |
| 3.3.         | Softw            | are                                                                                          | 37        |
| 4. RES       | ULTAD            | OS E DISCUSSÕES                                                                              | 36        |
| 4.1.         | Exper            | imentos Com Diversas Trajetórias                                                             | 36        |
| 4.1.         | 1. N             | Aalha aberta                                                                                 | 37        |
| 4            | .1.1.1.          | Trajetória retilínea                                                                         | 37        |
| 4            | .1.1.2.          | Trajetória circular                                                                          | 39        |
| 4            | .1.1.3.          | Trajetória semicircular                                                                      | 41        |

| 4.1.2. Ma    | alha fechada                   | 42 |
|--------------|--------------------------------|----|
| 4.1.2.1.     | Trajetória retilínea           | 42 |
| 4.1.2.2.     | Trajetória circular            | 45 |
| 4.1.2.3.     | Trajetória semicircular        | 47 |
| 4.2. Ensaios | s de Acurácia e Repetibilidade | 50 |
| 4.3. Discuss | sões                           | 52 |
| 5. CONCLUSÃO | )                              | 57 |
| BIBLIOGRAFIA |                                | 58 |
|              |                                |    |

# 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1. Descrição da Mesa XY

Desde o advento da revolução industrial, as fábricas vêm buscando meios de aumentar a velocidade de produção, a qualidade e a reprodutibilidade dos bens produzidos. Nos tempos de hoje, os produtos finais têm se tornado cada vez mais complexos, necessitando mais que nunca de peças que sejam produzidas de maneira robusta, fiéis ao projeto e, ao mesmo tempo, de forma rápida, para que atendam de forma satisfatória ao proposito para o qual foram concebidas mesmo em uma produção em larga escala.

Manipuladores robóticos são importantes aliados da indústria para a resolução desta problemática. Devido às suas características operacionais que lhe garantem atributos únicos, mesmo o mais simples dos robôs é altamente atrativo no setor industrial, pois possui como vantagem um custo de trabalho reduzido, alta precisão, produtividade elevada, alta flexibilidade de atuação quando comparado com máquinas especializadas, capacidade de trabalhar em produções repetitivas e robustez diante de ambientes perigosos (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006).

O grupo de manipuladores robóticos do tipo mesa XY, também conhecidos como mesas cartesianas ou posicionadoras, possui grande importância em uma larga variedade de aplicações nos diversos setores industriais, como também no setor comercial e de serviços (Kassouf, 2003). As mesas XY estão presentes em diversos tipos de equipamentos e têm a função de posicionar adequadamente a peça para os trabalhos de usinagem, soldagem, cortes, pinturas, furações, entre outros (MARIANO, SILVA, SILVA, NASCIMENTO, & SILVA, 2006). Elas são muito indicadas para tais funções, pois apresentam espaço de trabalho plano e cinemática simplificada, descrita por funções lineares, uma vez que utilizam apenas juntas prismáticas.

Uma mesa XY com controle de passo micrométrico é composta de partes micromecânicas contendo carros acionados por parafusos, motores de passo, circuitos eletrônicos de controle, circuitos de interface para microcomputador e software de gerenciamento (Santos Filho, 2002). Normalmente o acionamento desse tipo de mesa de coordenadas utiliza malhas fechadas de controle, que atuam juntamente com sensores de posição. Como elementos dos sistemas de retroalimentação, são utilizadas estruturas de sensores (*encoders*) ligados aos eixos dos motores (MENEZES FILHO, SILVA, ARAÚJO, & XAVIER FILHO, 2010).

O presente trabalho foi iniciado no primeiro semestre de 2015, como trabalho acadêmico da disciplina de Elementos de Robótica (CAT181), que resultou na publicação de um artigo no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (ROCHA, et al., 2015). As sugestões efetuadas pelos avaliadores do congresso supracitado foram incorporadas na presente monografia.

### 1.2. Objetivo

O objetivo da presente monografia é implementar técnicas de controle em malha aberta e malha fechada, realizar testes e comparar os resultados obtidos em uma mesa XY.

# 1.3. Organização do Trabalho

No capítulo 2 é realizado um estudo bibliográfico sobre manipuladores robóticos. No capítulo 3 são evidenciados os componentes da mesa, como foi realizado o *retrofit*, detalhamento dos métodos de controle implementados e descrição do funcionamento do *software* utilizado. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através de testes práticos e é feita uma discussão sobre os mesmos. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

# 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

#### 2.1. Manipuladores Robóticos

O termo "robô" apareceu pela primeira vez na peça "Rossum's Universal Robots", do escritor tcheco Karel Kapek, em 1920. Este termo vem da palavra tcheca "robota", que significa "trabalho. A atual definição oficial para a palavra "robô" vem do *Robot Institute of America* (RIA), sendo a seguinte: "Um robô é um manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou sistemas especializados em uma vasta gama de movimentos programados, visando o desempenho e a variedade de tarefas" (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006).

A maior parte da tecnologia robótica já desenvolvida até os dias atuais pode ser dividida em dois grupos específicos bem distintos, os robôs móveis e os robôs com base fixa. Os robôs que possuem a capacidade de se locomoverem, podendo esta locomoção ser proveniente de qualquer mecanismo, são integrantes da robótica móvel. Sistemas robóticos que possuem uma base fixa e são formados por uma sequência de elos rígidos e juntas móveis integram o grupo da robótica fixa (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009). Estes robôs também são conhecidos como manipuladores robóticos e são exclusivamente o foco desde trabalho. Os manipuladores robóticos são basicamente constituídos de juntas e elos. Os elos são partes rígidas que fazem a ligação entre as juntas do manipulador. Geralmente são feitos de metais mais resistentes e leves, no entanto podem ser constituídos também de acrílico, polímeros e até madeira. As juntas são as partes móveis que geram o movimento do manipulador. Elas podem ser do tipo prismática ou rotacional (Figura 2.1). Entre dois elos quaisquer, as juntas prismáticas criam um movimento relativo translacional, enquanto as juntas rotacionais criam um movimento relativo angular entre as mesmas (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

Robôs que são constituídos em maioria de juntas prismáticas realizam mais facilmente trajetórias retilíneas; já os que são construídos majoritariamente com juntas rotacionais são mais aptos a efetuarem trajetórias sinuosas (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

Existem as juntas converncionais e as especiais. As juntas convencionais dão um grau de liberdade ao manipulador cada e as juntas especiais são aquelas que, sozinhas, dão mais de um grau de liberdade. Estas segundas podem ser simplificadas analiticamente como uma união de juntas convencionais.



