

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

DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO CILÍNDRICO
ACIONADO PNEUMATICAMENTE

por

Renan Schmidt Allgayer

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2011

DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO CILÍNDRICO
ACIONADO PNEUMATICAMENTE

por

Renan Schmidt Allgayer
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 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. Eduardo Andre Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flavio José Lorini - PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques - PPGEE / UFRGS

Prof. Dr. Rodrigo Rossi - DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, abril de 2011

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e meu irmão por tudo.

Ao Prof.º Eduardo Perondi pela orientação e conhecimento.

Ao Eng.º Carlos Dreyer pela ajuda técnica.

Ao LAMECC pela amizade e auxílio.

Á CAPES e o PROMEC pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho aborda o projeto de um manipulador robótico cilíndrico acionado pneumaticamente de baixo custo e com 5 graus de liberdade. Este robô está sendo desenvolvido para realizar operações de movimentação de peças que venham a substituir postos de trabalho com ambiente insalubre e/ou de ações repetitivas nas quais as exigências de precisão, velocidade e capacidade de carga sejam limitadas. Os requisitos de projeto foram obtidos por meio de uma pesquisa em uma fábrica de ferramentas manuais. É apresentada a proposta de uma estrutura mecânica para suprir parte significativa das necessidades usuais de movimentação de peças em indústrias manufatureiras e o seu correspondente modelo teórico dinâmico não-linear, considerando o equacionamento dos atuadores pneumáticos acoplados ao sistema mecânico. Finalmente, é apresentado o projeto de um controlador linear por meio da técnica de realimentação de estados, com os ganhos definidos pela alocação de pólos a partir de um modelo linearizado de 3ª ordem. Para validação do modelo teórico e do algoritmo de controle propostos são apresentadas simulações de movimentação ponto a ponto e seguimento de trajetória. Os resultados mostram que a precisão de posicionamento do efetuador final é adequada para as tarefas de manipulação.

Palavras-chave: robô de cinco graus de liberdade; manipulador robótico pneumático; controle por realimentação de estados

ABSTRACT

This work proposes the design of a low cost cylindrical robotic manipulator actuated pneumatically with 5 degrees of freedom. This robot is being developed to perform manipulation of parts, aiming to replace tasks usually performed in unhealthy environment and/or repetitive actions in which the requirements of accuracy, speed and load capacity are limited. The project requirements were obtained through a research in a manual tools factory. It is proposed a geometry that is intended to meet a significant amount of the usual moving parts demands in manufacturing industries and its corresponding nonlinear dynamic theoretic model, considering the pneumatic actuators model coupled to the mechanical system. Finally, the application of a linear control-law based on the technique of state feedback with design made by pole assignment using a linearized model of 3rd order is described. For validation of the theoretic model and proposed control algorithm are presented simulations of point to point regulation problem and trajectory tracking. The results show that the positioning accuracy of the end effector is suitable for achieving the planned tasks.

Keywords: 5 degrees of freedom manipulator, pneumatic robotic manipulator, state feedback control

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Descrição do problema	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Metodologia do trabalho.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Manipuladores robóticos	4
2.1.1	Descrição.....	4
2.1.2	Classificação geométrica de robôs	4
2.1.3	Unidades técnicas	5
2.2	Atuadores.....	7
2.3	Sistemas de transmissão mecânica	8
2.4	Manipuladores robóticos pneumáticos	8
3.	UNIDADE TÉCNICA DE ESTRUTURA MECÂNICA DO MANIPULADOR.....	13
3.1	Requisitos de projeto	13
3.2	Estrutura mecânica do manipulador robótico pneumático	15
3.3	Equipamentos pneumáticos	17
3.4	Modelagem geométrica	18
3.5	Determinação dos parâmetros geométricos do modelo	22
4.	UNIDADE TÉCNICA DE MODELAGEM MATEMÁTICA	25
4.1	Cinemática	25
4.2	Dinâmica.....	34
4.2.1	Subsistema pneumático	34
4.2.2	Subsistema mecânico.....	41
5.	UNIDADE TÉCNICA DE SISTEMA DE CONTROLE.....	44
5.1	Representação em espaço de estados.....	44
5.2	Controle por realimentação de estados	51
5.3	Projeto por alocação dos pólos	53
6.	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS.....	59
6.1	Implementação computacional	59
6.2	Simulações.....	62
6.2.1	Simulações em malha aberta	62
6.2.2	Simulações em malha fechada.....	63
6.2.2.1	Movimentação ponto a ponto	63
6.2.2.2	Seguimento de trajetória.....	67

