

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO CILÍNDRICO DE CINCO EIXOS  
ATUADO POR MOTORES DE PASSO

por

Iago Camargo Silveira

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2018

PROJETO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO CILÍNDRICO DE CINCO EIXOS  
ATUADO POR MOTORES DE PASSO

por

Iago Camargo Silveira

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Aprovada por:

Prof. Dr. Eduardo André Perondi.....PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Flavio José Lorini.....PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho.....DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 04 de maio de 2018

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Maria Inês Camargo, pelo amor que sempre teve por mim, sem o qual eu jamais me tornaria quem eu sou, alcançaria o que alcancei e o que vou conquistar.

À minha namorada, Andressa Brenner Fernandes, pelo amor que tem por mim e por ter me dado um motivo para seguir em frente. Te fazer sorrir me motiva no presente e sonhar ao teu lado me determina para o futuro.

À minha família, pelo amor e pelo apoio que sempre me deram.

Ao professor Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja, pela orientação, atenção, conhecimento, disponibilidade e paciência.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Ao PROMEC e à UFRGS pelo conhecimento e pela infraestrutura.

## RESUMO

Este trabalho contempla o projeto de um manipulador robótico cilíndrico atuado por motores de passo com cinco juntas de atuação. As etapas do projeto do robô, que tratam este estudo, foram divididas em: projeto mecânico; modelagem matemática; projeto do controlador; e simulações. O projeto mecânico apresenta uma proposta de configuração e dimensionamento mecânicos que supre a demanda exigida para a operação analisada. O modelo matemático apresenta as características elétricas e mecânicas do atuador e as características mecânicas do robô. O projeto de um controlador linear é realizado por meio da alocação dos polos do sistema em malha fechada através da realimentação dos estados de posição e de velocidade angulares do rotor unidos a um integrador do erro de posição angular. Para o primeiro grau de liberdade, por conta da variação do momento de inércia de massa associado a essa junta, um controlador com ganhos parametrizados foi projetado, no qual os ganhos são calculados baseado no modelo matemático relativo ao momento de inércia de massa associado a essa junta. Por meio de simulações computacionais, avaliou-se o projeto dos controladores no movimento ponto a ponto dos cinco eixos de atuação e a variação do momento de inércia de massa sobre a primeira junta. Os resultados dessas simulações mostraram que os controladores propostos cumprem com a dinâmica desejada nos cinco graus de liberdade do robô.

Palavras-chave: manipulador robótico cilíndrico de cinco graus de liberdade; robô atuado por motores de passo; controlador por realimentação de estados e integrador.

## **ABSTRACT**

This work contemplates the design of a robotic manipulator, which is operated by a stepper motor with five actuation joints. The robot design steps were divided into: mechanical design; mathematical modeling; controller design; and simulations. The mechanical design presents a proposal of mechanical configuration and sizing that supplies the required demand for the analyzed operation. The mathematical model presents the electrical and mechanical characteristics of the actuator and the mechanical characteristics of the robot. The design of a linear controller is accomplished by allocating the poles of the closed loop system by states feedback of the position and angular speed of the rotor attached to an angular position error integrator. For the first degree of freedom, due to the variation of mass moment of inertia associated with this joint, a controller with parameterized gains was projected, in which the gains are calculated based on the mathematical model related to the mass moment of inertia associated to this joint. By means of computational simulations, we evaluated the design of the controllers in the point-to-point movement of the five actuation joints and the variation of the mass moment of inertia on the first joint. The results of these simulations showed that the proposed controllers comply with the desired dynamics in the robot's five degrees of freedom.

**Key words:** cylindrical robotic manipulator of five degrees of freedom; robot operated by stepper motors; state feedback controller and integrator.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos do estudo	2
1.3	Organização do trabalho	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
2.1	Manipuladores Robóticos	5
2.1.1	Classificação Geométrica de Manipuladores Robóticos	6
2.2	Projeto de Manipuladores - Unidades Técnicas de Projeto	7
2.3	Atuadores	9
2.3.1	Motores de Passo	10
2.4	Sistemas de Transmissão	13
2.5	Principais Manipuladores Robóticos Estudados	13
<b>3</b>	<b>PROJETO MECÂNICO DO MANIPULADOR ROBÓTICO</b>	<b>16</b>
3.1	Configuração Geométrica e Dimensionamento do Quinto Eixo	19
3.2	Configuração Geométrica e Dimensionamento do Quarto Eixo	25
3.3	Configuração Geométrica e Dimensionamento do Terceiro Eixo	30
3.4	Configuração Geométrica e Dimensionamento do Segundo Eixo	34
3.5	Configuração Geométrica e Dimensionamento do Primeiro Eixo	39
3.6	Manipulador Robótico Cilíndrico – Componentes para montagem	46
<b>4</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO</b>	<b>50</b>
4.1	Cinemática	50
4.1.1	Cinemática Direta	50
4.1.2	Cinemática Inversa	55
4.2	Dinâmica	57
4.2.1	Sistema Elétrico	57

4.2.2	Sistema Mecânico .....	64
4.4	Modelo matemático do momento de inércia de massa do primeiro grau de liberdade .....	67
<b>5</b>	<b>PROJETO DO CONTROLADOR .....</b>	<b>74</b>
5.1	Projeto do controlador com ganhos fixos .....	76
5.2	Projeto do controlador com ganhos parametrizados para o primeiro eixo .....	84
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÕES .....</b>	<b>87</b>
6.1	Simulação do manipulador robótico .....	88
6.2	Simulações do primeiro grau de liberdade.....	91
6.2.1	Análise da variação do momento de inércia de massa sobre o primeiro eixo.....	92
6.2.2	Simulações do primeiro grau de liberdade sem peça associada ao efetuador.....	95
6.2.3	Simulações do primeiro grau de liberdade com peça associada ao efetuador.....	99
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>107</b>
7.1	Trabalhos Futuros .....	108
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS .....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE A</b> – Rotina elaborada no Matlab para cinemática direta e inversa do manipulador robótico.....	<b>113</b>
	<b>APÊNDICE B</b> – Parâmetros geométricos e inercias do manipulador robótico .....	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE C</b> – Parâmetros dos eixos para as simulações .....	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração de um manipulador robótico. Adaptado de Fu et al, 1987. ....	6
Figura 2.2 – Ilustração esquemática de um motor de passo híbrido de duas fases. ....	10
Figura 2.3 – Acionamento do motor de passo no modo passo completo. ....	11
Figura 2.4 – Arranjo para o controle e acionamento de um motor de passo. ....	12
Figura 2.5 – Manipulador robótico com atuadores pneumáticos. ....	14
Figura 2.6 – Manipulador robótico de 5 graus de liberdade com acionamento pneumático [Sarmanho, 2014]. ....	15
Figura 2.7 – Robô articulado [Cardozo, 2012]. ....	15
Figura 3.1 – Volume do trabalho desejado (roxo) e o volume de trabalho obtido com o projeto mecânico do manipulador (azul). ....	16
Figura 3.2 – Eixos de atuação e disposição dos atuadores do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos. ....	17
Figura 3.3 – Quinto eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos. ...	20
Figura 3.4 – Carregamento imposto ao eixo da quarta junta. ....	21
Figura 3.5 – Ação da força devido ao torque do motor do quarto eixo. ....	22
Figura 3.6 – Diagrama de forças para o eixo da quarta junta. ....	23
Figura 3.7 - Diagrama de esforços cortantes e momentos fletores para o eixo x. ....	23
Figura 3.8 - Diagrama de esforços cortantes e momentos fletores para o eixo y. ....	23
Figura 3.9 - Quarto eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos. ....	26
Figura 3.10 - Elementos acoplados à quarta junta do manipulador robótico. ....	26
Figura 3.11 – Mecanismo de transformação de movimento rotacional em linear. ....	30
Figura 3.12 - Terceiro eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos. ....	31
Figura 3.13 - Configuração geométrica das polias do terceiro eixo. ....	33
Figura 3.14 – Diferença geométrica entre o sistema de fuso e castanha de rosca (a) e de fuso e castanha de esfera (b). Adaptado de Craig, 2006. ....	35
Figura 3.15 - Segundo eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos. ....	35

Figura 3.16 – Detalhes do freio acoplado ao fuso do segundo eixo.....	39
Figura 3.17 – Braço do manipulador robótico elétrico.....	41
Figura 3.18 – Torre do manipulador robótico elétrico. ....	42
Figura 3.19 – Primeiro eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.....	43
Figura 3.20 – Carregamentos impostos ao eixo da primeira junta do robô.....	44
Figura 3.21 – Manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.....	46
Figura 4.1 – Eixos e parâmetros das juntas pelo método de DH.....	51
Figura 4.2 - Representação dos eixos do manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos por DH, seguindo Craig, 2005.....	51
Figura 4.3 – Circuito elétrico do motor de passo exemplificado para a fase A. ....	58
Figura 4.4 – Interação entre o ímã permanente e as bobinas. Adaptado de Mayé, 2016...58	
Figura 4.5 – Área atravessada pelo campo magnético. ....	60
Figura 4.6 – Circuito Elétrico Equivalente para um motor de passo bifásico. ....	62
Figura 4.7 - Componentes do manipulador e sistemas de coordenadas utilizados para o cálculo do momento de inércia de massa associado ao 1o grau de liberdade do robô. .	68
Figura 4.8 – Componentes da 2a junta e torre do robô.....	69
Figura 4.9 – Componentes da 3a junta e da 4a junta do robô.....	70
Figura 4.10 – Componentes da 4a junta e da 5a junta do robô.....	71
Figura 5.1 - Diagrama de blocos do controlador por realimentação de estados e integrador do erro de posição.....	74
Figura 5.2 - Diagrama de blocos do controlador por realimentação de estados e integrador de um motor de corrente contínua. ....	75
Figura 5.3 – Malha do controle PV+I com ganhos fixos. ....	79
Figura 5.4 – Parâmetros possíveis de serem utilizados para encontrar a dinâmica desejada para o sistema de controle. Adaptado de Ogata, 1997.....	81
Figura 5.5 – Malha do controlador PV+I com ganhos parametrizados.....	84

Figura 5.6 – Comparação entre os polos do sistema em malha fechada com a utilização de ganhos fixos e com a estratégia de ganhos parametrizados para o 1o eixo.....	86
Figura 6.1 – Diagrama de blocos no Simulink para a simulação do manipulador robótico.....	88
Figura 6.2 – Trajetória percorrido pelo efetuador. ....	89
Figura 6.3 - Movimentação do primeiro eixo para a simulação ponto a ponto. ....	90
Figura 6.4 - Movimentação do segundo eixo para a simulação ponto a ponto. ....	90
Figura 6.5 - Movimentação do terceiro eixo para a simulação ponto a ponto. ....	90
Figura 6.6 - Movimentação do quarto eixo para a simulação ponto a ponto. ....	91
Figura 6.7 - Movimentação do quinto eixo para a simulação ponto a ponto. ....	91
Figura 6.8 - Variação do momento de inércia de massa do 1o eixo sem peça acoplada ao efetuador. ....	92
Figura 6.9 - Variação do momento de inércia de massa do 1o eixo com peça de 1 kg acoplada ao efetuador. ....	94
Figura 6.10 - Variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo com peça de 0,5 kg acoplada ao efetuador. ....	95
Figura 6.11 – Comparação da movimentação do 1o eixo para os dois controladores sem peça no efetuador.....	96
Figura 6.12 – Variação do ganho $KI$ do controlador PV+I por ganhos parametrizados....	97
Figura 6.13 – Variação do ganho $Kp$ do controlador PV+I por ganhos parametrizados...97	97
Figura 6.14 – Variação do ganho $Kv$ do controlador PV+I por ganhos parametrizados...97	97
Figura 6.15 – Comparação da movimentação do 1o eixo para os dois controladores com peça de 1 kg no efetuador.....	100
Figura 6.16 – Posicionamento e movimentação dos polos para a simulação da Figura 6.15.....	101
Figura 6.17 – Variação do ganho $KI$ do Controlador PV+I com ganhos parametrizados.....	101
Figura 6.18 – Variação do ganho $Kp$ do Controlador PV+I com ganhos parametrizados.....	102

Figura 6.19 – Variação do ganho $Kv$ do Controlador PV+I com ganhos parametrizados.....	102
Figura 6.20 – Comparação da movimentação do 1o eixo para os dois controladores com peça de 1 kg no efetuador.....	103
Figura 6.21 – Posicionamento e movimentação dos polos para a simulação da Figura 6.20.....	104
Figura 6.22 – Comparação da movimentação do 1o eixo para os dois controladores sem peça no efetuador.....	104
Figura 6.23 – Posicionamento e movimentação dos polos para a simulação da Figura 6.22.....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Excitação das fases para movimento horário no modo passo completo....	12
Tabela 3.1 – Curso desejado para cada eixo do sistema de coordenadas do robô.....	17
Tabela 3.2 – Eixos do manipulador robótico e seus respectivos tipos de movimentação e espaço de trabalho. ....	18
Tabela 3.3 - Valores dos carregamentos sobre o quarto eixo.....	22
Tabela 3.4 – Parâmetros para determinação da deformação do eixo. ....	25
Tabela 3.5 – Resultados da deformação do eixo para os dois materiais estudados.....	25
Tabela 3.6 – Momento de inércia de massa da carga e do eixo do motor. ....	27
Tabela 3.7 – Valores da distância entre os eixos das polias e do diâmetro da polia maior.....	30
Tabela 3.8 – Tamanho e número de dentes da correia sincronizadora.....	30
Tabela 3.9 – Tamanho e número de dentes da correia sincronizadora.....	34
Tabela 3.10 – Torques: gravitacional, atrito e retenção. ....	38
Tabela 3.11 – Parâmetros do primeiro eixo do manipulador robótico pneumático. ....	41
Tabela 3.12 – Parâmetros para determinação do raio do primeiro eixo.....	45
Tabela 3.13 – Parâmetros para determinação do raio do primeiro eixo.....	45
Tabela 4.1 - Parâmetros de DH para o manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos.	52
Tabela 4.2 - Fatores de transmissão dos eixos.....	56
Tabela 4.3 - Espaço de trabalho requerido aos atuadores.....	57
Tabela 4.4 – Parâmetros referentes à Figura 4.8. ....	69
Tabela 4.5 – Parâmetros referentes à Figura 4.9. ....	70
Tabela 4.6 – Parâmetros referentes à Figura 4.10. ....	72
Tabela 5.1 – Valores das variáveis para a linearização. ....	77
Tabela 5.2 – Tempo de assentamento e momentos de inércia de massa de cada eixo...	82
Tabela 5.3 – Polos dos eixos em malha aberta. ....	83
Tabela 5.4 – Polos dos eixos em malha fechada. ....	83

Tabela 5.5 – Valores dos ganhos calculados. ....	83
Tabela 5.6 – Variação do momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo....	84
Tabela 5.7 – Variação dos ganhos de acordo com a variação do momento de inércia de massa. ....	85
Tabela 6.1 – Parâmetros do atuador elétrico para as simulações. ....	87
Tabela 6.2 – Valores do movimento ponto a ponto para a simulação do robô. ....	89
Tabela 6.3 – Parâmetros da 4ª junta referentes a uma peça de 1 kg no efetuador. ....	93
Tabela 6.4 – Parâmetros inercias da 4ª junta referentes a uma peça de 0,5 kg associada ao efetuador. ....	94
Tabela 6.5 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.11.....	96
Tabela 6.6 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.15.....	100
Tabela 6.7 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.20.....	103
Tabela 6.8 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.22.....	105
Tabela B.1 – Parâmetros geométricos e inerciais dos eixos do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos. ....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
D.O.R.T.	Distúrbio Osteomuscular Eelacionado ao Trabalho
FAG	Fischers Aktien-Gesellschaft
L.E.R.	Lesão por Esforço Repetitivo
MLP	Modulação da Largura Pulso
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NSK	Nippon Seikō Kabushiki-gaisha
P	Prismático
PV+I	Posição, velocidade e integrador
R	Rotacional
SDP/SI	Stock Drive Products / Sterling Instrument

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_i$	Comprimento do elo $i$ , m
$a_{x,y,z}$	Termos do vetor de orientação $Z_i$
$\alpha_i$	Ângulo de torção do elo $i$ , rad
$A$	Coefficiente da função de transferência
$A$	Área limitada pelas espiras nas fases do motor, $m^2$
$\mathcal{A}_{1,2,3}$	Coefficientes da equação de terceira ordem da dinâmica almejada para o sistema controlado
$B$	Coefficiente da função de transferência
$B$	Campo magnético, T
$C_{min}$	Distância mínima para se ter 7 dentes acoplador a polia menor, m
$C_f$	Termo do atrito relativo ao atrito viscoso, Ns/m
$C_{fuso}$	Coefficiente de atrito do sistema de fuso e castanha, Ns/m
$C$	Coefficiente da função de transferência
$c(t)$	Posição do sistema ao longo do tempo, rad ou m
$\mathcal{C}$	Carga causadora do momento fletor sobre eixo, N
$\mathbb{C}$	Distância entre os eixos das polias sincronizadoras, m
$\ddot{d}_{ini}$	Aceleração linear inicial possível de ser desenvolvida, $m/s^2$
$d_{3máx}$	Distância máxima do centro de gravidade do braço relativo ao centro geométrico da torre, m
$d_{3x}$	Distância do centro de gravidade do braço do robô em x, m
$d_{3y}$	Distância do centro de gravidade do braço do robô em y, m
$d_i$	Distância entre elos adjacentes, m
$d$	Deslocamento linear da junta prismática, m

$\delta$	Deformação do eixo
$e_{A,B}$	Tensão elétrica induzida, V
$e_{eq}$	Tensão elétrica induzida equivalente ao agrupamento das fases A e B, V
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal do material, Pa
$e$	Espessura do primeiro eixo do manipulador, m
$\varepsilon$	Coefficiente de amortecimento do sistema, Nm/rad
$F_{A,B}$	Força eletromagnética, N
$F_{elé}$	Força requerida pelos atuadores elétricos do eixo analisado, N
$F_{elev}$	Força no motor para elevação da carga pela aceleração inicial, N
$F_{gM}$	Força gravitacional devido ao motor da quinta junta e ao peso do quarto eixo, N
$F_{gb}$	Força gravitacional vinda do peso do braço do manipulador, N
$F_{gp}$	Força gravitacional da polia acoplada ao quarto eixo, N
$F_i$	Forças de reação nas juntas, N
$F_{pne}$	Força possível de ser desenvolvida pelo atuador pneumático, N
$f_i$	Força de ação do elo, N
$\eta$	Eficiência do sistema de transmissão
$G(s)$	Função de transferência em malha aberta
$H_{Ci}$	Matriz de inércia do elo
$H_{xx}$	Momento de inércia de massa relativo ao eixo $x$ , $\text{kgm}^2$
$H_{yy}$	Momento de inércia de massa relativo ao eixo $y$ , $\text{kgm}^2$
$H_{zz}$	Momento de inércia de massa relativo ao eixo $z$ , $\text{kgm}^2$
$H_{xy}$	Produto de inércia de massa relativo ao plano $xy$ , $\text{kgm}^2$
$H_{xz}$	Produto de inércia de massa relativo ao plano $xz$ , $\text{kgm}^2$

$H_{yz}$	Produto de inércia de massa relativo ao plano $yz$ , $\text{kgm}^2$
$H_{\text{braço}}$	Momento de inércia de massa fixa relacionado ao braço do manipulador robótico elétrico, $\text{kgm}^2$
$H_{\text{elé}}$	Momento de inércia de massa do eixo analisado do manipulador robótico elétrico, $\text{kgm}^2$
$H_{\text{fixo}}$	Momento de inércia de massa fixa relacionado a torre do manipulador robótico elétrico, $\text{kgm}^2$
$H_{\text{móvel}}$	Momento de inércia de massa variável do braço do robô, $\text{kgm}^2$
$H_{\text{motor}}$	Momento de inércia de massa do eixo do motor, $\text{kgm}^2$
$H_{\text{pne}}$	Momento de inércia do eixo analisado do manipulador robótico pneumático, $\text{kgm}^2$
$H(s)$	Função de ganhos do controle no domínio da frequência
$I_{A,B}$	Corrente elétrica, A
$I$	Corrente elétrica fornecida para o motor de passo de duas fases bipolar, A
$I$	Momento de inércia de área do eixo, $\text{m}^4$
$J_1$	Momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade do robô, $\text{kgm}^2$
$J_3$	Momento de inércia de massa relativa a movimentação do 3 <sup>o</sup> eixo do robô, $\text{kgm}^2$
$J_4$	Momento de inércia de massa relativa a movimentação do 4 <sup>o</sup> eixo do robô, $\text{kgm}^2$
$J_{XG}$	Momento de inércia de massa no eixo $x$ do sistema de coordenadas 2, $\text{kgm}^2$
$J_{XGY}$	Produto de inércia no centro de massa, $\text{kgm}^2$
$J_{YG}$	Momento de inércia de massa no eixo $y$ do sistema de coordenadas 2, $\text{kgm}^2$

$J_{zG}$	Momento de inércia no eixo z do sistema de coordenadas 2, $\text{kgm}^2$
$J_{eixos}$	Momento de inércia de massa do 2 <sup>o</sup> , 3 <sup>o</sup> , 4 <sup>o</sup> e 5 <sup>o</sup> eixos do robô, $\text{kgm}^2$
$J_f$	Momento de inércia de massa relativa a movimentação do 2 <sup>o</sup> eixo do robô, $\text{kgm}^2$
$J_{g3}$	Momento de inércia de massa do terceiro eixo em relação ao eixo z do sistema de coordenada 1, $\text{kgm}^2$
$J_{g4}$	Momento de inércia de massa do quarto eixo em relação ao eixo z do sistema de coordenada 1, $\text{kgm}^2$
$J_{motor}$	Momento de inércia de massa do eixo e do redutor unidos, $\text{kgm}^2$
$J$	Momento de inércia de massa dos eixos do robô, $\text{kgm}^2$
$K_E$	Ganhos das variáveis de estado
$K_I$	Ganho do controle para o integrador
$K_p$	Ganho do controle para o erro de posição
$K_v$	Ganho do controle para o erro de velocidade
$L_{A,B}$	Indutância elétrica, L
$L_{eq}$	Indutância elétrica equivalente do agrupamento das fases A e B, H
$\ell$	Dimensão do braço de alavanca, m
$\mathbb{L}$	Tamanho da correia sincronizadora, m
$\mathcal{L}$	Comprimento das bobinas nas fases do motor, m
$M_p$	Sobrepasso relativo a posição almejada
$m_{eixo}$	Massa transportada pelo eixo, kg
$m_{eq}$	Massa equivalente sobre o primeiro eixo do robô pneumático, kg
$m_i$	Massa do elo, kg
$\mathbb{M}$	Momento fletor sobre o primeiro eixo do robô, Nm

$n_{x,y,z}$	Termos do vetor de orientação $X_i$
$\ddot{\theta}_{ini}$	Aceleração angular inicial possível de ser desenvolvida, rad/s <sup>2</sup>
$\dot{\theta}_o$	Velocidade instantânea de operação do atuador, rad/s
$\Theta_i$	Ângulo entre elos adjacentes ou juntas, rad
$\Delta\theta$	Diferença entre a posição requerida e a posição momentânea, rad
$\theta$	Ângulo de rotação do atuador, rad
$\emptyset$	Passo do motor
$\Phi$	Equação da dinâmica desejada ao sistema controlado
$\mathbb{P}_{Ci}^i$	Vetor do centro de massa do elo relativo ao centro de coordenadas da junta
$P_i$	Vetor de posicionamento da garra com relação a base do manipulador
$P_{i+1}^i$	Vetor posição da junta $i + 1$ com relação a junta $i$ representada no sistema de coordenadas da junta $i + 1$
$\mathcal{P}_{1,2,3}$	Polos da dinâmica desejada
$\mathcal{P}_{x,y,z}$	Termos de orientação do vetor $P_i$
$\mathbb{P}_{fuso}$	Passo do sistema de fuso e castanha
$\mathbb{P}_{sinc}$	Passo da correia sincronizadora
$p$	Número de pares de polos magnéticos no rotor
$R_{A,B}$	Resistência elétrica, $\Omega$
$R_{eq}$	Resistência elétrica equivalente do agrupamento das fases A e B, $\Omega$
$R_{xy\mathfrak{a}}$	Forças de reações sobre os rolamentos do quarto eixo, ponto $\mathfrak{a}$ , N
$R_{xy\mathfrak{b}}$	Forças de reações sobre os rolamentos do quarto eixo, ponto $\mathfrak{b}$ , N
$\mathcal{R}_i^{i+1}$	Matriz de rotação da junta $i + 1$ sobre a junta $i$
$r$	Raio efetivo do rotor, m
$r_{eixo1}$	Raio do primeiro eixo, m

$r_{fuso}$	Raio do fuso, m
$r_{int1}$	Raio interno do eixo da primeira junta, m
$r_{polia1}$	Raio da polia acoplada sobre o primeiro eixo do robô pneumático, m
$r_{polia3}$	Raio da polia acoplada ao terceiro eixo do robô elétrico, m
$r_{polia4}$	Raio da polia menor montada sobre o eixo do motor da quarta junta, m
$r_{polia5}$	Raio da polia maior montada sobre a quarta junta, m
$r$	Taxa de redução
$\xi_{x,y,z}$	Termos do vetor de orientação $Y_i$
$s$	Operador de Laplace para o domínio da frequência
$T_i^{i-1}$	Matriz de transformação homogênea do elo $i$ com relação ao elo $i - 1$
$T_{A,B}$	Torque eletromagnético fornecido pelas fases do motor, Nm
$T_M$	Torque eletromagnético do motor, Nm
$T_{Mec}$	Torque mecânico que solicita o atuador, Nm
$T_{atr}$	Torque requerido ao motor do eixo para elevação da carga devido ao atrito do sistema de fuso e castanha, Nm
$T_c$	Torque que solicita o atuador, Nm
$T_{disp}$	Torque disponível para operação, Nm
$T_{elé}$	Torque requerido pelos atuadores elétrico do eixo analisado, Nm
$T_{elev}$	Torque requerido ao motor do eixo para elevação da carga, Nm
$T_{gatr}$	Torque de atrito em condição estática para o fuso e castanha do segundo eixo, Nm
$T_{gb}$	Torque gravitacional vinda do peso do braço do manipulador sobre o fuso e castanha, Nm
$T_i$	Torques de reação nas juntas, Nm

$T_{pne}$	Torque produzido pelos atuadores pneumáticos do eixo analisado, Nm
$T_r$	Torque de retenção, Nm
$t_i$	Torque de ação do elo, Nm
$t_r$	Torque máximo de retenção, Nm
$t_d$	Tempo de atraso, s
$t_p$	Tempo de pico, s
$t_r$	Tempo de subida, s
$t_s$	Tempo de estabilização, s
$t_{min}$	Número mínimo de dentes a serem engrenados na polia menor
$\mathcal{J}(s)$	Função de transferência em malha fechada
$t$	Tempo, s
$u$	Sinal de controle, A
$V_{A,B}$	Tensão elétrica de alimentação, V
$\dot{v}$	Aceleração linear do elo, m/s <sup>2</sup>
$V$	Tensão de alimentação para o motor de passo de duas fases bipolar, V
$\omega_n$	Frequência natural desejada ao sistema, rad/s
$\omega$	Velocidade angular do elo, rad/s
$X_i$	Vetor de orientação com relação ao eixo $x$ da base do manipulador
$\bar{X}$	Distância do centro de massa do elo com relação ao centro da junta para o eixo $x$ , m
$x_i$	Eixo de coordenada cartesiana da junta $i$ , m
$x$	Espaço de estados do sistema
$Y_i$	Vetor de orientação com relação ao eixo $y$ da base do manipulador
$\bar{Y}$	Distância do centro de massa do elo com relação ao centro da junta para o eixo $y$ , m

$y_i$	Eixo de coordenada cartesiana da junta $i$ , m
$\varphi_{A,B}$	Fluxo induzido das fases do motor de passo, Vs
$\varphi_M$	Fluxo induzido máximo, Vs
$\gamma$	Ângulo de avanço do sistema de fuso e castanha, °
$\hat{z}_{i+1}^{i+1}$	Vetor de eixo de atuação
$Z_i$	Vetor de orientação com relação ao eixo z da base do manipulador
$\bar{Z}$	Distância do centro de massa do elo com relação ao centro da junta para o eixo z, m
$z_i$	Eixo da coordenada cartesiana da junta $i$ , m

### Símbolos

$(\dot{\quad})$	Derivada primeira com relação ao tempo
$(\ddot{\quad})$	Derivada segunda com relação ao tempo
$(\overset{\cdot\cdot\cdot}{\quad})$	Derivada terceira com relação ao tempo
$(\quad)^*$	Variável considerada constante para o processo de derivação na linearização
$(\bar{\quad})$	Distância até o centro de massa
$(\tilde{\quad})$	Erro ou diferença
$\Delta$	Variação

### Índices

$(\quad)_i$	Subíndice de indicação da junta do robô estudada
$(\quad)_{A,B}$	Subíndice de indicação da fase do motor de passo bifásico em análise
$(\quad)_{pne}$	Subíndice indicando que a grandeza análise é do robô pneumático

- ( )<sub>elé</sub> Subíndice indicando que a grandeza análise é do robô elétrico
- ( )<sub>x,y,z</sub> Subíndice indicando o eixo cartesiano da grandeza analisada
- ( )<sub>eq</sub> Subíndice indicando a equivalência das grandezas unidas
- ( )<sub>min</sub> Subíndice de indicação de condição de valor mínimo
- ( )<sub>c</sub> Subíndice indicando que a grandeza é relativa ao centro de gravidade
- ( )<sup>i</sup> Superíndice indicando a partir de qual junta está sendo analisada

# 1 INTRODUÇÃO

A automação de sistemas mecânicos tem possibilitado, para as empresas, o aumento do lucro e da competitividade, a diminuição de custos e de riscos para os operadores em ambientes inapropriados e/ou perigosos. Com isso, o consumidor final também se beneficia, pois, com os proveitos citados, as empresas podem diminuir os preços dos seus produtos.

Entre os sistemas de automação, o mercado de manipuladores robóticos tem tido crescimento nos últimos anos. No mercado brasileiro, por exemplo, mil e quinhentos robôs são comercializados anualmente [Silva, 2017], e, no mercado mundial, a indústria chinesa destaca-se, com a compra de oitenta e sete mil robôs no ano de 2016 [International Federation of Robotics, 2017].

## 1.1 Motivação

Um estudo analisou as tarefas desempenhadas em uma indústria local dedicada à fabricação de ferramentas manuais. Nesse estudo, constatou-se que a empresa apresentava, em grande parte de suas atividades, operações monótonas e repetitivas, das quais se tem: a alimentação de máquinas, a paletização e a movimentação de carga desempenhadas de modo manual [Allgayer, 2011]. Além dessas atividades causarem desconfortos emocionais e físicos ao operador, elas podem causar diversas doenças, por exemplo, como cita Varella, 2011, a síndrome da Lesão por Esforço Repetitivo (L.E.R.) ou o Distúrbio Osteomuscular Relacionado ao Trabalho (D.O.R.T.).

Dessa forma, concluiu-se que, para uma determinada tarefa de transporte de peças, era necessária sua automação. Para tal atividade, Allgayer, 2011, constatou que, devido a essa tarefa ser feita por um trabalhador, a exigência de precisão não seria elevada. Além disso, as massas das peças, a serem transportadas por esse mecanismo automatizado, não seriam elevadas, não ultrapassando 1 kg. Adicionalmente, a operação exige flexibilidade na manipulação das peças. Com base nessas constatações, o mecanismo automatizado mais apropriado para desempenhar essa tarefa seria um manipulador robótico. Entretanto, como constatado por Sarmanho, 2014, a maioria dos robôs industriais trabalham superdimensionados, tanto com relação à precisão quanto com relação à

capacidade de carga, o que também aconteceria nesse caso, devido à baixa demanda desses parâmetros para a tarefa analisada.

Em trabalhos anteriores, propuseram-se projetos de manipuladores robóticos de atuadores pneumáticos, para solucionar esse problema da empresa, como apresentado por Allgayer, 2011, Rijo, 2013, Sarmanho, 2014, entre outros trabalhos.

Em função da maioria dos manipuladores robóticos, encontrados no mercado, serem atuados por motores elétricos, e devido aos trabalhos que propuseram soluções para a automatização da tarefa trataram do projeto de um robô acionado por atuadores pneumáticos, justifica-se este estudo se dedicar ao projeto de um robô cilíndrico acionados por atuadores elétricos.

## **1.2 Objetivos do estudo**

O objetivo principal desse estudo é definir a configuração e o dimensionamento mecânico de um manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos atuado por motores de passo e propor e simular um controlador por realimentação de estados e integrador do erro de posição para os atuadores das juntas do robô.

Com os seguintes objetivos específicos:

- Definir a configuração geométrica dos eixos do robô e dimensionar seus componentes;
- Determinar uma estratégia de controle que atenda às necessidades de precisão, baseada nas características do atuador determinado e nos requisitos de operação;
- Realizar simulações computacionais para avaliar o projeto do manipulador robótico.

## **1.3 Organização do trabalho**

Para alcançar tais objetivos, inicia-se com a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica sobre os principais tópicos relativos a este projeto, apresentada no Capítulo 2. Dessa forma, as principais partes de manipuladores robóticos e sua

classificação são apresentadas. Além disso, a metodologia deste projeto é descrita, bem como os principais tipos de atuadores utilizados em robôs, destacando-se os motores de passo, devido à aplicação neste projeto. Por fim, os principais projetos de robôs, que guiaram este trabalho, são mostrados.

No Capítulo 3, denominado projeto mecânico do manipulador robótico, são indicados os requisitos de projeto, assim como é apresentada a escolha do tipo de atuador elétrico, além de serem investigadas e detalhadas as soluções encontradas para a configuração geométrica de cada eixo, mostrando a composição geométrica final do manipulador robótico.

Na sequência, no Capítulo 4, denominado “Modelo Matemático”, é apresentada a cinemática e a dinâmica do manipulador robótico, assim como as equações que regem o comportamento mecânico e elétrico do atuador, além do comportamento mecânico do manipulador robótico. Além disso, o modelo matemático, referente ao momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade, é apresentado.

Com base no modelo matemático, o Capítulo 5 trata do projeto do controlador, no qual é desenvolvido um controlador PV+I (posição, velocidade e integrador) por realocação dos polos da dinâmica desejada, com o objetivo de controlar os motores de passo em cada junta do robô. Para o primeiro eixo do robô, por conta da variação do momento de inércia de massa associado a essa junta, é proposto um controlador PV+I com ganhos parametrizados, no qual os ganhos são calculados a cada ciclo de controle, com base no modelo matemático da parametrização do momento de inércia de massa, associado ao primeiro grau de liberdade.

Para avaliar os controles para os eixos do manipulador robótico, o Capítulo 6 trata das simulações computacionais. A primeira seção abrange as simulações dos eixos do robô com o controle PV+I com ganhos fixos. A segunda seção apresenta uma avaliação da variação do momento de inércia de massa, associado ao primeiro eixo, conforme a movimentação do robô, principalmente, relativa à movimentação do terceiro eixo e do quarto eixo. A movimentação do quarto eixo é simulada, com e sem peça ligada ao efetuador. Por fim, são apresentadas as simulações para o primeiro grau de liberdade, sem peça e com peça, para os dois controladores apresentados no trabalho, o controlador PV+I com ganhos parametrizados e o controlador PV+I com ganhos fixos, comparando os resultados.

Ao final do trabalho são detalhadas as conclusões sobre o projeto do manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos com atuação elétrica, além de serem mostrados possíveis trabalhos futuros, que poderão ser desenvolvidos sobre o tema deste trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Spong, et al, 2004, afirmam que o entendimento acerca dos manipuladores robóticos e da sua aplicação requer um conhecimento em diversas áreas, entre as quais se destaca: a engenharia mecânica, a engenharia elétrica, a engenharia de sistemas, a matemática e a ciência da computação. Desse modo, este capítulo tem como objetivo mostrar os principais conhecimentos necessários para o entendimento dos próximos capítulos deste trabalho, tendo, assim, uma abrangência geral sobre o assunto, já que os capítulos específicos, a respeito de cada etapa do projeto do manipulador robótico, tratarão mais detalhadamente sobre cada assunto.