### Figura 2.1 - Representação simbólica das juntas de um robô Fonte: Adaptada de SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2006 Outra definição dos manipuladores está em sua característica de cadeia cinemática, que

pode ser aberta ou fechada. Os robôs que possuem apenas uma sequência de elos entre a sua base e a sua última junta são chamados manipuladores de cadeia cinemática aberta. Já os que possuem um loop entre seus elos são chamados manipuladores de cadeia cinemática fechada.

O número mínimo de graus de liberdade necessário a um sistema robótico vai depender da sua finalidade de utilização. Como exemplo, discos rígidos possuem um braço robótico com apenas um grau de liberdade, proveniente de uma junta rotacional em sua base, que já é suficiente para permitir à cabeça de leitura e gravação percorrer todo o disco em busca dos dados. No entanto, para uma função mais complexa como o posicionamento e orientação arbitrária de um objeto qualquer no espaço tridimensional, são necessários no mínimo seis graus de liberdade, sendo três para o posicionamento e três para a orientação do objeto. Se forem adicionados ao manipulador mais graus de liberdade do que o mínimo necessário, o sistema passa a ser redundante e sua programação se torna mais complexa.

## 2.3. Modelagem Matemática da Cinemática de Robôs

Por ser uma união sequencial de elos rígidos e juntas móveis, podendo estas serem rotacionais ou prismáticas, o movimento resultante do manipulador em sua totalidade é um somatório dos movimentos elementares de cada elo, que naturalmente respeitam seus respectivos elos anteriores. Desta forma, uma maneira de calcular a configuração espacial final da estrutura é representando matricialmente a posição e movimento de cada elo em relação a uma base ortonormal, comumente titulada O-xyz (Figura 2.2), somando posteriormente de forma adequada seus efeitos conjuntos (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

# 2.3.1. Representação matricial de posição e orientação de um corpo rígido em relação a uma base referencial

Considerando a base fixa O-xyz, sendo x, y e z vetores unitários ortonormais que descrevem a base, é possível descrever a posição de um ponto O' qualquer pela equação:

$$0' = o'_x x + o'_y y + o'_z z$$

Na equação, o vetor  $0' \in \mathbb{R}^3$  é representado pelas componentes  $o'_x$ ,  $o'_y$  e  $o'_z$ . A posição de 0' então pode ser descrita pelo vetor:

$$0' = \begin{bmatrix} 0'_{x} \\ 0'_{y} \\ 0'_{z} \end{bmatrix}$$



Figura 2.2 - Posição e orientação de um corpo rígido em relação a uma base ortonormal O-xyz Fonte: SICILIANO *et al.*, 2009

Já para a orientação do corpo, considera-se também para o ponto 0' uma base ortonormal de forma similar à criada para a base 0, tendo x', y' e z' como vetores unitários.

Em relação à base de referência O-xyz, as componentes dos vetores unitários da base O' podem ser representados por cossenos diretores da seguinte forma:

$$x' = x'_{x}x + x'_{y}y + x'_{z}z$$
$$y' = y'_{x}x + y'_{y}y + y'_{z}z$$
$$z' = z'_{x}x + z'_{y}y + z'_{z}z$$

Estes vetores são representados matricialmente da seguinte forma:

$$R = \begin{bmatrix} x'_{x} & y'_{x} & z'_{x} \\ x'_{y} & y'_{y} & z'_{y} \\ x'_{z} & y'_{z} & z'_{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'^{T}x & y'^{T}x & z'^{T}x \\ x'^{T}y & y'^{T}y & z'^{T}y \\ x'^{T}z & y'^{T}z & z'^{T}z \end{bmatrix}$$

Esta forma compacta de representação da orientação do corpo é denominada Matriz de Rotação (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

#### 2.3.2. Transformada homogênea

Visando simplificar a representação espacial entre dois sistemas de coordenadas, foi utilizado o conceito de transformada homogênea (TH), que reúne as matrizes relacionais de rotação e translação em uma única matriz.

Considerando dois sistemas referenciais, sistema B e sistema M, a matriz de transformação homogênea A, que relaciona um ponto no sistema referencial M em relação ao sistema B é representada da seguinte forma:

$$\mathbf{A}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\mathbf{M}}^{B} & \mathbf{o}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{B}} \\ \mathbf{0}^{\mathrm{T}} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

Onde  $R_M^B$  é a matriz de rotação dos vetores unitários ortonomais do sistema referencial M em relação ao B,  $o_M^B$ é o vetor de translação da origem do sistema B para a origem do sistema M e  $0^T$ é um vetor de zeros (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

Por propriedade, a composição de duas transformadas homogêneas, que fisicamente representa a união dos efeitos de movimento de dois elos, é o produto matricial entre elas (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009). Desta maneira, a matriz de transformação homogênea de um sistema base 0 para um sistema sequencial n qualquer se dá pela equação:

$$A_n^0 = A_1^0 A_2^1 \dots A_n^{n-1}$$

O estudo do movimento de um corpo, focado na posição, velocidade e orientação do mesmo, levando apenas em consideração as propriedades geométricas e baseado no tempo é chamado de cinemática. Quando estes estudos levam em consideração as forças e torques envolvidos no movimento do corpo, este passa a ser chamado de cinemática diferencial (Craig, 2013).