6.	CONCLUSÕES	73
6.1	Trabalhos futuros	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		75
APENDICE A.....		76
APENDICE B.....		79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura de execução de projeto, adaptado de Frasson, 2007.....	6
Figura 2.2	Manipulador antropomórfico com três graus de liberdade, adaptado de Bobrow e McDonell, 1998.....	9
Figura 2.3	Manipulador antropomórfico com seis graus de liberdade adaptado de Mattiazzo et al, 2002.....	10
Figura 2.4	Manipulador antropomórfico com três graus de liberdade adaptado de Richardson et al, 2006.....	11
Figura 2.5	Manipulador antropomórfico com seta graus de liberdade adaptado de Watanabe et al, 2008.....	11
Figura 2.6	Manipulador antropomórfico com três graus de liberdade adaptado de Frasson, 2007.....	12
Figura 3.1	Gráfico da porcentagem acumulada para diferentes massas das peças	13
Figura 3.2	Alcance no plano horizontal (pessoa sentada) [ABNT, 2004]	14
Figura 3.3	Alcance frontal manual (pessoa sentada) [ABNT, 2004]	14
Figura 3.4	Representação simplificada dos elos e juntas do robô.....	16
Figura 3.5	Sistema de transmissão mecânica por cabos e polias proposto.....	17
Figura 3.6	Modelagem geométrica em perspectiva do manipulador.....	19
Figura 3.7	Modelagem geométrica do sistema de atuação da primeira junta.....	20
Figura 3.8	Modelagem geométrica das juntas 2 e 3.....	20
Figura 3.9	Modelagem geométrica do sistema de atuação da quarta junta.....	21
Figura 3.10	Modelagem geométrica do sistema de atuação da quinta junta.....	21
Figura 3.11	Modelagem geométrica do elo 1 e sistema de coordenadas.....	23
Figura 3.12	Modelagem geométrica do elo 2 e sistema de coordenadas.....	23
Figura 3.13	Modelagem geométrica do elo 3 e sistema de coordenadas.....	24
Figura 3.14	Modelagem geométrica do elo 4 e sistema de coordenadas.....	24
Figura 3.15	Modelagem geométrica do elo 5 e sistema de coordenadas.....	24
Figura 4.1	Sistemas de coordenadas dos elos e parâmetros de DH, adaptado de Fu et al,1987.....	26
Figura 4.2	Sistema de coordenadas do efetuador e vetores \mathbf{n} , \mathbf{s} e \mathbf{a} , adaptado de Fu et al,1987.....	27

Figura 4.3	Sistemas de coordenadas na representação simplificada dos elos e juntas do robô pneumático.....	27
Figura 4.4	Representação dimensional do espaço de trabalho.....	30
Figura 4.5	Vista do plano xy do espaço de trabalho.....	30
Figura 4.6	Vista do plano xz do espaço de trabalho.....	31
Figura 4.7	Aproximação linear da zona morta da válvula proporcional [Perondi, 2002].....	38
Figura 4.8	Mapa estático do atrito.....	40
Figura 5.1	Realimentação dos estados, controlador PVA – posição, velocidade e aceleração.....	53
Figura 5.2	Parâmetros ligados ao posicionamento dos pólos no plano complexo.....	53
Figura 5.3	Pólos dos sistemas em malha aberta.....	54
Figura 5.4	Características da resposta de um sistema a 2ª ordem a uma excitação degrau unitário, [Ogata, 2000].....	55
Figura 5.5	Pólos dos sistemas em malha fechada.....	57
Figura 6.1	Diagrama de blocos do sistema.....	59
Figura 6.2	Diagrama de blocos do robô pneumático.....	60
Figura 6.3	Posicionamento dos cilindros pneumáticos no ensaio em malha aberta.....	62
Figura 6.4	Força pneumática do atuador do eixo 2.....	63
Figura 6.5	Referência dos atuadores pneumáticos para a movimentação ponto a ponto.....	64
Figura 6.6	Posicionamento na coordenada x para a movimentação ponto a ponto.....	64
Figura 6.7	Posicionamento na coordenada y para a movimentação ponto a ponto.....	65
Figura 6.8	Posicionamento na coordenada z para a movimentação ponto a ponto.....	65
Figura 6.9	Sinais de controle para a movimentação ponto a ponto.....	66
Figura 6.10	Vista em perspectiva da trajetória de referência.....	67
Figura 6.11	Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 1 para o teste de seguimento de trajetória.....	68
Figura 6.12	Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 2 para o teste de seguimento de trajetória.....	68
Figura 6.13	Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 3 para o teste de seguimento de trajetória.....	69
Figura 6.14	Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 4 para o teste de seguimento de	69

	trajetória.....	
Figura 6.15	Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 5 para o teste de seguimento de trajetória.....	70
Figura 6.16	Posicionamento nas coordenadas x, y e z para o seguimento de trajetória.....	70
Figura 6.17	Erro de posicionamento nas coordenadas x, y e z para o seguimento de trajetória para o carregamento de 1 kg.....	71
Figura 6.18	Posições dos cilindros pneumáticos para o teste de seguimento de trajetória para o carregamento de 1 kg.....	72
Figura 6.19	Sinal de controle para o teste de seguimento de trajetória para o carregamento de 1 kg.....	72
Figura A.1	Sistema de transmissão por fuso e alavanca, [Schirmer, 2005].....	79
Figura A.2	Sistema de transmissão por um conjunto pinhão/cremalheira, adaptado de Mattiazzo et al, 2002.....	79
Figura A.3	Sistema de transmissão por cabo e polia, adaptado de McDonell, 1996.....	80
Figura A.4	Sistema de transmissão por alavancas, adaptado de Valdiero, 2005.....	80
Figura A.5	Sistema de transmissão por fuso e came, adaptado de Hoshino e Kawabuchi, 2006.....	81
Figura B.1	Vistas do manipulador robótico pneumático: (a) vista frontal (b) vista lateral.....	82
Figura B.2	Vista explodida do manipulador robótico pneumático.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Requisitos básicos de projeto.....	15
Tabela 3.2	Especificações técnicas dos cilindros pneumáticos.....	18
Tabela 3.3	Especificações técnicas da válvula.....	18
Tabela 3.4	Parâmetros geométricos dos elos.....	22
Tabela 4.1	Parâmetros de Denavit Hartenberg do robô pneumático.....	28
Tabela 4.2	Valores limites das juntas.....	29
Tabela 4.3	Fatores das relações de transmissão das juntas.....	32
Tabela 4.4	Vazões mássicas máximas.....	37
Tabela 4.5	Valores de \bar{u}_{lim}	38
Tabela 4.6	Valores dos parâmetros para o atrito.....	40
Tabela 5.1	Pontos médios de operação para as posições das juntas.....	49
Tabela 5.2	Pólos dos sistemas em malha aberta.....	54
Tabela 5.3	Valores dos ganhos calculados.....	57
Tabela 5.4	Pólos dos sistemas em malha aberta.....	58
Tabela 6.1	Parâmetros geométricos do quinto elo com diferentes carregamentos.....	61
Tabela 6.2	Parâmetros de simulação.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS

DH	Notação de Denavit Hartenberg
LAMECC	Laboratório de Mecatrônica e Controle
P	Junta Prismática
PV Δ P	Controle baseado na realimentação dos estados Posição, Velocidade e Diferença de Pressões
PVA	Controle baseado na realimentação dos estados Posição, Velocidade e Aceleração
R	Junta Rotacional

LISTA DE SÍMBOLOS

Variáveis e parâmetros

A	Área transversal do êmbolo do atuador [m^2]
\mathbf{A}	Matriz de áreas transversais dos êmbolos dos atuadores [m^2]
$\underline{\mathbf{A}}$	Matriz de estado
A_0	Área do orifício de passagem da servoválvula [m^2]
A_s	Área da superfície do volume de controle [m^2]
a	Coefficiente da matriz de estado
\mathbf{a}	Vetor normal ao efetuador final [m]
a_u	Constante da aproximação linear da zona morta
$\underline{\mathbf{B}}$	Matriz de entrada
b_0	Coefficiente da matriz de entrada
$\underline{\mathbf{C}}$	Matriz de saída
C_f	Coefficiente de atrito viscoso equivalente [N/(m/s)]
$\underline{\mathbf{D}}$	Matriz de transmissão direta
d	Variável da junta prismática [m]
F_a	Força de atrito [N]
\mathbf{F}_a	Vetor de forças de atrito [N]
F_c	Força de Coulomb [N]
\mathbf{F}_l	Vetor de forças líquidas [N]
\mathbf{F}_p	Vetor de forças pneumáticas [N]
F_s	Força de atrito estático [N]
\mathbf{H}	Matriz de inércia [kgm^2]
\mathbf{I}	Tensor de inércia
I_{xx}	Momento de inércia em relação ao plano x [kgm^2]
I_{yy}	Momento de inércia em relação ao plano y [kgm^2]
I_{zz}	Momento de inércia em relação ao plano z [kgm^2]
I_{xy}	Produto de inércia em relação aos planos x-y [kgm^2]
I_{xz}	Produto de inércia em relação aos planos x-z [kgm^2]
I_{yz}	Produto de inércia em relação aos planos y-z [kgm^2]
\mathbf{K}	Matriz de ganhos
K_q	Ganho de vazão-pressão dos orifícios de saída da servoválvula [kg/s]
K_p	Ganho de vazão-sinal de controle dos orifícios de saída da servoválvula [kg/s]

k_a	Ganho de aceleração
k_p	Ganho de posição
k_v	Ganho de velocidade
L	Comprimento do atuador [m]
M_p	Sobrepasse [%]
m	Massa [kg]
\mathbf{N}	Matriz de fatores constantes dependentes do tipo de transmissão
\mathbf{n}	Vetor transversal vertical ao efetuador final [m]
n	Número de graus de liberdade do robô
P	Fator de multiplicidade
p	Pressão [Pa]
p	Pólo
\mathbf{p}	Vetor posição do efetuador final [m]
\mathbf{Q}	Matriz de derivada parcial
\mathbf{q}	Vetor de variáveis generalizadas das juntas
q_m	Vazão mássica [kg/s]
${}^i R_{i-1}$	Matriz de transformação do sistema de coordenadas $i-1$ para o sistema de coordenadas i
R	Constante universal dos gases [J/(kgK)]
r	Razão de calores específicos do ar
\mathbf{s}	Vetor transversal horizontal ao efetuador final [m]
s	Operador de Laplace
sc	Superfície de controle [m ²]
${}^{i-1} \mathbf{T}_i$	Matriz de transformação do sistema de coordenadas i para o sistema de coordenadas $i-1$
T	Temperatura [K]
t	Tempo [s]
t_d	Tempo de atraso [s]
t_p	Tempo de pico [s]
t_r	Tempo de subida [s]
t_s	Tempo de assentamento [s]
u	Sinal de controle
\bar{u}	Sinal de controle normalizado
V	Volume do fluido [m ³]
V_{vm}	Volume morto da câmara do atuador [m ³]
v	Velocidade relativa entre superfícies [m/s]

v_s	Velocidade de Stribeck [m/s]
v_c	Volume de controle [m ³]
\mathbf{x}	Vetor de estados
\bar{x}	Posição x do centro de massa [m]
\mathbf{y}	Vetor posição dos atuadores [m]
y	Posição do atuador [m]
\bar{y}	Posição y do centro de massa [m]
z	Deformação no movimento de pré-deslizamento [m]
\bar{z}	Posição z do centro de massa [m]
Θ	Variável da junta rotacional [rad]
λ	Vetor de offset [m]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
σ	Valor da parcela real do pólo
σ_0	Coefficiente de rigidez elástica [N/ m ²]
σ_1	Coefficiente de amortecimento [Ns/m]
σ_2	Coefficiente de amortecimento viscoso [Ns/m]
ζ	Índice de amortecimento
\mathbf{v}	Vetor de velocidades do fluido [m/s]
ω	Velocidade angular [rad/s]
ω_d	Frequência natural amortecida [rad/s]
ω_n	Frequência natural [rad/s]

Índices

$f_p()$	Função de tensão
$f_u()$	Função de pressão
$()_{max}$	Sub-índice indicador de condição de valor máximo
$()_i$	Sub-índice indicador do eixo i
$()_u$	Sub-índice que indica estado a montante do estrangulamento
$()_a$	Sub-índice indicador da câmara a
$()_b$	Sub-índice indicador da câmara b
$()_{atm}$	Sub-índice de referência a pressão atmosférica
$()_d$	Sub-índice indicador de condição desejada
$()_d$	Sub-índice que indica estado a jusante do estrangulamento
$()^{ench}$	Superíndice indicador de condições de enchimento da câmara