Inicia-se este capítulo mencionando as principais partes de manipuladores robóticos e a sua classificação geométrica. Após essa discussão, em virtude do tema do trabalho, o projeto de manipuladores robóticos é tratado com o foco na divisão das tarefas para que se alcance o objetivo de projetar um robô. Dessa maneira, entre as principais partes do projeto do robô, está a escolha dos atuadores e do projeto do controle desses dispositivos. A terceira seção deste capítulo apresenta os principais tipos de atuadores utilizados em projetos de manipuladores robóticos, tendo como foco os atuadores elétricos, assunto tratado neste trabalho. Uma subseção apresenta as principais partes que compõem um motor de passo e o seu funcionamento.

Para finalizar, alguns sistemas de transmissão mecânicos são citados, em razão da sua importância na concepção e na construção dos eixos de atuação do robô. Além disso são brevemente abordados os principais projetos de manipuladores robóticos utilizados como referência para este estudo.

### **2.1 Manipuladores Robóticos**

Manipuladores robóticos são braços mecânicos, constituídos de elos, juntas, atuadores e efetuador, que têm como objetivo manusear peças por meio de movimentos preestabelecidos, os quais podem ser alterados conforme a necessidade da operação [Craig, 2005].

Segundo Fu et al, 1987, eles correspondem aos componentes mecânicos que fazem a ligação entre as juntas. As juntas constituem os graus de liberdade do robô e são movimentadas por atuadores. As juntas são divididas em lineares e em rotacionais, conforme o seu movimento e a sequência de disposição das juntas, partindo da base, determina a classificação geométrica do manipulador robótico.

O efetuador corresponde ao dispositivo de precisão para aplicação em movimento de peças, ou à ferramenta que permite ao manipulador conduzir a peça em determinada trajetória para a execução de um processo. A Figura 2.1 apresenta ilustração de um manipulador robótico com suas juntas, elos e efetuador.

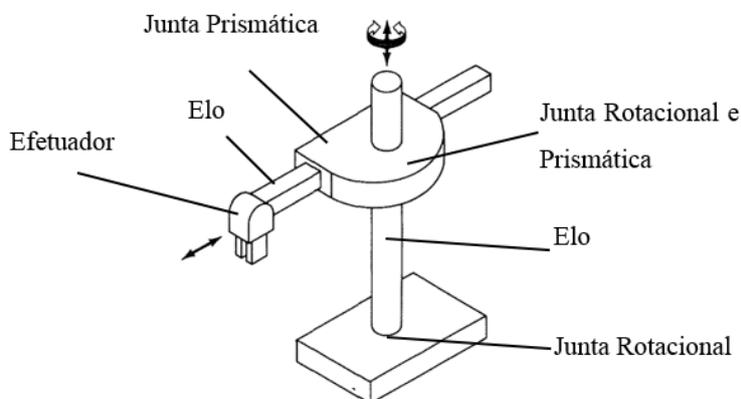


Figura 2.1 – Ilustração de um manipulador robótico. Adaptado de Fu et al, 1987.

### 2.1.1 Classificação Geométrica de Manipuladores Robóticos

Os manipuladores robóticos são classificados geometricamente de acordo com a sequência de tipos de juntas, partindo da base. Segundo Craig, 2005, a classificação caracteriza as estruturas nos tipos: Cartesiano, Cilíndrico, Esférico, SCARA e Articulado. A seguir, cada um dos modelos de robôs é descrito:

- **Robô Cartesiano**: Os robôs cartesianos têm as três juntas iniciais prismáticas (PPP). Segundo Rosário, 2005, os manipuladores cartesianos possuem pequena área de trabalho, quando comparados com manipuladores de dimensões semelhantes, mas de diferente geometria. Porém, possuem elevada rigidez mecânica e são capazes de grande

precisão, por conta da facilidade de controle. Esses robôs são, principalmente, utilizados para transporte e armazenamento de cargas;

- Robô Cilíndrico: São compostos por uma junta rotacional, no primeiro eixo, e duas juntas lineares, na sequência (RPP). Normalmente, possuem rigidez mecânica inferior ao cartesiano, por conta da maior variação dessa característica pelo movimento dos eixos. Quando comparados com os robôs cartesianos, de mesma proporção, o controle é mais complexo, pois o momento de inércia de massa associado, principalmente ao primeiro eixo, varia para os diferentes pontos no volume de trabalho do robô, contudo possuem volume de trabalho superior ao dos cartesianos.
- Robô Esférico: São compostos por duas juntas rotacionais e, na sequência dessas juntas, uma junta prismática (RRP). Essas juntas possuem os seus eixos de atuação perpendiculares entre si. O volume de trabalho formado é esférico, sendo superior ao volume dos robôs cilíndricos, de mesma proporção, porém (os robôs esféricos) possuem menor rigidez mecânica;
- Robô SCARA: Têm a mesma configuração que os robôs esféricos (RRP), porém os eixos das suas juntas são paralelos;
- Robô Articulado: São compostos por três juntas de rotação (RRR), sendo a configuração geométrica similar a de um braço humano. Possuem uma grande área de trabalho, mas baixa rigidez mecânica, devido às juntas rotacionais.

## **2.2 Projeto de Manipuladores - Unidades Técnicas de Projeto**

Na maioria dos projetos de produtos são necessárias divisões em partes de conhecimento técnico similar, para que, dessa maneira, seja estabelecida uma lógica e sequenciamento das tarefas e, assim, seja facilitado o desenvolvimento do equipamento e o gerenciamento do projeto. A diversidade de conhecimento necessário para o projeto de um robô justifica a divisão do projeto

Para o projeto do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos, dividiu-se o trabalho em etapas. Tais etapas foram definidas com base nos trabalhos de outros manipuladores robóticos estudados, sendo eles: Allgayer, 2011, Sarmanho, 2014 e Cardozo, 2012.

Neste trabalho, dividiu-se o projeto do manipulador robótico como segue: Projeto Mecânico, Modelo Matemático, Projeto do Controle, Simulações, Especificação e construção do sistema experimental e Experimentos.

O projeto mecânico trata das especificações, das definições, dos detalhamentos e dos dimensionamentos dos componentes mecânicos, que compõem os eixos do manipulador robótico.

O modelo matemático consiste do equacionamento dos sistemas dinâmicos de atuação para posterior utilização no projeto do controle e nas simulações computacionais. Também é necessária a caracterização do comportamento cinemático e do dinâmico do manipulador robótico.

Partindo dessas etapas iniciais, o projeto do controle, podendo ser determinado por meio da modelagem matemática dos sistemas do manipulador, deve estabelecer uma lógica para controlar os atuadores, com o objetivo de cumprir os requisitos de projeto.

As simulações computacionais do controlador têm como objetivo investigar se as movimentações das juntas do robô estão adequadas as tarefas demandadas, analisando todos os parâmetros relevantes à operação do sistema. Pode ser necessário realizar simulações para verificar o comportamento dinâmico e estrutural do manipulador.

Quando todos os testes computacionais necessários para a aprovação do projeto do robô forem realizados, e caso os resultados sejam favoráveis, deve-se especificar e construir o sistema experimental, para realização dos experimentos. Essa etapa, simplificada, trata da especificação e da aquisição da arquitetura de controle, bem como das tarefas relativas à construção, à aquisição e à montagem dos sistemas mecânicos.

Por fim, os experimentos abordam as questões necessárias para os testes do robô, como a programação do algoritmo de controle, as medições de alinhamento dos componentes do robô, as verificações da montagem e as instalações de sensores, entre outros. A partir dessas tarefas iniciais, deve-se avaliar o comportamento do robô, frente aos testes especificados, com base nos requisitos de operação.

### 2.3 Atuadores

A escolha do tipo de atuador é importante para todas as etapas do projeto do robô, pois orienta o projeto mecânico, a modelagem do sistema dinâmico e o projeto do controlador, que, por sua vez, tem influência nas demais fases. Baseado nisso, estudou-se os principais tipos de atuadores utilizados nesses equipamentos, sendo eles: atuadores hidráulicos, pneumáticos e elétricos.

De acordo com Craig, 2005, inicialmente, os atuadores hidráulicos foram os mais populares utilizados em projeto de manipuladores robóticos, principalmente pela força de atuação e pelos sistemas de controle de posição. Algumas das desvantagens desses atuadores são: a necessidade de vários sistemas e de peças auxiliares para operação, como, por exemplo, bombas, armazenadores, servo válvulas, válvulas de segurança, etc. e a possibilidade de vazamentos, o que causa sujeira e perigo para a operação.

Os atuadores pneumáticos, por sua vez, também possuem grande capacidade de força e, dessa forma, normalmente, não necessitam de sistemas de redução. A complexidade da modelagem matemática da compressibilidade do ar e a dificuldade do controle são as principais dificuldades que limitam a utilização desses atuadores para esse tipo de robô.

Os atuadores elétricos são os mais utilizados, atualmente, para o projeto de manipuladores robóticos. Mayé, 2016, afirma que as principais vantagens desses atuadores são a facilidade de adaptação entre o atuador e o controle, devido à natureza elétrica dos dois, e a simplificação dos sistemas eletrônicos, em razão do avanço no campo de seus componentes, assim como a melhoria da performance dos motores elétricos, graças à utilização de ímãs permanentes e ao avanço nas simulações. Cabe ainda citar a maior facilidade de controle, frente aos atuadores hidráulicos e aos pneumáticos, em razão da maior facilidade da modelagem matemática das não linearidades dos atuadores elétricos. Entre as principais desvantagens desses sistemas de atuação, está a baixa razão potência peso, a saturação eletromagnética, o aquecimento e a restrição de ambientes de utilização.

### 2.3.1 Motores de Passo

Entre os motores elétricos, de acordo com Mayé, 2016, o motor de passo destaca-se pela facilidade de controle para o posicionamento, sendo essa sua principal utilização. O princípio de funcionamento de um motor de passo é por um deslocamento angular elementar, executado toda vez que o circuito de controle executa a comutação da corrente elétrica em uma ou mais das fases do motor. Desse modo, uma estreita sucessão de comutações torna possível obter uma rotação contínua. Existem três principais tipos de motores de passo, sendo os de relutância variável, os de imã permanente e os híbridos. Atualmente, a maioria dos motores de passo comercializados são os do tipo híbrido, pois agregam as melhores características de atuação dos demais tipos porque operam usando os princípios do motor de imã permanente e os de relutância variável [Kenjo et al, 2003]. Acrescenta-se que esse tipo de atuador é o que será utilizado no projeto do manipulador robótico deste estudo. Para facilitar o entendimento sobre o princípio de funcionamento desse tipo de atuador, a Figura 2.2 apresenta uma ilustração das principais partes de um motor de passo híbrido de duas fases.

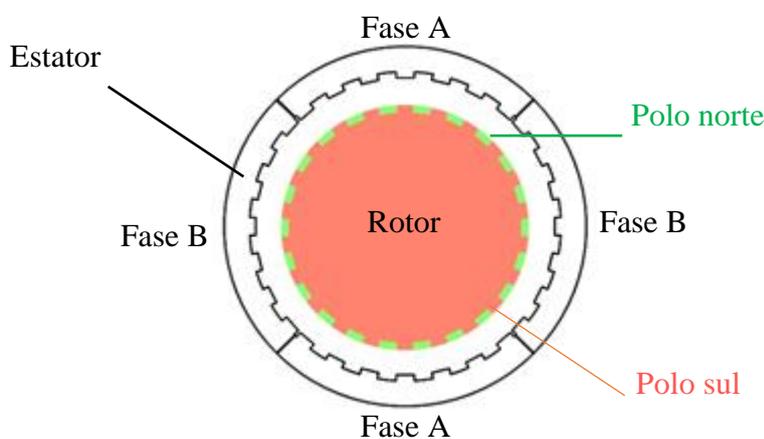


Figura 2.2 – Ilustração esquemática de um motor de passo híbrido de duas fases.

Entre os principais componentes desse tipo de atuador, tem-se o rotor do motor de passo híbrido, apresentado no centro da Figura 2.2. Esse rotor é composto por um núcleo permanentemente magnetizado, de modo a gerar um campo unipolar [Aarnley, 2002]. No entorno do rotor, existe um agrupamento de engrenagens polarizadas pelo ímã do núcleo. Os polos sul e norte do rotor magnetizado, são defasados por um dente de

engrenagem. O estator é composto por duas fases que podem inverter as suas polaridades, ou seja, cada fase pode ser alimentada com tensão positiva ou negativa.

A figura 2.3 ilustra um motor de passo sendo acionado no modo passo completo, com as duas fases acionadas simultaneamente, sendo que essa característica é benéfica para o caso de necessidade da geração de maior torque.

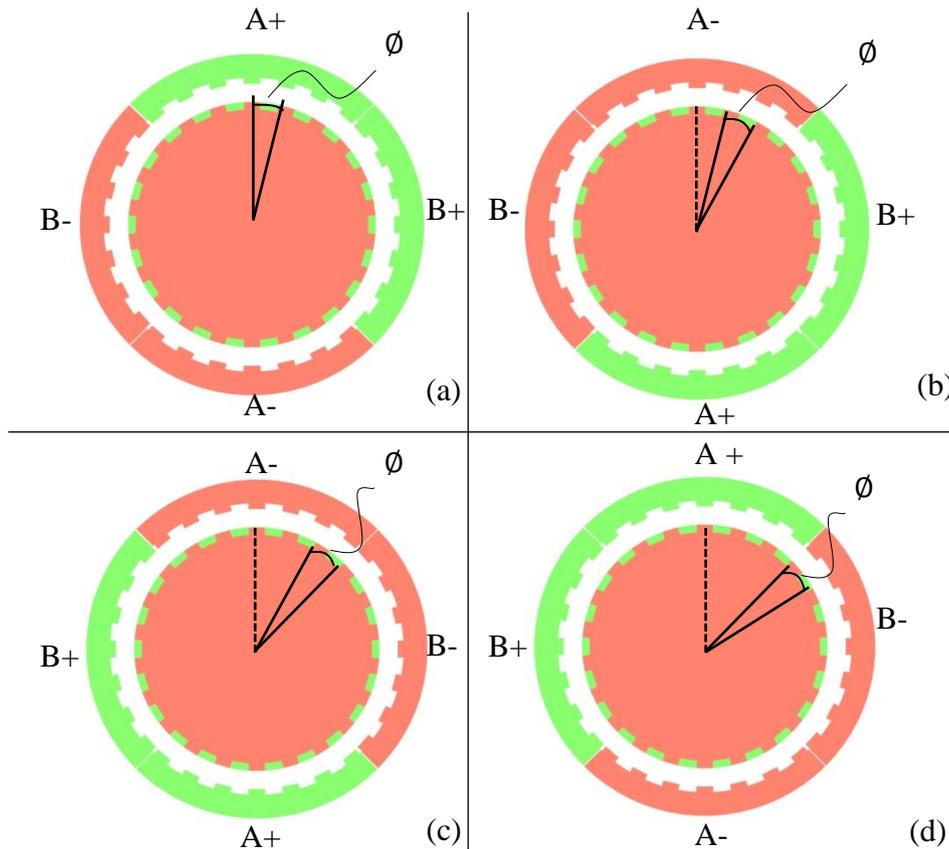


Figura 2.3 – Acionamento do motor de passo no modo passo completo.

A Figura 2.3 (a) apresenta a primeira excitação do motor, no qual as fases A e B são acionadas com uma tensão positiva, fazendo o rotor iniciar o movimento no sentido horário. Se o motor tiver somente esse acionamento, será completado um passo de movimentação, por isso o nome da excitação é passo completo. Essa rotação é da dimensão do ângulo elementar do motor, conhecida como passo do motor ( $\emptyset$ ).

Na sequência, a Figura 2.3 (b) apresenta a primeira comutação entre as fases do motor, onde a fase A é excitada com uma tensão negativa, enquanto a fase B continua com a tensão positiva. Isso faz com que o rotor gire, novamente, o ângulo elementar, o

passo do atuador, no mesmo sentido da excitação anterior. Outras duas comutações entre as fases são mostradas para a continuidade do movimento. A Figura 2.3 (c) mostra a terceira excitação, onde as fases A e B são acionadas com uma tensão negativa, e, finalmente, a Figura 2.3 (d) apresenta a última maneira de acionar as fases antes de reiniciar o processo, na qual a fase A é acionada com tensão positiva e a fase B com tensão negativa. Ao reiniciar o processo, partindo novamente para a Figura 2.3 (a), o motor completou quatro passos.

No projeto mecânico do robô, tema do próximo capítulo, os motores de passo especificados possuem passo de  $1,8^\circ$  ou  $0,031416$  radianos. Dessa forma, para realizar uma rotação completa do rotor no atuador são necessários 200 passos.

A Tabela 2.1 apresenta o modo de acionar as fases para gerar o movimento horário, apresentado na Figura 2.3, onde o movimento anti-horário, por sua vez, é alcançado pela excitação seguindo essa tabela de baixo para cima. A Figura 2.4 apresenta uma configuração para o controle e acionamento de um motor de passo.

Tabela 2.1 – Excitação das fases para movimento horário no modo passo completo.

Fase A	Fase B
Tensão Positiva	Tensão Positiva
Tensão Negativa	Tensão Positiva
Tensão Negativa	Tensão Negativa
Tensão Positiva	Tensão Negativa

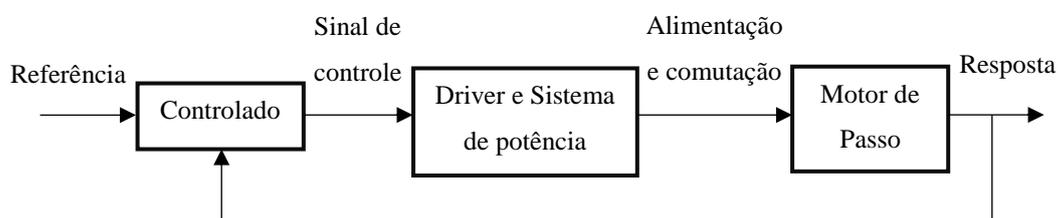


Figura 2.4 – Arranjo para o controle e acionamento de um motor de passo.

Como pode ser observado na Figura 2.4, o controlador, com base no valor de referência exigido para a movimentação do motor de passo e na resposta do atuador, emite um sinal de controle para o driver e para o sistema de potência. Esses, como base nesse

sinal, realizam a alimentação e a comutação entre as fases do motor de passo, para que o atuador realize a movimentação exigida pelo controlador. O motor de passo realiza a movimentação e a sua resposta é monitorada para fechar a malha de controle.

O controlador projetado neste trabalho consiste do algoritmo para a produção do sinal de controle, não abrangendo a lógica de comutação entre as fases do atuador, a qual (comutação) é assumida como sendo efetuada pelo driver.

## **2.4 Sistemas de Transmissão**

Os atuadores elétricos, normalmente, necessitam de sistemas mecânicos de transmissão, por conta da baixa capacidade de torque e da força de atuação, quando comparados com atuadores hidráulicos e pneumáticos. Além do mais, os sistemas de transmissão mecânicos, utilizados em manipuladores robóticos, também têm como objetivo reduzir as velocidades de atuação, alterar o tipo de movimento, de rotacional para linear, ou de linear para rotacional, e aumentar a precisão das juntas do robô. Além dos pontos positivos, cabe citar algumas desvantagens da utilização de sistemas de transmissão mecânicos em robôs, os quais correspondem, principalmente, ao aumento do atrito nos eixos do robô e às folgas existentes entre os componentes mecânicos.

Entre os sistemas de transmissão mecânicos, os mais comuns de serem utilizados, nos projetos mecânicos de manipuladores robóticos, são os redutores de engrenagem [Cardozo, 2012], o came e fuso [Allgayer, 2011], o parafuso de rosca sem fim e pinhão [da Silva, 2012], a correia sincronizadora [Allgayer, 2011, Rijo, 2013, Sarmanho, 2014, Preti, 2014, Strobotics, 2017] e o fuso e castanha (encontrado, principalmente, na última junta de robôs SCARA).

## **2.5 Principais Manipuladores Robóticos Estudados**

Os principais projetos de manipuladores robóticos, estudados para a construção deste projeto, serão tratados nesta seção. Como mencionado, previamente, os requisitos de projeto deste trabalho são os mesmos que foram utilizados na construção, principalmente, dos trabalhos de Allgayer, 2011, Rijo, 2013, e Sarmanho, 2014.

Allgayer, 2011, apresenta um projeto de um manipulador robótico cilíndrico de atuadores pneumáticos, onde são descritas todas as fases iniciais do projeto: definição dos componentes e da configuração dos eixos, modelagem matemática do manipulador e do sistema de atuação, algoritmo de controle e simulações computacionais. A Figura 2.5 apresenta o manipulador robótico projetado por Allgayer, 2011.

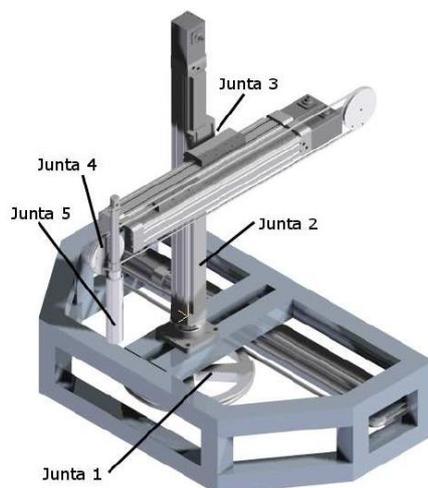


Figura 2.5 – Manipulador robótico com atuadores pneumáticos.

Rijo, 2013, fundamentado no projeto do manipulador robótico proposto por Allgayer, 2011, apresenta algumas modificações com relação à configuração geométrica da terceira, da quarta e da quinta juntas do robô. Em seu trabalho, tem-se como foco o projeto do controle do primeiro grau de liberdade do manipulador, pois, como citado, anteriormente, a inércia transportada por esse eixo varia, principalmente, com a atuação do terceiro eixo e do quarto eixo. Dessa forma, é apresentado um algoritmo de controle PVA com *gain scheduling*, no qual os valores dos ganhos do sistema de controle, para o primeiro eixo, são modificados, conforme a variação da inércia ocasionada pela movimentação do robô.

Sarmanho, 2014, apresenta o projeto completo do manipulador robótico, partindo do projeto mecânico, da modelagem matemática, do projeto de controle e da arquitetura de controle, e mostrando os resultados das simulações e dos experimentos práticos realizados com o manipulador robótico. A Figura 2.6 mostra o manipulador robótico apresentado pelo autor.



Figura 2.6 – Manipulador robótico de 5 graus de liberdade com acionamento pneumático [Sarmanho, 2014].

Além desses trabalhos, outros projetos de manipuladores robóticos foram estudados. Desses, cabe citar o trabalho de Cardozo, 2012, pois esse estudo trata do projeto de um manipulador robótico articulado, atuado por motores de passo. O trabalho, apresenta o projeto, a construção, a montagem, as simulações e os experimentos de um manipulador robótico de seis graus de liberdade. Nesse trabalho, é projetado um algoritmo de controle para os motores de passo, baseado na estimativa da frequência de passos que devem ser enviados ao driver do motor. A Figura 2.7 mostra o robô projetado por Cardozo, 2012.



Figura 2.7 – Robô articulado [Cardozo, 2012].

### 3 PROJETO MECÂNICO DO MANIPULADOR ROBÓTICO

Para o projeto do manipulador robótico de cinco eixos por atuadores elétricos, foram considerados os requisitos de projeto pesquisados com base em uma indústria de ferramentas manuais. Essa pesquisa foi realizada nos trabalhos de Allgayer, 2011, Rijo, 2013, e Sarmanho, 2014, onde se constatou que as massas das peças a serem transportadas pelo manipulador robótico não ultrapassavam 1 kg e a precisão de posicionamento requerida ao manipulador robótico era modesta. O espaço de trabalho desejado para o robô, apresentado nesses estudos, seria similar ao volume alcançado por um homem sentado, sendo essa a posição de trabalho adequada para a tarefa de movimentação de tais peças.

A norma ABNT 9050:2004 regulariza os alcances possíveis de serem desenvolvidos por um homem nessa posição. Desse modo, o volume de trabalho desejado para o robô pode ser determinado. Esse volume é mostrado na Figura 3.1, na qual se tem a comparação deste volume almejado de se alcançar com a capacidade do manipulador robótico projetado.

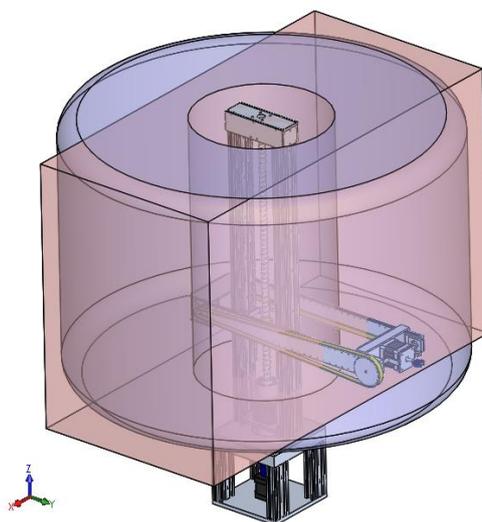


Figura 3.1 – Volume do trabalho desejado (roxo) e o volume de trabalho obtido com o projeto mecânico do manipulador (azul).

O curso desejado para cada eixo do sistema de coordenadas da Figura 3.1 é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Curso desejado para cada eixo do sistema de coordenadas do robô.

Eixos Cartesianos	Exigência (mm)
Eixo X	1000
Eixo Y	400
Eixo Z	de 650 à 1200

A pesquisa desenvolvida pelos autores expõe que a flexibilidade de movimentação para a tarefa a ser automatizada é importante, sendo necessário um manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos para o completo manuseio das peças pelo volume de trabalho. A Figura 3.2 mostra o manipulador robótico projetado, definindo os seus eixos de atuação e a posição dos atuadores de cada junta de atuação.

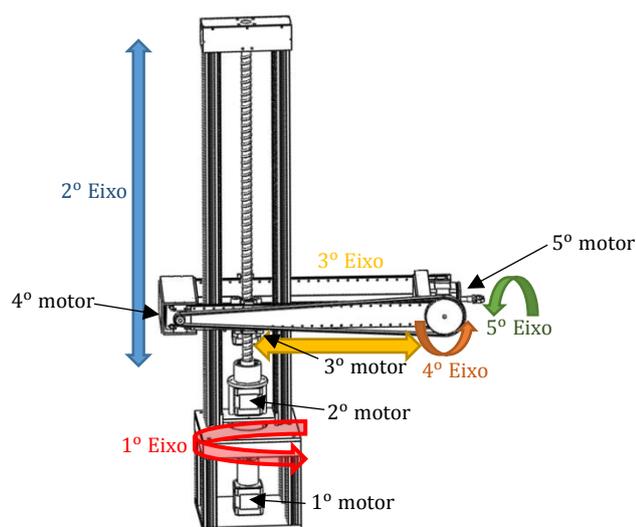


Figura 3.2 – Eixos de atuação e disposição dos atuadores do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

Para alcançar o espaço de trabalho requerido ao robô, cada eixo deve possuir um determinado curso. A Tabela 3.2 mostra o curso de trabalho e o tipo de movimentação em cada eixo do manipulador robótico elétrico.

Tabela 3.2 – Eixos do manipulador robótico e seus respectivos tipos de movimentação e espaço de trabalho.

Eixo	Tipo de movimentação	Espaço de trabalho
Primeiro Eixo	Rotacional	360 <sup>o</sup>
Segundo Eixo	Prismático Vertical	0,45 m
Terceiro Eixo	Prismático Horizontal	0,30 m
Quarto Eixo	Rotacional (Arfagem do Efetuado)	180 <sup>o</sup>
Quinto Eixo	Rotacional (Rotação do Efetuador)	360 <sup>o</sup>

Apoiado nos requisitos mostrados e com o objetivo de projetar um manipulador robótico elétrico de baixo custo, verificou-se os tipos de atuadores elétricos que poderiam ser aplicados. Como mencionado por Cao, 1998, os motores de passo possuem maior relação torque/peso, além de, segundo Kamalasadán, 2011, possuírem maior relação torque/inércia, quando comparados com os motores de corrente contínua. Essas características são desejadas para minimizar os custos do projeto, porque o dimensionamento dos demais componentes do manipulador são influenciados pelas características inercias dos atuadores. Dessa forma, verificou-se que existe uma grande variedade de motores de passo disponíveis no mercado e com baixo custo. Em virtude desses fatores, esse tipo de atuador foi especificado para o acionamento dos eixos do robô.

Em conformidade com a determinação dos tipos de atuadores elétricos definidos no projeto, deve-se escolher uma maneira de dimensionamento desses atuadores. Seguindo, novamente, os trabalhos relativos ao manipulador robótico pneumático – [Allgayer, 2011, Rijo, 2013, e Sarmanho, 2014] – tem-se diversos resultados que podem ser considerados para o dimensionamento dos atuadores elétricos.

A escolha do parâmetro comparativo entre os sistemas de atuação seria a potência transmitida pelos sistemas elétricos e pelos pneumáticos, pois essa característica está associada à energia requerida pelo sistema, a qual relaciona parâmetros de força e de velocidade de atuação. Contudo, de acordo com Craig, 2005, os atuadores pneumáticos possuem vantagem relativa à potência de atuação, quando comparados com os atuadores elétricos, em vista da maior razão potência/peso. Por consequência, a utilização desse parâmetro conduziria à escolha de atuadores elétricos e componentes mais robustos e, desse modo, mais caros, dificultando assim o projeto do robô, na medida que um dos requisitos deste trabalho é o baixo custo econômico.

Considerando a escolha dos tipos de atuadores elétricos (motores de passo) a serem utilizados no projeto do manipulador elétrico, o parâmetro comparativo que se adequa as exigências do projeto é o torque – ou a força –, desenvolvido pelos atuadores pneumáticos, visto que a vantagem do motor de passo, frente aos demais tipos de motores elétricos, é o seu torque. Dessa forma, escolhendo esse parâmetro, reduz-se o custo empregado no projeto do robô, já que os motores, determinados com base nesse parâmetro, seriam menores e, conseqüentemente, os elementos mecânicos poderiam ter dimensões menores.

Em cada eixo do manipulador robótico de atuadores pneumáticos, tem-se um torque desenvolvido por cada atuador, para a operação dessa junta do robô, sendo que esse torque está relacionado ao momento de inércia de massa acoplada sobre o eixo. Baseado nisso, determinando geometricamente e dimensionando estruturalmente cada um dos eixos do manipulador robótico elétrico, partindo do efetuador até a base do robô, consegue-se dimensionar os atuadores elétricos demandados para cada um dos eixos do manipulador robótico. Esse dimensionamento é realizado por meio da comparação entre o torque requerido para a atuação em cada eixo do robô pneumático com o torque exigido para atuação em cada eixo do manipulador robótico elétrico, sendo que cada torque é associado ao momento de inércia de massa da junta analisada. Posto isso, a determinação da configuração geométrica de cada eixo e o seu dimensionamento são exigidos. Essa tarefa passa pela escolha dos atuadores elétricos rotacionais, determinados anteriormente. Diferente do realizado para o manipulador robótico de atuadores pneumáticos lineares, do qual trata os trabalhos de Allgayer, 2011, Rijo, 2013, e Sarmanho, 2014.

Cada detalhe da configuração geométrica e do dimensionamento de cada eixo serão mostrados nas próximas seções deste capítulo, seguindo a metodologia de dimensionamento, comentada anteriormente, ou seja, do efetuador até a base do manipulador robótico.

### **3.1 Configuração Geométrica e Dimensionamento do Quinto Eixo**

O quinto eixo do manipulador robótico é rotacional, conseqüentemente, com a escolha dos atuadores elétricos rotacionais, o efetuador do robô pode ser acoplado, diretamente, ao eixo do motor de passo, como apresentado na Figura 3.3.

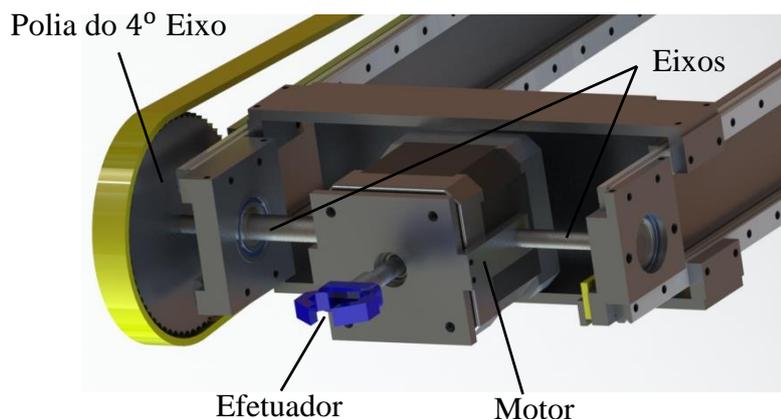


Figura 3.3 – Quinto eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

O dimensionamento dos atuadores elétricos tem como guia as especificações e os resultados encontrados no projeto do manipulador robótico de atuadores pneumáticos, mostrado nos trabalhos de Allgayer, 2011, Rijo, 2013, e Sarmanho, 2014.

Com relação ao quinto eixo do robô, foram utilizados os resultados do trabalho de Sarmanho, 2014, referentes aos testes do manipulador robótico pneumático. Nesse trabalho, o maior torque necessário para a movimentação do momento de inércia de massa desse eixo foi de aproximadamente 1,5 Nm. Foi adotado esse valor, porque o torque especificado para o atuador pneumático desse eixo tem valores que foram considerados elevados para ser usado na comparação e no dimensionamento do atuador elétrico do quinto eixo. O momento de inércia de massa desse eixo foi obtido, diretamente, do modelo em CAD do robô pneumático, tendo um valor de  $7,25 \cdot 10^{-5} \text{kgm}^2$ . Esses dois parâmetros do eixo podem ser associados por meio de uma aceleração inicial máxima desejada, desconsiderando efeitos de atrito ou de outras forças dissipativas. A Equação (3.1) mostra a relação entre torques, momentos de inércia de massa e aceleração em cada eixo.

$$\ddot{\theta}_{ini} = \frac{T_{pne}}{H_{pne}} = \frac{T_{elé}}{H_{elé}} \quad (3.1)$$

onde  $\ddot{\theta}_{ini}$  é a aceleração angular inicial possível de ser desenvolvida pelos dois sistemas de atuação para o eixo analisado;  $T_{pne}$  é o torque produzido pelos atuadores pneumático desse eixo;  $H_{pne}$  é o momento de inércia da massa do eixo analisado do manipulador

robótico pneumático;  $T_{elé}$  é o torque necessário pelos atuadores elétricos desse eixo; e  $H_{elé}$  é o momento de inércia da massa do eixo analisado do manipulador robótico elétrico.

Para o manipulador robótico elétrico, simulou-se motores com diversas capacidades de torque. Verificou-se que o motor NEMA 17 de 0,16 Nm de torque poderia movimentar  $7,73 \cdot 10^{-6} kgm^2$  de momento de inércia de massa, acoplado ao seu eixo, o que corresponde, por exemplo, a um cilindro de 5 mm de diâmetro e de mais de 0,6 kg de massa. Esse resultado foi considerado adequado, pois 0,6 kg corresponde à massa de 90 % das peças que o manipulador robótico deve manipular. Além do mais, a aceleração inicial encontrada para o quinto eixo do manipulador robótico pneumático foi bastante elevada ( $\ddot{\theta}_{ini5} = 2,07 \cdot 10^4 rad/s^2$ ), quando comparada com a aceleração inicial máxima possível de ser desenvolvida, encontrada para os demais eixos do manipulador robótico, como será mostrado nas próximas seções.