Aplicando os estudos de cinemática à robótica, o problema se desmembra em duas vertentes, a cinemática direta e a inversa. A primeira objetiva calcular o efeito cumulativo do movimento de cada junta para encontrar a posição e a orientação do elemento final do manipulador. A cinemática inversa, como o próprio nome indica, funciona de maneira contrária, calculando qual deve ser a configuração de cada junta para que o efetuador do manipulador obtenha uma característica de posição e orientação desejada no espaço (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006).

Para realizar os cálculos da cinemática direta utilizando as ferramentas matemáticas vistas, considera-se um sistema referencial fixo relacionado a cada ponto relevante do manipulador, geralmente concêntrico às juntas. São encontradas então as transformadas homogêneas (TH) entre cada sistema de coordenadas fixado e a cinemática direta do manipulador se dá enfim pela multiplicação matricial destas TH.

Os sistemas de coordenadas podem ser fixados de forma arbitrária; no entanto, para facilitar os cálculos, é recomendada uma definição sistemática e generalizada. Como exemplo, um método muito utilizado para manipuladores mais complexos é a convenção de Denavit-Hartenberg (Figura 2.3) (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).



Figura 2.3 - Manipulador "Braço Esférico" com sistemas de coordenadas fixados de acordo com a convenção de Denavit-Hartenberg *standard* Fonte: SICILIANO *et al.*, 2009

No caso da mesa XY, as matrizes de TH do primeiro elo para a base do robô  $(A_1^0)$  e do segundo para o primeiro elo  $(A_2^1)$  são expressas por:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} e A_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz de TH da cinemática direta da mesa XY então é obtida por:

$$A_2^0 = A_1^0 A_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por possuir apenas juntas prismáticas, o efetuador da mesa nunca altera sua orientação com os movimentos dos elos, apenas sua posição, realizando apenas movimentos translacionais em um plano. Isto é possível de se notar em sua matriz de cinemática direta, onde a matriz de rotação é uma identidade e encontramos apenas as variáveis dx e dy, que representam respectivamente a distância imposta pela primeira e pela segunda junta.

A questão da cinemática inversa de um manipulador é um tanto mais complexa, pois as equações de resolução geralmente são do tipo não-linear. Vários métodos analíticos, experimentais e numéricos estão disponíveis para resolver este tipo de equação, no entanto estes nem sempre são aplicáveis, como em muitos casos de resoluções analíticas, ou não conseguem encontrar todas as soluções possíveis, ocorrência recorrente em resoluções numéricas, ou até mesmo retornam vários resultados válidos (Fortuna, 2000).

Devido a estas características, muitas vezes ao resolver estes problemas, o projetista esbarra em múltiplas soluções para uma mesma configuração final do efetuador, ou mesmo a inexistência de soluções. Para o primeiro caso, a análise do espaço de trabalho do manipulador, a existência de obstáculos no espaço físico do robô, entre outras questões devem ser abordadas para conseguir chegar a uma resposta válida para o problema (Craig, 2013).

Devido às suas características construtivas, a mesa XY possui a cinemática direta igual à inversa. Ou seja, a relação entre a cinemática direta e inversa é linear.

#### 2.3.4. Cinemática diferencial

Visando agora relacionar as velocidades lineares e angulares do efetuador em relação às velocidades das juntas, a cinemática diferencial utiliza a ferramenta matemática chamada matriz jacobiana. Esta é uma das principais ferramentas na caracterização de manipuladores, sendo possível através dela a extração de informações acerca das singularidades, das redundâncias, de algoritmos da cinemática inversa, das forças aplicadas no efetuador em relação às das juntas, dentre outras (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

A jacobiana, como é simplificadamente chamada, pode ser encontrada de duas maneiras. A primeira leva em conta a configuração do manipulador, realizando cálculos préestabelecidos que levem em consideração o tipo das juntas para encontrar as componentes da matriz. Este tipo de jacobiana é conhecida como geométrica. A segunda pode ser encontrada quando a relação base-efetuador está descrita na forma mínima. Neste caso, deriva-se no tempo a cinemática direta em função das variáveis de junta, encontrando-se então a relação das velocidades. Este segundo tipo de matriz é nomeada jacobiana analítica (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

A jacobiana consiste geralmente, no espaço tridimensional, em uma matriz (6xn), onde *n* é o número de graus de liberdade do robô. Cada coluna da matriz é um vetor de seis elementos, representando a contribuição das velocidades lineares e angulares que cada junta infere no atuador. Os três primeiros elementos deste vetor são referentes à contribuição linear e os três últimos à contribuição angular.

Por trabalhar apenas no plano bidimensional e por possuir apenas juntas prismáticas, o efetuador não irá alterar a sua orientação e nem fará movimentos translacionais ao longo do eixo Z. Desta maneira, a jacobiana para a mesa XY será uma matriz de dimensão 2x2, conforme apresentado a seguir:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### 2.4. Controle Cinemático

Em sua operação habitual, o manipulador deve realizar trajetórias em seu espaço de trabalho, seja para mover um objeto, instalar uma peça, furar uma placa, entre outras operações corriqueiras quaisquer. As ferramentas vistas até então nos permitem definir uma posição desejada no espaço para o efetuador e/ou determinar as velocidades envolvidas. No entanto, para garantir que as trajetórias sejam corretamente efetuadas, são implementados sistemas de controle para melhorar tais operações.

A técnica de controle adotada deve levar em consideração várias características construtivas do manipulador e da capacidade do processamento de informação, não havendo então um sistema de controle ideal para todos os sistemas robóticos.