$()^{eau}$ Superíndice indicador de condições de exaurimento da câmara

Símbolos

$()$ Primeira derivada

$(\ddot{ })$ Segunda derivada

$(\dddot{ })$ Terceira derivada

(Δ) Variação

(\sim) Erro

1. INTRODUÇÃO

A automação é aplicada no ambiente industrial buscando o aumento do ritmo de produção, a redução de custos e o auxílio aos trabalhadores em situações insalubres e/ou repetitivas. Os manipuladores robóticos são um dos produtos mais utilizados nesta área, pois apresentam alta adaptabilidade aos sistemas de produção atuais, que produzem uma gama diversificada de itens.

Atualmente, o mercado de robôs é, na sua grande maioria, composto por modelos acionados eletricamente. Entretanto, com o avanço da microeletrônica, outros sistemas de atuação podem ser utilizados como o hidráulico e pneumático.

Os sistemas pneumáticos apresentam algumas vantagens competitivas, tais como boas relações peso/potência e potência/custo, são não-poluente e de fácil montagem e operação. Entretanto, possuem algumas desvantagens, tais como a compressibilidade do ar, possibilidade de existência de vazamentos e o elevado valor das forças de atrito.

Estas características negativas dificultam o uso de sistemas pneumáticos em aplicações de alta precisão, porém, com o estudo destes problemas aliado ao contínuo avanço tecnológico, estão sendo desenvolvidas novas técnicas de controle que superam, ao menos em parte, estes problemas.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma configuração de um manipulador robótico acionado pneumaticamente e sua modelagem, controle e simulação.

1.1 Descrição do problema

Segundo Asada e Slotine, 1986, para se projetar um manipulador robótico apropriado e desenvolver um algoritmo de controle eficaz é necessário entender precisamente como uma dada tarefa deve ser realizada e quais tipos de movimentos o robô deve ser capaz de realizar.

Por meio da análise de uma fábrica de ferramentas manuais foi verificada a existência de uma grande possibilidade de automação dos processos. Por exemplo, um dos pontos observados na empresa é que a carga manipulada nas estações de trabalho não excediam 1 kg. Isto está em consonância com Frasson, 2007, que verificou que cerca de 60% dos processos industriais envolvem cargas menores de 10 kg.

Os processos de movimentação de carga, alimentação de máquinas, paletização, seleção entre outros, são atividades repetitivas e monótonas que podem gerar doenças

ocupacionais como LER (Lesão por Esforço Repetitivo) e DORT (Distúrbio Osteomuscular Relacionado ao Trabalho) para os trabalhadores, o que resulta em problemas de saúde para o funcionário e prejuízos para a empresa.

Por se tratarem de ações manuais, estes processos não requerem uma grande precisão no posicionamento final. Assim, o uso de robôs comerciais disponíveis geralmente acarretam em aplicações superdimensionadas como ocorre em empresas já automatizadas, ou são encontrados robôs com capacidade de carga de vários quilogramas manipulando peças de apenas algumas centenas de gramas.

Baseado nestas considerações, a proposta do trabalho é válida, tanto nos aspectos econômicos e de aumento de produtividade, mas também, principalmente, com a substituição das atividades insalubres dos trabalhadores por soluções mecanizadas.

1.2 Objetivos

Projetar um manipulador robótico com o acionamento por cilindros pneumáticos e propor e aplicar uma técnica de controle para simular a operação em atividades industriais.

Os objetivos específicos são:

- definir a configuração do manipulador robótico;
- desenvolver um modelo teórico;
- definir e implementar uma estratégia de controle;
- realizar simulações de operação do robô.

1.3 Metodologia do trabalho

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de analisar o estado da arte de manipuladores robóticos acionados pneumaticamente. A revisão bibliográfica está apresentada no Capítulo 2, juntamente com os conceitos fundamentais de robótica necessários ao adequado entendimento deste trabalho.

Em seguida, foi feita uma análise do problema e definidos os requisitos a serem atingidos. Para auxiliar nesta etapa, foi utilizado um software de auxílio ao projeto (CAD) e informações de fabricantes de equipamentos pneumáticos. Esta análise é dada no Capítulo 3.

Tendo sido determinada a estrutura mecânica necessária, é realizado o desenvolvimento da unidade técnica de modelagem matemática, com o equacionamento da cinemática e dinâmica do manipulador robótico.

Após a construção do modelo teórico (apresentado no Capítulo 4) é definida a estratégia de controle a ser utilizado no projeto, enquanto que, no Capítulo 5, seu projeto é apresentado.

Para validar o conceito proposto, foi realizada a sua implementação computacional em um programa de processamento numérico. Os resultados das simulações para o manipulador para o caso de posicionamento ponto a ponto e de seguimento de trajetórias estão apresentados no Capítulo 6.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados o embasamento teórico considerado necessário para o entendimento dos capítulos que se seguem e o estado da arte na área de manipuladores acionados pneumaticamente.

2.1 Manipuladores robóticos

2.1.1 Descrição

O conceito de manipulador robótico é atribuído aos sistemas mecânicos compostos por elos, juntas e atuadores utilizados para movimentar ferramentas e peças entre pontos ou seguindo trajetórias, podendo estes serem reconfiguráveis [Romano e Dutra, 2002].

Os elos são os elementos estruturais do robô que devem apresentar rigidez calculada para garantir uma precisão adequada do sistema. As juntas conectam os elos e são responsáveis pelo número de graus de liberdade do sistema, podendo ser do tipo rotacional ou prismático.