O motor NEMA 17 de 0,16 Nm de torque possui uma resolução de 200 passos por revolução em modo passo completo, ou seja,  $1,8^\circ$  por passo do motor, o que resulta em um arco de circunferência de 0,08 mm de comprimento para esse modo de operação, estando, dessa forma, com uma resolução adequada à necessidade do projeto.

Como pode ser verificado nas figuras 3.3 e 3.4, os eixos da quarta junta do robô são solicitados tanto pela força gravitacional, proveniente dos componentes acoplados sobre esses eixos (sendo os principais componentes: o motor da quinta junta ( $F_{gM}$ ) e a polia acoplada sobre esse eixo ( $F_{gp}$ )), quanto pelo torque vindo do motor da quarta junta ( $T_{elé}$ ). Desse modo, deve-se dimensionar o eixo e os rolamentos para esses carregamentos. Os valores desses parâmetros são apresentados na Tabela 3.3.

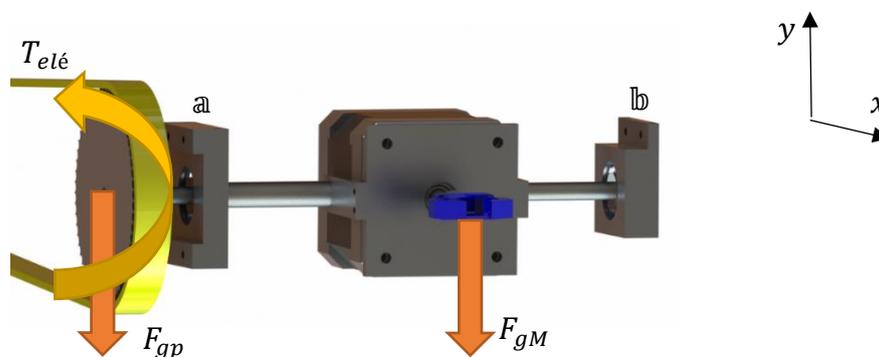


Figura 3.4 – Carregamento imposto ao eixo da quarta junta.

Tabela 3.3 - Valores dos carregamentos sobre o quarto eixo.

Parâmetros	Valores
$F_{gp}$	1,16 N
$F_{gM}$	4,32 N
$T_{elé}$	0,61 Nm <sup>1</sup>

A força proveniente do torque do motor da quarta junta é obtida pela Equação (3.2).

$$F_{elé} = \frac{T_{elé}}{r_{polia4}} \quad (3.2)$$

onde  $F_{elé}$  é a força requerida pelo atuador elétrico do eixo analisado; e  $r_{polia4}$  é o raio da polia menor, montada sobre o eixo do motor da quarta junta.

O valor da força produzida pelo torque desse atuador é de 53 N. Entretanto, de acordo com SDP/SI, 2015, um coeficiente de segurança deve ser aplicado, tendo o valor de 1,5, para casos de aplicações menos severas, como o estudado. A ação dessa força é representada na Figura 3.5. Dessa forma, existem ações de forças tanto com relação ao eixo  $x$  quanto com relação ao eixo  $y$ . O diagrama de forças é mostrado na Figura 3.6.

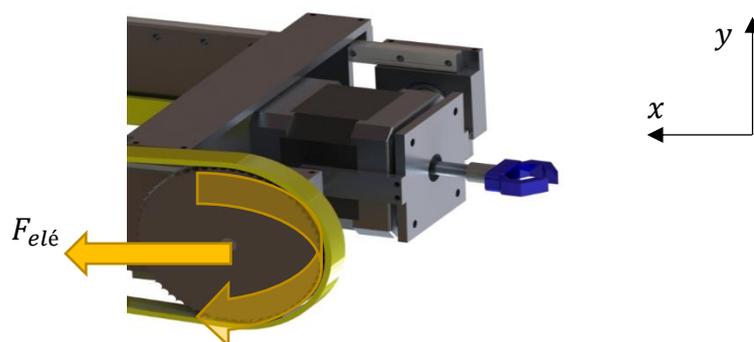


Figura 3.5 – Ação da força devido ao torque do motor do quarto eixo.

<sup>1</sup> Esse torque é calculado com base no torque do atuador da quarta junta (0,16 Nm) e na redução do par de polias utilizado nesse eixo (3,78:1).

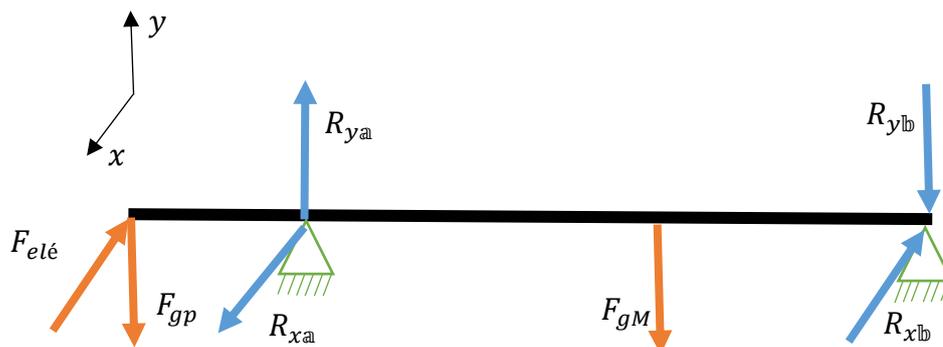


Figura 3.6 – Diagrama de forças para o eixo da quarta junta.

Na Figura 3.6, os pontos **a** e **b** representam os pontos de apoio do eixo sobre o braço do manipulador. Com base no diagrama de forças da Figura 3.6, o diagrama de esforços cortantes (DEC) e o diagrama de momentos fletores (DMF) para o eixo  $x$  são mostrados na Figura 3.7, enquanto que o diagrama de esforços cortantes e o de momentos fletores para o eixo  $y$  são apresentados na Figura 3.8.

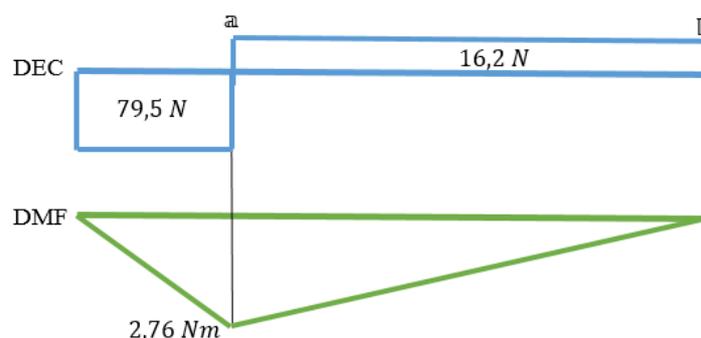


Figura 3.7 - Diagrama de esforços cortantes e momentos fletores para o eixo  $x$ .

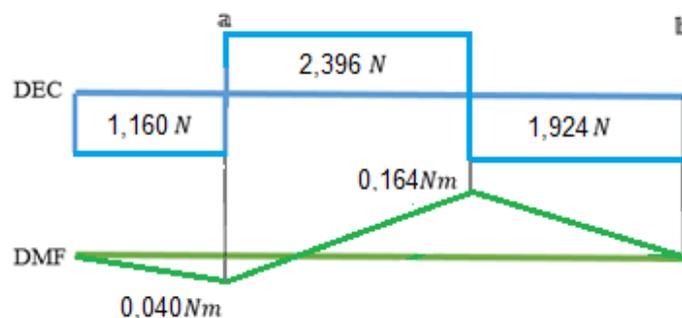


Figura 3.8 - Diagrama de esforços cortantes e momentos fletores para o eixo  $y$ .

Como pode ser observado nas figuras 3.7 e 3.8, os esforços no eixo  $x$  são maiores quando comparados com os esforços no eixo  $y$ . Ademais, o momento fletor é nulo com relação ao ponto  $b$ . Dessa forma, é realizada a análise do dimensionamento desse eixo com relação ao ponto  $a$ , onde os esforços são mais pronunciados e os problemas de deformação podem se manifestar.

As peças necessárias para a realização da montagem do manipulador robótico e que devem ser fabricadas foram especificadas como sendo de alumínio, devido à resistência mecânica e à baixa densidade de massa, quando comparadas com as peças de aço. Entretanto, é necessário verificar se esse material pode ser utilizado nesse eixo, ou um outro material, como o aço, deve ser aplicado para a manufatura do eixo. Para especificar o material que o eixo deve ser fabricado, escolhe-se um diâmetro inicial e, então, verifica-se a deformação do eixo e o ângulo formado por essa deformação, com relação ao seu eixo geométrico teórico, para analisar se estão em conformidade com os requisitos de projeto.

Dessa forma, a deformação máxima aceitável para o eixo não pode exceder a melhor resolução dos eixos, que, como será apresentado, é de 0,06 mm para a quarta junta do manipulador robótico. Além do mais, o rolamento instalado no ponto  $a$ , da Figura 3.5, deve ser um rolamento autocompensador, que, de acordo com NSK, 2002, suporta até 4 graus de desalinhamento com o eixo geométrico teórico.

A deformação de uma viga em balanço, assim como o ponto  $a$ , das figuras 3.8 e 3.9, pode ser determinado pela Equação 3.3: [Beer e Johnston, 1995].

$$\delta = \frac{C\ell^3}{3EI} \quad (3.3)$$

onde  $\delta$  é a deformação do eixo;  $C$  é a carga que causa o momento fletor sobre o eixo;  $\ell$  é o tamanho do braço de alavanca;  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal do material; e  $I$  é o momento de inércia de área do eixo. Esses parâmetros são mostrados na Tabela 3.4 e os resultados da aplicação da Equação (3.3) são mostrados na Tabela 3.5, para os dois materiais analisados (alumínio e aço).

Tabela 3.4 – Parâmetros para determinação da deformação do eixo.

Parâmetros	Valores
$\ell$	23 mm
$E$ (Alumínio/Aço)	69000/200000 $N/mm^2$
$I$	30,68 $mm^4$

Tabela 3.5 – Resultados da deformação do eixo para os dois materiais estudados.

Material	Deformação	Ângulo de deformação
Alumínio	0,161 mm	0,0070°
Aço	0,055 mm	0,0024°

Como pode ser observado na Tabela 3.5, tanto para alumínio quanto para aço, o ângulo de deformação é menor do que o máximo permitido para rolamentos autocompensadores. Entretanto, a deformação sofrida pelo eixo, quando utilizado alumínio, é mais elevada do que o melhor caso de resolução do manipulador robótico (quarta junta). Por isso, aço é o material especificado para o eixo.

### 3.2 Configuração Geométrica e Dimensionamento do Quarto Eixo

A quarta junta do manipulador robótico, do mesmo modo que a quinta junta, é rotacional e é a responsável pelo efeito de arfagem do efetuador. Por questões de equilíbrio estático e melhor balanço dinâmico do braço do manipulador, o atuador dessa junta deve ser colocado na outra extremidade do braço do manipulador. Para isso é necessário um sistema de transmissão intermediário entre o eixo que sustenta o motor da quinta junta e o eixo do motor da quarta junta.

O sistema de transmissão escolhido para tal função é o de polias e correias sincronizadoras. A Figura 3.9 apresenta as particularidades geométricas desse eixo, em que a polia menor é montada sobre o eixo do motor da quarta junta e a polia maior é acoplada sobre o eixo que rotaciona a quinta junta.

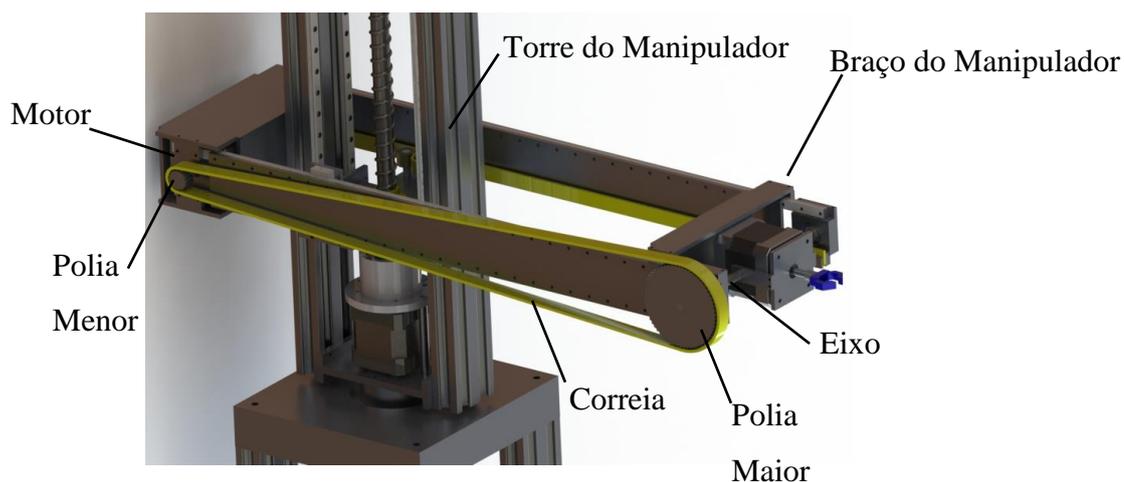


Figura 3.9 - Quarto eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

Mayé, 2016, propõe uma equação para otimização da redução de um sistema de transmissão mecânico, para que o torque requerido ( $T_{elé}$ ) ao motor seja minimizado, sendo apresentada na Equação (3.4), onde  $H_{elé}$  é o momento de inércia de massa do eixo do robô analisado e  $H_{motor}$  é o momento de inércia de massa do eixo do atuador do eixo.

$$r = \sqrt{\frac{H_{elé}}{H_{motor}}} \quad (3.4)$$

Fundamentado nisso, apoia-se no modelo em CAD para encontrar o momento de inércia de massa da junta, a qual (junta) é mostrada na Figura 3.10. Kalatec, 2017, apresenta o momento de inércia de massa do eixo do atuador dessa junta. Os valores desses dois parâmetros são apresentados na Tabela 3.6.

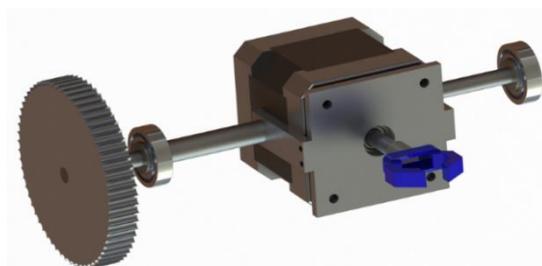


Figura 3.10 - Elementos acoplados à quarta junta do manipulador robótico.

Tabela 3.6 – Momento de inércia de massa da carga e do eixo do motor.

Item	Momento de inércia de massa ( $kgm^2$ )
Carga	$7,74. 10^{-5}$
Eixo do atuador	$5,40. 10^{-6}$

Com valores da Tabela 3.6, aplicados na Equação (3.4), obtém-se o valor de 3,78:1, para a redução otimizada para o sistema de polias.

Seguindo a mesma metodologia, mostrada anteriormente, referente ao dimensionamento do motor do quinto eixo, o dimensionamento do motor do quarto eixo depende dos parâmetros de torque e de momento de inércia de massa correspondentes a esse eixo no manipulador robótico pneumático.

De acordo com os resultados experimentais de Sarmanho, 2014, o máximo torque utilizado para operação desse eixo é de 7 Nm, unido ao momento de inércia de massa de  $2,70. 10^{-3}kgm^2$ , retirada do modelo em CAD do eixo. Esses valores resultam em uma aceleração inicial ( $\ddot{\theta}_{ini}$ ) de  $2,59. 10^3 rad/s^2$ .

Para o manipulador robótico elétrico se simulou alguns atuadores, em que, determinando o momento de inércia de massa relativa ao eixo do motor ( $5,40. 10^{-6}kgm^2$ ) e o momento de inércia de massa referente a essa junta do robô ( $7,74. 10^{-5}kgm^2$ ), retirada do modelo em CAD, pode-se verificar qual a taxa de redução necessária ao sistema (3,78:1) e o torque necessário ao motor desse eixo. Sendo assim, utilizando a Equação (3.5), proposta por Mayé, 2016, consegue-se determinar o torque necessário para o motor.

$$T_{elé} = \left[ \frac{H_{elé}}{\eta r} + H_{motor} r \right] \ddot{\theta}_{ini} \quad (3.5)$$

onde  $\eta$  é a eficiência do sistema de transmissão;  $r$  é a taxa de redução; e  $H_{motor}$  é o momento de inércia de massa do eixo do motor.

Para o sistema de transmissão de polias sincronizadoras, tem-se uma eficiência de transmissão de 95 %, de acordo com SDP/SI, 2015. Dessa maneira, o torque necessário

ao motor é de 0,11 Nm, sendo suficiente um motor NEMA 17 de 0,16 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução no modo passo completo.

O par de polias apresenta uma redução de 3,78:1, que, unido à resolução do atuador (1,8° por passo), conduz a uma resolução do eixo de atuação de 0,476° por passo. A resolução da junta de atuação, unida ao diâmetro da polia acoplada a esse eixo, conduz para essa junta, do manipulador robótico, um arco de circunferência com resolução de 0,064 mm para o funcionamento em modo passo completo do motor.

Definido o par de polias adequado para esse eixo, necessita-se definir a correia sincronizadora. Dentre os métodos de dimensionamento para o sistema de correias sincronizadoras, a maneira mais difundida pelos fabricantes é a do método da potência de transmissão, como é exibida no manual de dimensionamento da Mitsuboshi, 2014, da Gates, 2015, e no manual técnico da Optibelt, 2013. Entretanto, como já citado, a grandeza utilizada para a especificação dos motores de passo é o torque desenvolvido por esses. Desse modo, o manual técnico da SDP/SI, 2015, oferece um método de dimensionamento fundamentado, principalmente, nessa grandeza.

Seguindo esse manual, o primeiro passo é referente ao torque máximo desenvolvido pelo atuador. Tendo em vista a redução para o par de polias (3,78:1) e o torque do atuador, determinado para essa junta (0,16 Nm), tem-se um torque máximo de 0,61 Nm. O manual recomenda a aplicação de um coeficiente de segurança que, nesse caso, é usado o mínimo recomendado, de 1,5, devido à baixa carga que solicita a correia.

Tendo como base o torque máximo, o qual solicita a correia, o próximo passo do procedimento é determinar os passos da correia. Por questões dimensionais e econômicas, recorre-se aos menores tamanhos disponíveis pela empresa, sendo esses, os passos de 2 mm e 3 mm.

Com isso, é possível analisar a capacidade máxima de carga em cada uma das correias. A correia com passo de 2 mm suporta no máximo 1,1 Nm de torque, enquanto a correia com passo de 3 mm suporta no máximo 5,6 Nm de torque.

Seguindo a metodologia apresentada em SDP/SI, 2015, demanda-se a verificação de que pelo menos seis dentes da polia menor estejam engrenados na correia sincronizadora. Assim, a Equação (3.6) determina o tamanho mínimo da correia para que, pelo menos sete dentes, por motivos de eficiência, estejam acoplados na correia menor.

$$C_{min} = \frac{[(60\pi(2r_{polia4})^2(r-1)]}{[(2\pi r_{polia4}180) - (360t_{min}p_{sinc})]} \quad (3.6)$$

onde  $C_{min}$  é a distância mínima para se ter pelo menos 7 dentes acoplados à polia menor;  $t_{min}$  é o número mínimo de dentes a serem engrenados na polia menor; e  $p_{sinc}$  é o passo da correia sincronizadora.

Dos parâmetros requeridos pela Equação (3.6), somente o diâmetro da polia menor não foi especificado, sendo essa a próxima etapa do dimensionamento, segundo SDP/SI, 2015. Para a correia sincronizadora com passo de 2 mm, exige-se pelo menos uma polia com 32 dentes, com diâmetro de 20,37 mm, para uma largura de 12 mm, que suporta 0,62 Nm de torque. A correia sincronizadora com passo de 3 mm, por sua vez, demanda pelo menos uma polia com 16 dentes, com diâmetro de 15,28 mm, para uma largura de 9 mm, que suporta 2,37 Nm de torque.

Dessa maneira, finalizar-se-á a análise para a correia sincronizadora com passo de 3 mm, pois essa possui maior resistência mecânica e necessita de uma polia menor acoplada ao eixo do atuador elétrico, o que exigirá uma correia menor e uma polia menor, quando comparada ao que seria demandado por uma correia sincronizadora com passo de 2 mm.

Partindo disso, verifica-se, através da Equação (3.6), o tamanho mínimo da correia para garantir o acoplamento de pelo menos sete dentes na polia menor, para a correia sincronizadora com passo de 3 mm. O tamanho mínimo encontrado foi de 81,49 mm, sendo esse tamanho menor do que o existente entre as duas polias. Dessa maneira, garante-se o acoplamento mínimo exigido de sete dentes na polia menor.

A última etapa do dimensionamento da correia é especificar o tamanho da correia e o seu número de dentes. A Equação (3.7), segundo SDP/SI, 2015, calcula o tamanho requerido para a correia:

$$L = 2c + \frac{(2r_{polia5} - 2r_{polia4})^2}{4c} + 1,57(2r_{polia5} + 2r_{polia4}) \quad (3.7)$$

onde  $L$  é o tamanho da correia sincronizadora;  $c$  é a distância entre os eixos das polias sincronizadoras; e  $r_{polia5}$  é o raio da polia montada sobre o eixo do motor da quarta junta.

Dos parâmetros requeridos pela Equação (3.7), os que faltam para calcular o tamanho da correia é a distância entre os eixos das polias, que é retirada do modelo em CAD do robô, e o diâmetro da polia maior, que é calculado pela multiplicação do diâmetro da polia menor pela redução do sistema. Esses resultados são mostrados na Tabela 3.7. Com base nesses resultados, chega-se ao tamanho requerido para a correia sincronizadora, assim como o número de dentes da mesma, apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.7 – Valores da distância entre os eixos das polias e do diâmetro da polia maior.

Parâmetros	Valores
Distância entre os eixos das polias	404,57 mm
Diâmetro da polia maior	59.21 mm

Tabela 3.8 – Tamanho e número de dentes da correia sincronizadora.

Parâmetros	Valores
Tamanho da correia sincronizadora	927 mm
Número de dentes	309

### 3.3 Configuração Geométrica e Dimensionamento do Terceiro Eixo

A terceira junta do manipulador robótico possui movimento linear horizontal. Conseqüentemente, a junta necessita de um sistema de transmissão, que transforme o movimento rotacional do eixo do motor em movimento linear na junta de atuação. Em Gates, 2006, são expostas algumas sugestões para a realização dessa transformação e a sugestão utilizada neste trabalho é a exibida na Figura 3.11.

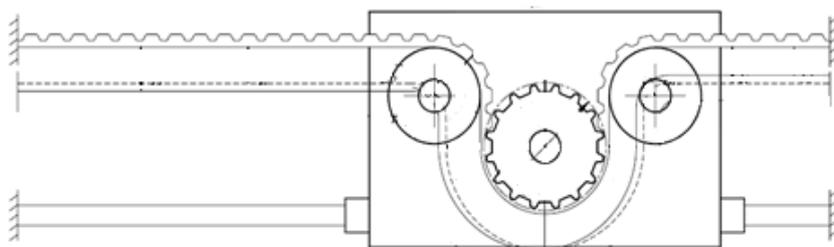


Figura 3.11 – Mecanismo de transformação de movimento rotacional em linear.

Justifica-se a escolha dessa configuração, porque o motor dessa junta ficará fixo em relação ao movimento do braço do robô. Acrescido o fato do centro de gravidade do motor estar sobre o eixo da torre do manipulador. Essas constatações, justificando a escolha desse mecanismo, são interessantes por dois fatores:

- O primeiro fator está vinculado ao dimensionamento do motor do terceiro eixo e aos elementos estruturais do braço do manipulador robótico, que são favorecidos pela menor carga, quando comparados com uma configuração em que o atuador da terceira junta igualmente estaria em movimento, em virtude de seu acionamento e do movimento linear realizado pelo braço do robô;
- O segundo fator é relativo ao dimensionamento do motor da primeira junta, ao dimensionamento do sistema de transmissão e ao dimensionamento dos elementos estruturais dos eixos inferiores. Como mostrado, no trabalho de Rijo, 2013, o carregamento, imposto ao primeiro eixo, é provocado pela movimentação, principalmente, do terceiro eixo. Esse carregamento é causado pelo peso do braço do robô e pela alavanca causada pela movimentação do terceiro eixo. Como o percurso máximo (dimensão especificada para movimentação do terceiro eixo) é um requisito geométrico do projeto, os únicos fatores que podem ser minimizados para esse eixo são: o seu peso e a distância do seu centro de gravidade até o centro geométrico da torre.

A Figura 3.12 mostra a configuração geométrica dessa junta.

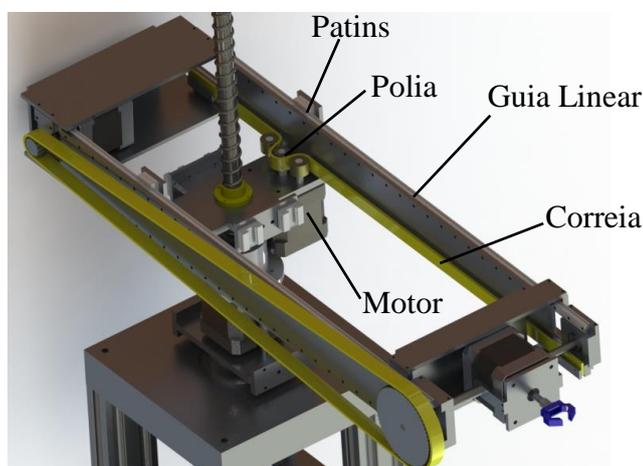


Figura 3.12 - Terceiro eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

Na Figura 3.12 elementos estruturais e elementos de movimentação do quarto eixo foram omitidos, para melhorar a visualização do terceiro eixo. Como apresentado na Figura 3.12, foram utilizadas guias lineares como elementos de ligação entre a torre e o braço do manipulador robótico. As guias lineares foram unidas entre si por meio de placas a fim de aumentar a rigidez do braço.

Seguindo a mesma metodologia mostrada anteriormente, inicia-se o dimensionamento do motor do terceiro eixo, determinando os parâmetros de força e de massa<sup>2</sup>, correspondentes a esse eixo no manipulador robótico pneumático. A máxima força teórica produzida pelo atuador pneumático, do terceiro eixo do robô pneumático, é de 644 N, considerando a câmara de exaustão do cilindro pneumático com vácuo total e pressão de suprimento de  $6 \cdot 10^5$  Pa. Tendo esse valor unido a uma massa,  $m_{eixo}$ , de 12,76 kg, retirada do modelo em CAD dessa junta, a aceleração inicial possível de ser desenvolvida por esse eixo, desconsiderando atrito e outros efeitos dissipativos, pode ser encontrada pela segunda Lei de Newton, apresentada pela Equação (3.8):

$$F_{pne} = m_{eixo} \ddot{d}_{ini} \quad (3.8)$$

Com a utilização da Equação (3.8), chega-se a uma aceleração inicial ( $\ddot{d}_{ini}$ ) de  $50,47 \text{ m/s}^2$ . Para o manipulador robótico elétrico, a massa transportada pelo terceiro eixo é de 1,24 kg. Assim, pela Equação (3.9), consegue-se determinar qual o valor do torque necessário ao motor para a movimentação dessa massa.

$$T_{elé} = m_{eixo} \ddot{d}_{ini} r_{polia3} \quad (3.9)$$

onde  $r_{polia3}$  é o raio da polia acoplada ao terceiro eixo.

O raio da polia acoplada ao motor do terceiro eixo é de 6,68 mm. Desse modo, o torque requerido ao motor do terceiro eixo é de 0,41 Nm, sendo suficiente o motor NEMA 17 de 0,52 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução no modo passo completo (1,8° por passo completo).

---

<sup>2</sup> Nesse eixo, foi utilizado força e massa, ao invés de torque e inércia, por se tratar de um eixo prismático

Assim como foi apresentado previamente, para o dimensionamento da correia sincronizadora, recorre-se ao SDP/SI, 2015, pois tal metodologia de especificação da polia sincronizadora é fundamentada, principalmente, no torque produzido pelo atuador.

Seguindo essa metodologia, determina-se o torque máximo que solicita o sistema. O motor desse eixo possui um torque máximo de 0,52 Nm, porém, SDP/SI, 2015, recomenda a aplicação de um coeficiente de segurança, que nesse caso se usa o mínimo recomendado, de 1,5, devido à baixa carga solicitada à correia.

Com isso, deve-se determinar quais os passos da correia sincronizadora a serem analisados. Por questões dimensionais e econômicas, recorre-se às correias sincronizadoras com passo de 3 mm. A capacidade máxima de carga nesse tipo de correia é de 5,6 Nm de torque. Sendo assim, para garantir melhores condições de precisão nessa junta, pesquisou-se qual o menor diâmetro da polia, que poderia ser acoplada ao eixo do motor, concluindo-se que a polia deve ter 14 dentes, com diâmetro externo de 13,37 mm, para uma largura de 9 mm, a qual suporta aproximadamente 2 Nm.

Seguindo SDP/SI, 2015, recomenda-se verificar se pelo menos seis dentes, da polia acoplada ao atuador, estão engrenados na correia sincronizadora. Fundamentado nisso, determina-se a configuração geométrica do par de polias de tração para a adequação a dada condição, sendo apresentada na Figura 3.13.

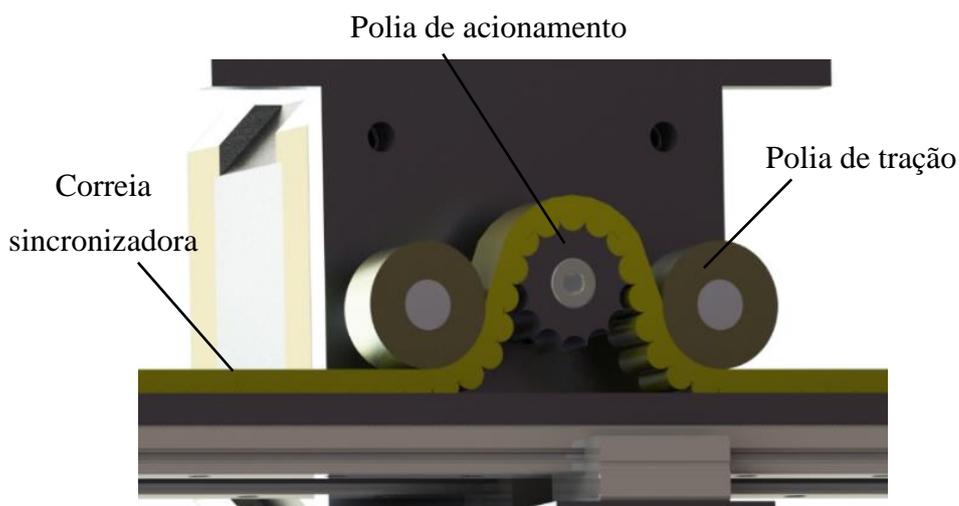


Figura 3.13 - Configuração geométrica das polias do terceiro eixo.

Como observado na Figura 3.13, a configuração geométrica entre as polias faz com que sete dentes da correia sincronizadora fiquem inteiramente engrenados na polia acoplada ao eixo do atuador. O diâmetro da polia de tração adotado para o projeto é o mínimo recomendado pelo SDP/SI, 2015, com 12,70 mm. O tamanho e o número de dentes da correia sincronizadora são mostrados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Tamanho e número de dentes da correia sincronizadora.

Parâmetros	Valores
Tamanho da correia sincronizadora	444 mm
Número de dentes	148

A resolução do motor desse eixo ( $1,8^\circ$  por passo), unida ao diâmetro da polia acoplada a esse eixo, conduz para essa junta um arco de circunferência com resolução de 0,21 mm, para o funcionamento em modo passo completo do motor.

### 3.4 Configuração Geométrica e Dimensionamento do Segundo Eixo

A segunda junta do manipulador, tal como a terceira junta, possui movimento linear. Todavia, diferentemente da terceira junta, o movimento da segunda junta é vertical.

Conforme Gates, 2015, não se recomenda utilizar os sistemas de correias sincronizadoras como sistema de levantamento de carga. Mas, no caso da utilização, deve-se ter um sistema de transmissão independente da correia sincronizadora e das polias, para garantir a operação segura. Assim, a utilização do sistema de correias sincronizadoras torna-se insegura, bem como demanda um mecanismo secundário, o que, naturalmente, aumenta o custo e a complexidade do projeto. Portanto, a opção por um sistema de fuso e castanha torna-se mais atrativa. Os principais sistemas de fuso e castanha existentes são os sistemas denominados: fuso de esfera e fuso de rosca. A diferença entre os dois sistemas pode ser vista na Figura 3.14.

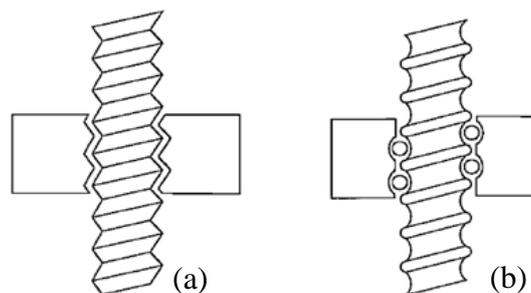


Figura 3.14 – Diferença geométrica entre o sistema de fuso e castanha de rosca (a) e de fuso e castanha de esfera (b). Adaptado de Craig, 2006.

Segundo Helix, 2013, os fusos e castanhas de rosca possuem algumas vantagens com relação aos fusos e castanhas de esfera, entre as quais são: mais adequados para transportes verticais de carga, mais baratos, mais precisos, melhor performance em velocidades elevadas e mais rígidos. Logo, são mais adequados para as exigências de projeto desse eixo. A desvantagem mais significativa desse tipo de fuso e castanha é a maior ineficiência energética, quando comparada com a do sistema de fuso de esfera. A Figura 3.15 apresenta o segundo eixo do manipulador robótico, em que elementos do braço do manipulador foram suprimidos da figura para facilitar a visualização desse eixo.

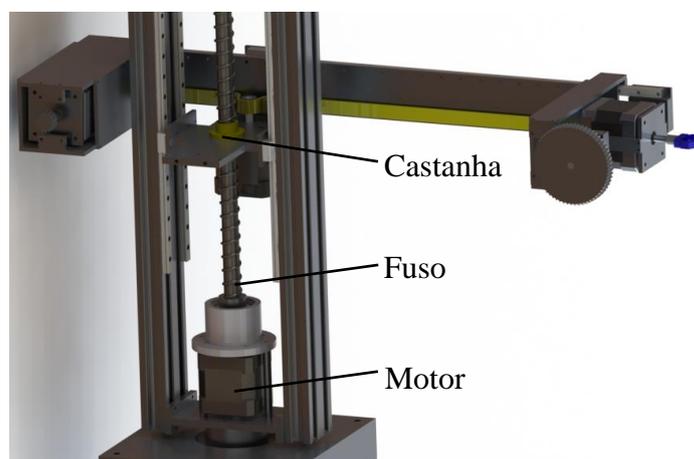


Figura 3.15 - Segundo eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

Para o dimensionamento do motor do quarto eixo, são buscados os parâmetros de força e de massa<sup>3</sup>, correspondentes ao respectivo eixo, no manipulador robótico

<sup>3</sup> Nesse eixo, foi utilizado força e massa, ao invés de torque e de inércia, por se tratar de um eixo prismático

pneumático. A máxima força teórica produzida pelo atuador pneumático, do segundo eixo do robô pneumático, é de 644 N, considerando a câmara de exaustão do cilindro pneumático com vácuo total e pressão de suprimento de  $6.10^5$  Pa. Com esse parâmetro unido a uma massa de 16,05 kg, retirada do modelo em CAD do eixo, a aceleração inicial possível de ser desenvolvida por esse eixo, desconsiderando atrito e outros efeitos dissipativos, é definida pela segunda Lei de Newton, apresentada pela Equação (3.8). Obtendo-se uma aceleração inicial ( $\ddot{d}_{ini}$ ) de  $40,13 \text{ m/s}^2$ . Porém, como mencionado anteriormente, o segundo eixo é vertical, necessitando acrescentar a esse valor de aceleração inicial a aceleração da gravidade. Dessa maneira, a aceleração inicial passa a ter o valor de  $49,94 \text{ m/s}^2$ .