Devido às características construtivas e por trabalhar a baixas velocidades, para o acionamento da mesa XY foi implementado um controlador cinemático individual em cada junta, composto de ação proporcional e ação antecipadora *feed-forward*. Apesar de causar pequenos distúrbios, o atrito proveniente da caixa de redução gera um efeito de ação derivativa no sistema (Ogata, 1985, p. 215), que somados às ações implementadas, geram uma ação de controle eficiente para a dinâmica proposta.

O Controle cinemático é uma técnica de controle que trata das características do movimento do manipulador e as restrições deste, sem levar em conta as forças envolvidas. Esta estratégia leva em consideração a derivada das características mecânicas do robô durante o movimento quando este recebe a atuação do sinal de controle (VIEIRA, MEDEIROS, & ALSINA, 2005).

A malha de controle cinemático (Figura 2.4) recebe a posição desejada  $(p_d)$  e realiza duas operações separadas sobre ela: na primeira, a posição desejada é subtraída da posição atual  $(q_p)$ , gerando o sinal de erro  $(e_p)$  que é posteriormente multiplicado pelo ganho  $(K_p)$ ; na segunda, a velocidade para o trecho, que será utilizada no laço *feed-forward*, é calculada a partir da distância para a posição desejada com o tempo de amostragem. Estes dois valores somados  $(\bar{u}_p)$  são aplicados na jacobiana inversa  $(J_{11}^{-1})$ , gerando o sinal de controle  $(u_p)$  que é aplicado ao motor. Os motores funcionam como integradores, transformando o sinal de controle, que são aplicados em nível de velocidade das juntas, em posição do efetuador no plano. Como explicitado na seção Cinemática diferencial (2.3.4), a jacobiana do manipulador aqui considerado é uma matriz identidade e pode ser suprimida da malha de controle.



Figura 2.4 - Malha de Controle Cinemático Fonte: COCOTA; D'ANGELO; MONTEIRO, 2014

#### 2.5. Acurácia e Repetibilidade

Robôs industriais possuem diversos parâmetros que caracterizam sua eficiência na realização de uma dada tarefa, duas delas que são mensuráveis e muito importantes são a acurácia e a repetibilidade do manipulador.

A acurácia se refere ao erro que o robô obtém entre a tarefa que lhe foi dada e a tarefa que é efetivamente realizada por ele. A repetibilidade diz respeito à capacidade do robô em realizar, de maneira igual, várias vezes a mesma tarefa. De modo simplificado (Figura 2.5), repetibilidade é realizar a mesma tarefa várias vezes, enquanto acurácia é acertar o alvo. Matematicamente, a acurácia é a distância do baricentro dos pontos obtidos até o alvo e a repetibilidade é o raio da menor circunferência que circunscreve todos estes pontos (JOUBAIR, 2014).

Sobre a repetibilidade, SPONG *et al.* (2006) afirma que ela está ligada à resolução do controlador, que é a menor porção de movimento perceptível por este. A resolução do controlador, para o caso em questão, é a distância total do eixo divido por  $2^n$ , onde *n* é o número de bits de precisão do *encoder*. O autor ainda afirma que, normalmente, a resolução dos manipuladores de juntas prismáticas é maior do que os manipuladores de juntas rotacionais, já que a distância linear percorrida pelo atuador prismático entre dois pontos é menor do que o arco realizado por uma junta rotacional entre estes mesmos pontos. Sobre a acurácia, SICILIANO *et al.* (2009) diz que esta é constante nos robôs prismáticos, mas diminui nos robôs antropomórficos com o aumento do traço horizontal.



Figura 2.5 - Exemplificação de acurácia e repetibilidade Fonte: Adaptada de JOUBAIR, 2014

# 3. IMPLEMENTAÇÃO

### 3.1. Materiais e Equipamentos

### 3.1.1. A mesa XY

A mesa utilizada é do modelo NAO-501778 da empresa Micro-Slides (Figura 3.1). O equipamento contava originalmente com motores de corrente continua sem escova (*Brushless Direct Curent Motor* - BLDC) para acionamento, controlados pela placa Anorad I-SERV-BLM2, que processava as instruções utilizando-se de um microprocessador 8XC196KC20 da Intel. Este sistema de acionamento, além de muito ultrapassado, foi descontinuado pelo fabricante, o que nos motivou a realizar um *retrofit* da mesa.



Figura 3.1 - Mesa XY utilizada

Os pesados e antigos motores BLDC foram substituídos por motores de passo, mais leves acionamento relativamente fácil. Foram desenvolvidos circuitos para o acionamento dos motores de passo e para o interfaceamento entre os sinais da mesa e o Arduino. Este por sua vez comunica-se com um computador por meio de uma porta USB e do software MATLAB para receber comandos do usuário, executa-los e retornar os resultados obtidos de cada ensaio. Os motores instalados para acionamento da mesa XY são do modelo 57BYG-059, na configuração unipolar. Suas características construtivas são: 4 [V/fase]; 2,5 [ $\Omega$ /fase]; 1,6 [A/fase] e 1,8 [°/passo].

O driver do motor de passo (Figura 3.2) foi desenvolvido baseando-se nos circuitos integrados L297 e L298. O primeiro possui todos os circuitos necessários para controlar de maneira simplificada motores de passo unipolar e bipolar. O L298 serve como um módulo de potência, amplificando o sinal gerado pelo L297 para uma configuração elétrica compatível com o acionamento de motores de passo de maior corrente (STMicroelectronics, 2003). A utilização dos dois em conjunto fornece um driver completo para acionamento adequado dos motores utilizados.



Figura 3.2 - Driver do Motor de Passo

### 3.1.3. Encoders

A mesa XY possui em cada eixo um *encoder* incremental linear do modelo MSA003 da RSF Electronics. Cada *encoder* gera dois sinais digitais defasados 90 [°] entre si. Esta onda dupla em descompasso (Figura 3.3) serve para o sistema processador reconhecer em qual sentido a plataforma está se locomovendo. Devido a limitações de processamento do Arduino, apenas uma onda pôde ser adquirida por eixo. Sendo assim, o sentido em que a mesa está se deslocando é determinado a partir do sentido do giro do motor de passo. Esta inferência é possível neste caso já que a única fonte de movimento das plataformas são os seus próprios motores. Além disso, vale citar que o mecanismo de translação possui atrito e um elevado fator de redução em função da transmissão por fuso.