2.1.2 Classificação geométrica de robôs

Os robôs podem ser classificados, segundo sua geometria, como:

- **Robô cartesiano:** este modelo geométrico apresenta três juntas prismáticas ortogonais que formam um paralelepípedo como volume de trabalho. Sua rigidez estrutural é elevada e aproximadamente constante dentro de todo volume de trabalho, entretanto, sua capacidade de atingir diferentes orientações e de aproximação aos objetos é restrita. Este tipo de robô é usualmente utilizado na movimentação de cargas e em montagens;
- **Robô cilíndrico:** este tipo de robô possui uma junta rotacional na base seguida por duas juntas prismáticas ortogonais. O seu volume de trabalho consiste de um cilindro vazado. A rigidez, bastante elevada, é dependente da posição da sua junta horizontal. Normalmente é utilizado no acesso a cavidades horizontais, como, por exemplo, na situação da alimentação de máquinas;

- **Robô esférico:** também conhecido como robô polar, possui duas juntas rotacionais e uma prismática. Seu envelope possui a forma de uma esfera. Devido às suas juntas rotacionais, possui baixa rigidez mecânica;
- **Robô articulado:** também chamado de antropomórfico, pois se assemelha ao braço humano. Este modelo é o mais utilizado na indústria devido à sua grande destreza e flexibilidade de aplicação. É caracterizado por apresentar três juntas de rotação, uma vertical e duas horizontais;
- **Robô SCARA:** acrônimo para *Selective Compliance Assembly Robot Arm*. Este robô é especializado na movimentação de componentes em um plano. Suas juntas, duas de rotação e uma de translação, possuem seus eixos paralelos. Este modelo é amplamente utilizado na indústria de componentes eletrônicos.
- **Robô paralelo:** diferentemente dos modelos apresentados, que são de cadeia aberta, este robô possui uma cadeia fechada. Esta geometria fornece elevada rigidez, performance dinâmica e precisão. Porém, por apresentar difícil modelagem e controle é ainda objeto de estudos e desenvolvimentos [Kumazawa et al, 2009; Simas et al, 2009; Yu e Cong, 2008].

2.1.3 Unidades técnicas

No desenvolvimento de produtos e no gerenciamento de projetos são necessárias a identificação e a divisão das áreas de conhecimento envolvidas no processo a fim de serem aplicadas as habilidades, ferramentas e técnicas e atender ao propósito para o qual os produtos ou projetos estão sendo executados [Buzzetto, 2008].

Para o desenvolvimento de um robô, Frasson, 2007, separou as áreas envolvidas em cinco unidades técnicas:

- **Estrutura do robô:** esta unidade trata do estudo e definição da composição física do robô, como volume de trabalho, geometria, número de juntas e etc., e os componentes mecânicos necessários;
- **Modelagem matemática:** esta unidade é compreendida pelo desenvolvimento do equacionamento para representar matematicamente um sistema. Nela são realizadas simulações dos equipamentos da estrutura do robô e do sistema de controle implementado;

- **Sistema de controle:** nessa unidade é definido o algoritmo de controle utilizado no controle dos movimentos do robô. A modelagem matemática é necessária para a síntese de alguns algoritmos de controle;
- **Arquitetura de controle:** nessa unidade é realizado o estudo do hardware necessário para implementar o sistema de controle desenvolvido. O estudo deve considerar o volume de dados a serem obtidos, processados e enviados ao sistema de acionamento do robô;
- **Programação *offline*:** a interação entre o robô e o operador é objetivo desta unidade. Normalmente, são desenvolvidos um software gráfico ou uma linguagem de programação para gerar as referências a serem utilizadas pelo sistema de controle.

A Figura 2.1 apresenta a estrutura de execução de projeto com as unidades técnicas desenvolvida por Frasson, 2007.