Tendo como base tais resultados provenientes do segundo eixo do manipulador robótico pneumático, deve-se utilizar a teoria de parafusos de potência, para dimensionar o torque necessário para o motor do segundo eixo do robô elétrico. Justifica-se essa afirmação, pois o segundo eixo do manipulador robótico utiliza um sistema de fuso e castanha para transformar o movimento rotacional do motor em movimento linear no eixo. A teoria de parafusos de potência, apresentada em Shigley, 2005, requer o cálculo de duas componentes de torque, para determinar o torque necessário para o atuador. A primeira componente é mostrada na Equação (3.10), referente ao torque necessário para elevar a carga. E a segunda componente é mostrada na Equação (3.11), referente ao atrito desenvolvido entre a castanha e o fuso.

$$T_{elev} = F_{elev} r_{fuso} \sin \gamma \quad (3.10)$$

onde  $T_{elev}$  é o torque requerido ao motor do eixo para elevação da carga;  $F_{elev}$  é a força requerida ao motor para elevação da carga pela aceleração inicial requerida;  $r_{fuso}$  é o raio do fuso; e  $\gamma$  é o ângulo de avanço do sistema de fuso e castanha.

$$T_{atr} = F_{elev} r_{fuso} C_{fuso} \sin \gamma \quad (3.11)$$

onde  $T_{atr}$  é o torque requerido ao motor do eixo para elevação da carga devido ao atrito entre o fuso e a castanha; e  $C_{fuso}$  é o coeficiente de atrito do sistema de fuso e castanha.

Dos parâmetros requeridos pelas equações (3.10) e (3.11), a força requerida ao motor para elevar a carga ( $F_{elev}$ ) e o ângulo de avanço do sistema de fuso e castanha ( $\gamma$ ) necessitam ser calculados, sem como o coeficiente de atrito do sistema de fuso e castanha ( $C_{fuso}$ ) necessita ser especificado. Segundo Drylin, 2016, o máximo coeficiente de atrito encontrado é de 0,3. A força requerida ao motor para elevar a carga ( $F_{elev}$ ) é calculada pela Equação (3.10), utilizando a massa transportada pelo segundo eixo, que é igual a 1,75 kg, e a aceleração inicial, calculada anteriormente. O ângulo de avanço do sistema de fuso e castanha ( $\gamma$ ) é calculado através da Equação (3.12):

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{\mathbb{P}_{fuso}}{2\pi r_{fuso}} \right) \quad (3.12)$$

onde  $\mathbb{P}_{fuso}$  é o passo do sistema de fuso e castanha.

O fuso e castanha especificado possui passo de 25 mm e diâmetro de 12 mm. O resultado encontrado pelas equações (3.10) e (3.11) fornece o torque necessário ao motor do segundo eixo, sendo igual a 0,42 Nm, com o qual foi especificado o motor NEMA 17 de 0,52 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução no modo passo completo.

A definição do tipo de fuso e castanha a ser utilizado, deve ser determinado o passo desse sistema de transmissão. Quanto menor o passo do sistema maior será a precisão da junta. De acordo com Drylin, 2016, os fusos com passos abaixo de 6 mm são autotravantes, o que é interessante para aplicações verticais, como para essa junta. O maior problema resultante da escolha de fusos com passos pequenos é a lentidão do sistema, pois quanto menor o passo maior será o percurso desse eixo e maior o número de rotações que o atuador deve realizar para completar esse percurso. Para fundamentar essa afirmação, imagina-se que se define para esse eixo o fuso com passo de 6 mm, em vista disso o motor necessita executar 75 voltas para completar todo o percurso dimensionado para a junta (450 mm), uma vez que esse número de voltas é 10,5 vezes superior ao número de voltas que o motor da terceira junta tem de realizar para completar a distância dimensionada para essa junta (300 mm).

Fazendo o balanço entre requisitos de precisão e de velocidade de operação, encontra-se como melhor escolha a utilização do fuso de passo rápido com 12 mm de

diâmetro e com passo de 25 mm. Isso garante um torque adequado ao motor, somado com a precisão (0,1mm) e com a velocidade de operação, apropriadas ao eixo (18 voltas do motor para completar o percurso requerido para o eixo).

Os fusos de passo rápido, ao contrário dos fusos de passo normal, não são autoblocantes. Isso demanda verificar se o torque de retenção, somado ao torque proveniente do atrito do sistema de fuso e castanha, é superior ao torque gravitacional, proveniente dos elementos do braço do robô, o que seria suficiente para manter o eixo na posição pretendida para a operação. Para facilitar tal investigação, utiliza-se a hipótese de considerar o centro de gravidade do braço concêntrico com o centro geométrico da torre. O torque gravitacional,  $T_{gb}$ , é encontrado pela aplicação da Equação (3.10), com uma alteração: a força utilizada na equação é a força peso do braço do manipulador,  $F_{gb}$ , sendo igual à massa do braço, apresentada anteriormente, como 1,75 kg, multiplicada pela aceleração da gravidade, adotada como  $9.81 \text{ m/s}^2$ . A Equação (3.13) apresenta o torque gravitacional.

$$T_{gb} = F_{gb}r_{fuso} \sin \gamma \quad (3.13)$$

Da mesma maneira, a força de atrito estático pode ser encontrada, por meio da Equação (3.14), onde  $T_{gatr}$  é o torque de atrito em condição estática.

$$T_{gatr} = F_{gb}r_{fuso}C_{fuso} \sin \gamma \quad (3.14)$$

Os valores do torque gravitacional, do torque devido ao atrito estático e do torque de retenção são apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Torques: gravitacional, atrito e retenção.

Torques	Valores
Torque Gravitacional	0,5220 Nm
Torque de atrito	0,2362 Nm
Torque de retenção	0,0275 Nm

Como pode ser observado na Tabela 3.10, a soma do torque de atrito, em condição estática, com o torque de retenção é igual a 0,2636 Nm, sendo inferior ao torque gravitacional. Dessa forma, é necessário a utilização de um freio nesse eixo, com capacidade de pelo menos 0,2584 Nm, para que o braço do robô permaneça parado, quando alcançar o ponto desejado para o segundo eixo de atuação.

Foi especificado o freio eletromagnético de ativação automática, modelo PB-120, que, de acordo com Warner Electric, 2012, possui capacidade de torque de 0,565 Nm e possui ativação automática (assim que o atuador não possuir mais corrente elétrica o alimentando). Portanto, o freio é adequado para manter uma carga em posição.

Além dos sistemas de acionamento, de movimentação e de frenagem dessa junta, por questões de rigidez estrutural do manipulador robótico, especialmente correspondentes à flexão (causada pelo braço do robô) e à torção (gerada pelo atuador do primeiro eixo), elementos estruturais de alumínio extrudado foram especificados para garantir a rigidez necessária. A união do freio ao fuso da segunda junta do robô e os elementos estruturais dessa junta são apresentados na Figura 3.16.

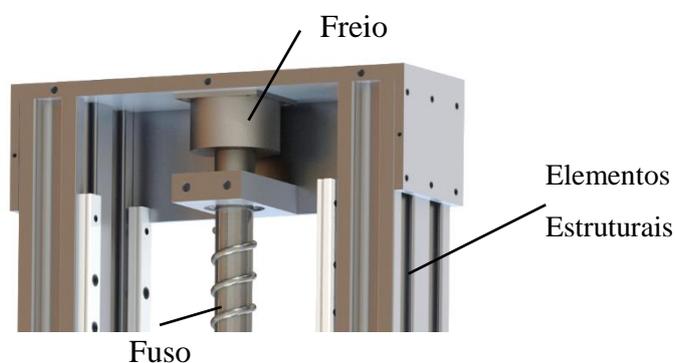


Figura 3.16 – Detalhes do freio acoplado ao fuso do segundo eixo.

### 3.5 Configuração Geométrica e Dimensionamento do Primeiro Eixo

Com a determinação da configuração geométrica e com o dimensionamento dos elementos que compõem os eixos superiores, a especificação do motor da primeira junta pode ser realizada. No entanto, por questões de precisão, o atuador do primeiro eixo não pode ser montado diretamente sobre a torre do manipulador robótico. Justifica-se essa afirmação, pois um motor de 200 passos por revolução, com o braço do robô totalmente

distendido, faria um arco de circunferência de 9 mm de resolução, sendo que esse valor é superior ao demandado para a precisão dos movimentos do robô.

Desse modo, é necessário a utilização de algum tipo de redução do movimento nesse eixo, para garantir a resolução adequada para a operação dessa junta. A primeira opção a ser considerada foi a utilização de um par de polias sincronizadoras de tamanhos diferentes: uma acoplada ao eixo do atuador (a menor polia) e a outra montada sobre a torre do manipulador (a maior polia), como definido para a quarta junta do robô. Entretanto, com base na precisão dos demais eixos, necessitar-se-ia de uma distância entre o eixo do motor e o eixo da torre de 465 mm<sup>4</sup>, para um acoplamento de pelo menos 7 dentes na polia menor e para um diâmetro da polia maior de 528 mm. Esses valores são elevados para as dimensões do manipulador robótico e, por consequência, há a inviabilização da utilização desse mecanismo. Nestas condições, a escolha de um redutor de engrenagens é uma solução considerada adequada. No catálogo da Pittman, 2013, existem diversos modelos que podem ser utilizados no projeto, dos quais foi selecionado o redutor de 24:1, com capacidade de torque de 3,53 Nm e eficiência energética de 81 %.

Com o redutor especificado, pode-se determinar o atuador elétrico exigido para a operação da primeira junta, com analogia ao manipulador robótico pneumático; os parâmetros de torque e de momento de inércia de massa correspondentes a esse eixo. Para essa junta foi utilizado, principalmente, o trabalho desenvolvido por Rijo, 2013, pelo fato de abordar o controle do primeiro eixo do manipulador robótico pneumático. Como mostrado em Rijo, 2013, o momento de inércia de massa sobre o primeiro eixo varia, principalmente, por conta do movimento do braço do manipulador robótico. Considera-se no caso o máximo carregamento sobre a junta, para especificar a necessidade de torque requerida ao atuador elétrico.

Define-se a força máxima possível de ser desenvolvida pelo atuador pneumático do primeiro eixo,  $F_{pne}$ , considerando a câmara de exaustão do cilindro pneumático com vácuo e pressão de suprimento de  $6.10^5$  Pa. O momento de inércia de massa associado a esse eixo é determinado pela máxima massa equivalente,  $m_{eq}$ , e pelo raio da polia acoplada sobre esse eixo,  $r_{polia1}$ . Esses valores são mostrados na Tabela 3.11.

---

<sup>4</sup> Esse cálculo não foi mostrado neste trabalho, porém foram utilizadas as equações (3.6) e (3.7) para determinar essa dimensão

Tabela 3.11 – Parâmetros do primeiro eixo do manipulador robótico pneumático.

Parâmetros	Valores
Força máxima	644 N
Massa equivalente máxima	180,46 kg
Raio da polia	91,7 mm

Fundamentado nesses parâmetros, a aceleração inicial dessa junta, desconsiderando forças dissipativas, pode ser determinada pela Equação (3.15), na qual se obtém o valor de  $\ddot{\theta}_{ini} = 38,93 \text{ rad/s}^2$ .

$$\ddot{\theta}_{ini} = \frac{F_{pne}}{r_{polia1}m_{eq}} \quad (3.15)$$

Determinado os parâmetros da primeira junta do atuador pneumático, deve-se encontrar o máximo momento de inércia de massa, associado ao primeiro eixo do manipulador robótico elétrico, e, dessa forma, definir o valor de torque requerido ao motor dessa junta.

Segundo Rijo, 2013, deve-se identificar o momento de inércia de massa fixo (torre do robô) sobre o primeiro eixo do robô, assim como determinar o momento de inércia de massa móvel, sendo que este último é relativo ao braço do manipulado e a sua movimentação. A Figura 3.17 mostra os elementos que compõem o momento de inércia de massa móvel referente ao braço do robô e a Figura 3.18 mostra a torre do manipulador robótico.

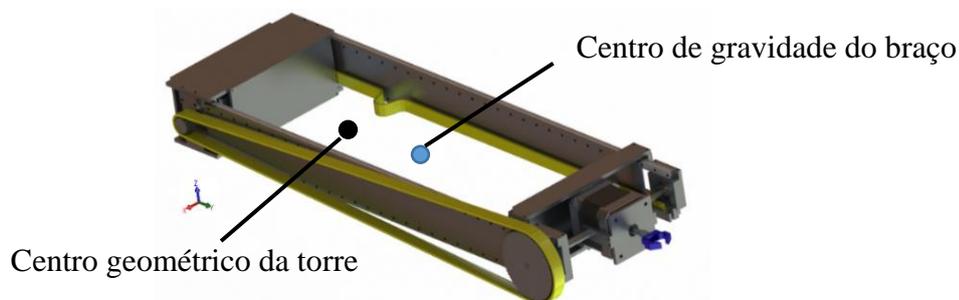


Figura 3.17 – Braço do manipulador robótico elétrico.

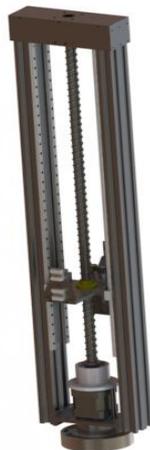


Figura 3.18 – Torre do manipulador robótico elétrico.

O valor do momento de inércia de massa fixo, relacionado à torre do manipulador robótico, tem o valor de  $H_{fixo} = 5,58 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ . Para o braço do manipulador robótico, por sua vez, o momento de inércia de massa, que solicita o atuador elétrico da primeira junta, é variável, sendo que, seguindo a metodologia exposta previamente, se estudou o pior caso, ou seja, com o braço totalmente distendido, intitulado de  $d_{3máx}$ , com valor de 300 mm.

Para a configuração do braço totalmente distendido, o momento de inércia de massa do braço ( $H_{braço}$ ) tem o valor de  $4,29 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$ , a massa do braço ( $m_{braço}$ ) tem o valor  $1,27 \text{ kg}$  e o centro de gravidade, relativo ao centro geométrico da torre, possui no eixo  $x$  ( $d_{3x}$ ) 17,04 mm de distanciamento, enquanto que com relação ao eixo  $y$  ( $d_{3y}$ ) possui 112,22 mm de distanciamento.

Desse modo, baseado no Teorema dos Eixos Paralelos, pode-se determinar o valor do máximo momento de inércia de massa, referente ao braço do manipulador robótico, definido conforme a Equação (3.16).

$$H_{móvel} = H_{braço} + m_{braço} d_{CGmáx}^2 \quad (3.16)$$

onde  $H_{móvel}$  é o momento de inércia de massa variável do braço do robô; e  $d_{CGmáx}$  é a máxima distância do centro de gravidade do braço relativo ao centro geométrico da torre.

Essa distância é encontrada pela Equação (3.17), utilizando a relação de catetos em triângulos retângulos.

$$d_{CGmáx} = \sqrt{d_{3x}^2 + ((d_{3y} - d_{3máx}) - d_{3máx})^2} \quad (3.17)$$

O máximo momento de inércia de massa do braço do manipulador é de  $H_{móvel} = 5,93 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$ . Dessa forma, soma-se os dois termos referentes ao momento de inércia de massa fixo,  $H_{fixo}$ , e ao momento de inércia de massa variável,  $H_{móvel}$ , e tem-se o máximo momento de inércia de massa acoplado à junta. Para determinar o valor do torque necessário ao atuador elétrico, recorre-se à Equação (3.1).

O redutor de engrenagens, especificado para o primeiro eixo, possui uma redução de 24:1, o que leva a necessidade de um torque de no mínimo 0,12 Nm ao atuador desse eixo. O torque requerido para essa junta é inferior ao torque requerido para os eixos superiores do manipulador robótico, devido ao redutor acoplado ao primeiro eixo. Entretanto, especificou-se um atuador NEMA 17 de 0,52 Nm de torque com precisão de 200 passos por revolução no modo passo completo. O que faz com que o primeiro eixo alcance uma resolução de 0,39 mm de arco de circunferência, com o braço do robô totalmente distendido. A Figura 3.19 mostra a configuração geométrica do primeiro eixo.

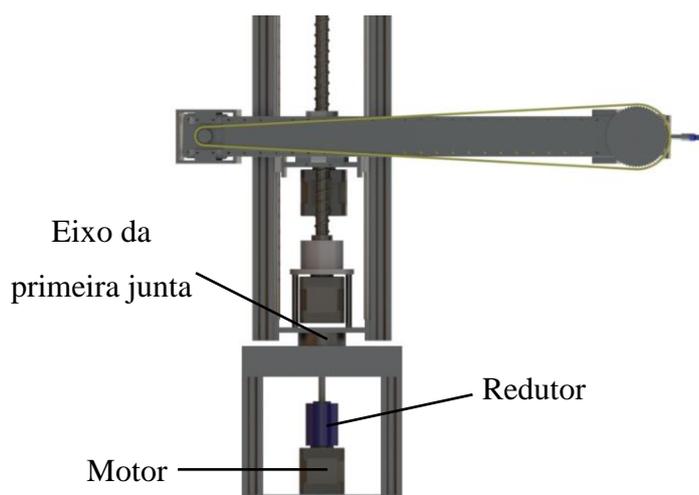


Figura 3.19 – Primeiro eixo do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

Somado com a especificação do motor, é demandado o dimensionamento do eixo acoplado ao redutor e do rolamento montado em conjunto. O eixo da primeira junta, além de sofrer as cargas de torção provenientes do movimento do atuador, também sofre flexão por conta do braço do manipulador robótico. A Figura 3.20 apresenta o primeiro eixo com os respectivos carregamentos.

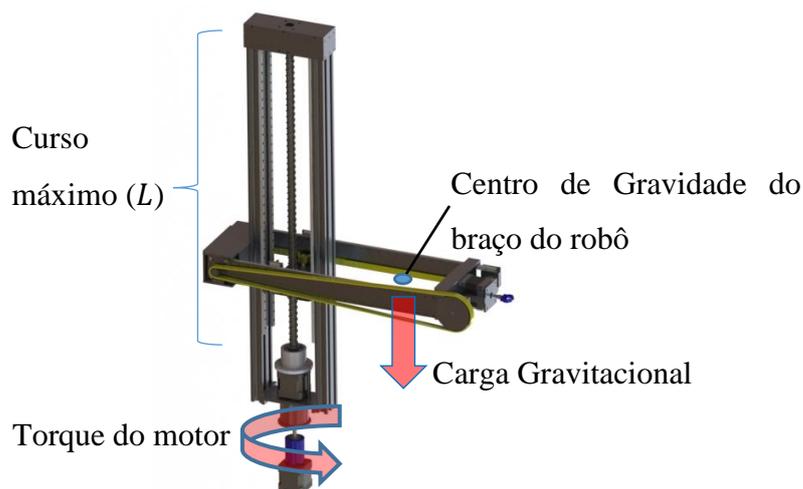


Figura 3.20 – Carregamentos impostos ao eixo da primeira junta do robô.

Como mostrado nos demais dimensionamentos, a carga fletora foi bastante importante para o dimensionamento dos eixos e dos rolamentos. Assim, se dimensionará o eixo com relação a essa carga e se avaliará tal dimensionamento ante as demais cargas. A Equação (3.18) apresenta a maneira de encontrar a dimensão necessária para o eixo dessa junta devido à carga fletora.

$$r_{eixo1} = \left( \frac{4Ml^2}{3E\pi\delta} \right)^{1/4} \quad (3.18)$$

onde  $r_{eixo1}$  é o raio do eixo da primeira junta;  $M$  é momento fletor sobre o eixo da primeira junta do robô.

Os valores dos parâmetros necessários para aplicação da Equação (3.18) são mostrados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Parâmetros para determinação do raio do primeiro eixo.

Parâmetros	Valores
M	1,0075 Nm
$E$ (Alumínio)	$69000 \text{ N/mm}^2$
$\ell$	607 mm
$\delta$	0,032 mm

Com esses parâmetros definidos, chega-se no valor de 18,2 mm para o raio do primeiro eixo. Porém, em virtude do peso que um eixo maciço teria, uma solução interessante é a utilização de um perfil tubular. Desse modo, foi estipulado uma espessura ( $e$ ) de 5 mm para o tubo, resultando na Equação (3.19), a fim de encontrar o valor do raio interno do eixo ( $r_{int1}$ ).

$$4er_{int1}^3 - 6e^2r_{int1}^2 + 4e^3r_{int1} - e^4 = \frac{4M\ell^2}{3E\pi\delta} \quad (3.19)$$

O único valor positivo e real encontrado para o raio interno do eixo é de 20 mm. A Tabela 3.13 apresenta os resultados da aplicação das cargas sobre o eixo da primeira junta e o respectivo coeficiente de segurança, simulado para a liga de alumínio 6063, com tensão de escoamento de 210 GPa.

Tabela 3.13 – Parâmetros para determinação do raio do primeiro eixo.

Tipo de Carregamento	Flexão	Torção <sup>5</sup>	Carga Normal
Carregamento	1,14 Nm	12,48 Nm	15,10 N
Parâmetro resistivo	$8,59E-8 \text{ m}^4$	$1,72E-7 \text{ m}^4$	$7,85E-5 \text{ m}^2$
Tensão	499,79 KPa	2745,80 KPa	192,26 KPa
Coeficiente de segurança	430	78	1092

<sup>5</sup> Como apresentado no dimensionamento do motor do primeiro eixo, o máximo torque calculado para operação é de 2,88 Nm, porém, nessa análise estrutural, foi utilizado o valor 12,48 Nm, pois esse é o torque máximo alcançado pelo atuador (0,52 Nm) com o redutor (24:1).

### 3.6 Manipulador Robótico Cilíndrico – Componentes para montagem

Após a determinação das configurações geométricas e do dimensionamento dos componentes de cada junta, a montagem final do manipulador robótico pode ser realizada. A Figura 3.21 apresenta a configuração final do manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos atuador por motores de passo.



Figura 3.21 – Manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

São listados, a seguir, todos os elementos especificados para cada um dos eixos do manipulador robótico projetado neste trabalho.

Quinto eixo:

- Motor NEMA 17 de 0,16 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução em modo passo completo.

Quarto eixo:

- Motor NEMA 17 de 0,16 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução no modo passo completo;

- Dois eixos de 5 mm de diâmetro fabricado em aço;
- Dois rolamentos autocompensadores de esferas de 5 mm de diâmetro interno e 19 mm de diâmetro externo, similar ao modelo 135 da NSK;
- Uma correia sincronizadora fechada do modelo GT2 com 309 dentes e com 927 mm de comprimento.
- Uma polia sincronizadora de 15,28 mm de diâmetro externo e uma polia sincronizadora 59,21 mm de diâmetro externo – ambas com 9 mm de largura e com perfil de dentes adequados às correias sincronizadoras do modelo GT2;

#### Terceiro eixo:

- NEMA 17 de 0,52 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução no modo passo completo;
- Uma polia sincronizadora de 13,37 mm de diâmetro externo e com largura de 9 mm e com perfil de dentes adequado às correias sincronizadoras do modelo GT2;
- Duas polias de tração externa com diâmetro de 12,70 mm;
- Uma correia sincronizadora aberta do modelo GT2 com 148 dentes e com 444 mm de comprimento;
- Quatro guias lineares com 430 mm de comprimento e seus respectivos patins, modelo TKDM07 com 5 mm de altura e com 7 mm de largura.

#### Segundo eixo:

- NEMA 17 de 0,52 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução no modo passo completo;
- Fuso de passo rápido com 12 milímetros de diâmetro e com passo de 25 mm;
- Freio Warner Electric modelo PB-120 com capacidade de torque de 0,565 Nm;
- Quatro guias lineares com 430 mm de comprimento e seus respectivos patins, modelo TKDM07 com 5 mm de altura e com 7 mm de largura;
- Quatro perfis extrudados de alumínio, Alu-Cek, modelo P20201 com base de 20 mm, com largura de 40 mm e com 641 mm de comprimento;
- Um rolamento de esferas de 10 mm de diâmetro interno e de 19 mm de diâmetro externo, equivalente ao modelo 6800 da NSK;
- Um rolamento de esferas de 20 mm de diâmetro interno e de 32 mm de diâmetro externo, equivalentes ao modelo 6804 da NSK.

Primeiro eixo:

- NEMA 17 de 0,52 Nm de torque com resolução de 200 passos por revolução no modo passo completo;
- Eixo de alumínio com 40 mm de diâmetro interno, com 5 mm de espessura e com 36,5 mm de comprimento;
- Redutor de engrenagens coaxial, modelo G30A, da Pittman, com redução de 24:1, com capacidade de torque de 3,53 Nm e com eficiência energética de 81 %.
- Um rolamento autocompensador de esferas de 45 mm de diâmetro interno e de 85 mm de diâmetro externo, equivalente ao modelo 1209 da NSK;
- Quatro perfis extrudados de alumínio, Alu-Cek, modelo P20201, com base de 20 mm, com largura de 40 mm e com 111 mm de comprimento.

Como apresentado neste capítulo, existem diferenças entre as configurações dos eixos do robô de acionamento elétrico e dos eixos do robô de acionamento pneumático. São descritas a seguir as configurações geométricas de cada eixo desses robôs, com o intuito de verificar e de analisar a diferença entre esses projetos.

O quinto eixo de atuação dos robôs é rotacional e foi especificado como sendo atuado por acionadores rotacionais. Dessa forma, o efetuator é acoplado diretamente sobre o eixo desses atuadores.

O quarto eixo de atuação dos robôs possui um sistema de correia e polias sincronizadoras. O robô de acionadores pneumáticos possui um atuador linear nessa junta, sendo que o acoplamento do êmbolo do atuador pneumático é realizado na correia sincronizadora, e o movimento linear do êmbolo é transformado em rotacional pelo par de polias. As polias são montadas em cada uma das extremidades do braço do robô, e uma delas é montada no eixo de arfagem do efetuator. Diferentemente dessa configuração, o robô de acionamento elétrico utiliza o eixo do motor de passo acoplado a uma das polias; e a outra polia é montada no eixo de arfagem do efetuator.

O terceiro eixo de atuação do robô de acionadores pneumáticos foi determinado pela fixação do êmbolo do atuador pneumático sobre a torre do manipulador robótico. Assim, o acionamento do cilindro pneumático movimenta diretamente essa junta. Para o robô de acionadores elétricos, um sistema de correia e polias sincronizadoras é utilizado, afim de transformar o movimento rotacional do eixo do atuador em movimento linear no eixo de atuação do robô. Além disso, o robô de acionadores elétricos necessita de guias

lineares para fazer o movimento nesse eixo; e o robô de acionadores pneumáticos utiliza os próprios guias lineares do atuador pneumático.

O segundo eixo de atuação do robô de acionamento pneumático, assim como o terceiro eixo de atuação, utiliza o êmbolo do atuador pneumático fixado sobre o braço do robô, com o objetivo de realizar o movimento nessa junta. No robô de acionamento elétrico, utiliza-se um sistema de castanha e fuso de rosca, devido à necessidade de conversão do tipo de movimento (rotacional para linear). Além disso, o robô de acionamento elétrico necessita de guias lineares para realizar o movimento nesse eixo; e o robô de acionamento pneumático utiliza os próprios guias lineares do atuador pneumático.

O primeiro eixo do robô de acionamento pneumático utiliza um sistema de correia e polias sincronizadoras, visando transformar o movimento linear do atuador em movimento rotacional na junta. O robô de acionamento elétrico utiliza um redutor de engrenagens, em busca de aumentar a precisão nessa junta de atuação.

## 4 MODELO MATEMÁTICO

O foco deste capítulo é apresentar o modelo matemático que fundamenta o projeto do controlador e os testes computacionais realizados. Para tanto, são abordadas a cinemática direta e a inversa do manipulador robótico projetado, e bem como a dinâmica referente ao sistema elétrico e ao sistema mecânico do atuador e a dinâmica do sistema mecânico do robô.

### 4.1 Cinemática

O estudo da cinemática trata do deslocamento de um determinado elemento, sem levar em consideração as forças necessárias para realizar esse movimento sobre o corpo. O estudo da cinemática em manipuladores robóticos seriais tem dois objetivos. O primeiro, denominado cinemática direta, tem como finalidade, segundo Spong et al, 2004, determinar a posição e a orientação do atuador final, fornecido os valores das variáveis das juntas. O segundo, denominado cinemática inversa, visa encontrar os valores das variáveis de cada junta para se obter a orientação e a posição desejada para o efetuador do robô.

#### 4.1.1 Cinemática Direta

Será utilizado o procedimento de Denavit-Hartenberg (DH), para corpos rígidos conectados em série, na determinação da orientação e da posição do efetuador.

Como apresentado em Spong et al, 2004, Fu et al, 1987, e Craig, 2005, o primeiro passo para determinar os parâmetros de DH, para o robô estudado, é encontrar a origem e a orientação dos eixos em cada uma das juntas. Para determinar isso, Craig, 2005, apresenta um procedimento, que segue a determinada sequência: o eixo  $z_i$  da junta  $i$  é definida pelo eixo de atuação da junta  $i$ . A origem do sistema de coordenadas da junta  $i$  é determinado pela intersecção de  $a_i$  com a junta  $i$ . A direção do eixo  $x_i$  é definida pela normal de  $z_i$  com  $z_{i+1}$ . Por fim, o eixo  $y_i$  completa o sistema de coordenadas. A Figura 4.1 mostra a representação de duas juntas, com seus eixos estabelecidos a partir do método proposto por Craig, 2005.

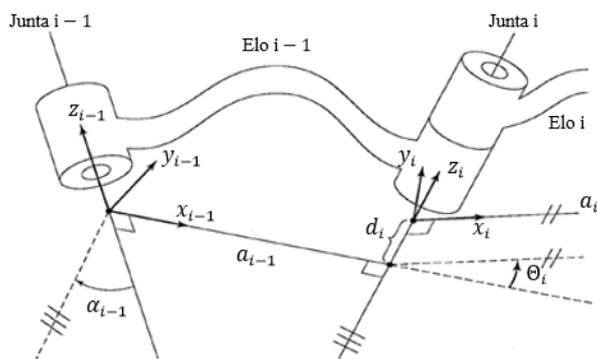


Figura 4.1 – Eixos e parâmetros das juntas pelo método de DH.

A Figura 4.2 mostra a representação dos eixos do manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos por DH.

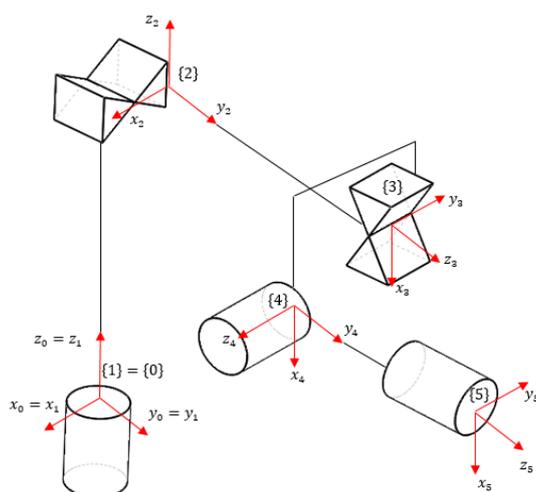


Figura 4.2 - Representação dos eixos do manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos por DH, seguindo Craig, 2005.

Posterior a essa etapa, deve-se determinar os parâmetros de DH com base nos eixos estabelecidos no procedimento anterior. Os parâmetros requeridos por essa metodologia são:

- O comprimento do elo  $i$ , representado por  $a_i$ , é especificado como sendo a distância do elo  $i$  até o elo  $i + 1$  por um eixo perpendicular à origem dos eixos de cada elo. O comprimento do elo ( $a_i$ ) é determinado pela distância de  $z_i$  até  $z_{i+1}$  medida em  $x_i$ ;

- O ângulo de torção do elo  $i$ , representado por  $\alpha_i$ , é especificado como sendo o ângulo entre o elo  $i$  e o elo  $i + 1$  feito pela projeção dos eixos de cada elo sobre um plano perpendicular a esses dois. O ângulo de torção ( $\alpha_i$ ) é definido pelo ângulo de  $z_i$  até  $z_{i+1}$  medida em  $x_i$ ;
- A distância entre elos adjacentes que, para o elo  $i$ , é representada por  $d_i$  e que é especificada como sendo a distância do elo  $i$  até o elo  $i + 1$  por um eixo comum entre eles. A distância entre elos adjacentes ( $d_i$ ), para o elo  $i$ , é determinada pela distância de  $x_i$  até  $x_{i-1}$  medida em  $z_i$ ;
- O ângulo entre elos adjacentes que, para o elo  $i$ , é representado por  $\Theta_i$  e que é especificado como sendo o ângulo entre o elo  $i$  e o elo  $i + 1$  apoiado no eixo comum aos dois. O ângulo entre os elos adjacentes ( $\Theta_i$ ), para o elo  $i$ , é determinado pelo ângulo formado entre  $x_i$  e  $x_{i-1}$  medido em  $z_i$ .

A Tabela 4.1 exhibe os parâmetros de DH para o manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos.

Tabela 4.1 - Parâmetros de DH para o manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos.

Elo ( $i$ )	$\alpha_i$ (rad)	$a_i$ (m)	$\Theta_i$ (rad)	$d_i$ (m)
1	0	0	$\theta_1$	0
2	$-\pi/2$	0	0	$d_2$
3	$\pi/2$	0	$\pi/2$	$d_3 + 0,108$
4	$-\pi/2$	0	$\theta_4$	0
5	0	0	$\theta_5$	0,064

A Equação (4.1) correspondente à matriz DH de transformação homogênea ( $T_i^{i-1}$ ) do elo  $i$  com relação ao elo  $i - 1$ .

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_i & -\sin \Theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \Theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \Theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \Theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \Theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Utilizando a Equação (4.1) em conjunto com os parâmetros de DH, apresentados na Tabela 4.1, para o manipulador robótico de cinco eixos, define-se a matriz de transformação homogênea para cada junta, como mostrado a seguir:

Para a primeira junta (rotação relativa à base):

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \Theta_1 & -\text{sen } \Theta_1 & 0 & 0 \\ \text{sen } \Theta_1 & \cos \Theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Para a segunda junta (translação relativa à rotação da primeira junta):

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Para a terceira junta (translação relativa à translação da segunda junta):

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 + 0,108 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Para a quarta junta (rotação relativa à translação da terceira junta):

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \Theta_4 & -\text{sen } \Theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \text{sen } \Theta_4 & \cos \Theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para a quinta junta (rotação relativa à translação da terceira junta):

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,064 \\ -\sin \theta_5 & -\cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Pela multiplicação das matrizes de transformação associada a cada um dos elos, obtém-se a matriz de transformação homogênea do efetuador com relação à base do manipulador robótico, o que fornece a posição e a orientação da garra do robô relativos aos parâmetros de cada uma das suas juntas. A cinemática direta do manipulador robótico é mostrada na Equação (4.7):

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} -c\theta_1 s\theta_5 - c\theta_5 s\theta_1 s\theta_4 & -c\theta_5 c\theta_1 + s\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 & -c\theta_4 s\theta_1 & -0,064c\theta_4 s\theta_1 - s\theta_1(d_3 + 0,108) \\ -s\theta_1 s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_5 s\theta_4 & -c\theta_5 s\theta_1 - c\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 & c\theta_4 c\theta_1 & 0,064c\theta_4 c\theta_1 + c\theta_1(d_3 + 0,108) \\ -c\theta_5 c\theta_4 & c\theta_4 s\theta_5 & s\theta_4 & d_2 + 0,064s\theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde  $c\theta_i = \cos \theta_i$ ; e  $s\theta_i = \sin \theta_i$ .