Figura 3.3 - Sinais gerados pelo encoder de um eixo

O *encoder* possui resolução de 8 [µm], gerando assim uma onda quadrada proporcional à distância percorrida. Para se obter a posição da mesa é utilizada uma técnica de contagem de pulsos da onda gerada pelo *encoder* através de funções de interrupção do Arduino. Por meio de experimentos foram obtidos os ganhos de normalização que, quando multiplicados pelo número de pulsos contados, geram a distância em milímetros que a plataforma percorreu em seu trajeto.

#### 3.1.4. Chaves de fim de curso

Cada eixo da mesa contém duas chaves de fim de curso. Elas são responsáveis por delimitar o espaço de trabalho da mesa XY. Quando o efetuador chega ao limite do eixo, um sinal luminoso que incide sobre um sensor óptico é interrompido, o Arduino interpreta esta mudança indicando ao sistema que a ferramenta alcançou a borda da região de trabalho.

Além da função de proteção do alcance do limite do espaço de trabalho, as chaves de fim de curso também possuem um papel importante na determinação do posicionamento da mesa. Devido ao fato dos *encoders* incorporados à mesa serem do tipo incremental, eles não possuem a informação da localização da ferramenta no momento em que o sistema inicializa. Os *encoders* instalados possibilitam determinar o deslocamento relativo da ferramenta a partir do momento de inicialização da mesa. Desta maneira, ao inicializar o sistema, faz-se necessário movimentar o efetuador até uma das extremidades do espaço de trabalho da mesa, onde se encontram um par de chaves de fim de curso (uma por eixo), para que o sistema utilize esta posição como referência da origem dos eixos XY.

Assim como já mencionado na seção 1.2, este trabalho visa a comparação do funcionamento da mesa XY em dinâmicas de malha aberta (MA) e malha fechada (MF). A seguir, é descrito o modo como ambas foram implementadas neste sistema.

#### 3.2.1. Malha aberta

Para o acionamento da mesa em malha aberta foi utilizada a relação passo por distância percorrida, tendo em vista que os motores trabalham com distância fixa de passo. Na prática, o usuário envia a posição desejada em milímetros, o sistema calcula então a distância do ponto atual ao ponto desejado e o número necessário de passos que devem ser efetuados para realizar corretamente tal movimentação, realizando assim um controle de posição.

Para estabelecer a relação entre número de passos e distância percorrida foi realizado um ensaio de calibração por eixo. A partir dos resultados obtidos foi feito um ajuste de curva por meio do método dos mínimos quadrados, correlacionando a distância percorrida e o número de passos. Foram obtidos, tanto para o eixo X quanto para o eixo Y da mesa, modelos polinomiais de primeira ordem com coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) próximos de um, o que indica que os modelos matemáticos encontrados representam bem a dinâmica observada (Figura 3.4 e Figura 3.5).



Figura 3.4 - Ajuste de curva do eixo X



Figura 3.5 - Ajuste de curva do eixo Y

Estes modelos matemáticos foram incluídos no controlador em malha aberta para realizar a conversão entre a distância que deve ser percorrida na trajetória e o número de passos que deve ser executado para realizá-la.

De acordo com os modelos encontrados, cada passo do motor representa o deslocamento de 0,0127 [mm].

#### 3.2.2. Malha fechada

Como abordado na seção (2.4) de Controle Cinemático, foi implementada neste sistema de controle uma ação de controle proporcional associada a uma ação de antecipação por *feed-forward*.

Sendo o sistema linear no caso da mesa XY, a inversa da jacobiana foi suprimida da malha de controle cinemático (Figura 2.4) por se tratar de uma matriz identidade, deixando a malha como indicada na Figura 3.6. Isto representa uma economia de custo computacional em relação a robôs com juntas rotacionais. Ainda em função desta linearidade, é possível realizar o desacoplamento do controle, implementando assim duas malhas independentes em paralelo, sendo uma para cada eixo da mesa. Desta forma, cada eixo tem sua própria sintonia de ganho proporcional (K) e seus próprios vetores de posições e de velocidades desejadas.



Ganho de Normalização do Encoder

Figura 3.6 - Esquema da malha de controle utilizada

Para realizar o controle, o MATLAB inicialmente divide a trajetória desejada em vários pontos e posteriormente calcula a velocidade necessária em função da distância a ser percorrida entre os pontos e do intervalo do tempo da amostragem que são definidos pelo usuário. O cálculo desta velocidade entre pontos é necessário para a implementação do laço *feed-forward* (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006). Os dados gerados (posições e velocidades) pelo MATLAB são enviados à lógica do Arduino para a execução do controle cinemático. Devido a limitação de memória do Arduino, neste trabalho limitamos a divisão de uma trajetória em até 100 pontos (99 segmentos).

A malha de controle implementada (Figura 3.6) primeiramente recebe as posições e velocidades desejadas geradas pelo MATLAB, o controlador no Arduino trabalha da seguinte forma para executar a trajetória: calcula-se o erro de posição (Erro), obtido pela subtração entre a posição desejada (P\_Desejado) e a posição atual do efetuador (P\_Atual). Como o *encoder* gera dados em contagem de pulsos, estes são convertidos para milímetros através da multiplicação por um ganho (K\_encoder) para a determinação da posição atual em cada eixo. O erro calculado é multiplicado pelo ganho proporcional do controlador (K) e então somado com a componente de ação do *feed-forward* (dP\_Desejado), gerando o sinal de controle (U). Este processo é repetido, e o ponto desejado é atualizado ao término do intervalo de amostragem, até que a trajetória seja concluída.