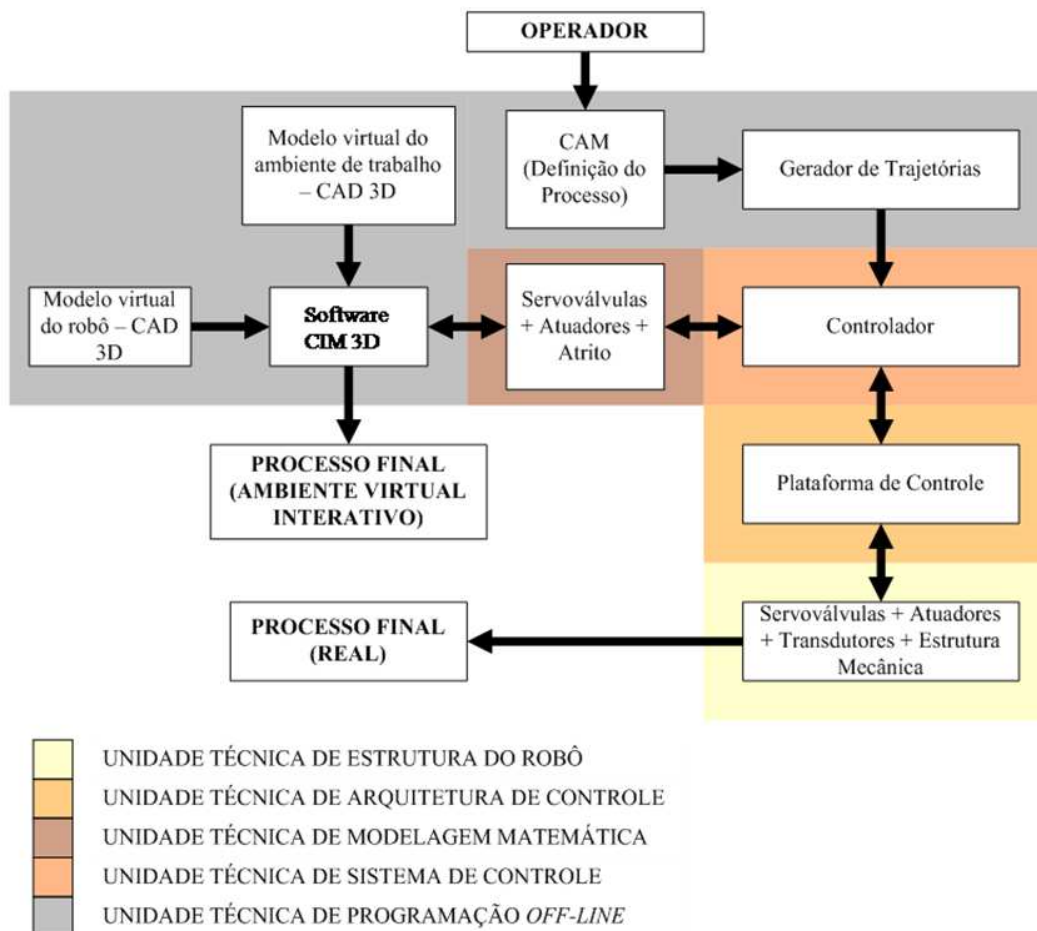


Figura 2.1 – Estrutura de execução de projeto, adaptado de Frasson, 2007

Esta dissertação se limita ao estudo apenas de três unidades técnicas: estrutura mecânica do robô, modelagem matemática e sistema de controle.

2.2 Atuadores

Segundo Spong e Vidyasagar, 1989, além da classificação pelas configurações geométricas (como apresentado na Seção 2.1.2), os manipuladores robóticos também podem ser divididos pelas suas fontes de potência. A atuação pode ser elétrica, pneumática ou hidráulica.

O acionamento elétrico é feito por motores elétricos lineares ou rotacionais. Os motores elétricos podem ser de corrente contínua, de passo ou de corrente alternada. Atualmente, a atuação elétrica é a mais utilizada em robôs industriais. Como vantagens, esse sistema de acionamento apresenta facilidade de controle e manutenção, além de a fonte de energia ser geralmente acessível. Como desvantagens, apresenta a possibilidade da ocorrência de danos associados às paradas do motor. Além disso, geralmente têm restrições quanto ao uso em ambientes classificados (MTE, 2004) e a relação peso/carga útil é comprometida pela saturação eletromagnética.

A atuação pneumática faz uso do ar comprimido como fonte de energia. O sistema é geralmente composto por um cilindro, motor pneumático ou músculo pneumático, uma válvula para direcionar o fluxo e um compressor para gerar a pressão necessária. Suas características favoráveis são o baixo custo, boa relação peso/potência, a possibilidade de manter alto e sem danos o momento de atuação enquanto parado por longos períodos sem danos e a fácil acessibilidade ao ar comprimido no ambiente fabril. Suas desvantagens estão associadas à dificuldade de se obter uma alta precisão de seguimento de trajetória e posicionamento.

O atuador hidráulico utiliza um fluido incompressível a alta pressão como fonte de potência. Assim como no sistema pneumático, o sistema hidráulico é geralmente composto por um cilindro ou um motor hidráulico, uma válvula e uma bomba. Os aspectos positivos deste meio de acionamento são a elevada velocidade de resposta e força ou torque produzido. Além disso, também apresenta uma boa relação peso/potência. Como aspectos negativos existe a possibilidade de ocorrência de vazamentos, trazendo perigo de contaminação ao meio-ambiente, a necessidade de uso de válvulas de precisão de custo elevado e a dificuldade de controle.

2.3 Sistemas de transmissão mecânica

Os sistemas de transmissão mecânica, ou drivers, realizam a conexão entre os atuadores e as juntas, podendo ser diretos ou indiretos [Romano e Dutra, 2002].

- **Sistema de transmissão direto:** neste caso o atuador é montado diretamente na junta que será movida. Este tipo de transmissão é normalmente encontrado em juntas prismáticas acionadas por cilindros pneumáticos e hidráulicos e em juntas rotacionais atuadas por motores torcionais. Suas vantagens consistem na simplificação do projeto e na montagem da estrutura do manipulador.
- **Sistema de transmissão indireto:** este tipo de transmissão é utilizado para reduzir ou amplificar a força (ou o torque) e a velocidade do acionamento ou modificar o modo de movimento entre rotacional e linear. As transmissões indiretas geralmente possibilitam a redução do peso do robô, aumentando, porém, número de pontos de perda de potência. Como exemplos existem engrenagens, alavancas, cabos e polias, correntes e coroas e fusos.

No Apêndice-A são apresentados exemplos de sistemas de transmissão mecânica utilizados em pesquisa e na indústria.

2.4 Manipuladores robóticos pneumáticos

Nesta seção são descritos os trabalhos pesquisados durante a revisão bibliográfica que envolve o uso de cilindros pneumáticos como fonte de potência para robôs. É importante destacar que bibliografias sobre robôs pneumáticos são relativamente escassas, principalmente quando comparados aos robôs hidráulicos e elétricos.

Guihard et al, 1994, simularam um mecanismo antropomórfico com dois graus de liberdade. Para converter os movimentos lineares dos cilindros pneumáticos em movimentos rotacionais das juntas foram utilizados sistemas de transmissão mecânica por cabos e polia. Neste trabalho foram implementados controles adaptativos e por realimentação de estados, foi concluído que o último é facilmente implementável, podendo, entretanto, se desestabilizar em movimentos de alta velocidade e quando as condições iniciais apresentam valores diferentes

das da trajetória desejada (o que resulta em um tipo de problema conhecido como controle de sistema “não-colocado”).