De acordo com Fu et al, 1987, a matriz de transformação homogênea da garra do manipulador até a base pode ser dividida pelos vetores que mostram a sua orientação e pelo vetor que mostra a sua posição, conforme representado pela Equação (4.8):

$$T_i^0 = \begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & P_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Por uma questão de simplificação, essa matriz também é apresentada pelos vetores ‘ $n$ ’, ‘ $s$ ’, ‘ $a$ ’ e ‘ $p$ ’. Essa notação é associada a um efetuador, normalmente uma pinça, onde o vetor ‘ $p$ ’ corresponde à posição  $(x, y, z)$  em relação ao sistema de referência. O vetor ‘ $n$ ’ corresponde ao vetor normal ao plano de atuação, o vetor ‘ $s$ ’ corresponde ao eixo de abertura/fechamento da pinça e o vetor ‘ $a$ ’ corresponde ao eixo de aproximação do ponto a ser atingido, sendo tais vetores relativos ao sistema de eixos de orientação da pinça.

#### 4.1.2 Cinemática Inversa

Dos métodos existentes para se resolver a cinemática inversa para manipuladores robóticos, será adotado o método analítico. Nesse método, analisando algebricamente a matriz de transformação homogênea do manipulador robótico projetado, consegue-se comparar os termos dos vetores de orientação e a posição da garra do robô e, por consequência, determinar as equações que relacionam as variáveis das juntas com os termos existentes nesses vetores.

A variável mais apropriada para determinar, inicialmente, é a variável da quarta junta  $\Theta_4$ , na medida em que, como pode ser visto na matriz da Equação (4.7), termo (3,3), comparado ao mesmo termo na Equação (4.8), tem-se:

$$\Theta_4 = \text{sen}^{-1}(a_z) \quad (4.9)$$

A partir desse resultado, outras variáveis podem ser determinadas pela descoberta do valor necessário para a quarta junta. A Equação (4.10) apresenta a expressão para a variável da primeira junta.

$$\Theta_1 = \text{cos}^{-1}\left(\frac{a_y}{\text{cos } \Theta_4}\right) \quad (4.10)$$

A Equação (4.11) mostra a expressão para a variável da segunda junta.

$$d_2 = p_z - 0,046 \text{ sen } \Theta_4 \quad (4.11)$$

E a Equação (4.12) apresenta a expressão para a variável da quinta junta.

$$\Theta_5 = \text{sen}^{-1}\left(\frac{s_z}{\text{cos } \Theta_4}\right) \quad (4.12)$$

Para a variável relativa à terceira junta ( $d_3$ ) existem dois termos que podem ser utilizados:  $p_x$  e  $p_y$ . Independente do termo utilizado para determinar a equação para a variável da terceira junta, a equação terá singularidades. Dessa maneira, a Equação (4.13) apresenta a expressão para esse parâmetro com base no termo  $p_x$ .

$$d_3 = \frac{p_x + 0,046 \cos \Theta_4 \sin \Theta_1 + 0,108 \sin \Theta_1}{\sin \Theta_1} \quad (4.13)$$

Uma vez definidas as variáveis das juntas podem-se determinar os valores das variáveis dos atuadores. Para as variáveis prismáticas, encontradas na resolução da cinemática inversa ( $d_2$  e  $d_3$ ), deve-se transformá-las em variáveis rotacionais requeridas aos motores. Para definir os valores das variáveis requeridas aos atuadores da primeira junta e da quarta junta, deve-se dividir o valor encontrado pelas variáveis  $\Theta_1$  e  $\Theta_4$ , na cinemática inversa, pela taxa de redução dos sistemas de transmissão. A Tabela 4.2 mostra os valores dos fatores de transmissão para os respectivos eixos.

Tabela 4.2 - Fatores de transmissão dos eixos.

Junta	Fator de transmissão
Primeira	$24 \text{ rad/rad}$
Segunda	$6,688 \cdot 10^{-3} \text{ m/rad}$
Terceira	$3,981 \cdot 10^{-3} \text{ m/rad}$
Quarta	$3,78 \text{ rad/rad}$
Quinta	$1 \text{ rad/rad}$

Com os dados indicados na Tabela 4.2 e no espaço de trabalho desejado a cada um dos eixos do manipulador robótico, mostrado na Tabela 3.2, pode-se determinar o espaço de trabalho requerido aos atuadores para completar todo o percurso em cada eixo. A Tabela 4.3 apresenta o espaço de trabalho dos atuadores de cada junta.

Tabela 4.3 - Espaço de trabalho requerido aos atuadores.

Junta	Espaço de trabalho dos atuadores ( <i>rad</i> )
Primeira	141,51
Segunda	113,10
Terceira	44,88
Quarta	5,95
Quinta	6,28

No Apêndice A, esta rotina elaborada no software *Matlab* para calcular a cinemática direta e a inversa do manipulador robótico.

## 4.2 Dinâmica

A modelagem dinâmica do robô é dividida na representação matemática do comportamento elétrico e na do comportamento mecânico do motor de passo, bem como na representação matemática do comportamento do sistema mecânico do manipulador robótico.

### 4.2.1 Sistema Elétrico

A modelagem matemática do sistema elétrico segue, principalmente, os trabalhos de: Kabde et al, 2014, Elksasy et al, 2010, Baldha et al, 2015, Kamalasadnan, 2007, Cardozo, 2012. De acordo com esses trabalhos, esse sistema é dividido em duas partes: a primeira é relativa ao circuito elétrico que representa o sistema, e a segunda é relativa ao torque eletromagnético do atuador. O circuito elétrico é interligado à dinâmica de movimentação do atuador (parcela mecânica) através do torque eletromagnético. A modelagem matemática do circuito elétrico do atuador é realizada a partir da Figura 4.3, exemplificada para a fase *A* do motor de passo. As equações (4.14) e (4.15) representam a dinâmica dos circuitos elétricos das fases *A* e *B*, determinadas pelo método das malhas.

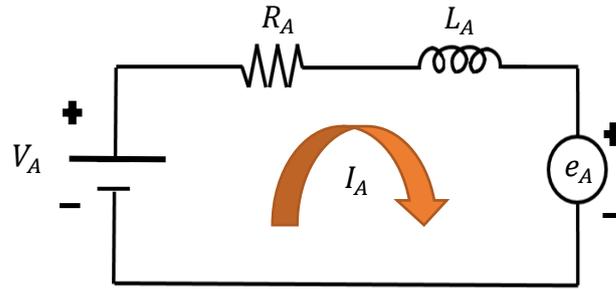


Figura 4.3 – Circuito elétrico do motor de passo exemplificado para a fase A.

$$V_A = R_A I_A + L_A \frac{dI_A}{dt} - e_A \quad (4.14)$$

$$V_B = R_B I_B + L_B \frac{dI_B}{dt} - e_B \quad (4.15)$$

onde  $V_{A,B}$  é a tensão de alimentação;  $R_{A,B}$  é a resistência elétrica;  $I_{A,B}$  é a corrente elétrica;  $L_{A,B}$  é a indutância elétrica e  $e_{A,B}$  é a tensão induzida em cada uma das fases.

Para determinar o fluxo magnético existente no motor de passo bifásico, analise-se a Figura 4.4, onde  $\mathcal{B}$  é o campo magnético.

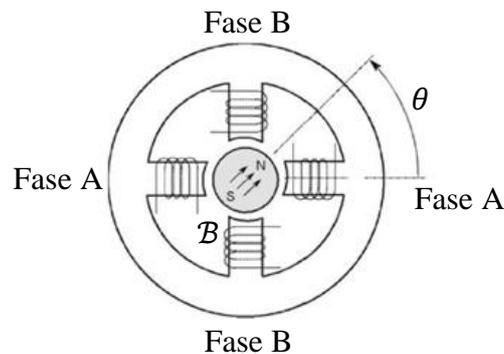


Figura 4.4 – Interação entre o ímã permanente e as bobinas. Adaptado de Mayé, 2016.

O fluxo magnético para o motor de passo bifásico pode ser determinado, segundo Fitzgerald et al, 2006, a partir da integral de superfície da componente normal do campo magnético. No caso do motor de passo, o ímã permanente produz as linhas do campo magnético, enquanto que a superfície fechada é a superfície limitada pelas espiras nas

fases do motor, localizadas no estator. A aplicação da definição do fluxo magnético sobre as fases  $A$  e  $B$  do motor de passo resulta nas equações (4.16) e (4.17):

$$\varphi_A = \int_A \mathcal{B}A = \mathcal{B}_{\perp A}A = \mathcal{B}A \cos(p\theta) = \varphi_M \cos(p\theta) \quad (4.16)$$

$$\varphi_B = \int_A \mathcal{B}A = \mathcal{B}_{\perp B}A = \mathcal{B}A \sin(p\theta) = \varphi_M \sin(p\theta) \quad (4.17)$$

onde  $\varphi_A$  e  $\varphi_B$  são os fluxos magnéticos nas fase  $A$  e  $B$ ;  $A$  é a área limitada pelas espiras nas fases do motor;  $\varphi_M$  é o máximo fluxo magnético;  $p$  é número de par de polos magnéticos do rotor;  $\theta$  é o ângulo de rotação do eixo do motor de passo, ou seja, o ângulo de rotação do rotor de ímãs permanente; e o subíndice  $\perp_{A,B}$  significa perpendicular à fase  $A$  ou  $B$ .

De acordo com Halliday et al, 1993, a lei da indução de Faraday enuncia que a tensão induzida em uma espira condutora, na qual um campo magnético atravessa a área delimita por essa espira, é igual à taxa em que o fluxo magnético, através dessa espira, varia ao longo do tempo. Aplicando a lei da indução de Faraday sobre as fases  $A$  e  $B$  do motor de passo, as tensões induzidas são determinadas pelas equações (4.18) e (4.19):

$$e_A = \frac{d\varphi_A}{dt} = -p\varphi_M\dot{\theta} \sin(p\theta) \quad (4.18)$$

$$e_B = \frac{d\varphi_B}{dt} = -p\varphi_M\dot{\theta} \sin(p\theta - \pi/2) \quad (4.19)$$

onde  $\dot{\theta}$  é a velocidade de rotação do motor.

Com base nas equações (4.18) e (4.19), as equações (4.14) e (4.15) podem ser modificadas, conforme apresentado nas equações (4.20) e (4.21):

$$V_A = R_A I_A + L_A \frac{dI_A}{dt} + p\varphi_M\dot{\theta} \sin(p\theta) \quad (4.20)$$

$$V_B = R_B I_B + L_B \frac{dI_B}{dt} + p\varphi_M \dot{\theta} \sin(p\theta - \pi/2) \quad (4.21)$$

O torque eletromagnético produzido por cada fase do motor de passo, é oriundo da força eletromagnética devida à interação do campo magnético com uma partícula com carga elétrica e velocidade [Fitzgerald, et al, 2006]. A força eletromagnética ( $F_{A,B}$ ), oriunda da interação de uma bobina (no caso do motor de passo uma das fases) com o campo magnético, é determinada, segundo Halliday et al, 1993, pela Equação (4.22):

$$F_A = I_A \mathcal{L} \mathcal{B}_{\perp A}; F_B = I_B \mathcal{L} \mathcal{B}_{\perp B} \quad (4.22)$$

onde  $\mathcal{L}$  é comprimento total das bobinas em cada uma das fases.

O torque eletromagnético ( $T_{A,B}$ ) é determinado pela multiplicação da força eletromagnética pelo raio efetivo do rotor ( $r$ ), como apresentado na Equação (4.23):

$$T_A = F_A r = I_A \mathcal{L} r \mathcal{B}_{\perp A}; T_B = F_B r = I_B \mathcal{L} r \mathcal{B}_{\perp B} \quad (4.23)$$

Para determinar o campo magnético perpendicular a cada uma das fases do motor de passo, ilustram-se as figuras 4.4 e 4.5, com o intuito de determinar a área que o campo magnético atravessa para gerar o fluxo magnético sobre cada fase.

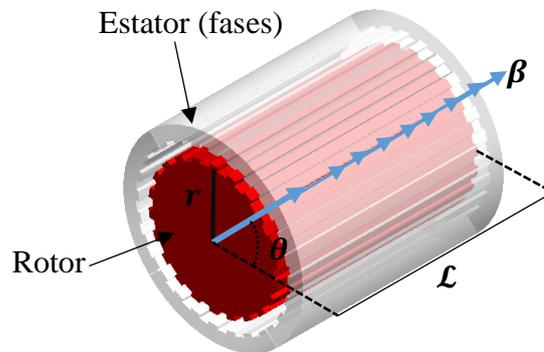


Figura 4.5 – Área atravessada pelo campo magnético.

Observando as figuras 4.4 e 4.5, percebe-se que a área que o campo magnético atravessa sobre cada fase do estator depende do raio efetivo do rotor ( $r$ ), do comprimento

das bobinas na fase ( $\mathcal{L}$ ) e do ângulo de rotação do rotor ( $\theta$ ) de ímãs permanentes (campo magnético) faz com a fase analisada. Desses parâmetros, o raio efetivo do rotor e o comprimento das bobinas das fases do estator são parâmetros geométricos constantes, enquanto que o ângulo de rotação é alterado continuamente devido à atuação do motor de passo. Dessa forma, a área de largura infinitesimal ( $dA$ ) atravessada pelo campo magnético do rotor é dependente do ângulo de rotação do rotor, conforme determinado pela Equação (4.24):

$$dA = d(\mathcal{L}r\theta) = \mathcal{L}rd(\theta) \quad (4.24)$$

Dessa forma, recorre-se à definição do fluxo magnético, apresentada nas equações (4.16) e (4.17), para determinar a expressão para o campo magnético. Sendo assim, o campo magnético é determinado pela derivada do fluxo magnético com relação à área que o campo magnético atravessa. A Equação (4.25) apresenta essa derivada para a fase A do motor de passo.

$$\frac{d\varphi_A}{dA} = \frac{d}{dA} \left( \int_A B dA \right) \quad (4.25)$$

O segundo termo da Equação (4.25) é o fluxo magnético. Utilizando as equações (4.16) e (4.25) o primeiro termo da Equação (4.25) resulta na Equação (4.26):

$$\frac{d\varphi_A}{dA} = \frac{d(\varphi_M \cos(p\theta))}{d(\mathcal{L}r\theta)} = \frac{\varphi_M}{\mathcal{L}r} \frac{d(\cos(p\theta))}{d(\theta)} = -\frac{p\varphi_M}{\mathcal{L}r} \text{sen}(p\theta) = \mathcal{B}_{\perp A} \quad (4.26)$$

Assim, o torque eletromagnético para a fase A pode ser determinado substituindo o resultado da Equação (4.26) na Equação (4.23), resultando na Equação (4.27):

$$T_A = I_A \mathcal{L}r \mathcal{B}_{\perp A, B} = -I_A \mathcal{L}r \frac{p\varphi_M}{\mathcal{L}r} \text{sen}(p\theta) = -p\varphi_M I_A \text{sen}(p\theta) \quad (4.27)$$

onde  $T_A$  é o torque eletromagnético fornecido pela fase A.

O torque eletromagnético da fase  $B$  é determinado de maneira análoga à dedução apresentada para a fase  $A$  do motor de passo. A Equação (4.28) apresenta o torque eletromagnético da fase  $B$ .

$$T_B = p\varphi_M I_B \cos(p\theta) \quad (4.28)$$

onde  $T_B$  é o torque eletromagnético fornecido pela fase  $B$ .

Mayé, 2016, aglutina a Equação (4.27) com a Equação (4.28), que unidas fornecem o torque eletromagnético do motor, para o caso de um atuador de duas fases bipolares, como os motores utilizados neste projeto. Assim:  $I_A = I_B = I$ . Além disso, o número de par de polos magnéticos do rotor,  $p$ , é igual a um. E o torque eletromagnético ( $T_M$ ) do motor pode ser calculado usando a Equação (4.29):

$$T_M = \varphi_M I \sqrt{2} \sin(\theta - \pi/4) \quad (4.29)$$

Seguindo a mesma lógica de Mayé, 2016, para o agrupamento dos torques das fases  $A$  e  $B$ , utiliza-se um circuito elétrico equivalente para as duas fases do atuador, com o objetivo de agrupar as equações (4.20) e (4.21). O sistema elétrico equivalente é mostrado na Figura 4.6:

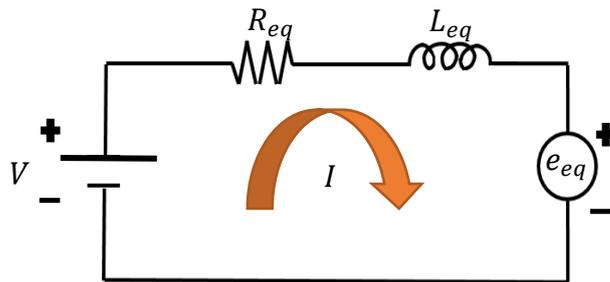


Figura 4.6 – Circuito Elétrico Equivalente para um motor de passo bifásico.

A modelagem matemática do circuito elétrico da Figura 4.6, utilizando o método das malhas, é apresentada na Equação (4.30), sendo o resultado do agrupamento dos termos das equações (4.20) e (4.21):

$$V = R_{eq}I + L_{eq} \frac{dI}{dt} - e_{eq} \quad (4.30)$$

onde  $V$  corresponde à tensão de alimentação para o motor de passo de duas fases bipolar;  $I$  é a corrente elétrica fornecida para o motor de passo de duas fases bipolar;  $R_{eq}$  e  $L_{eq}$  são a resistência e a indutância equivalentes ao agrupamento das fases  $A$  e  $B$ , as quais dependem da ligação entre as fases serem em série ou em paralelo; e  $e_{eq}$  é a tensão induzida equivalente ao agrupamento das fases  $A$  e  $B$ .

A tensão induzida equivalente pode ser encontrada de maneira similar à de Mayé, 2016, para os torques eletromagnéticos. Por essa razão, unindo os últimos termos das equações (4.20) e (4.21), chega-se na Equação (4.31):

$$e_{eq} = -\varphi_M \dot{\theta} \sqrt{2} \operatorname{sen}(\theta - \pi/4) \quad (4.31)$$

Com base na Equação (4.31), a Equação (4.30) pode ser modificada. Conforme mostrado na Equação (4.32), que resulta na equação final para a dinâmica do circuito elétrico equivalente para o motor de passo de duas fases bipolar:

$$V = R_{eq}I + L_{eq} \frac{dI}{dt} + \varphi_M \dot{\theta} \sqrt{2} \operatorname{sen}(\theta - \pi/4) \quad (4.32)$$

O modelo matemático do sistema elétrico foi acoplado devido ao controlador projetado neste trabalho, no qual utiliza o sinal de controle, corrente elétrica, para alimentar as duas fases do atuador simultaneamente.

Por fim, além do torque eletromagnético, os motores de passo produzem um torque induzido pela atração do ímã permanente do rotor com os polos do estator, mesmo quando não há corrente alimentado as bobinas do estator [Collins, 2016]. Esse torque é contrário ao torque eletromagnético, sendo denominado de torque de retenção (residual). Segundo Mayé, 2016, o torque de retenção é definido pela Equação (4.33):

$$T_r = t_r \operatorname{sen}(4\theta) \quad (4.33)$$

onde  $T_r$  é o torque de retenção; e  $t_r$  é o valor máximo do torque de retenção.

#### 4.2.2 Sistema Mecânico

Na equação que rege o comportamento do sistema mecânico, pode ser visto, comumente, um termo relativo ao momento de inércia de massa, um ou mais termos relativos ao atrito e uma componente relativa ao torque.

Baseado nos modelos utilizados, principalmente, nos trabalhos referentes a motores de passo (Kabde et al, 2014, Elksasy et al, 2010, Baldha et al, 2015, Kamalasadán, 2007, Cardozo, 2012) e na falta de experimentos para se determinar um modelo de atrito mais elaborado e concordante com a realidade, utiliza-se um modelo matemático com somente a componente viscosa do atrito. A Equação (4.34) apresenta o modelo matemático para o sistema mecânico:

$$T_{Mec} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_f \frac{d\theta}{dt} + T_c \quad (4.34)$$

onde  $T_{Mec}$  é o torque mecânico que solicita o atuador;  $J$  é ao momento de inércia de massa associada ao eixo analisado;  $C_f$  é o termo do atrito relativo ao atrito viscoso; e  $T_c$  é torque proveniente da dinâmica do robô. O torque  $T_c$  é obtido através da aplicação dos equacionamentos de Newton-Euler para manipuladores robóticos seriais, com base na segunda lei do movimento de Newton. Porém, como mostrado no Capítulo 3, dois eixos do robô possuem sistemas de redução (primeiro eixo e quarto eixo), o segundo eixo é linear e trabalha acoplado a um sistema de fuso e castanha e o terceiro eixo é linear e utiliza uma polia sincronizadora acoplada sobre o eixo do atuador. Desse modo, as forças e os torques, provenientes dos atuadores, não acionam diretamente esses eixos, pois passam por sistemas de transmissão intermediários.

Para a primeira e a quarta junta os torques de acionamento nos eixos são determinados pela multiplicação do torque proveniente dos atuadores pela redução nesse eixo. Para o segundo eixo, a aplicação e subtração das equações 3.13 e 3.14, apresentada no dimensionamento do motor da segunda junta, fornece a força que aciona esse eixo. Nessas equações, substitui-se o torque gravitacional pelo torque proveniente do atuador

e determina-se a força fornecida para a atuação desse eixo do robô. No terceiro eixo o torque proveniente do atuador é dividido pelo raio da polia sincronizadora acoplada sobre o eixo para gerar a força que movimenta esse eixo. Além disso, devido aos sistemas de transmissão, o monitoramento do posicionamento dos eixos também passa pelos sistemas de transmissão para fechar a malha de controle. O posicionamento para cada eixo é determinado de forma análoga ao apresentado para determinação das forças e torques que acionam os eixos do robô.

Baseado em Craig, 2005, para determinar as forças e torque de ação, para gerar o movimento dos eixos do robô, deve-se determinar as acelerações e as velocidades em cada uma das juntas. As equações (4.35) a (4.38) determinam as acelerações e as velocidades para a junta analisada:

$$\omega_{i+1}^{i+1} = \mathcal{R}_i^{i+1} \omega_i^i + \dot{\Theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}^{i+1} \quad (4.35)$$

$$\dot{\omega}_{i+1}^{i+1} = \mathcal{R}_i^{i+1} \dot{\omega}_i^i + \mathcal{R}_i^{i+1} \omega_i^i \times \dot{\Theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}^{i+1} + \dot{\Theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}^{i+1} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_{i+1}^{i+1} = & \mathcal{R}_i^{i+1} [\dot{\omega}_i^i \times P_{i+1}^i + \omega_i^i \times (\omega_i^i \times P_{i+1}^i) + \dot{v}_i^i] + 2\omega_{i+1}^{i+1} \\ & \times \dot{d}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}^{i+1} + \ddot{d}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}^{i+1} \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\dot{v}_{Ci}^i = \omega_i^i \times \mathbb{P}_{Ci}^i + \omega_i^i \times (\omega_i^i \times P_{i+1}^i) + \dot{v}_i^i \quad (4.38)$$

onde  $\omega_{i+1}^{i+1}$  é a velocidade angular do elo  $i + 1$ , com relação ao seu sistema de referência;  $\mathcal{R}_i^{i+1}$  é a matriz de rotação da junta  $i + 1$  sobre a junta  $i$ , sendo calculada pela Equação (4.39);  $\dot{\Theta}$  é a velocidade angular da junta;  $\hat{Z}_{i+1}^{i+1}$  é expressa pela Equações (4.40);  $\dot{\omega}$  é a aceleração angular do elo;  $\dot{v}$  é a aceleração linear do elo;  $P_{i+1}^i$  é a posição da junta  $i + 1$ , com relação à junta  $i$  representada no sistema de coordenadas da junta  $i + 1$ , sendo determinada pela Equação (4.41);  $\dot{d}$  é a velocidade linear da junta prismática;  $\ddot{d}$  é a aceleração linear da junta prismática;  $\dot{v}_c$  é a aceleração linear do elo no seu centro de massa; e  $\mathbb{P}_{Ci}^i$  é o vetor correspondente ao centro de massa do elo relativo ao centro de coordenadas da junta, determinado pela Equação (4.42):

$$\mathcal{R}_i^{i+1} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_{i+1} & \sin \Theta_{i+1} & 0 \\ \cos \alpha_{i+1} \sin \Theta_{i+1} & \cos \alpha_{i+1} \cos \Theta_{i+1} & \sin \alpha_{i+1} \\ \sin \Theta_{i+1} \sin \alpha_{i+1} & \cos \Theta_{i+1} \sin \alpha_{i+1} & \cos \alpha_{i+1} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$$\hat{Z}_{i+1}^{i+1} = [0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (4.40)$$

$$P_{i+1}^i = [a_{i+1} \cos \Theta_{i+1} \quad a_{i+1} \sin \Theta_{i+1} \quad d_{i+1}] \quad (4.41)$$

$$\mathbb{P}_{Ci} = [\bar{X}_i \quad \bar{Y}_i \quad \bar{Z}_i] \quad (4.42)$$

onde  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  e  $\bar{Z}$  são os valores da distância do centro de massa do elo com relação ao centro da junta para os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

Baseado nas velocidades e nas acelerações expressas pelas equações (4.35) a (4.38), consegue-se definir as forças e os torques de ação provenientes das juntas, sendo esses as forças e os torques necessários para a movimentação dos eixos do robô. As equações (4.43) e (4.44) apresentam a força e o torque de ação:

$$f_i = m_i \dot{v}_{Ci}^i \quad (4.43)$$

$$t_i = H_{Ci} \dot{\omega}_i + \omega_i \times H_{Ci} \dot{\omega}_i \quad (4.44)$$

onde  $f_i$  é a força de ação do elo;  $m_i$  é a massa do elo;  $t_i$  é o torque de ação do elo; e  $H_{Ci}$  é a matriz de inércia do elo, apresentada pela Equações (4.45):

$$H_{Ci} = \begin{bmatrix} H_{xx} & -H_{xy} & -H_{xz} \\ -H_{xy} & H_{yy} & -H_{yz} \\ -H_{xz} & -H_{yz} & H_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Os parâmetros de momento de inércia de massa, o produto de inércia de massa, a massa do elo e os valores das coordenadas do centro de massa, para cada um dos elos do robô, são mostrados no Apêndice B.

Fundamentado nas velocidades, nas acelerações, nas forças e nos torques de ação do robô, consegue-se, a partir do efetuador até a base, encontrar as forças e os torques de reação, que atuam sobre cada eixo do manipulador robótico. As equações (4.46) e (4.47) mostram a força e o torque de reação sobre as juntas:

$$F_i = \mathcal{R}_{i+1}^i f_{i+1} + f_i \quad (4.46)$$

$$T_i = t_i + \mathcal{R}_{i+1}^i n_{i+1} + P_{Ci}^i \times f_i + P_{i+1}^i \times \mathcal{R}_{i+1}^i f_{i+1} \quad (4.47)$$

onde  $F_i$  e  $T_i$  são a força e o torque de reação; e  $\mathcal{R}_{i+1}^i$  é a inversa da matriz, apresentada na Equação (4.34).

#### 4.4 Modelo matemático do momento de inércia de massa do primeiro grau de liberdade

Como avaliado, anteriormente, no projeto do motor de passo e no projeto do sistema de redução para o primeiro grau de liberdade do manipulador robótico, o momento de inércia de massa associado a essa junta varia ao longo da operação, principalmente, relativo à movimentação da terceira junta e da quarta junta do robô.

Rijo, 2013, apresenta uma metodologia para determinar o momento de inércia de massa imposto sobre o primeiro grau de liberdade para o manipulador robótico de atuadores pneumáticos. Essa metodologia consiste em dividir o manipulador em eixos relativos à movimentação das suas juntas de atuação e, conforme tal divisão, determinar o momento de inércia de massa equivalente, que é associado ao primeiro eixo, de acordo com a movimentação das demais juntas do robô. Aplicando essa metodologia ao projeto do manipulador de atuadores elétricos, são necessários dois sistemas de coordenadas. O primeiro sistema de coordenadas é relativo à movimentação da primeira junta. O segundo sistema de coordenadas é relativo à movimentação da quarta junta. A Figura 4.7 apresenta os componentes do manipulador, que são acoplados sobre o redutor de engrenagens, conectado sobre o eixo do motor de passo do primeiro grau de liberdade, além dos sistemas de coordenadas utilizados para a modelagem matemática do momento de inércia de massa associado a essa junta.

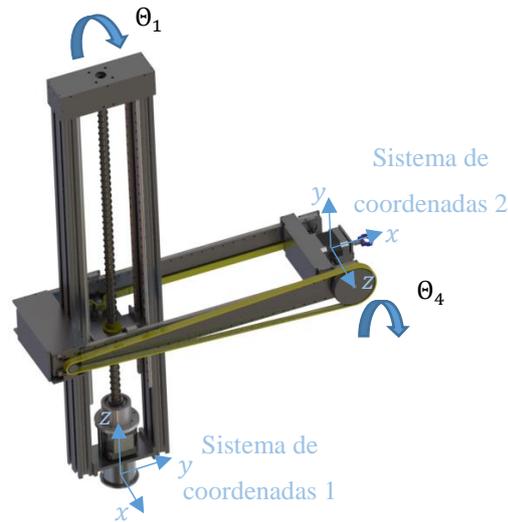


Figura 4.7 - Componentes do manipulador e sistemas de coordenadas utilizados para o cálculo do momento de inércia de massa associado ao 1<sup>o</sup> grau de liberdade do robô.

Como apresentado na Equação (3.5), proposta por Mayé, 2016, o momento de inércia de massa associado a um sistema de atuação com redutor, depende do momento de inércia de massa dos componentes antes do redutor e do momento de inércia de massa dos componentes após o redutor. Os componentes antes do redutor ( $J_{eixos}$ ) foram apresentados na Figura 4.7, relativa ao 2<sup>o</sup>, ao 3<sup>o</sup>, ao 4<sup>o</sup> e ao 5<sup>o</sup> eixo do robô. Os componentes após o redutor são relativos ao próprio sistema de redução de engrenagem e ao eixo do motor de passo dessa junta. O momento de inércia equivalente ( $J_1$ ) sobre o primeiro grau de liberdade é apresentado na Equação (4.48):

$$J_1 = \frac{J_{eixos}}{\phi^2} + J_{motor} \quad (4.48)$$

onde  $J_{motor}$  é o momento de inércia relativa ao sistema de redução de engrenagem somado ao momento de inércia de massa do eixo do motor de passo dessa junta.

O momento de inércia de massa associado aos eixos do robô é dividido conforme apresentado na Equação (4.49):

$$J_{eixos} = J_f + J_3 + J_4 \quad (4.49)$$

onde  $J_f$  é o momento de inércia de massa relativo à movimentação do 2º eixo do robô;  $J_3$  é o momento de inércia de massa relativo à movimentação do 3º eixo do robô; e  $J_4$  é o momento de inércia de massa relativo à movimentação do 4º eixo do robô.

Seguindo a metodologia apresentada em Rijo, 2013, na Figura 4.8, os elementos estruturais são conectados de maneira que a única movimentação possível é a da segunda junta do robô.

Observa-se, na Figura 4.8, que a movimentação da segunda junta do robô não altera o momento de inércia de massa relativa ao eixo  $z$  do sistema de coordenadas 1. Sendo assim, considerada um momento de inércia de massa fixa ( $J_f$ ) associado à movimentação do 1º eixo. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de massa, centro de massa e do momento de inércia de massa associados ao eixo  $z$  do sistema de coordenadas 1, devido ao segundo eixo do robô.



Figura 4.8 – Componentes da 2ª junta e torre do robô.

Tabela 4.4 – Parâmetros referentes à Figura 4.8.

Parâmetros	Valores
Massa (kg)	2,926
Centro de massa em relação ao eixo x, y z (mm)	-5,17/ 0,00/ 314,80
Momento de inércia de massa em relação ao eixo z do sistema de coordenada 1 obtido no centro de massa ( $\text{gmm}^2$ )	4.851.536,28
Momento de inércia de massa com relação ao eixo z ( $J_f$ ) do sistema de coordenada 1 ( $\text{gmm}^2$ )	4.867.380,62

A movimentação da terceira junta do robô modifica o momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade do robô, como apresentado na Figura 4.9.

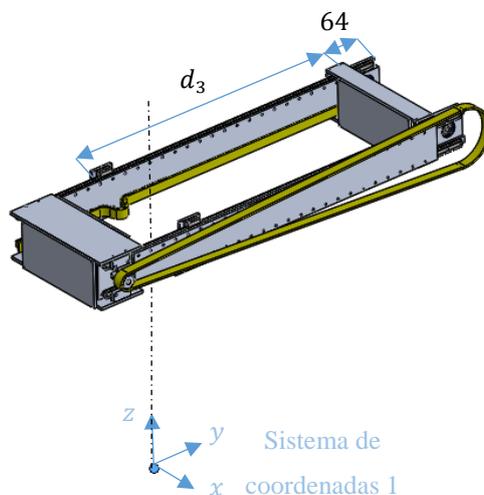


Figura 4.9 – Componentes da 3ª junta e da 4ª junta do robô.

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros de massa, centro de massa e momento de inércia de massa do conjunto apresentado da Figura 4.9.

Tabela 4.5 – Parâmetros referentes à Figura 4.9.

Parâmetros	Valores
Massa (kg)	1,003
Centro de massa em relação ao eixo X/Y/Z (mm)	15,76/46,52/274,07
Momento de inércia de massa em relação ao eixo z ( $J_{g3}$ ) do sistema de coordenada 1 obtido no centro de massa ( $\text{gmm}^2$ )	26.571.298,97

O Teorema dos Eixos Paralelos estabelece que: definido o momento de inércia de massa relativo a um eixo que passa pelo centro de gravidade do corpo ( $J_{cg}$ ), o momento de inércia de massa relativo a um eixo paralelo a esse eixo é determinado pela Equação (4.50) [Hibbeler, 2011]:

$$J = J_{cg} + md^2 \quad (4.50)$$

onde  $m$  é a massa; e  $d$  é a distância perpendicular entre os eixos.

Para aplicar a Equação (4.50) para o terceiro eixo, deve-se determinar a distância do centro de gravidade do conjunto, apresentado na Figura 4.9, até o eixo  $z$  do sistema de coordenadas 1 ( $d_{G3}$ ). Como na Figura 4.9 o terceiro eixo está totalmente distendido ( $d_3 = 300$  mm), a componente em  $Y$  dessa distância é de  $-253,48$  mm ( $46,52$  mm  $-$   $300$  mm). Fundamentado nisso, essa distância é calculada pela Equação (4.51):

$$d_{G3} = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{15,76^2 + (-253,48 + d_3)^2} \quad (4.51)$$

Aplicando a Equação (4.51) sobre o conjunto da Figura 4.9, obtém-se a Equação (4.52):

$$J_3 = J_{g3} + m(d_{G3})^2 \quad (4.52)$$

A movimentação da quarta junta do robô modifica o momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade do robô, como apresentado na Figura 4.10.

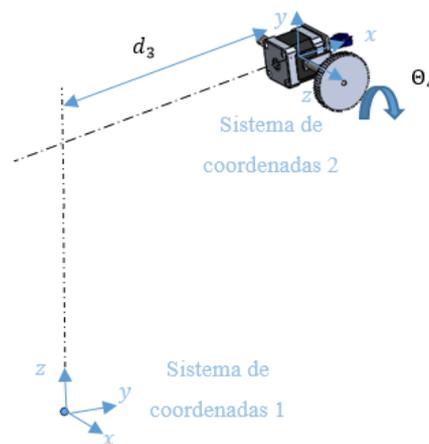


Figura 4.10 – Componentes da 4ª junta e da 5ª junta do robô.

Para o conjunto apresentado na Figura 4.10, o momento de inércia de massa associado ao eixo  $z$  do sistema de coordenadas 1 pode variar tanto com relação ao deslocamento do terceiro eixo ( $d_3$ ) quanto com relação à rotação da quarta junta ( $\theta_4$ ). A

Tabela 4.6 apresenta os parâmetros de massa, centro de massa e momento de inércia de massa do conjunto apresentado na Figura 4.10.