O sinal de controle gerado é uma velocidade, em [mm/s]. Como os motores de passo trabalham em rotações angulares fixas (neste caso, 1,8 [°/passo]), é realizada em uma função interna do Arduino a conversão do sinal U (saída do controlador em mm/s) em frequência para o acionamento das bobinas do motor. Sendo assim, executando rotações em ângulos fixos e operando a uma frequência adequada, os motores serão então capazes de empregar no efetuador as velocidades requeridas pelo controlador.

Pode ocorrer no processo de realização da trajetória uma eventual saturação nos motores, já que os mesmos possuem naturalmente uma velocidade máxima de operação. Neste caso, o controlador conta com uma saturador que determina o valor máximo que pode ser enviado para a mesa, evitando assim danos ao driver ou aos motores de passo.

### 3.2.3. Sintonia do controlador pelo método de Cohen-Coon

O método de Cohen-Coon visa a sintonia do ganho do controlador através da análise da curva de reação do sistema quando este recebe o estímulo de um sinal degrau (Figura 3.7). Três parâmetros necessários ao método são obtidos através desta curva, sendo estes: o ganho estático (K0), que é a amplitude estacionária de reação do sistema, antes e depois da aplicação degrau, divido pela amplitude do degrau de entrada; o tempo morto (L), que representa o tempo entre os momentos de aplicação do degrau e resposta do sistema; e a constante de tempo (T), calculada através da divisão da saída do sistema em regime estacionário pela inclinação da curva no ponto de inflexão do sigmoide da curva de reação (GOODWIN, GRAEBE, & SALGADO, 2000).



Figura 3.7 - Curva de reação do motor do eixo X da mesa (azul) e sinal degrau aplicado (vermelho).

Foi aplicado no eixo X um degrau de valor equivalente a 20% do fundo de escala (valor máximo de velocidade que o motor atinge). Através da curva de reação obtida em ensaio, os parâmetros K0, L e T foram calculados (Figura 3.8) utilizando a plataforma MATLAB e posteriormente aplicados na tabela de cálculo de ganho de Cohen-Coon. Para o cálculo apenas do cálculo Kp, a equação se dá na seguinte forma (GOODWIN, GRAEBE, & SALGADO, 2000):

$$\mathbf{x} = \mathbf{r} + \mathbf{r} +$$

$$Kp = \frac{T}{K0 * L} * \left[1 + \frac{L}{3 * T}\right]$$

Figura 3.8 - Obtenção dos parâmetros L e T. Curva de reação experimental (linha azul), reta tangente ao ponto de inflexão (linha vermelha), L e T explicitados.

Tempo [ms]

Para o motor do eixo X, os parâmetros encontrados foram K0 = 0.9774, L = 23[ms] e T = 124.73[ms]; o que resultou, após os cálculos de Cohen-Coon, em um ganho proporcional Kp = 5.8892. Tendo em vista que os motores de ambos os eixos são idênticos, com montagens e dinâmicas muito parecidas, o método de sintonia de ganho de Cohen-Coon foi aplicado apenas no eixo X, sendo então o valor de Kp encontrado aplicado nos controladores de ambos os eixos.

### 3.3. Software

A comunicação entre MATLAB e Arduino é efetuada por meio de uma porta USB. O modus operandi da realização de uma trajetória se dá da seguinte forma: ao receber um pedido especifico de início de código proveniente do MATLAB, o Arduino posiciona o efetuador na origem da área de trabalho, ou seja, posição (x,y) = (0,0), calibrando então a posição da mesa e zerando os contadores dos *encoders*. Tendo posse dos vetores com as coordenadas e velocidades desejadas, o micro-controlador realiza os cálculos para a execução do controle e efetua a trajetória experimental, salvando todos os dados referentes à trajetória para cada intervalo de amostragem, e.g., rota real efetuada, sinal de erro e sinal de controle; sendo o último para o caso de controle em malha fechada. Logo que termina a trajetória, o Arduino envia esses dados para o MATLAB, que os trata da forma adequada e gera os gráficos pertinentes ao ensaio realizado. Na Figura 3.9 temos a representação da arquitetura do *software*.



Figura 3.9 - Diagrama de lógica programática e de protocolo da comunicação MATLAB e Arduino

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Experimentos Com Diversas Trajetórias

Foram realizados ensaios em malha aberta e malha fechada para três tipos de trajetória: retilínea, circular e semicircular, sendo:

Retilínea: reta com início na coordenada (20,130) [mm] e fim em (130,20) [mm];

Circular: circulo completo com centro em (75,75) [mm] e raio de 30 [mm];

Semicircular: semicírculo com centro em (75,75) [mm] e raio de 30 [mm].

Todas as trajetórias foram divididas em 100 pontos, sendo este valor o máximo permitido devido à limitação de memória do Arduino.

Os resultados pertinentes de cada trajetória realizada estão evidenciados a seguir, divididos entre os testes em malha aberta e os em malha fechada.

# 4.1.1.1. Trajetória retilínea



Figura 4.1 – Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) para a trajetória retilínea com o sistema em malha aberta



Figura 4.2 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no tempo em cada eixo na operação em malha aberta da trajetória retilínea. Em (a) trajetória no eixo X e (b) trajetória no eixo Y



Figura 4.3 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória retilínea em malha aberta



Figura 4.4 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) para a trajetória circular com o sistema em malha aberta



Figura 4.5 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no tempo em cada eixo na operação em malha aberta da trajetória circular. Em (a) trajetória no eixo X e (b) trajetória no eixo Y



Figura 4.6 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória circular em malha aberta



Figura 4.7 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) para a trajetória semicircular com o sistema em malha aberta



Figura 4.8 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no tempo em cada eixo na operação em malha aberta da trajetória semicircular. Em (a) trajetória no eixo X e (b) trajetória no eixo Y



Figura 4.9 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória semicircular em malha aberta

4.1.2. Malha fechada

# 4.1.2.1. Trajetória retilínea

Assim como encontrado no método de sintonia de Cohen-Coon, os parâmetros do controlador para esta trajetória foram de: ganho proporcional (Kp) igual a 5.8892 para ambos os eixos e tempo de amostragem de 1000 [ms].