Em Bobrow e McDonell, 1998 e McDonell, 1996 é apresentado um robô com três juntas rotacionais. Os autores desenvolveram um novo modelo baseado em resultados de ensaios experimentais para representar o comportamento estático das vazões na válvula proporcional. Os resultados do novo modelo foram mais próximo dos resultados experimentais do que os do equacionamento teórico clássico. Foi utilizada uma lei de controle hierárquica a qual apresentou resultados satisfatórios, que, segundo McDonell, 1996, mostram que robôs pneumáticos podem competir com os elétricos em algumas aplicações. Na Figura 2.2 são apresentadas algumas posições obtidas durante os testes.



Figura 2.2 – Manipulador antropomórfico com três graus de liberdade, adaptado de Bobrow e McDonell, 1998

Abou-Fayssal, 1997, dimensionou e construiu um robô pneumático cartesiano com dois graus de liberdade para ser utilizado como plataforma de estudo na universidade de Queen, Canadá. No trabalho foi realizada uma análise da influência do atrito e das técnicas para compensá-lo. O autor aplicou no protótipo três controladores distintos: controle proporcional de posição, controle por realimentação de estados com realimentação de posição, velocidade e de diferença de pressão ($PV\Delta P$) e com realimentação de posição, velocidade e aceleração (PVA) e concluiu que o controle PVA foi superior, tanto na precisão quanto na repetibilidade. Além disso, o robô pneumático proposto atingiu uma redução de custos de 50% a 70% em relação aos modelos com acionamento elétrico.

Xia, 2001, utilizou em seu trabalho a plataforma desenvolvida por Abou-Fayssal, 1997. Foram simulados e testados no protótipo dois tipos de controladores, um baseado na teoria de modos deslizantes e outro baseado na realimentação de estados. O autor descreve que o controle por realimentação de estados foi mais fácil de implementar, porém foi mais

difícil sintonizar seus ganhos que os do controle por modos deslizantes. Nos testes de seguimento de trajetória, o controle por modos deslizantes apresentou desempenho superior ao por realimentação de estados.

Mattiazzo et al, 2002, utilizaram controle por lógica *fuzzy* em um robô antropomórfico de seis graus de liberdade. Foram utilizados motores pneumáticos rotativos com redução em três de suas juntas: as duas primeiras e a última. Para as demais, foram utilizados cilindros pneumáticos com transmissão mecânica por pinhão/cremalheira. Válvulas pneumáticas direcionais binárias foram usadas, sendo acionadas por modulação de largura de pulso (PWM). A *performance* do robô foi considerada adequada dentro de todo espaço de trabalho, mesmo com a variação de carga transportada. Na Figura 2.3 está apresentada uma imagem do robô em operação.



Figura 2.3 – Manipulador antropomórfico com seis graus de liberdade, adaptado de Mattiazzo et al, 2002

Richardson et al, 2006, desenvolveram um robô fisioterápico com três graus de liberdade e geometria articulada. O dimensionamento de sua estrutura mecânica foi definido para alcançar um dado volume de trabalho requerido. Devido à necessidade de interação com pessoas, foi implementado um controle por impedância onde se controla paralelamente posição e força com o auxílio de uma célula de carga. Os ensaios mostraram que o sistema

possui potencial para realizar as tarefas propostas, porém os autores consideram que serão necessários mais estudos e desenvolvimentos até que o robô possa interagir com os pacientes. Na Figura 2.4 são ilustrados os detalhes das conexões dos atuadores com os elos do robô.

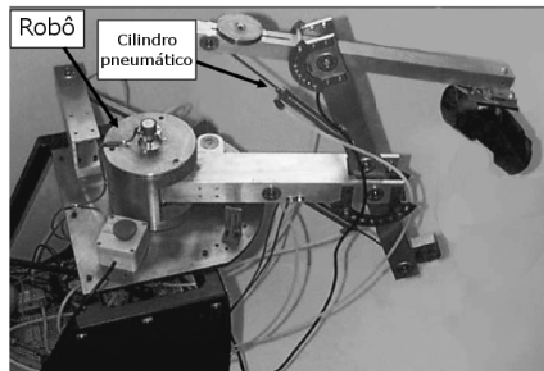


Figura 2.4 – Manipulador antropomórfico com três graus de liberdade, adaptado de Richardson et al, 2006

Em Hoshino e Krishantha, 2007, é apresentado o desenvolvimento de um modelo dinâmico baseado em técnicas experimentais. Neste mesmo trabalho é apresentada a aplicação de um controle linear proporcional, integral e derivativo (I-PD), onde a parcela integral atua sobre o desvio e as restantes agem diretamente sobre a realimentação. Os resultados mostraram que o sistema possui um curto tempo de resposta e um pequeno erro de posição, fazendo movimentos rápidos e suaves comparáveis ao braço humano.

Watanabe et al, 2008, utilizaram o mesmo robô de Hoshino e Kawabuchi, 2007, para testar um controle de flexibilidade. Neste mesmo trabalho são apresentados, além da modelagem cinemática, os parâmetros de Denavit Hartenberg e o equacionamento dos sistemas de transmissão mecânica das juntas. A Figura 2.5 apresenta a estrutura do manipulador utilizado no trabalho.