Tabela 4.6 – Parâmetros referentes à Figura 4.10.

Parâmetros	Valores
Massa (kg)	0,311
Centro de massa em relação ao eixo x, y z do sistema de coordenada 1 (mm)	17,82/312,74/274,47
Centro de massa em relação ao eixo x, y z do sistema de coordenada 2 (mm)	14,87/0,00/-1,58
Momento de inércia de massa em relação ao eixo z ( $J_{g4}$ ) do sistema de coordenada 1 obtido no centro de massa ( $\text{gmm}^2$ )	480.604,96
Momento de inércia de massa no centro de massa ( $J_{XG}/J_{YG}/J_{ZG}$ ) alinhado com o sistema de coordenada 1 ( $\text{gmm}^2$ )	465.643,97/ 480.609,39/ 101.010,06
Produto de inércia no centro de massa ( $J_{XGY}$ ) alinhado com o sistema de coordenada 1 ( $\text{gmm}^2$ )	8.675,40

A distância do centro de gravidade do conjunto, apresentado na Figura 4.10, até o eixo z do sistema de coordenadas 1 ( $d_{G4}$ ) é definida pela Equação (4.53):

$$d_{G4} = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{17,82^2 + (d_3 + 64 + 14,87 \cos \Theta_4)^2} \quad (4.53)$$

Dessa forma, o momento de inércia de massa associado ao conjunto da Figura 4.10 é determinado pela Equação (4.54):

$$J_4 = J_{g4} + m(d_{G4})^2 \quad (4.54)$$

Entretanto, o momento de inércia de massa relativo ao eixo z do sistema de coordenadas 1, que passa pelo centro de gravidade ( $J_{g4}$ ), varia conforme a rotação da

quarta junta. Esse momento de inércia de massa pode ser determinado pela Equação (4.55), que é obtida através do Teorema dos Eixos Inclinados [Hibbeler, 2011].

$$J_{g4} = \frac{J_{xG} + J_{yG}}{2} - \frac{J_{xG} + J_{yG}}{2} \cos(2\theta_4) + J_{xyG} \sin(2\theta_4) \quad (4.55)$$

## 5 PROJETO DO CONTROLADOR

Os motores de passo são alternativas interessantes para o controle em malha aberta, por conta da discretização do seu movimento incremental e da consequente facilidade de controle para essa operação. Entretanto, alguns problemas surgem para esse tipo de arranjo. De acordo com Acarnley, 2002, para garantir que não ocorra perda de passos durante a operação em malha aberta, as acelerações e as velocidades máximas do atuador devem ser limitadas. Dessa forma, a baixa performance possível de ser desenvolvida pelo atuador é um problema com essa estratégia. Cao et al, 1998, apresentam que o motor de passo operando em malha aberta pode apresentar oscilações na velocidade de operação, sendo que essas oscilações não ocorrem com a estratégia de controle em malha fechada por realimentação de estados.

O projeto de controladores baseado na realimentação dos estados pode utilizar a estratégia de realocação dos polos do sistema em malha fechada, sendo que os polos podem ser determinados para que o sistema controlado cumpra uma determinada dinâmica de atuação [Ogata, 1997].

De acordo com Sename, 2018, um controlador por realimentação de estados pode não se adequar aos efeitos de perturbações, particularmente de perturbações na entrada, o que causa dificuldade para se determinar os ganhos do sistema para se adequar a dinâmica desejada ao sistema controlado. Ele apresenta que uma maneira de solucionar esse problema é adicionar um termo integral sobre o erro de posicionamento para garantir um ganho estático unitário sobre a malha de controle fechada. A Figura 5.1 apresenta o diagrama de blocos do controlador apresentado por Sename, 2018.

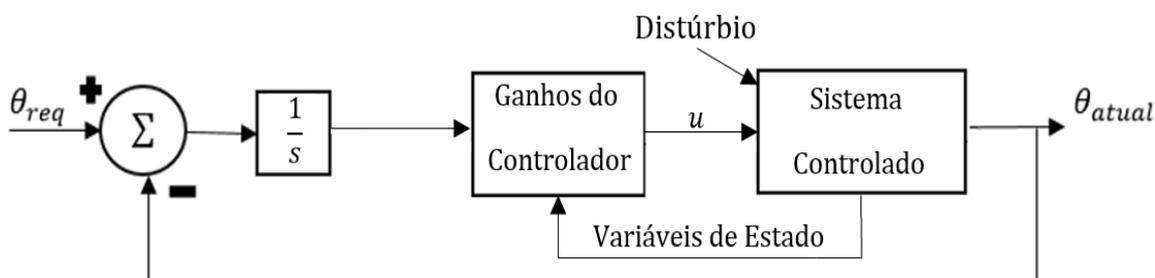


Figura 5.1 - Diagrama de blocos do controlador por realimentação de estados e integrador do erro de posição. Adaptado de Sename, 2018

Na Figura 5.1,  $\theta_{req}$  é a posição requerida,  $\theta_{atual}$  é a posição atual e  $u$  é o sinal de controle. Tilbury e Messner, 1998, utilizam essa estratégia para controlar um motor elétrico de corrente contínua. Nesse estudo, ilustra-se um exemplo no qual um torque externo ao sistema (distúrbio) aplicado sobre o rotor do atuador faz com que o sistema não permaneça na posição requerida devido ao erro causado pelo ganho estático não unitário. Esse problema é eliminado com a utilização do integrador do erro de posição. A Figura 5.2 apresenta o diagrama de blocos do controlador projetado por Tilbury e Messner, 1999.

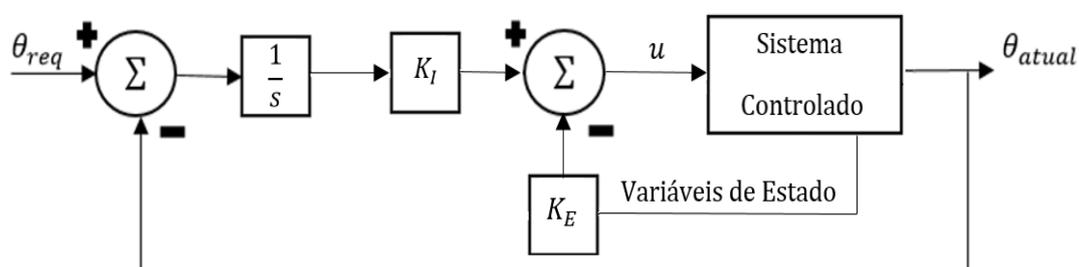


Figura 5.2 - Diagrama de blocos do controlador por realimentação de estados e integrador de um motor de corrente contínua. Adaptado de Tilbury e Messner, 1999.

Na Figura 5.2,  $K_I$  é o ganho do integrador,  $K_E$  são os ganhos das variáveis de estado. Para o projeto do controlador de Tilbury e Messner, 1998, a dinâmica elétrica do atuador é considerada no projeto do controlador e o torque eletromagnético desse atuador depende somente da corrente elétrica. Dessa forma, as variáveis de estado, para o estudo de Tilbury e Messner, 1998, são a posição angular do rotor, a velocidade angular do rotor e a corrente elétrica.

De acordo com Carrillo-Serrano et al, 2014, na maioria dos projetos de controladores para motores de passo é desconsiderada a dinâmica da parte elétrica do atuador e a corrente elétrica é o sinal de controle utilizado. Além disso, como apresentado nas equações 4.27, 4.28 e 4.29 o torque eletromagnético gerado pelos motores de passo depende da corrente elétrica e da posição angular do rotor. Dessa forma, o controlador por realimentação de estados para o motor de passo pode ser projetado desconsiderando a dinâmica elétrica do atuador e a corrente elétrica pode ser utilizada como o sinal de controle.

Outro exemplo de aplicação dessa estratégia é apresentado em Vittek et al, 2011, que realizaram um estudo do controle de posição angular do rotor de um motor síncrono de ímãs permanentes. Nesse estudo as variáveis de estado são a posição angular e a velocidade angular do rotor e o sinal de controle é a corrente elétrica, assim como o projeto do controlador deste trabalho. Entretanto no estudo de Vittek et al, 2011, é considerado um elemento flexível acoplado sobre o rotor do atuador, diferentemente da dinâmica de corpos rígidos que foi utilizada neste estudo.

Com base nisso, o controlador projetado neste capítulo é um controlador por realimentação de estados somado ao integrador do erro da posição, sendo que, devido a se desconsiderar a dinâmica do sistema elétrico do atuador, as variáveis de estado são a posição angular e a velocidade angular do rotor.

Assim, a primeira parte deste capítulo trata do projeto do controlador PV+I com ganhos fixos, que é utilizado para controlar os motores de passo nos eixos do manipulador robótico. Com base nesse desenvolvimento inicial e na variação do momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade do robô, a segunda seção deste capítulo apresenta o controlador PV+I com ganhos parametrizados, que é utilizado para controlar o motor de passo do primeiro eixo, no qual os ganhos são calculados a cada passo de processamento, com base no momento de inércia de massa momentâneo associado ao primeiro grau de liberdade do manipulador robótico.

## 5.1 Projeto do controlador com ganhos fixos

Inicia-se o projeto do controlador, partindo do modelo matemático mostrado no capítulo anterior, igualando o torque produzido pelo motor de passo ao torque mecânico acoplado a esse, apresentado na Equação (5.1):

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_f \frac{d\theta}{dt} + T_c = \varphi_M I \sqrt{2} \sin(\theta - \pi/4) - t_r \sin(4\theta) \quad (5.1)$$

Para encontrar a função de transferência em malha aberta desse sistema, a Equação (5.1) deve ser linearizada e transformada para o domínio da frequência. Como pode ser visto na Equação (5.1), os dois termos do lado direito da igualdade são não lineares, sendo

que o primeiro termo depende de duas variáveis. Dessa forma, esse termo deve ser linearizado com relação à corrente elétrica e com relação à posição do eixo do motor. Referente ao processo de linearização, as equações (5.2), (5.3) e (5.4) apresentam as derivações e os truncamentos no primeiro termo da série de Taylor de cada termo da Equação (5.1).

$$\frac{\partial T_M}{\partial I} = \varphi_M \sqrt{2} \operatorname{sen}(\theta^* - \pi/4) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial \theta} = \varphi_M I^* \sqrt{2} \cos(\theta^* - \pi/4) \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial T_r}{\partial \theta} = 4t_r \cos(4\theta^*) \quad (5.4)$$

onde  $\frac{\partial T_M}{\partial I}$  é a derivada do torque eletromagnético do atuador com relação à corrente elétrica  $I$ ;  $\frac{\partial T_M}{\partial \theta}$  é a derivada do torque eletromagnético do atuador com relação à posição  $\theta$  do eixo do motor;  $\frac{\partial T_r}{\partial \theta}$  é a derivada do torque de retenção com relação à posição  $\theta$  do eixo do motor; e o símbolo “\*” indica a variável que foi considerada constante para a derivação. A Tabela 5.1 apresenta os valores das variáveis para o processo de linearização.

Tabela 5.1 – Valores das variáveis para a linearização.

Variável	Valor
Corrente Elétrica ( $I$ )	1 A
Ângulo de rotação do motor ( $\theta$ )	$\pi/3$ rad

O valor da corrente elétrica foi determinado para que o sistema fosse linearizado em uma condição de energização do atuador e o ângulo de rotação do motor foi especificado para que os coeficientes da função de transferência em malha aberta obtivessem valores não nulos.

Baseado nos termos das equações (5.2), (5.3) e (5.4), a Equação (5.5) mostra a linearização da Equação (5.1), na qual o termo do torque proveniente da dinâmica do robô ( $T_c$ ) é suprimido da equação, pois esse independe das variáveis do sistema.

$$\begin{aligned}
 J\Delta\theta s^2 + C_f\Delta\theta s & \quad (5.5) \\
 & = \varphi_M\sqrt{2}\sin(\theta^* - \pi/4)\Delta I \\
 & + \varphi_M I^*\sqrt{2}\cos(\theta^* - \pi/4)\Delta\theta - 4t_r\cos(4\theta^*)\Delta\theta
 \end{aligned}$$

onde  $s$  é o operador de Laplace para o domínio da frequência.

Na Equação (5.5), a grandeza a ser controlada é a posição angular e o sinal de controle ou variável de atuação é a corrente elétrica. Transforma-se agora a Equação (5.5) para o domínio da frequência, resultando na Equação (5.6):

$$\begin{aligned}
 Js^2\theta(s) + C_f s\theta(s) & \quad (5.6) \\
 & = \varphi_M\sqrt{2}\sin(\theta^* - \pi/4)I(s) \\
 & + \varphi_M I^*\sqrt{2}\cos(\theta^* - \pi/4)\theta(s) - 4t_r\cos(4\theta^*)\theta(s)
 \end{aligned}$$

Divide-se todos os termos da Equação (5.6) pelo momento de inércia de massa,  $J$ , e agrupa-se os termos iguais, resultando na Equação (5.7):

$$\begin{aligned}
 & \left( \frac{\varphi_M\sqrt{2}\sin(\theta^* - \pi/4)}{J} \right) I(s) = & (5.7) \\
 & \left( s^2 + \frac{C_f}{J}s \frac{-\varphi_M I^*\sqrt{2}\cos(\theta^* - \pi/4) + 4t_r\cos(4\theta^*)}{J} \right) \theta(s)
 \end{aligned}$$

Fundamentado na Equação (5.7), consegue-se encontrar a função de transferência em malha aberta ( $\theta(s)/I(s)$ ) desse sistema, porém, para a simplificação dessa etapa, agrupa-se os termos da Equação (5.7), conforme as equações (5.8), (5.9) e (5.10):

$$A = \frac{\varphi_M \sqrt{2} \operatorname{sen}(\theta^* - \pi/4)}{J} \quad (5.8)$$

$$B = \frac{C_f}{J} \quad (5.9)$$

$$C = \frac{-\varphi_M I^* \sqrt{2} \cos(\theta^* - \pi/4) + 4t_r \cos(4\theta^*)}{J} \quad (5.10)$$

Dessa forma, a função de transferência pode ser montada, sendo apresentada na Equação (5.11):

$$\frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{A}{s^2 + Bs + C} = G(s) \quad (5.11)$$

onde  $G(s)$  é a função de transferência em malha aberta.

A Figura 5.3 apresenta o controle por realimentação de estados, sendo os estados especificados: a posição e a velocidade somados ao integrador (controlador PV+I).

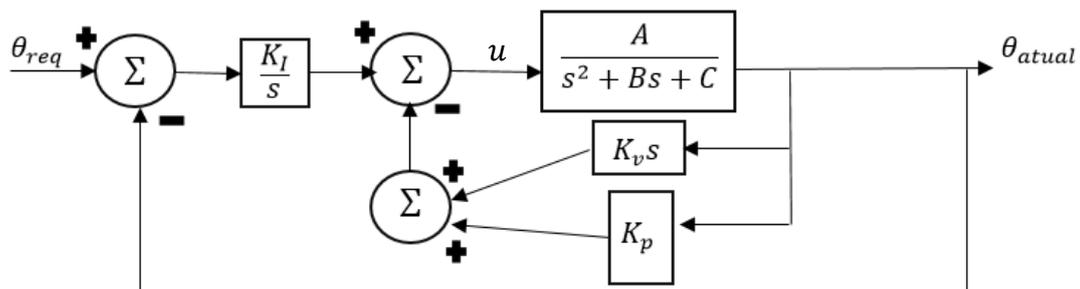


Figura 5.3 – Malha do controle PV+I com ganhos fixos.

Na Figura 5.3,  $K_v$ ,  $K_p$  e  $K_I$  são os ganhos do controle para a velocidade, a posição e para a integral do erro de posição,  $\theta_{req}$  é a posição requerida ao eixo do atuador,  $\theta_{atual}$  é a posição atual do eixo do atuador e  $u$  é o sinal de controle.

A função de transferência em malha fechada do sistema,  $\mathcal{T}(s)$ , é determinada pela Equação (5.12), na qual o sinal de controle (corrente elétrica) é o sinal de entrada e o sinal de saída é o ângulo de giro do eixo do atuador.

$$\mathcal{T}(s) = \left( \frac{K_I A}{s^3 + (K_v A + B)s^2 + (K_p A + C)s + (K_I A)} \right) \quad (5.12)$$

Definida a função de transferência em malha fechada, os ganhos do controlador PV+I podem ser encontrados pela comparação dessa função com uma equação, cujos coeficientes são calculados conforme a dinâmica desejada ao sistema a ser controlado [Ogata, 1997]. Fundamentado nessa comparação, consegue-se determinar os valores dos ganhos necessários para alcançar a dinâmica desejada em malha fechada. A Equação (5.13) mostra uma equação de terceira ordem com os coeficientes calculados de acordo com a dinâmica pretendida.

$$s^3 + \mathcal{A}_1 s^2 + \mathcal{A}_2 s + \mathcal{A}_3 = \Phi \quad (5.13)$$

onde  $\mathcal{A}_1$ ,  $\mathcal{A}_2$  e  $\mathcal{A}_3$  são os coeficientes da equação da dinâmica almejada para o sistema e  $\Phi$  é a equação da dinâmica desejada ao sistema controlado.

Por comparação entre o denominador da função de transferência em malha fechada, Equação (5.12) com a Equação (5.13), chega-se aos valores requeridos para os ganhos do controlador, representados pelas equações (5.14), (5.15) e (5.16), para o ganho de velocidade, de posição e do integrador, respectivamente.

$$K_v = \frac{\mathcal{A}_1 - B}{A} \quad (5.14)$$

$$K_p = \frac{\mathcal{A}_2 - C}{A} \quad (5.15)$$

$$K_I = \frac{\mathcal{A}_3}{A} \quad (5.16)$$

Os coeficientes da equação da dinâmica almejada para o sistema controlado são determinados pelas equações (5.17), (5.18) e (5.19).

$$\mathcal{A}_1 = -(\mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 + \mathcal{P}_3) \quad (5.17)$$

$$\mathcal{A}_2 = \mathcal{P}_1\mathcal{P}_2 + \mathcal{P}_1\mathcal{P}_3 + \mathcal{P}_2\mathcal{P}_3 \quad (5.18)$$

$$\mathcal{A}_3 = \mathcal{P}_1\mathcal{P}_2\mathcal{P}_3 \quad (5.19)$$

onde  $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2$  e  $\mathcal{P}_3$  são os polos da dinâmica desejada.

Assim, deve-se especificar os parâmetros que serão considerados para a determinação da dinâmica requerida para o sistema. Ogata, 1997, apresenta alguns parâmetros que podem ser escolhidos de acordo com a dinâmica almejada ao projeto do controlador. A Figura 5.4 apresenta alguns desses parâmetros.

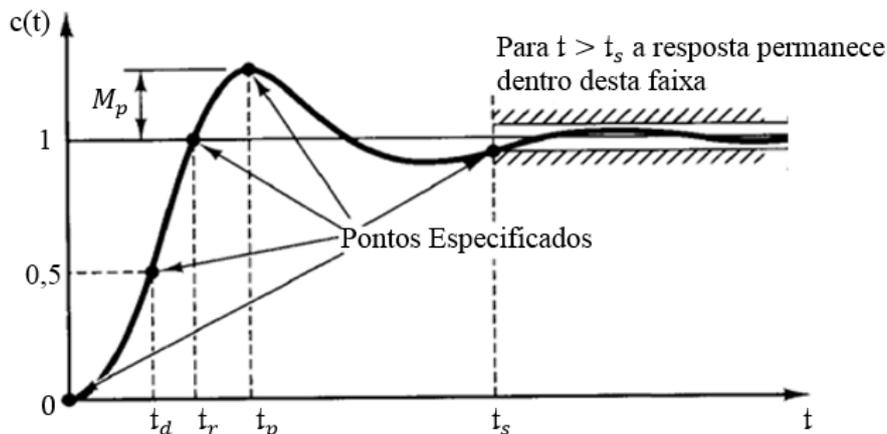


Figura 5.4 – Parâmetros possíveis de serem utilizados para encontrar a dinâmica desejada para o sistema de controle. Adaptado de Ogata, 1997.

Na Figura 5.4,  $t$  é o tempo,  $t_d$  é o tempo de atraso, correspondente a 50 % do valor de referência,  $t_r$  é o tempo de subida, necessário para alcançar a posição desejada,  $t_p$  é o tempo de pico, corresponde ao tempo necessário para alcançar a posição desejada mais o sobrepasso ( $M_p$ ), o qual é relativo a essa posição,  $c(t)$  é a posição do sistema ao longo do tempo,  $t_s$  é o tempo de assentamento, necessário para a resposta alcançar valores dentro

de uma faixa em torno do valor de referência. Essa faixa é especificada por uma porcentagem do valor absoluto, sendo utilizado os valores de 1%, 2% e 5%.

Como apresentado em Allgayer, 2011, os polos do sistema e os coeficientes da dinâmica desejada podem ser definidos pelo índice de amortecimento ( $\varepsilon$ ) e pelo tempo de assentamento ( $t_s$ ). A faixa percentual do tempo de assentamento foi definida assim como em Allgayer, 2011, em 2 %. Segundo Ogata, 1997, o valor do índice de amortecimento deve ser estabelecido entre 0,4 e 0,8, para garantir uma resposta transitória rápida e amortecida. Dessa forma, assim como Allgayer, 2011, utiliza-se um índice de amortecimento de 0,8. Além da definição desses parâmetros, para garantir que a resposta transitória seja rápida e amortecida, a dinâmica dominante deve ser de segunda ordem, dessa forma, o terceiro polo é posicionado 10 vezes o valor da projeção real dos polos imaginários.

Allgayer, 2011, define um tempo de assentamento inicial e com base em testes preliminares o valor desse parâmetro foi refinado. Seguindo essa lógica, define-se um tempo de assentamento para cada eixo com base na posição de referência que cada junta deve alcançar. A posição de referência para cada junta é apresentada no próximo capítulo. Na Tabela 5.2 são apresentados o tempo de assentamento e os momentos de inércia de massa, associados a cada um dos eixos.

Tabela 5.2 – Tempo de assentamento e momentos de inércia de massa de cada eixo.

Eixos	$t_s$ (s)	$J$ ( $\text{kgm}^2$ )
Primeiro	4,5	0,005441 <sup>6</sup>
Segundo	4,5	6,8400.10 <sup>-5</sup>
Terceiro	1,5	5,5332.10 <sup>-5</sup>
Quarto	0,6	4,1966.10 <sup>-5</sup>
Quinto	0,6	1,3130.10 <sup>-5</sup>

A Tabela 5.3 e a Tabela 5.4 apresentam os polos dos eixos do robô em malha aberta e em fechada, respectivamente.

---

<sup>6</sup> Valor médio da inércia associada ao primeiro eixo do robô

Tabela 5.3 – Polos dos eixos em malha aberta.

Eixos	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Primeiro	-19,31	10,14	0
Segundo	-751,73	20,74	0
Terceiro	-924,48	20,85	0
Quarto	$-1,2124 \cdot 10^3$	0,021	0
Quinto	$-3,8293 \cdot 10^3$	0,021	0

Tabela 5.4 – Polos dos eixos em malha fechada.

Eixos	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Primeiro	$-0,9829 + 0,7371i$	$-0,9829 - 0,7371i$	-9,8286
Segundo	$-0,9829 + 0,7371i$	$-0,9829 - 0,7371i$	-9,8286
Terceiro	$-2,9486 + 2,2114i$	$-2,9486 - 2,2114i$	-29,4857
Quarto	$-7,3714 + 5,5286i$	$-7,3714 - 5,5286i$	-73,7141
Quinto	$-7,3714 + 5,5286i$	$-7,3714 - 5,5286i$	-73,7141

Observa-se na Tabela 5.3 que o segundo polo do sistema em malha aberta apresenta valores positivos devido ao valor usado nas variáveis para a linearização do sistema. A Tabela 5.5 apresenta os valores dos ganhos do controlador PV+I para cada um dos eixos do robô.

Tabela 5.5 – Valores dos ganhos calculados.

Eixos	$K_I (A/(rad.s))$	$K_p (A/rad)$	$K_v (A.s/rad)$
Primeiro	0,5519	8,0587	0,0973
Segundo	0,0069	7,2934	-0,3360
Terceiro	0,1514	7,3546	-0,3281
Quarto	1,7939	7,6196	-0,3162
Quinto	0,5613	7,3888	-0,3336

## 5.2 Projeto do controlador com ganhos parametrizados para o primeiro eixo

Como apresentado na Seção 4.5, o momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo varia ao longo da operação do robô, principalmente, devido à movimentação da terceira junta e da quarta junta do robô. A Tabela 5.6 apresenta a variação do momento de inércia de massa no primeiro grau de liberdade do manipulador.

Tabela 5.6 – Variação do momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo.

Descrição	Inferior	Intermediária Inferior	Intermediária	Intermediária Superior	Superior
Valor ( $\text{kgm}^2$ )	0,004317	0,004879	0,005441	0,006003	0,006565

Como apresentado na Equação (5.11), os coeficientes da função de transferência em malha aberta dependem do valor do momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo de atuação. Dessa forma, de acordo com Rijo, 2013, a estratégia tradicional de realocação de polos, por meio de ganhos fixos, tem tendência à perda de desempenho. Com base nisso, os ganhos para conseguir a dinâmica desejada ao sistema controlado devem variar ao longo da operação. Utilizando-se, assim, a estratégia de ganhos parametrizados, a qual, para esse caso, baseia-se na parametrização do momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade. A parametrização do momento de inércia de massa para esse eixo é realizada com o objetivo de determinar os ganhos ideais momentâneos de acordo com o momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo do robô. A Figura 5.5 apresenta o esquema da malha de controle PV+I para o controlador com ganhos parametrizados. A Tabela 5.7 apresenta os valores dos ganhos para cada momento de inércia de massa apresentado na Tabela 5.6.

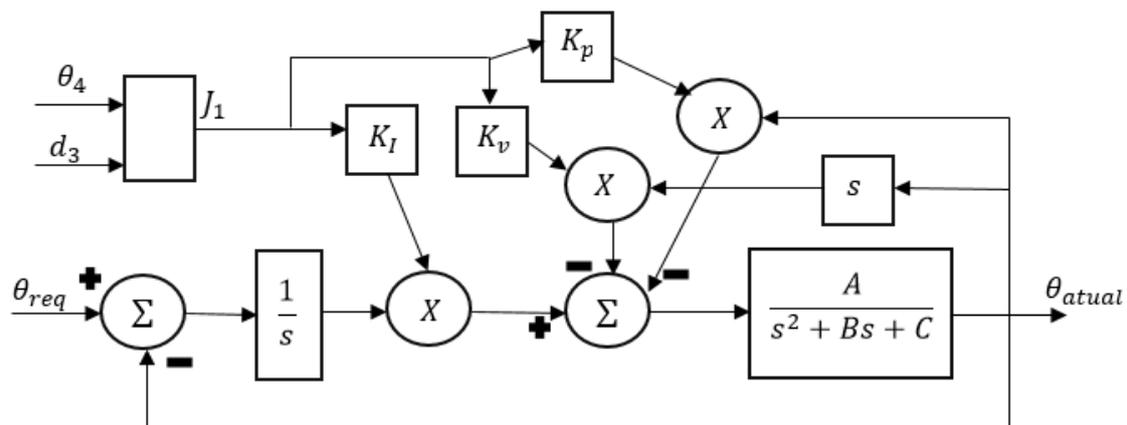


Figura 5.5 – Malha do controlador PV+I com ganhos parametrizados.

Tabela 5.7 – Variação dos ganhos de acordo com a variação do momento de inércia de massa.

Momento de inércia de massa ( $\text{kgm}^2$ )	$K_I$ ( $A/(\text{rad} \cdot \text{s})$ )	$K_p$ ( $A/\text{rad}$ )	$K_v$ ( $A \cdot \text{s}/\text{rad}$ )
0,004317	0,4374	7,8979	0,0063
0,004879	0,4944	7,9778	0,0515
0,005441	0,5513	8,0578	0,0968
0,006003	0,6083	8,1378	0,1421
0,006565	0,6652	8,2177	0,1873

Para analisar a diferença entre um controlador PV+I com ganhos fixos e um controlador PVA com a parametrização do momento de inércia de massa para o cálculo dos ganhos, a Figura 5.6 apresenta as mudanças dos polos do sistema em malha fechada com base nas cinco variações do momento de inércia de massa do primeiro eixo, apresentados na Tabela 5.6. Os ganhos do controlador PV+I com ganhos fixos, dessa figura, foram calculados com base no valor do momento de inércia de massa intermediário.

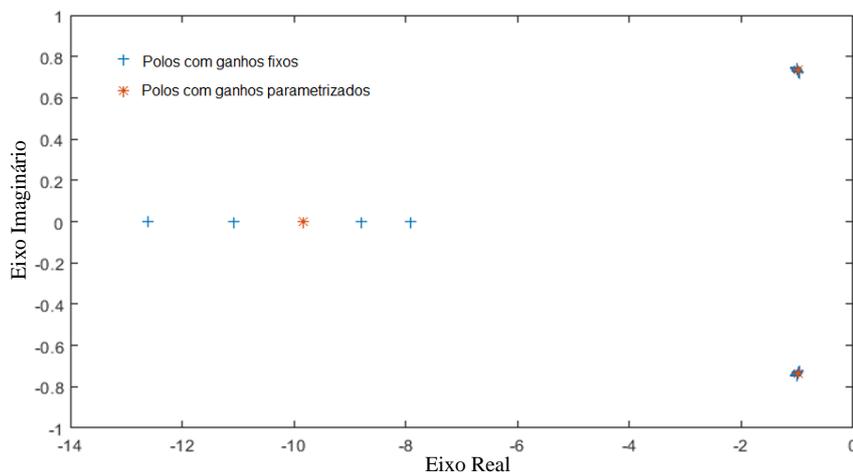


Figura 5.6 – Comparação entre os polos do sistema em malha fechada com a utilização de ganhos fixos e com a estratégia de ganhos parametrizados para o 1<sup>o</sup> eixo.

Como mostrado na Figura 5.6, os polos conjugados complexos do sistema em malha fechada, praticamente, não se alteram, em razão da variação do momento de inércia de massa dessa junta. Porém, o polo real aproxima-se da origem do eixo real, no momento que se aumenta o momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade. Isso, de acordo com Rijo, 2013, faz com que o sistema fique mais lento. Dessa forma, é justificável a aplicação dessa estratégia de controle sobre essa junta do robô, para assegurar que a dinâmica desejada ao sistema controlado seja cumprida.

## 6 SIMULAÇÕES

Neste capítulo, serão apresentadas, inicialmente, as simulações dos eixos do manipulador robótico para o controle apresentado na Seção 5.1. Serão simulados os movimentos ponto a ponto com valores de referência abrangentes a operação de cada eixo. Na sequência, serão apresentadas as variações do momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo do robô. A variação do momento de inércia de massa sobre esse eixo será avaliada na condição de nenhuma peça estar acoplada ao efetuador e também na condição de uma peça estar acoplada ao efetuador. As peças consideradas nessa análise possuem massas de 0,5 kg e 1 kg. Por fim, simulações do primeiro eixo de atuação com o controlador PV+I com parametrização do momento de inércia de massa serão comparadas com o controlador PV+I com ganhos fixos, para os casos sem transporte de peça pelo efetuador e com transporte de peça pelo efetuador.

Todas as simulações deste capítulo foram realizadas no ambiente de simulação do Matlab, o Simulink. O passo de processamento foi estabelecido com um valor mínimo de  $1.10^{-3}$ s e um valor máximo de  $1.10^{-6}$ s. O erro relativo e o erro absoluto foram ajustados como sendo  $1.10^{-14}$ .

Os parâmetros dos atuadores elétricos, exigidos para a simulação, são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros do atuador elétrico para as simulações.

Parâmetros	Valores
$\varphi_M$	0,4 Vs
$t_r$	0,26 Nm
$C_f$	0,05 $kgm^2/s$

Esses parâmetros foram retirados de Cardozo, 2012, por conta da necessidade de testes experimentais para encontrar os valores, principalmente, do fluxo eletromagnético induzido e do coeficiente de atrito viscoso. Como as etapas do projeto do manipulador robótico de atuadores elétricos, contempladas por este trabalho, não abrangeram testes experimentais, justifica-se a utilização da pesquisa de Cardozo, 2012, como referência

para esses parâmetros, pois o autor trata do projeto de um manipulador robótico atuado por motores de passo. Os atuadores elétricos utilizados por Cardozo, 2012, possuem maior capacidade de torque, quando comparados aos especificados para os eixos deste projeto. Assim, a avaliação do controle para os eixos do robô tem, principalmente, caráter qualitativo.

## 6.1 Simulação do manipulador robótico

Para realizar as simulações dos eixos do manipulador robótico, investigou-se os movimentos ponto a ponto sobre cada eixo do robô. Esses movimentos devem ser abrangentes ao espaço de trabalho requerido para cada junta. Além disso, as trajetórias realizadas, principalmente para o terceiro eixo e para o quarto eixo do robô, devem exercer, por boa parte da simulação, grande variação do carregamento sobre o primeiro eixo. A Figura 6.13 apresenta o diagrama de blocos no Simulink para a simulação do manipulador robótico, que foi baseado nas simulações desenvolvidas em Allgayer, 2011.

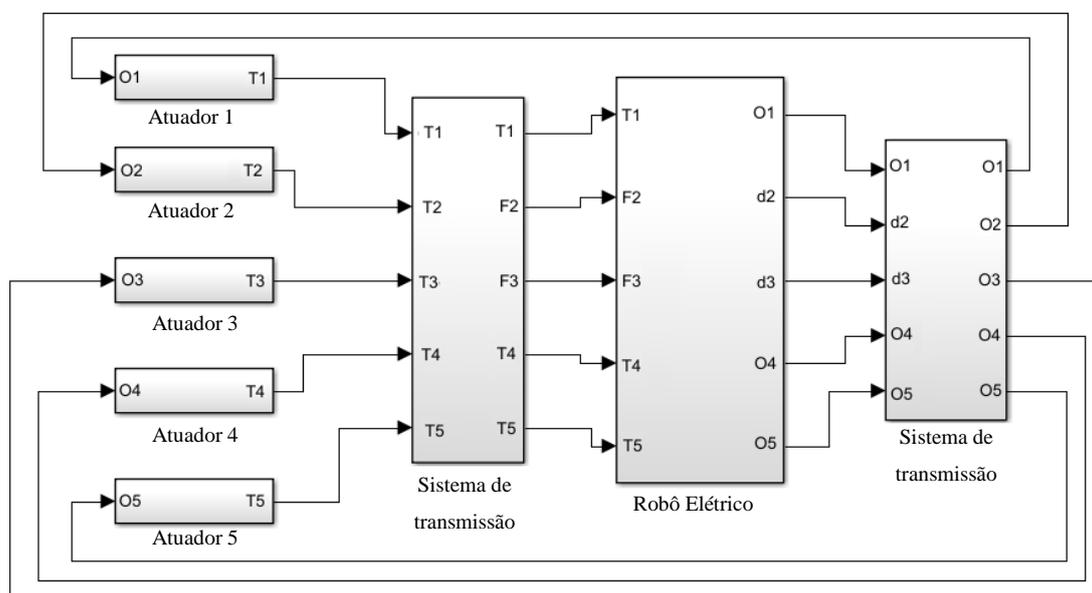


Figura 6.1 – Diagrama de blocos no Simulink para a simulação do manipulador robótico.

A Tabela 6.2 apresenta os valores dos movimentos ponto a ponto para a simulação de cada um dos eixos do manipulador robótico.

Tabela 6.2 – Valores do movimento ponto a ponto para a simulação do robô.