Figura 4.10 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) para a trajetória retilínea com o sistema em malha fechada



Figura 4.11 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no tempo em cada eixo na operação em malha fechada da trajetória retilínea. Em (a) trajetória no eixo X e (b) trajetória no eixo Y



Figura 4.12 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória retilínea com o sistema em malha fechada



Figura 4.13 - Sinais de saída dos controladores no eixo X (azul) e eixo Y (vermelho) para a trajetória retilínea com sistema em malha fechada

Para a trajetória circular em malha fechada, os parâmetros utilizados foram: ganho proporcional do controlador de 5.8892 para ambos os eixos e tempo de amostragem de 1300 [ms].



Figura 4.14 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) para a trajetória circular com o sistema em malha fechada



Figura 4.15 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no tempo em cada eixo na operação em malha fechada da trajetória circular. Em (a) trajetória no eixo X e (b) trajetória no eixo Y



Figura 4.16 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória circular com o sistema em malha fechada



Figura 4.17 - Sinais de saída dos controladores no eixo X (azul) e eixo Y (vermelho) para a trajetória circular com sistema em malha fechada

4.1.2.3. Trajetória semicircular

Para a trajetória semicircular, os parâmetros utilizados foram: ganho proporcional de 5.8892 para ambos os eixos e tempo de amostragem de 800 [ms].



Figura 4.18 - Trajetória desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) para a trajetória semicircular com o sistema em malha fechada



Figura 4.19 - Posição desejada (linha tracejada em vermelho) e efetuada (linha contínua em azul) no tempo em cada eixo na operação em malha fechada da trajetória semicircular. Em (a) trajetória no eixo X e (b) trajetória no eixo Y



Figura 4.20 - Erros no eixo X (azul) e no eixo Y (vermelho) para a trajetória semicircular com o sistema em malha fechada



Figura 4.21 - Sinais de saída dos controladores no eixo X (azul) e eixo Y (vermelho) para a trajetória semicircular com sistema em malha fechada

Foram realizados dez ensaios para determinar a repetitividade e a exatidão do manipulador para uma trajetória retilínea em ambas as abordagens de controle, com as seguintes configurações: trajetória retilínea partindo da coordenada (20,20) [mm], indo até o ponto (50,50) [mm]. Para o controle em malha fechada, os ganhos proporcionais do controlador foram ajustados em 30 para ambos os eixos, o tempo de amostragem foi estipulado em 70 [ms].

Para o controle em malha fechada, a exatidão do robô foi de 0,670 [mm] (Figura 4.22). Em relação à repetitividade, houve uma pequena dispersão dos pontos alcançados, sendo o raio do círculo que compreende todos os pontos igual a 0,3717 [mm] (Figura 4.23). No caso do controle em malha aberta, a mesa apresentou excelente acurácia e repetibilidade, sendo ambos iguais a 0,005 [mm], como se pode verificar na Figura 4.24 e Figura 4.25.



Figura 4.22 - Teste de acurácia em malha fechada. Posição desejada (X), baricentro dos pontos alcançados (o) e vetor de erro médio (linha tracejada em vermelho)



Figura 4.23 - Teste de repetibilidade em malha fechada. Posição desejada (X) e pontos alcançados (0)



Figura 4.24 - Teste de acurácia em malha aberta. Posição desejada (X), baricentro dos pontos alcançados (o) e vetor de erro médio (linha tracejada em vermelho)



Figura 4.25 - Teste de repetibilidade em malha aberta. Posição desejada (X) e pontos alcançados (o)

### 4.3. Discussões

Abordando primeiramente os resultados obtidos de forma mais abrangente, tratamos sobre as diferenças entre as dinâmicas realizadas pelos controles em malha aberta e malha fechada. As trajetórias reais em malha aberta se mostraram mais condizentes com as suas respectivas simuladas, isto devido às condições ideais de teste, não introduzindo na mesa quaisquer tipos de distúrbio. O controlador em malha fechada foi um pouco menos efetivo, mas ainda sim mantendo bons resultados. Esta discrepância se dá principalmente pela dinâmica de operação dos motores de passo, que são construídos para trabalhar a uma distância de passo fixa e não respondem tão bem a variações bruscas de velocidade de operação.

A operação em malha aberta não se mostrou sensível ao tipo de trajetória a ser efetuada. Todas as trajetórias testadas foram executadas com boa repetibilidade pelo sistema, com um erro máximo igual para todas as três trajetórias de 0.01 [mm]. Esta característica resulta da naturalidade que os precisos motores de passo possuem em trabalhar em malha aberta.

As trajetórias em malha fechada apresentaram respostas substancialmente inferiores àquelas encontradas em malha aberta em relação ao desempenho, porém muito interessantes do ponto de vista didático sobre a aplicação e análise de controladores em malha fechada.

Para a trajetória retilínea em malha fechada o erro médio durante a execução da trajetória foi de 0,644 [mm] com um maior erro de 2.5 [mm] (Figura 4.12). Para os trajetos encíclicos, na trajetória circular o erro médio foi de 0,902 [mm], com maior erro de 3,36 [mm] (Figura 4.16). Na trajetória semicircular o erro médio foi de 0,462 [mm] e o maior erro de 1,5 [mm] (Figura 4.20). Nota-se então uma substancial melhora na execução da trajetória semicircular (Figura 4.19) em relação à circular (Figura 4.15) devido à distância dos seguimentos entre os pontos ter sido reduzida pela metade no primeiro caso.