Juntas	Movimento de atuação
Primeira	0 a 262,6°
Segunda	0 a 0,45 (m)
Terceira	0 a 0,3 (m)
Quarta	-90° a +90°
Quinta	0 a 360°

Ao comparar a Tabela 6.2 com a Tabela 3.2, verifica-se que o espaço requerido nesta simulação é bastante abrangente para o projeto do manipulador robótico. Nesta simulação, foi utilizado o controlador PV+I com ganhos fixos, apresentado na Seção 5.1, para todos os eixos. No caso do primeiro eixo, o momento de inércia de massa foi considerado fixo e com o valor intermediário, como apresentado na Tabela 5.6. Os ganhos da primeira junta também foram calculados com base no momento de inércia de massa intermediário.

A Figura 6.2 apresenta a trajetória percorrida pelo efetuador, de acordo com o espaço requerido para a movimentação de cada junta, apresentado na Tabela 6.2. As figuras 6.3 a 6.7 apresentam essa movimentação para cada junta do robô, sendo que o tempo de simulação foi de 10 segundos.

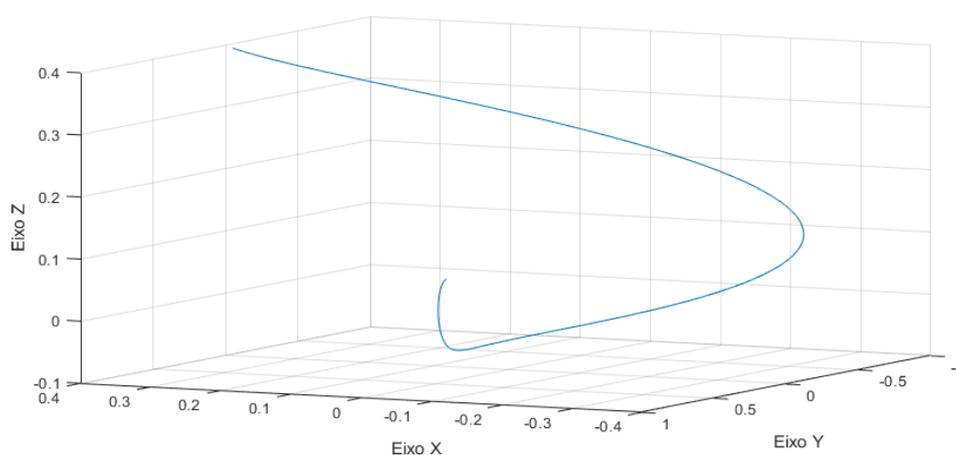


Figura 6.2 – Trajetória percorrida pelo efetuador.

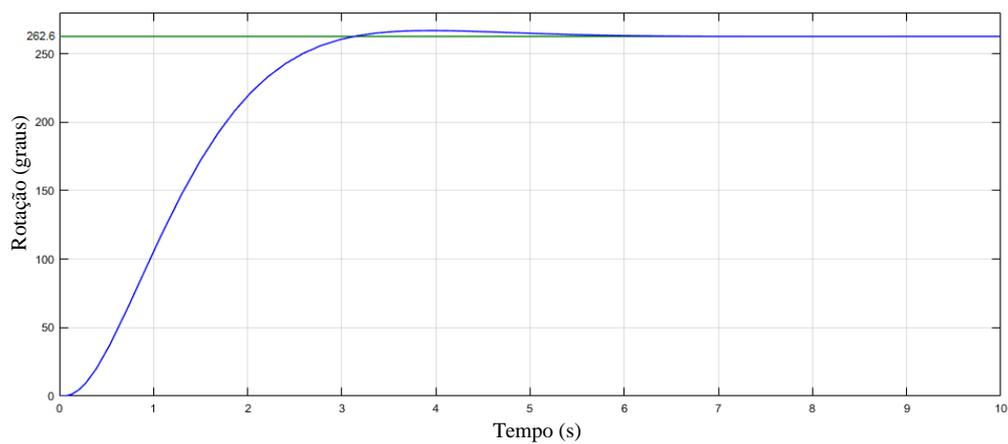


Figura 6.3 - Movimentação do primeiro eixo para a simulação ponto a ponto.

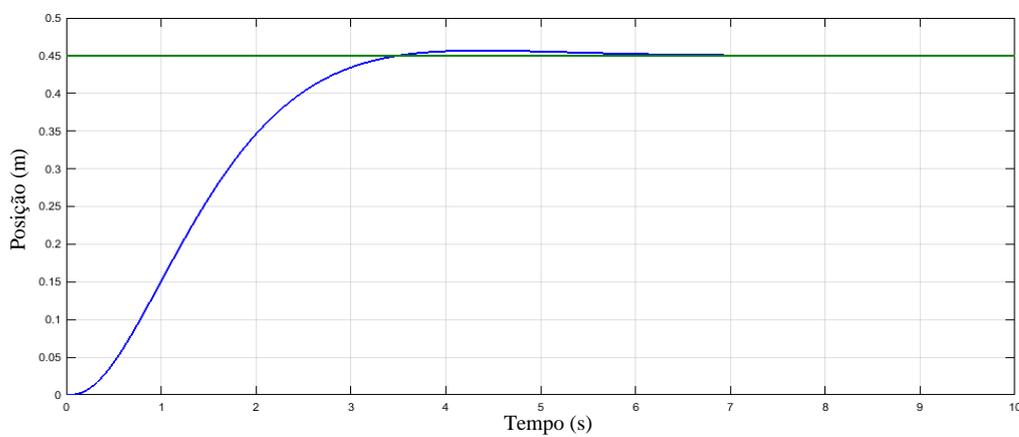


Figura 6.4 - Movimentação do segundo eixo para a simulação ponto a ponto.

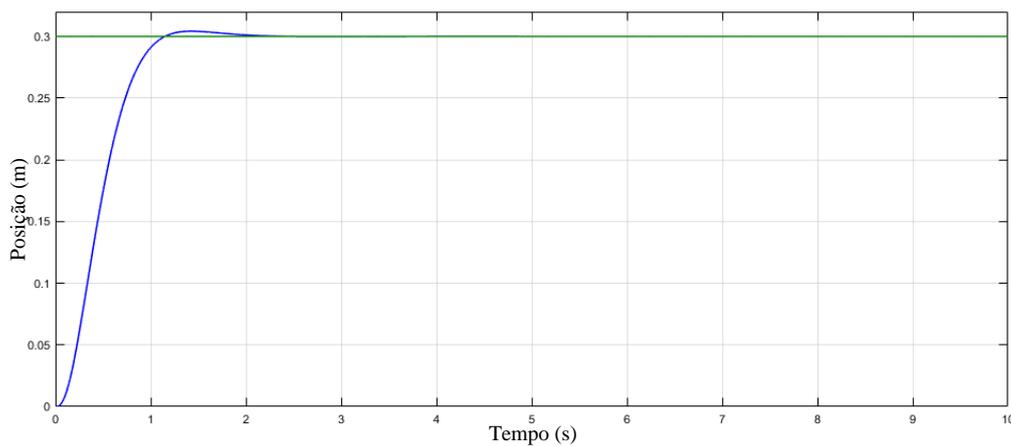


Figura 6.5 - Movimentação do terceiro eixo para a simulação ponto a ponto.

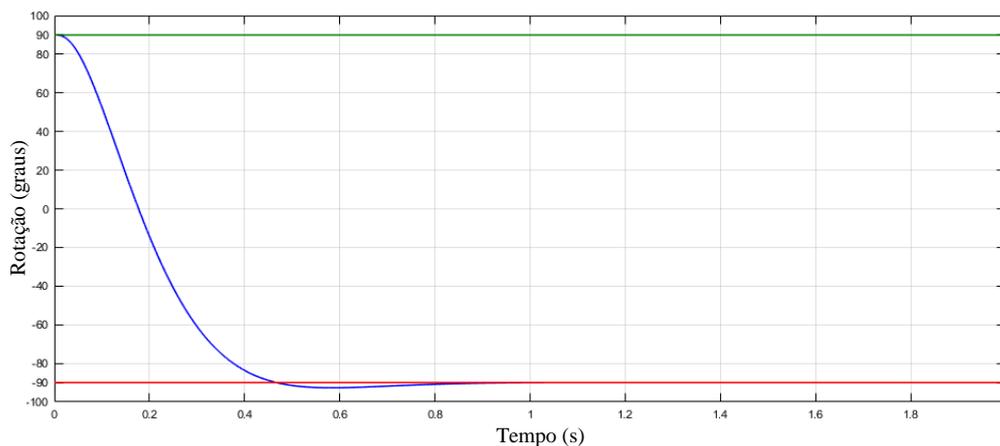


Figura 6.6 - Movimentação do quarto eixo para a simulação ponto a ponto.

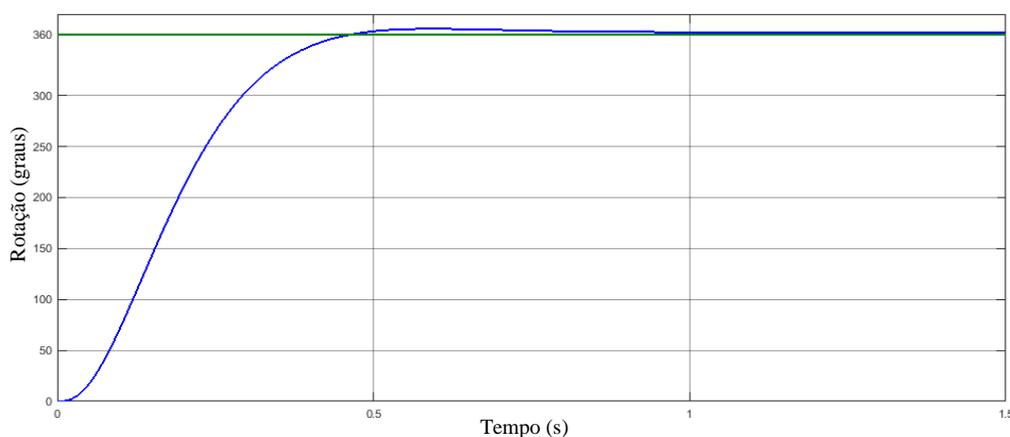


Figura 6.7 - Movimentação do quinto eixo para a simulação ponto a ponto.

Analisando as figuras 6.3 a 6.7, percebe-se que o tempo de assentamento proposto para o projeto do controle foi cumprido em todas as juntas, podendo ser comparado com os tempos apresentados na Tabela 5.2. Além disso, o erro de posicionamento é praticamente nulo após 7 segundos de simulação, tendo em todos os eixos um pequeno sobrepasso referente ao posicionamento requerido.

## 6.2 Simulações do primeiro grau de liberdade

Inicialmente, será desenvolvida uma análise relativa à variação do momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade, conforme as movimentações do 3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> eixos, apresentadas na Seção 6.1. Por fim, será analisado o controle do primeiro grau de liberdade, comparando os resultados desenvolvidos para o controlador

PV+I com ganhos fixos com os resultados do controlador PV+I pela estratégia de parametrização.

### 6.2.1 Análise da variação do momento de inércia de massa sobre o primeiro eixo

Analisa-se, inicialmente, a variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo para as movimentações do terceiro grau e do quarto grau de liberdade do robô, conforme a movimentação desses eixos apresentada nas figuras 6.5 e 6.6. As análises apresentadas são baseadas no modelo matemático da variação do momento de inércia de massa, mostrado no Capítulo 4. A Figura 6.8 mostra o resultado da variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo no caso de nenhuma peça ser acoplada ao efetuador.

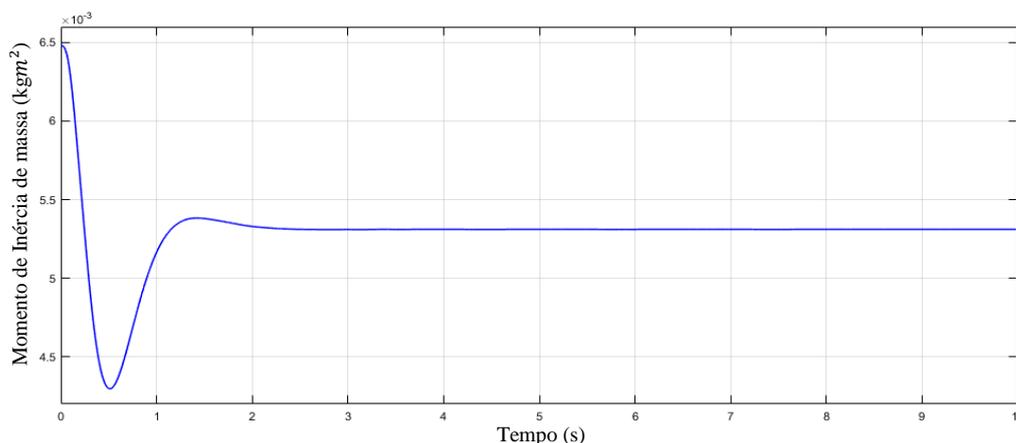


Figura 6.8 - Variação do momento de inércia de massa do 1<sup>o</sup> eixo sem peça acoplada ao efetuador.

Conforme apresentado pela Figura 6.8, a movimentação exigida para o terceiro eixo e para o quarto eixo faz com que o momento de inércia de massa, associado ao primeiro eixo, varie do seu valor máximo para o seu valor mínimo, conforme pode ser verificado com os valores da Tabela 5.6.

Além desta análise, realizou-se a avaliação da variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo, quando o robô está manipulando uma peça no efetuador. Como apresentado no Capítulo 4, os parâmetros de massa e de momento de inércia de massa associados ao efetuador alteram o momento de inércia de massa referente à movimentação da 4<sup>a</sup> junta que, por sua vez, altera o momento de inércia de massa do

primeiro eixo. Como mostrado no Capítulo 3, a máxima massa das peças que devem ser manipuladas pelo robô é de 1 kg. Dessa forma, para o conjunto apresentado na Figura 4.8, somado a uma peça de 1 kg associada ao efetuador, a Tabela 6.3 exibe os parâmetros de massa, centro de massa e momento de inércia de massa desse conjunto.

Tabela 6.3 – Parâmetros da 4ª junta referentes a uma peça de 1 kg no efetuador.

Parâmetros	Valores
Massa (kg)	1,311
Centro de massa em relação ao eixo x, y z do sistema de coordenada 1 (mm)	4,23 / 359,84 / 274,47
Centro de massa em relação ao eixo x, y z do sistema de coordenada 2 (mm)	48,85/0,00/3,23
Momento de inércia de massa em relação ao eixo z ( $J_{g4}$ ) do sistema de coordenada 1 obtido no centro de massa ( $\text{gmm}^2$ )	1.665.256,39
Momento de inércia de massa no centro de massa ( $J_{XG}/J_{YG}/J_{ZG}$ ) alinhado com o sistema de coordenada 1 ( $\text{gmm}^2$ )	1.665.686,71/ 1.265.637,76/ 799.575,64
Produto de inércia no centro de massa ( $J_{XGY}$ ) alinhado com o sistema de coordenada 1 ( $\text{gmm}^2$ )	45.563,21

Baseado nos valores da Tabela 6.3, a variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo foi avaliada. A movimentação do terceiro e do quarto eixos para esta avaliação foi a mesma usada nas figuras 6.4 e 6.5. A Figura 6.9 mostra o resultado da variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo para esta análise.

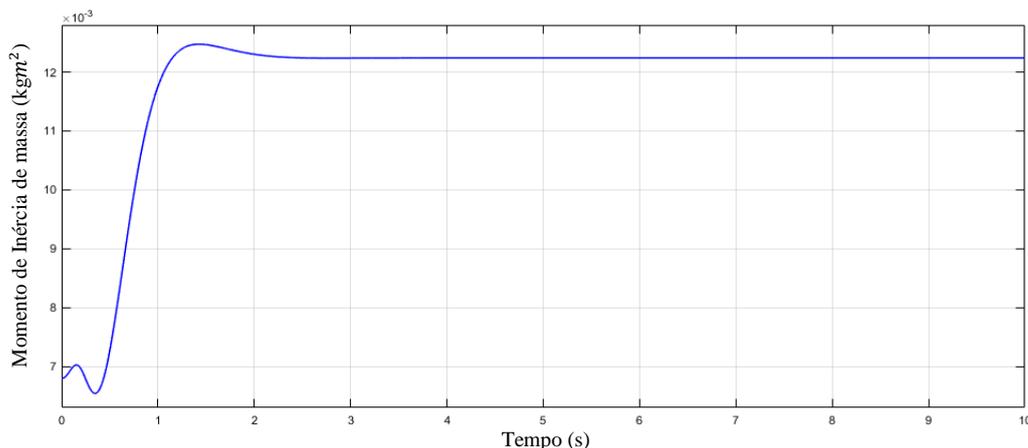


Figura 6.9 - Variação do momento de inércia de massa do 1º eixo com peça de 1 kg acoplada ao efetuador.

Para esta análise, o valor máximo do momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo é de  $0,01247 \text{ kgm}^2$ , enquanto que o valor mínimo é de  $0,006116 \text{ kgm}^2$ . Dessa forma, percebe-se um aumento de 89,95 %, relativo ao valor máximo de momento de inércia de massa desta análise, quando comparado ao valor máximo de momento de inércia de massa calculado no momento em que não há nenhuma peça sendo manipulada pelo robô. Assim, justifica-se uma análise da movimentação do primeiro eixo do robô, quando o efetuador realiza a manipulação de uma peça.

Por fim, avalia-se a variação do momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo quando uma peça de 0,5 kg é associada ao efetuador. Assim, para o conjunto apresentado na Figura 4.8, somado a uma peça de 0,5 kg associada ao efetuador, a Tabela 6.4 exhibe os parâmetros de massa, centro de massa e momento de inércia de massa desse conjunto.

Tabela 6.4 – Parâmetros inercias da 4ª junta referentes a uma peça de 0,5 kg associada ao efetuador.

Parâmetros	Valores
Massa (kg)	0,811
Centro de massa em relação ao eixo x, y e z do sistema de coordenada 1 (mm)	6,79 / 359,84 / 274,47
Centro de massa em relação ao eixo x, y e z do sistema de coordenada 2 (mm)	43,08/0,00/1,81

Tabela 6.4 – Parâmetros inercias da 4<sup>a</sup> junta referentes a uma peça de 0,5 kg associada ao efetuador.

Parâmetros	Valores
Momento de inércia de massa em relação ao eixo z ( $J_{g4}$ ) do sistema de coordenada 1 obtido no centro de massa ( $\text{gmm}^2$ )	1.187.139,82
Momento de inércia de massa no centro de massa ( $J_{XG}/J_{YG}/J_{ZG}$ ) alinhado com o sistema de coordenada 1 ( $\text{gmm}^2$ )	1.523.456,85/ 1.083.727,92/ 636.553,24
Produto de inércia no centro de massa ( $J_{XYG}$ ) alinhado com o sistema de coordenada 1 ( $\text{gmm}^2$ )	37.081,29

(continuação)

Baseado nos valores da Tabela 6.4, a variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo foi avaliada. A movimentação do terceiro eixo e do quarto eixo para esta avaliação foi a mesma usada nas figuras 6.4 e 6.5. A Figura 6.10 mostra o resultado da variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo para esta análise.

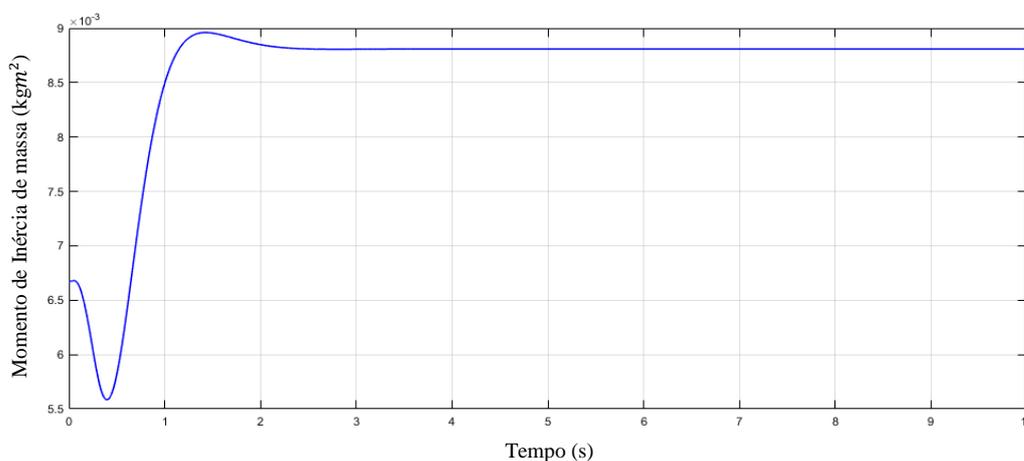


Figura 6.10 - Variação do momento de inércia de massa do primeiro eixo com peça de 0,5 kg acoplada ao efetuador.

### 6.2.2 Simulações do primeiro grau de liberdade sem peça associada ao efetuador

Para avaliar a diferença existente entre o controlador PV+I parametrizado e o controlador PV+I com ganhos fixos sobre o controle do primeiro grau de liberdade do

manipulador robótico, realizou-se a análise desses controladores ante a movimentação ponto a ponto com o valor de referência de 110 radianos. Como apresentado anteriormente, a movimentação do terceiro e do quarto graus de liberdade, para esta simulação, demanda uma grande variação do momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo. Assim, para avaliar um dos piores casos para o controlador PV+I com ganhos fixos, os mesmos foram calculados com base no mínimo momento de inércia de massa associado ao primeiro eixo. A simulação, para esses controladores e para o valor de referência citado anteriormente, é apresentada na Figura 6.11. A Tabela 6.5 apresenta os valores das variáveis operacionais dessa simulação.

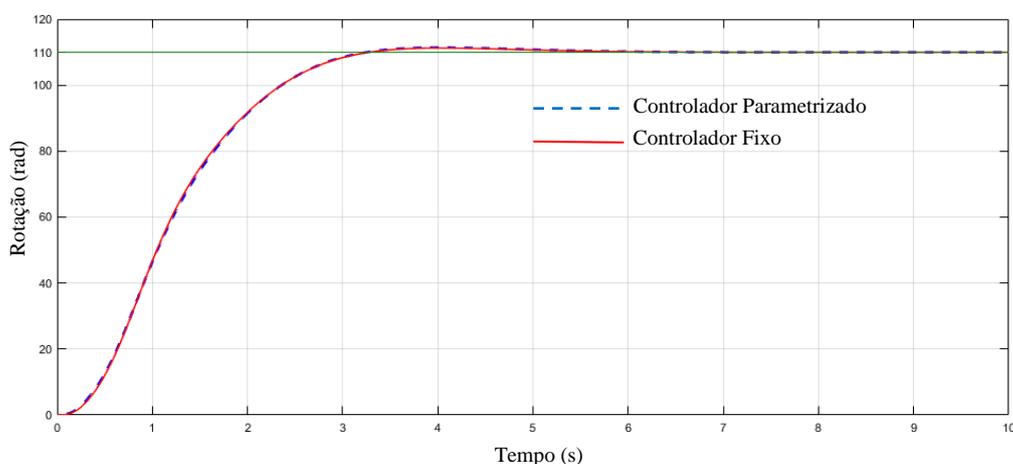


Figura 6.11 – Comparação da movimentação do 1º eixo para os dois controladores sem peça no efetuador.

Tabela 6.5 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.11.

Controlador/ Variáveis	Tempo de pico (s)	Tempo de subida (s)	Erro de posicionamento no $t_s$ (rad)	Sobrepasso percentual (%)	Velocidade Máxima (rad/s)
Controlador com ganhos fixos	4,019	3,283	1,066	1,091	75,11
Controlador com ganhos parametrizados	4,025	3,255	1,195	1,273	73,65

As variações dos ganhos do controlador PV+I com parametrização do momento de inércia de massa do primeiro eixo são apresentadas nas figuras 6.12, 6.13 e 6.14.

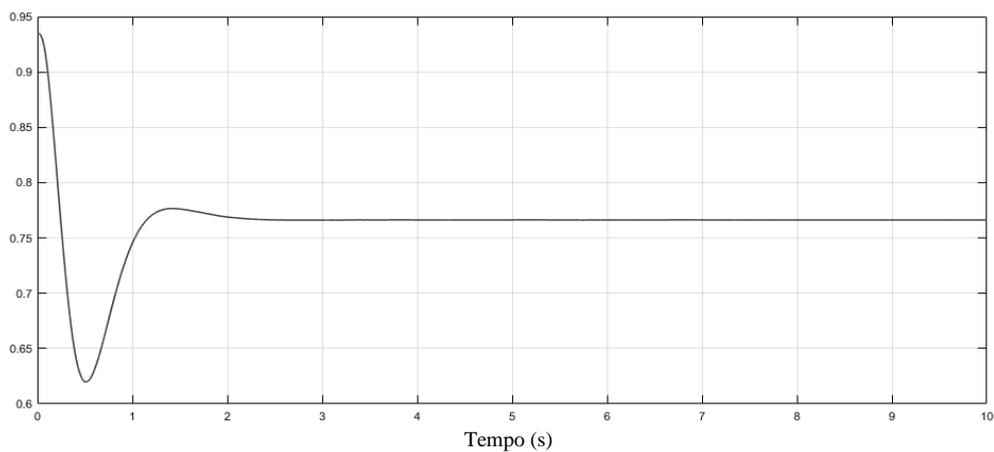


Figura 6.12 – Variação do ganho  $K_I$  do controlador PV+I por ganhos parametrizados.

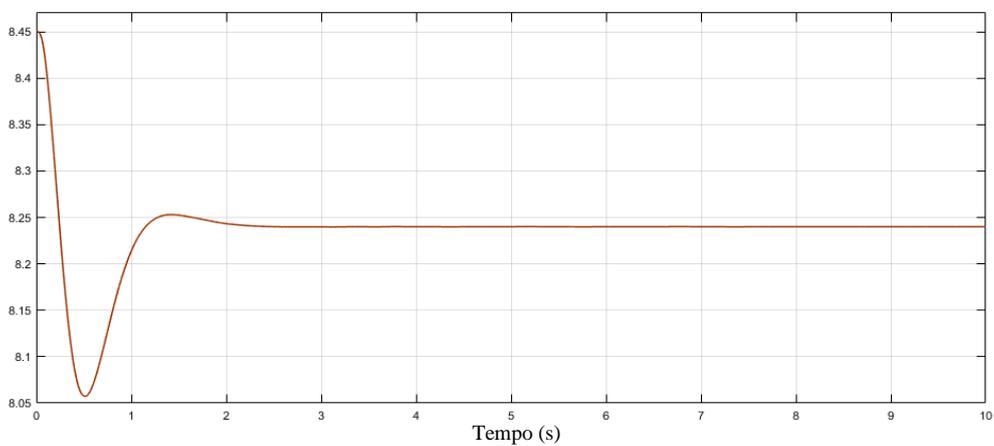


Figura 6.13 – Variação do ganho  $K_p$  do controlador PV+I por ganhos parametrizados.

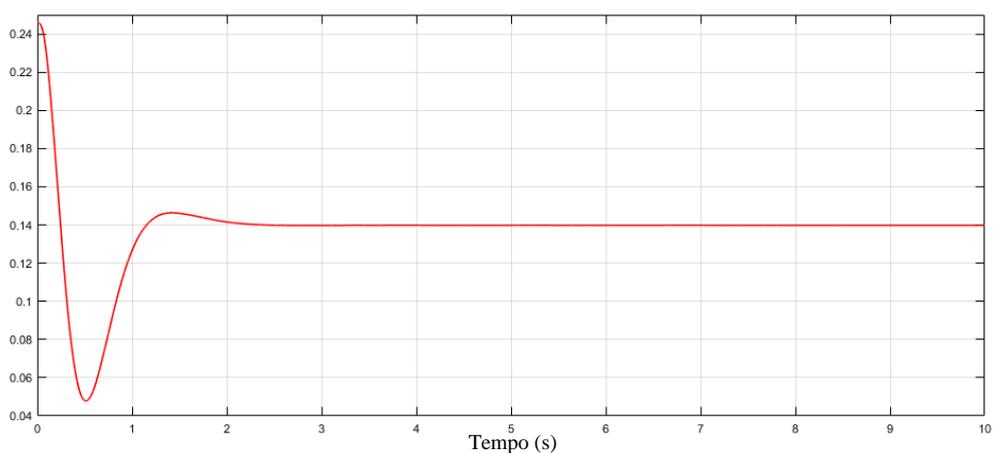


Figura 6.14 – Variação do ganho  $K_v$  do controlador PV+I por ganhos parametrizados.

Analisando a Figuras 6.11 e a Tabela 6.5, verifica-se que há uma pequena diferença nas trajetórias do primeiro grau de liberdade, para os dois controladores

simulados. Constatase que a trajetória executada pelo controlador PV+I com ganhos fixos é levemente mais rápida quando comparada com a trajetória executada pelo controlador com a estratégia de parametrização. Esse fato é comprovado pelo aumento da velocidade de operação com o controlador PV+I com ganhos fixos, o qual teve um aumento na velocidade máxima de operação relativa à velocidade máxima alcançada com o controlador PV+I com ganhos parametrizados. Isto ocorre porque quando se utiliza ganhos fixos no controle desse grau de liberdade, os quais foram calculados com base em momentos de inércias de massa menores do que o que realmente está associado a primeira junta, faz com que o polo real tenda a se aproximar cada vez mais do eixo real, o que torna mais rápido o controle da atuação desse eixo. O afastamento do polo real frente ao eixo real foi ilustrado na Figura 5.6.

Diferentemente desses resultados, Rijo, 2013, constatou diferenças significativas para o controlador PVA com ganhos parametrizados, quando comparado com o controlador PVA com ganhos fixos, para o controle do primeiro grau de liberdade do robô pneumático. Rijo, 2013, apresenta resultados mais favoráveis para as simulações com o controlador PVA com parametrização do momento de inércia de massa, quando comparado ao controlador PVA com ganhos fixos. Uma das razões para que os resultados das simulações fossem mais favoráveis ao controlador com estratégia de parametrização, para o robô pneumático, tem relação com a maior variação do momento de inércia de massa associado a esse eixo, quando comparado ao projeto do robô com atuadores elétricos. No estudo de Rijo, 2013, verifica-se mais do que o dobro da variação do momento de inércia de massa (108,62%) entre o mínimo e o máximo momento de inércia de massa associado a essa junta; enquanto que, para o robô de atuadores elétricos, essa variação é de 50,45%.

A menor variação do momento de inércia de massa do robô de atuadores elétricos pode ser entendida analisando o braço do robô, como apresentado na Figura 3.2. O motor do terceiro eixo de atuação montado sobre a torre do robô diminui o peso do braço do robô e também possibilita que os dois outros motores, do quarto e do quinto eixos de atuação, fossem montados, cada um deles, em cada uma das extremidades do braço. Essa configuração é benéfica por manter equilibrada a distribuição do peso do braço do robô sobre a torre do robô, em qualquer posição de atuação do terceiro eixo, a qual (distribuição do peso) ocasiona uma pequena variação do momento de inércia de massa sobre o primeiro eixo do robô.

Cabe citar, que além da menor variação da inércia sobre o primeiro eixo para o robô elétrico quando comparado ao robô pneumático, as simulações deste estudo foram realizadas considerando o atuador linearizado e com a dinâmica elétrica desprezível, o que diminui a sensibilidade a variação dos parâmetros.

### 6.2.3 Simulações do primeiro grau de liberdade com peça associada ao efetuador

Como apresentado na seção anterior, o primeiro eixo do robô elétrico possui uma variação menor do momento de inércia de massa quando comparado com o primeiro eixo do robô de atuadores pneumáticos. Isso resulta no fato de que o controlador PV+I com ganhos fixos, para o robô elétrico, obtém bons resultados no controle do primeiro eixo, mesmo quando se utiliza, como base para calcular os ganhos do controlador, o mínimo momento de inércia de massa associado a esse eixo. Porém, como apresentado na Seção 6.2.1, o momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de liberdade do robô sofre uma mudança significativa, quando é associada uma peça ao efetuador do robô. Em razão das menores massas e dos momentos de inércia de massa dos eixos de atuação do robô elétrico, quando comparadas com as massas e aos momentos de inércia de massa dos eixos do robô pneumático, justifica-se a realização desta análise neste trabalho.

Para analisar esse efeito, simulou-se um controlador PV+I com ganhos fixos calculados com base no momento de inércia de massa inferior, associado ao primeiro grau de liberdade do robô, sendo que para essa análise a peça associada ao efetuador possui uma massa de 1 kg. A Figura 6.15 apresentam os resultados das simulações do movimento ponto a ponto para o controlador PV+I com ganhos fixos e para o controlador PV+I com parametrização. Nessa simulação se utilizou o mesmo valor de referência utilizado para as demais simulações realizadas para o primeiro eixo do robô (110 radianos). A Tabela 6.6 apresenta os valores das variáveis operacionais dessa simulação.

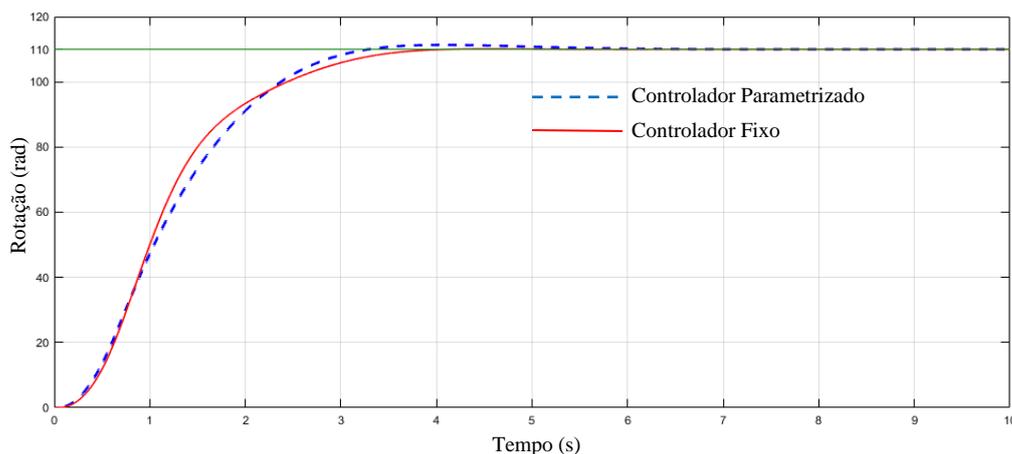


Figura 6.15 – Comparação da movimentação do 1º eixo para os dois controladores com peça de 1 kg no efetuador.

Tabela 6.6 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.15.

Controlador/ Variáveis	Tempo de pico (s)	Tempo de subida (s)	Erro de posicionamento no $t_s$ (rad)	Sobrepasso percentual (%)	Velocidade Máxima (rad/s)
Controlador com ganhos fixos	4,455	3,958	0,190	0,173	81,84
Controlador com ganhos parametrizados	4,044	3,292	1,168	1,182	70,26

Analisando a Figuras 6.15 e a Tabela 6.6, verifica-se que o movimento executado pelo motor de passo quando controlado pelo controlador PV+I com ganhos fixos possui mudanças de trajetória mais bruscas do que o movimento realizado pelo controlador PV+I com ganhos parametrizados. Além disso, constata-se que a trajetória executada pelo controlador PV+I com ganhos fixos é mais rápida quando comparada com o controlador com a estratégia de parametrização. Esse fato é comprovado pelo aumento da velocidade de operação com o controlador PV+I com ganhos fixos, o qual teve um aumento de 20% na sua velocidade máxima de operação relativa à velocidade máxima alcançada com o controlador PV+I com ganhos parametrizados. Também se comprova que a trajetória executada pelo controlador PV+I com ganhos fixos é mais rápida verificando que o tempo de estabilização na posição requerida diminui com a utilização desse controlador. Para o controlador PV+I com ganhos fixos o tempo de estabilização é de aproximadamente 4,3 s, enquanto que para o controlador PV+I com ganhos parametrizados é de aproximadamente 5,9 s. Isso ocorre porque quando se utiliza ganhos fixos no controle desse grau de

liberdade, ganhos calculados com base em momentos de inércia de massa menores fazem com que o polo real tenda a se aproximar cada vez mais do eixo real, o que torna mais rápido o controle da atuação desse eixo. A Figura 6.16 apresenta a variação das posições dos polos em malha fechada para essa simulação, na qual as setas indicam a movimentação dos polos para o controlador com ganhos fixos.