É notável a diferença de desempenho do controlador em malha fechada na realização da trajetória retilínea (Figura 4.11) em relação à circular (Figura 4.15), quando parâmetros similares são utilizados. Além da questão de ser necessário um maior número de pontos para descrever melhor um traçado relativamente mais complexo, notamos que para as mesmas condições de execução a mesa realiza de maneira melhor os traçados retos. Isto confirma a afirmação de que os manipuladores compostos essencialmente de juntas prismáticas possuem uma maior facilidade para efetuarem trajetórias retilíneas, enquanto os de juntas rotacionais realizam melhor as circulares (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009). A trajetória semicircular (Figura 4.19) apresentou melhores resultados em relação às duas outras trajetórias pois seu trajeto possui uma menor extensão, o que infere em uma maior densidade de pontos por distância na trajetória, e o tempo de amostra foi melhor configurado para a execução desta.

Adicionalmente, vale ressaltar que no controle cinemático de posição implementado por *feed-forward* foi dado como entrada as velocidades desejadas em cada seguimento de uma trajetória, conforme apresentado por (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006). No entanto, neste trabalho não foi determinado o caminho a ser aproximado para cada seguimento da trajetória, como abordado por (SICILIANO, SCIAVICCO, VILLANI, & ORIOLO, 2009).

Pela lógica de operação do controlador em malha fechada, o sinal de controle (U, em [mm/s]) é resultado da multiplicação do valor do erro (Erro) de posição pelo ganho do controlador (K), somado posteriormente pelo valor da ação *feed-forward* (dX\_Desejado). Comparando os erros encontrados nas trajetórias realizadas (Figura 4.12, Figura 4.16 e Figura 4.20) com seus respectivos sinais de controle (Figura 4.13, Figura 4.17 e Figura 4.21), é possível notar uma semelhança em suas curvas, isto indica que a ação *feed-forward* calculada foi responsável apenas por uma pequena parcela da lei de controle, suavizando a ação proporcional do controlador.

## 5. CONCLUSÃO

Ao fim do trabalho, todos os objetivos estabelecidos foram atingidos. Os métodos de controle foram implementados com sucesso de acordo com a bibliografia consultada; testes práticos com diferentes tipos de trajetória foram realizados com sucesso.

Como um apanhado geral dos resultados obtidos e levando em consideração as limitações físicas da mesa XY, concluímos que o tipo de controle em malha aberta se mostra mais preciso para a realização de qualquer tipo de trajetória proposta caso a mesa se encontre em condições ideais de operação (sem distúrbios).

O controle em malha fechada por sua vez, possibilitou abordar o conteúdo teórico presente na obra do SPONG *et al.* (2006). Este método aplicado no trabalho nos permitiu aplicar e visualizar em um sistema real os conceitos de teoria de controle e de robótica abordadas em sala de aula.

Mais interessante ainda na abordagem em malha fechada é que notamos uma potencial melhora de seus resultados caso o microprocessador fosse melhor. Uma melhoria neste componente permitirá aumentar o número de pontos em uma trajetória, realizando um traçado com melhor resolução, como também obter as duas bandas de cada *encoder*. Deixamos então como proposta de trabalho futuro a melhoria ou substituição do Arduino Mega 2560 por outro periférico de maior capacidade. Outra proposta para melhoria é implementar um algoritmo que possibilite aproximar um caminho a ser executado por cada seguimento de uma trajetória, conforme apresentado por SICILIANO *et al.* (2009).

### **BIBLIOGRAFIA**

- COCOTA, J. A., D'Angelo, T., & MONTEIRO, P. M. (2014). Experiência de Aprendizagem Baseada em Projetos no Ensino de Robótica. *Versión Abierta Español-Portugués - IEEE-RITA, 2*.
- Craig, J. J. (2013). Robótica (3ª ed.). Pearson Education do Brasil.
- Fortuna, A. d. (2000). *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações.* São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- GOODWIN, G. C., GRAEBE, S. F., & SALGADO, M. E. (2000). Control System Design. Valparaíso.
- JOUBAIR, A. (2014). What are accuracy and repeatability in industrial robots? Acesso em 27 de Fevereiro de 2016, disponível em Robotiq: http://blog.robotiq.com/bid/72766/What-are-Accuracy-and-Repeatability-in-Industrial-Robots
- Kassouf, S. (2003). Mesa XY. Mecatrônica Atual, 21(4), 406-424.
- MARIANO, V., SILVA, J. F., SILVA, J. B., NASCIMENTO, J. F., & SILVA, J. C. (2006). Simulação da dinâmica e identificação de parâmetros em uma mesa XY de máquina-ferramenta. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecânica, 10*(1), 57-70.
- MENEZES FILHO, J. B., SILVA, S. A., ARAÚJO, C. S., & XAVIER FILHO, A. F. (2010). Controlador vetorial neural para mesa de coordenadas XY. *Revista Controle & Automação, 21*(4), 28-35.
- Ogata, K. (1985). Modern Control Engineering. Englewood Cliffs.
- ROCHA, F. A., SERRANTOLA, W., LOPEZ, G. N., TORGA, D., CARVALHO, M. A., SOUZA, G., et al. (2015). Retrofitting de uma mesa XY. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Santos Filho, S. G. (2002). Controle de Mesa XY utilizando motor de passo. Mecatrônica Atual, 2, 28-35.
- SICILIANO, B., SCIAVICCO, L., VILLANI, L., & ORIOLO, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control.* London: Springer-Verlag London Limited.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot Modeling and Control* (1<sup>ª</sup> ed.). Willey: John Wiley & Sons Inc.
- STMicroelectronics. (2003). Datasheet: The L297 Stepper Motor Controller.
- VIEIRA, F. C., MEDEIROS, A. A., & ALSINA, P. J. (2005). *Controle Dinâmico de Robôs Móveis com Acionamento Diferencial.* Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.