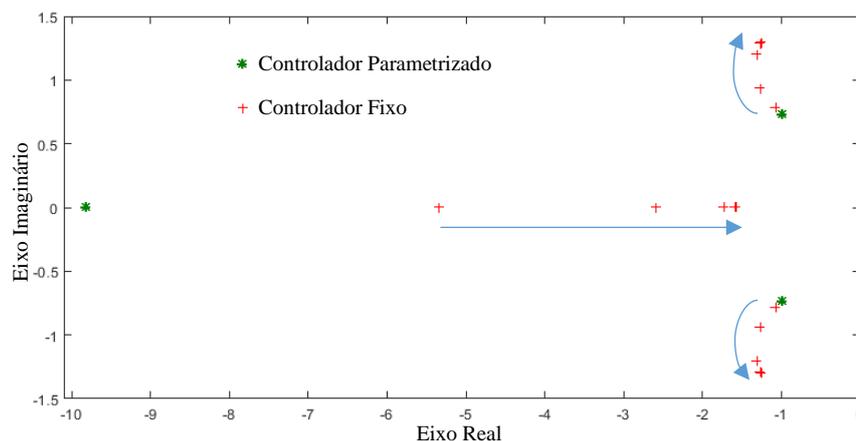


Figura 6.16 – Posicionamento e movimentação dos polos para a simulação da Figura 6.15.

As figuras 6.17, 6.18 e 6.19 apresentam os ganhos do controlador PV+I com parametrização do momento de inércia de massa para essa simulação.

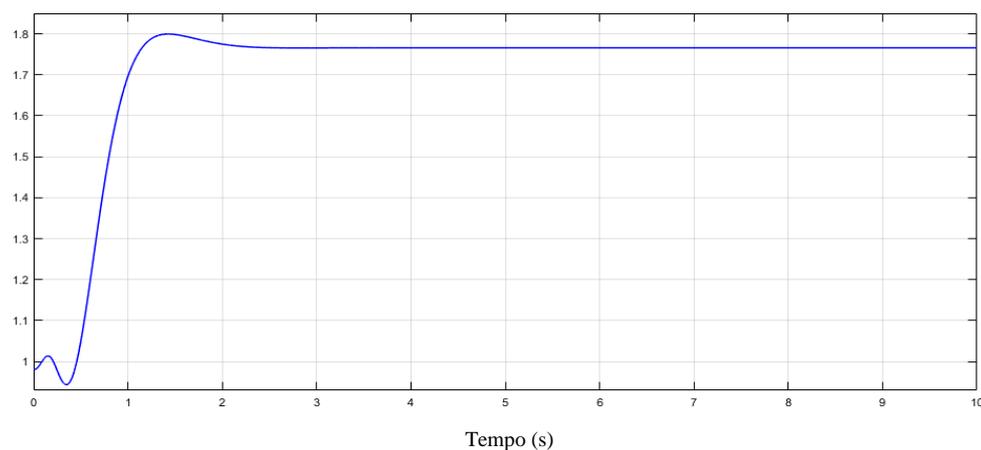


Figura 6.17 – Variação do ganho  $K_I$  do Controlador PV+I com ganhos parametrizados.

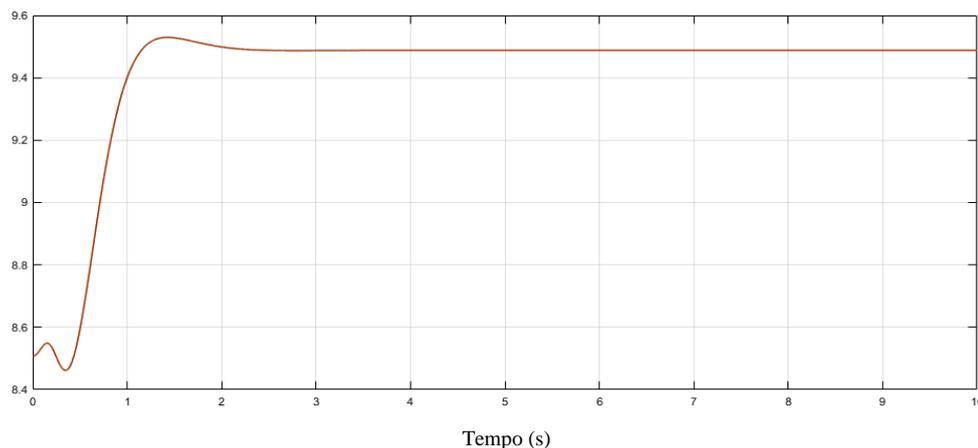


Figura 6.18 – Variação do ganho  $K_p$  do Controlador PV+I com ganhos parametrizados.

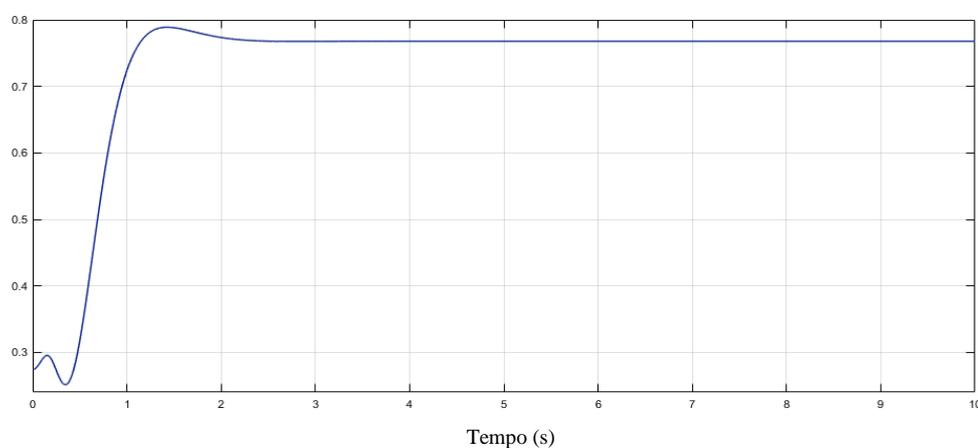


Figura 6.19 – Variação do ganho  $K_v$  do Controlador PV+I com ganhos parametrizados.

Nas simulações anteriores foi trabalhada com a hipótese ideal para o controlador parametrizado, na qual tanto a carga quanto as trajetórias do terceiro e do quarto eixo eram conhecidas. Porém, o projeto mecânico do robô não especificou nenhum sensor de carga no efetuador e também não é prático que a cada manipulação de peça seja especificada para o controlador o peso dessa peça. Assim, é interessante que o controlador PV+I parametrizado seja calculado com base em uma massa fixa associada ao efetuador, sendo escolhida uma massa de 0,5 kg. Duas simulações serão realizadas. A primeira com uma peça de 1 kg associada ao efetuador e a segunda sem peça acoplada ao efetuador. Os resultados do controlador PV+I parametrizado são comparados com o controlador PV+I com ganhos fixos calculados com base no momento de inércia de massa médio quando há uma peça de massa de 0,5 kg acoplada ao efetuador. O momento de inércia de massa médio é de  $0,0072125 \text{ kgm}^2$ .

A Figura 6.20 apresenta os resultados das simulações do movimento ponto a ponto do primeiro eixo para o controlador PV+I com ganhos parametrizados e para o controlador PV+I com ganhos fixos. Nessa simulação uma peça de 1 kg foi acoplada ao efetuator. A Tabela 6.7 apresenta os valores das variáveis operacionais nessa simulação.

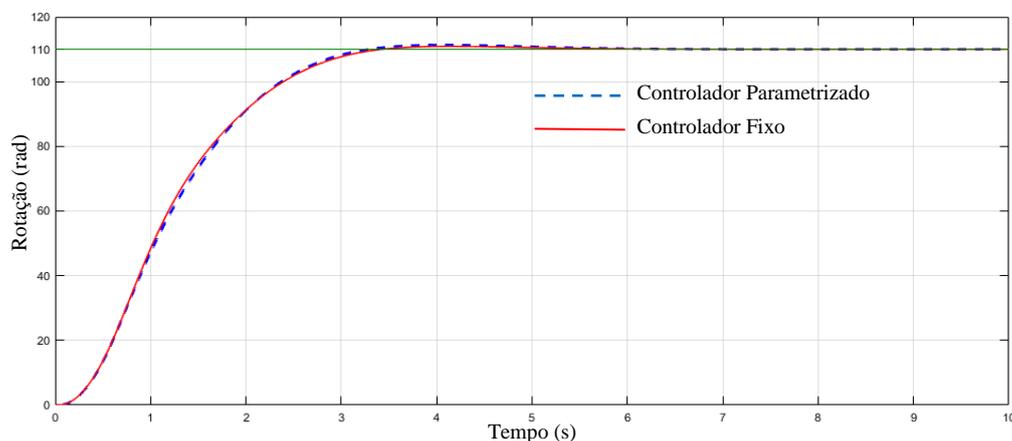


Figura 6.20 – Comparação da movimentação do 1<sup>o</sup> eixo para os dois controladores com peça de 1 kg no efetuator.

Tabela 6.7 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.20.

Controlador/ Variáveis	Tempo de pico (s)	Tempo de subida (s)	Erro de posicionamento no $t_s$ (rad)	Sobrepasso percentual (%)	Velocidade Máxima (rad/s)
Controlador com ganhos fixos	4,134	3,435	0,782	0,818	73,45
Controlador com ganhos parametrizados	4,105	3,371	1,100	0,854	74,23

Analisando a Figura 6.20 e a Tabela 6.7, percebe-se que não há grande diferença na trajetória feita pelo primeiro eixo para os dois controladores simulados, obtendo para os dois casos praticamente o mesmo tempo de estabilização na posição requerida. A diferença percebida durante a simulação foi uma velocidade levemente inferior para o controlador PV+I com ganhos fixos, o que caracteriza que o polo real foi deslocado levemente mais à esquerda quando comparado ao polo real obtido com a estratégia de parametrização. Isso acontece no início da movimentação devido aos ganhos do controlador parametrizado serem calculados com base em um momento de inércia de massa inferior ao que foi utilizado para calcular os ganhos do controlador com ganhos

fixos. Após esse período inicial, esse fato se inverte e pode ser visto pelas variações dos polos dos sistemas em malha fechada, apresentadas na Figura 6.21. As setas indicam a movimentação dos polos durante a simulação.

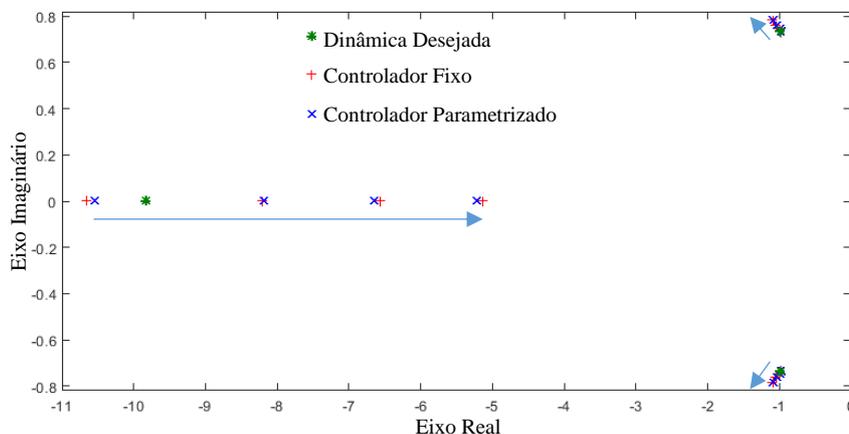


Figura 6.21 – Posicionamento e movimentação dos polos para a simulação da Figura 6.20.

A Figura 6.22 apresenta os resultados das simulações do movimento ponto a ponto do primeiro eixo para o controlador PV+I com ganhos parametrizados e para o controlador PV+I com ganhos fixos. Nessa simulação nenhuma peça foi acoplada ao efetuator.

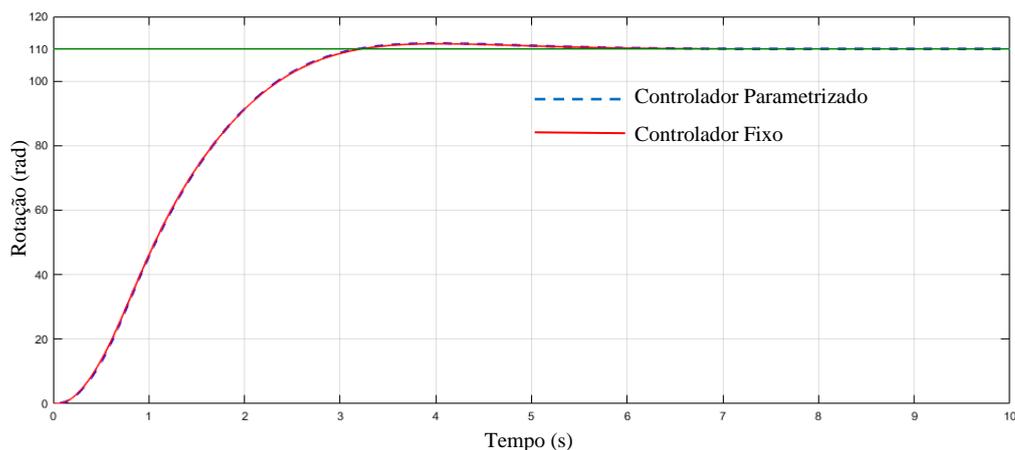


Figura 6.22 – Comparação da movimentação do 1º eixo para os dois controladores sem peça no efetuator.

Analisando a Figura 6.22, não se percebe diferença significativa na trajetória feita pelo primeiro eixo para os dois controladores simulados. Nessa simulação, o controlador com ganhos parametrizados obteve uma velocidade máxima de operação levemente maior do que controlador com ganhos fixos, o que também ocasiona um tempo maior para a estabilização na posição requerida e um sobrepasso percentual maior. A Tabela 6.8 apresenta os valores das variáveis operacionais dessa simulação.

Tabela 6.8 – Valores das variáveis operacionais da simulação da Figura 6.22.

Controlador/ Variáveis	Tempo de pico (s)	Tempo de subida (s)	Erro de posicionamento no $t_s$ (rad)	Sobrepasso percentual (%)	Velocidade Máxima (rad/s)
Controlador com ganhos fixos	4,018	3,227	1,350	1,454	69,1
Controlador com ganhos parametrizados	4,002	3,200	1,427	1,545	69,84

As variações dos polos dos sistemas em malha fechada são apresentadas na Figura 6.23 comparando com os polos da dinâmica desejada.

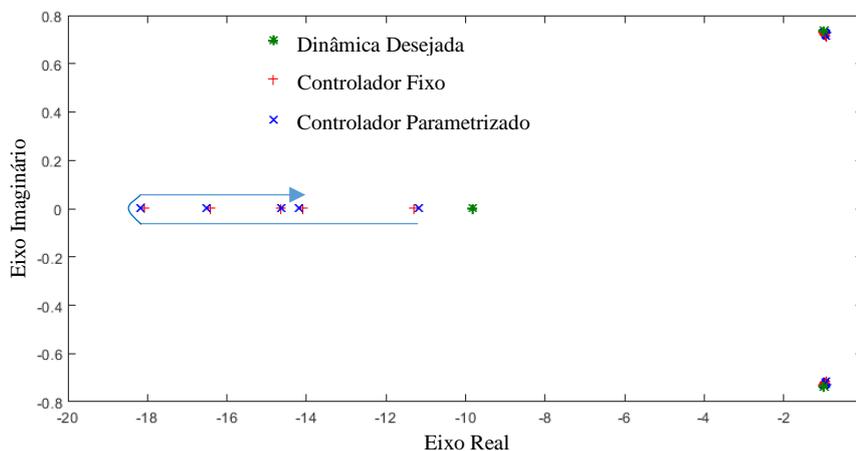


Figura 6.23 – Posicionamento e movimentação dos polos para a simulação da Figura 6.22.

Dessa forma, percebe-se que a vantagem observada anteriormente para o controlador PV+I com ganhos parametrizados não é garantida no caso de não definir para o controlador o valor da massa a ser transportada pelo robô. Assim, conclui-se que o

controlador PV+I com ganhos parametrizados somente será efetivo e garantirá a melhor performance no controle do primeiro grau de liberdade se for definida para o controlador a massa das peças que o robô transportar. Além disso, verifica-se que o controlador PV+I com ganhos fixos, calculados com base no momento de inércia de massa médio, obtém resultados similares aos obtidos com o controlador parametrizado, sendo esse um resultado interessante em termos de projeto, pois viabiliza a utilização de um controle mais simples e com garantia de cumprimento da dinâmica desejada mesmo quando ocorrem variações dos parâmetros da dinâmica do sistema.

## 7 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou o projeto de um manipulador robótico atuado por motores de passo. Os requisitos deste projeto foram determinados com base em estudos sobre tarefas realizadas por operadores em uma fábrica. Os objetivos específicos deste trabalho foram: definir a configuração geométrica dos eixos do robô e dimensionar seus componentes; determinar uma estratégia de controle que atenda às necessidades de precisão, baseada nas características do atuador determinado e nos requisitos de operação; realizar simulações computacionais para avaliar o projeto do manipulador robótico.

A metodologia utilizada, neste estudo, dividiu o projeto do robô em partes de conhecimento técnico similares, o que facilitou a realização das pesquisas a respeito de cada um dos assuntos. Desta forma, foi possível verificar os principais problemas envolvendo a etapa analisada e determinar a melhor solução para o mesmo.

A determinação da configuração geométrica para as juntas do robô foi facilitada, em função da metodologia de dimensionamento implementada, na qual se investigou as possibilidades de configuração geométrica e dimensionamento dos elementos do robô, desde a quinta junta até a primeira junta. Outro fator que facilitou foram os trabalhos acerca do projeto do robô acionado pneumáticamente, pois, dessa forma, conseguiu-se verificar os principais problemas enfrentados no projeto do robô pneumático e determinar soluções para diminuir os problemas observados nesses projetos.

Um dos problemas enfrentados no dimensionamento dos componentes do robô foi a dificuldade de determinar um método de dimensionamento para os sistemas de correia e polias sincronizadoras. Nas bibliográficas específicas sobre elementos de máquinas, estudadas neste projeto, não se encontrou um método de dimensionamento para esses sistemas, porém existem diversos catálogos de fabricantes com diferentes metodologias para atender essa tarefa, sendo determinada a mais adequada para este projeto.

A falta de experimentos limitou o modelo matemático para as simulações computacionais, já que parâmetros tiveram que ser retirados de estudos que utilizaram atuadores e sistemas de transmissão diferentes dos utilizados neste projeto.

Devido ao projeto mecânico do braço do manipulador, o qual (projeto) causa pequena variação do momento de inércia de massa associado ao primeiro grau de

liberdade do robô, o controlador projetado, com ganhos fixos, obteve resultados próximos da dinâmica desejada ao sistema controlado, praticamente igualando os resultados encontrados pelo controlador com parametrização dos ganhos, o que é benéfico, porque se pode utilizar um controlador mais simples para o controle desse grau de liberdade.

## **7.1 Trabalhos Futuros**

Para exemplificar alguns trabalhos possíveis de serem desenvolvidos, relativos à continuidade do projeto apresentado neste trabalho, são apontados os possíveis temas:

- Análise dinâmica estrutural do manipulador robótico;
- Implementação experimental do controle proposto na movimentação de um motor de passo;
- Construção e teste do manipulador robótico cilíndrico de cinco eixos atuado por motores elétricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT **NBR 9050 Acessibilidade a edificações mobiliário, espaços e equipamentos urbanos** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004

Acarney, P. **Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice**. Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 4th edition, 2002.

Akiyama Soluções Tecnológicas, Especificações do motor de passo AK85H/3.75-1.8. Disponível em: <<http://www.guiacnc.com.br/>>. Acesso em: abr. 2017.

Allgayer, R. S. **Desenvolvimento de um Manipulador Robótico Cilíndrico Acionado Pneumaticamente**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

Baldha, S., Shukla, J., Tarpara, K. Design and Simulation of Two-Phase Hybrid Stepper Motor with Current Tracking, **National Conference on Emerging Trends in Computer, Electrical & Electronics**, Rajkot, Gujarat, India, 2015.

Beer, F. P., Johnston Jr., E. R. **Resistência dos Materiais**. Pearson Makron Books, São Paulo, 3ª edição, 1995.

Cao, L., Schwartz, H. M. **Oscillation, Instability and Control of Stepper Motors**. Kluwer Academic, Vol. 18, p. 383–404, 1999.

Cardozo, W. S. **Controle de Motores de Passo aplicado a um Manipulador Robótico**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

Carrillo-Serrano, R.V., Hernández-Guzmán, V. M., and Santibáñez, V. **Global Asymptotic Stability of PD Control for PM Stepper Motor Servo-Systems**, Asian Journal of Control, Vol. 16(3), p. 1–9, 2014.

Craig, J. J. **Introduction to Robotics: mechanics and control**. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 3rd edition, 2005.

Collins, D. **Detent torque and holding torque**. Disponível em: <<http://www.motioncontroltips.com/>>. Acesso em: maio. 2018.

da Silva, J. F. **Construção e Controle Inteligente de um Manipulador Robótico com Dois Graus de Liberdade**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

Drylin, Lead Screw Technology – Trapezoidal and Metric Threads. Disponível em: <<http://www.igus.com>>. Acesso em: mar. 2017.

Elksasy, M. S. M., Gad, H. H. A New Technique for Controlling Hybrid Stepper Motor Through Modified PID Controller, **International Journal of Electrical & Computer Sciences**, Vol. 10(2), p. 28-35, 2010.

FAG, Catálogo de Rolamentos. Disponível em: <<http://eurorol.com>>MITSUBOSHI(2014). Acesso em: fev. 2017.

Fitzgerald, A.E. Kingsley, C.J. Umans, S. D. **Máquinas Elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. Porto Alegre, 6<sup>a</sup> edição, Bookman, 2006.

Fu, K. S., Gonzalez, R. C., Lee, C. S. G. **Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.

Gates Mectrol, Timing Belt Theory. Disponível em: <<http://www.gatesmectrol.com>>. Acesso em: mar. 2017.

Gates, Drive Design Manual: Light Power and Precision. Disponível em: <<https://www.gates.com/>>. Acesso em: fev. 2017.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. Volume 3, Rio de Janeiro, 4<sup>a</sup> edição, LTC, 1993.

Helix Linear Technologies, The Engineer's Guide: Lead Screws vs. Ball Screws. Disponível em: <<https://www.helixlinear.com/>>. Acesso em: mar. 2017.

Hibbeler, R.C. **Mecânica para Engenharia: Estática**. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 12<sup>a</sup> edição, 2011.

International Federation of Robotics, Robots: China breaks historic records in automation. Disponível em: <<https://ifr.org/>>. Acesso em ago. 2017.

Kabde, A. B., Savio, A. D., Position Control of Stepping Motor, **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, Vol. 3(4), p. 8974 – 8981, 2014.

Kamalasadan. S. A New Intelligent Controller for the Precision Tracking of Permanent Magnet Stepper Motor, **IEEE**, p. 1-7, 2011.

Kenjo, T., Sugawara, A. **Stepping Motors and Their Microprocessor Controls**. Oxford University Press, Oxford, 2nd edition, 2003.

Mathworks Matlab. Model Stepper Motor Disponível em: <<https://www.mathworks.com>>, acesso em: jul 2017.

Mayé, P. **Moteurs Électriques Pour La Robotique**. Dunod, Paris, 3<sup>e</sup> édition, 2016.

Messner C. W., Tilbury, D. **Control Tutorials for MATLAB and Simulink: A Web-Based Approach**, Addison-Wesley, 1998.

Mitsuboshi, Design Manual Timing Belt. Disponível em: <<https://www.mitsuboshi.co.jp>>. Acesso em: mar. 2017.

NSK, Catálogo Geral de Rolamentos. Disponível em: <<http://www.nsk.com.br/>>. Acesso em: fev. 2017.

Ogata, K. **Modern Control Engineering**. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 3th edition, 1997.

Optibelt, Technical Manual: Rubber Timing Belt Drives. Disponível em: <<http://www.optibelt-usa.com>>. Acesso em: mar. 2017.

Pittman, General Catalog: Gearboxes. Disponível em: <<https://prototypes.haydonkerk.com/>>. Acesso em: abr. 2017.

Policomp, Data Sheet Motor de Passo NEMA 5,2 kgf.cm. Disponível em: <<https://www.policompcomponentes.com.br>>. Acesso em: mai. 2017.

Preti, J. **Projeto e Desenvolvimento de Robô Cartesiano de Baixo Custo para Manipulacao de Produtos em Linhas de Média Cadência**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2014.

Rachid, A. A Lyapunov Approach for the Tracking Control of a permanent magnet stepper motor, **Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications**, Beijing, China, 2006.

Rijo, M. G. Q. **Desenvolvimento da Base e Controle do Grau de Liberdade Rotacional de um Robô Cilíndrico com Acionamento Pneumático**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

Rosário, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. Prentice Hall, São Paulo, 2006.

Sarmanho Jr., C. A. C., **Desenvolvimento de um Robô Pneumático de 5 graus de Liberdade com Controlador não linear com Compensação de Atrito**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

SDP/SI, Belts and Pulleys - Technical Data. Disponível em: < <http://www.sdp-si.com>>. Acesso em: mar. 2017.

Sename, O. **Modelling, analysis and control of linear systems using state space representations**, Disponível em: < [www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr](http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr) >. Acesso em: mai. 2018.

Shigley, J. E. Mischke, C. R., Budynas, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. Bookman, Porto Alegre, 7ª edição, 2005.

Silva, C. Indústria instala 1,5 mil robôs por ano. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/>>. Acesso em ago. 2017.

Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. **Robot Dynamics and Control**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2nd edition, 2004.

Strobotics, R15 Robot System. Disponível em: <<http://www.strobotics.com>>. Acesso em: mar. 2017.

Varella, D. Lesões por Esforços Repetitivos (L.E.R. / D.O.R.T.). Disponível em: <<https://drauziovarella.com.br>>. Acesso em ago. 2017.

Vittek, J., Makyš, P., Pospíšil, M. Szychta, E. Luft, M. State – Space Control of the Drive with PMSM and Flexible Coupling, **Archives of Transport**, 23(1):77-90, 2011.

Warner Electric, PB Series Brake Disponível em: <<http://warnerelectricparts.com>>. Acesso em: abr. 2017.

## APÊNDICE A – Rotina elaborada no Matlab para cinemática direta e inversa do manipulador robótico

```
%Cinemática direta e inversa
```

```
%Parâmetros das juntas:
```

```
%Elo 1
```

```
anfa1 = 0;
```

```
a1 = 0;
```

```
o1= sym('o1');
```

```
d1 = 0;
```

```
%Elo 2
```

```
anfa2 =-pi/2;
```

```
a2 = 0;
```

```
o2= 0;
```

```
d2 = sym('d2');
```

```
%Elo 3
```

```
anfa3 = (pi/2);
```

```
a3 = 0;
```

```
o3= (pi/2);
```

```
d3 = sym('d3+0.108'); %retirado do cad
```

```
%Elo 4
```

```
anfa4 = (-pi/2);
```

```
a4 = 0;
```

```
o4= sym('o4');
```

```
d4 = 0;
```

```

%Elo 5

anfa5 = 0;

a5 = 0;

o5= sym('o5');

d5 = 0.04603;

%Matrizes de transformação homogênea da cinamática direta:

T01 = [cos(o1) -sin(o1) 0 0
       sin(o1) cos(o1) 0 0
       0 0 1 d1
       0 0 0 1];

T12 = [cos(o2) -sin(o2) 0 a1
       sin(o2)*cos(anfa1) cos(o2)*cos(anfa1) -sin(anfa1) -sin(anfa1)*d2
       sin(o2)*sin(anfa1) cos(o2)*sin(anfa1) cos(anfa1) cos(anfa1)*d2
       0 0 0 1];

T23 = [cos(o3) -sin(o3) 0 a2
       sin(o3)*cos(anfa2) cos(o3)*cos(anfa2) -sin(anfa2) -sin(anfa2)*d3
       sin(o3)*sin(anfa2) cos(o3)*sin(anfa2) cos(anfa2) cos(anfa2)*d3
       0 0 0 1];

T34 = [cos(o4) -sin(o4) 0 a3
       sin(o4)*cos(anfa3) cos(o4)*cos(anfa3) -sin(anfa3) -sin(anfa3)*d4
       sin(o4)*sin(anfa3) cos(o4)*sin(anfa3) cos(anfa3) cos(anfa3)*d4
       0 0 0 1];

T45 = [cos(o5) -sin(o5) 0 a4
       sin(o5)*cos(anfa4) cos(o5)*cos(anfa4) -sin(anfa4) -sin(anfa4)*d5

```

$\sin(o5)*\sin(anfa4) \cos(o5)*\sin(anfa4) \cos(anfa4) \cos(anfa4)*d5$

0 0 0 1]

$T05 = T01*T12*T23*T34*T45;$

$nx=T05(1,1);$

$ny=T05(2,1);$

$nz=T05(3,1);$

$sx=T05(1,2);$

$sy=T05(2,2);$

$sz=T05(3,2);$

$ax=T05(1,3);$

$ay=T05(2,3);$

$az=T05(3,3);$

$px=T05(1,4);$

$py=T05(2,4);$

$pz=T05(3,4);$

%Cinemática Inversa

$O4=asin(az);$

$d2=pz-d5*\sin(O4);$

$O1=acos(ay/\cos(O4));$

$O5=asin(sz/\cos(O4));$

$d3=(py-0.06*\cos(O1)-0.046*\cos(O1)*\cos(O4))/\cos(O1);$

$\%oud31=(px-0.06*\sin(O1)+0.046*\cos(O4)*\sin(O1))/\sin(O1);$

## APÊNDICE B – Parâmetros geométricos e inercias do manipulador robótico

A Tabela B.1 apresenta os valores dos parâmetros geométricos e inerciais dos eixos do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

Tabela B.1 – Parâmetros geométricos e inerciais dos eixos do manipulador robótico cilíndrico de atuadores elétricos.

Parâmetros/ Eixos	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4	Eixo 5
$\bar{X}_i(mm)$	0	-29,32	-0,08	0	0
$\bar{Y}_i(mm)$	0	0	-25,54	1,52	0
$\bar{Z}_i(mm)$	257,05	-29,26	-248,85	-69,52	33,29
$H_{xx} (gmm^2)$	162019661,78	266032,39	17123211,61	529884,22	3764,47
$H_{yy} (gmm^2)$	1587624,97	629884,27	15750622,83	517051,86	3764,47
$H_{zz} (gmm^2)$	4621494,16	577908,28	1768536,39	99566,01	32
$H_{xy} (gmm^2)$	-47,98	-5,17	4346,24	-0,88	0
$H_{xz} (gmm^2)$	-4,94	-0,42	526795,33	-42634,33	0
$H_{yz} (gmm^2)$	-3,93	125132,47	13807,24	-4,81	0
$m_i(g)$	2976,48	516,37	781,97	321,95	10,04

## APÊNDICE C – Parâmetros dos eixos para as simulações

A seguir é apresentada a rotina criada no software *MatLab* para declaração dos valores dos parâmetros do manipulador robótico para as condições apresentadas no Capítulo 6, referente as simulações do manipulador robótico.

```
%Redução para cada eixo

r1=24;

r2=3.98089*10^-3;

r3=6.6845*10^-3;

r4=3.7866;

r5=1;

%Parâmetros para Dinâmica

% Parâmetros do eixo 1

alfa1=0;

ca1=cos(alfa1);

sa1=sin(alfa1);

v.o=[0

    0

    9.81];

z1=[1 1 1];

pc1=[0.257

    0.257

    0];

Ixx1=162019616.78/(1000*1000*1000);

Iyy1=158762437.97/(1000*1000*1000);
```

```

Izz1=4621494.16/(1000*1000*1000);
Ixy1=-47.98/(1000*1000*1000);
Iyz1=-4.94/(1000*1000*1000);
Ixz1=-3.93/(1000*1000*1000);
I1 = [Ixx1 -Ixy1 -Ixz1
      -Ixy1 Iyy1 -Iyz1
      -Ixz1 -Iyz1 Izz1];
M1=2.97648;
Izz31=81906580.47/(1000*1000*1000);
d3max=0.3;
% Parâmetros do eixo 2
a=(33.55);
f=0.3;
r=12/2000;
sa=sind(a);
ca=cosd(a);
alfa2=(-pi/2);
a2 = 0;
O2= 0;
ca2=cos(alfa2);
sa2=sin(alfa2);
z2=[1 1 1];
pc2=[0.1426
     0.02926

```

```

0.1426];
Ixx2=2660032.39/(1000*1000*1000);
Iyy2=629884.27/(1000*1000*1000);
Izz2=577908.28/(1000*1000*1000);
Ixy2=-5.17/(1000*1000*1000);
Iyz2=-0.42/(1000*1000*1000);
Ixz2=125132.47/(1000*1000*1000);
I2 = [Ixx2 -Ixy2 -Ixz2
      -Ixy2 Iyy2 -Iyz2
      -Ixz2 -Iyz2 Izz2];
Msup=M3+M4+M5;
% Parâmetros do eixo 3
Dp3=13.369/1000;
alfa3=(pi/2);
a3 = 0;
O3= (pi/2);
ca3=cos(alfa3);
sa3=sin(alfa3);
z3=[1 1 1];
pc3=[-0.24885
      -0.24885
      -0.02554];
Ixx3=17123211.61/(1000*1000*1000);
Iyy3=15750622.83/(1000*1000*1000);

```

$$I_{zz3}=1768536.39/(1000*1000*1000);$$

$$I_{xy3}=4346.24/(1000*1000*1000);$$

$$I_{yz3}=526795.33/(1000*1000*1000);$$

$$I_{xz3}=13807.24/(1000*1000*1000);$$

$$I_3 = [I_{xx3} \ -I_{xy3} \ -I_{xz3}$$

$$\ -I_{xy3} \ I_{yy3} \ -I_{yz3}$$

$$\ -I_{xz3} \ -I_{yz3} \ I_{zz3}];$$

$$M_3=0.78197;$$

% Parâmetros do eixo 4

$$\text{alfa4} =(-\pi/2);$$

$$a_4 = 0;$$

$$d_4=0;$$

$$ca_4=\cos(\text{alfa4});$$

$$sa_4=\sin(\text{alfa4});$$

$$z_4=[1 \ 1 \ 1];$$

$$pc_4=[-0.06952$$

$$\ -0.06952$$

$$\ 1.52/1000];$$

$$I_{xx4}=529884.22/(1000*1000*1000);$$

$$I_{yy4}=517051.86/(1000*1000*1000);$$

$$I_{zz4}=99566.01/(1000*1000*1000);$$

$$I_{xy4}=-0.88/(1000*1000*1000);$$

$$I_{yz4}=-42634.43/(1000*1000*1000);$$

$$I_{xz4}=-4.81/(1000*1000*1000);$$

```

I4 = [Ixx4 -Ixy4 -Ixz4
      -Ixy4 Iyy4 -Iyz4
      -Ixz4 -Iyz4 Izz4];

M4=0.32195;

% Parâmetros do eixo 5

alfa5 = 0;

a5 = 0;

d5 = 0.04603;

ca5=cos(alfa5);

sa5=sin(alfa5);

z5=[1 1 1];

pc5=[-95.40/1000
      -95.40/1000
      0];

Ixx5=852144.55/(1000*1000*1000);

Iyy5=852144.55/(1000*1000*1000);

Izz5=641215.19/(1000*1000*1000);

Ixy5=0/(1000*1000*1000);

Iyz5=0/(1000*1000*1000);

Ixz5=0/(1000*1000*1000);

I5 = [Ixx5 -Ixy5 -Ixz5
      -Ixy5 Iyy5 -Iyz5
      -Ixz5 -Iyz5 Izz5];

M5=2.055;

```