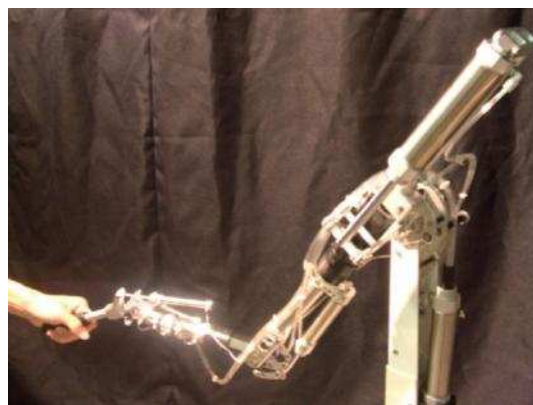


Figura 2.5 – Manipulador antropomórfico com sete graus de liberdade adaptado de Watanabe et al, 2008

Frasson, 2007, apresentou o projeto e simulações de um robô cartesiano pneumático de três eixos obtidas a partir de um modelo baseado na teoria da dinâmica de servoposicionadores pneumáticos apresentada em Perondi, 2002. Neste robô foi implementado um controle por modos deslizantes. Os resultados das simulações mostraram que com o controlador proposto o robô sofre pouca influência da variação da massa transportada, porém a velocidade de deslocamento influencia muito na precisão do efetuador final. A Figura 2.6 apresenta o robô durante simulação no ambiente gráfico desenvolvido.

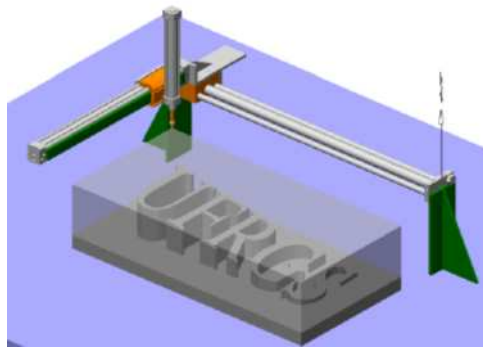


Figura 2.6 – Manipulador antropomórfico com três graus de liberdade, adaptado de Frasson, 2007

3. UNIDADE TÉCNICA DE ESTRUTURA MECÂNICA DO MANIPULADOR

A unidade técnica de estrutura mecânica do manipulador pneumático proposto envolve os procedimentos e análises que balizaram as escolhas da geometria e dos sistemas de transmissão mecânica. Também são obtidos os dados do manipulador, a partir de catálogos e da sua modelagem geométrica em software CAD 3D, para serem utilizados na criação do modelo matemático.

3.1 Requisitos de projeto

O desenvolvimento do manipulador pneumático foi feito baseado em uma pesquisa realizada em uma fábrica de ferramentas manuais, citada na Seção 1.1, com o intuito de levantar subsídios para ações visando automatizar os postos de trabalho onde são executadas atividades repetitivas e insalubres.

Estas atividades consistem, principalmente, na manipulação de peças para alimentação de máquinas. A precisão necessária para as tarefas é relativamente baixa e erros de posição final podem, muitas vezes, ser corrigidos pelo uso de dispositivos como garras e chamadores. Segundo os profissionais da empresa, um desvio de posição final de ± 2 mm é considerado aceitável pelos padrões utilizados pela empresa.

A partir da análise da produção, foi verificado que as peças produzidas possuem massas relativamente pequenas, como mostra a Figura 3.1. Peças de até 500 g compõem 89,25% da produção e outros 5,58% abrangem peças de 500 g a 1 kg.

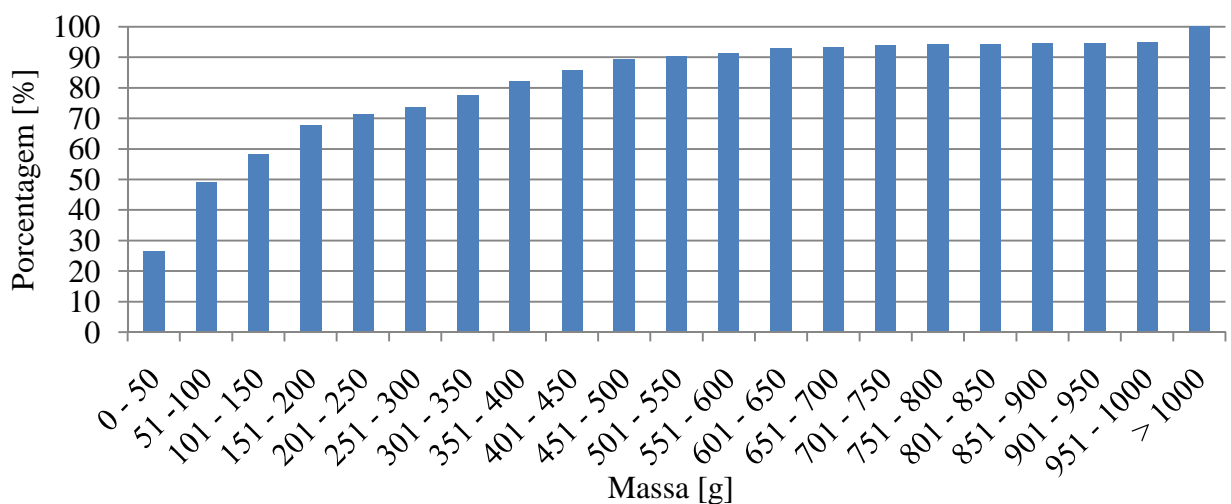


Figura 3.1 – Gráfico da porcentagem acumulada para diferentes massas das peças

O volume de trabalho é definido a partir da norma ABNT 9050:2004 [ABNT, 2004], que referencia os alcances manuais nos postos de trabalho, como apresentado na Figura 3.2. Foi observado que a principal posição de trabalho é do profissional sentado. Por isso, será considerada para a altura do volume de trabalho a diferença entre as distâncias G2 (1,20 m) e E2 (0,65 m) da Figura 3.2, o qual se refere ao alcance máximo confortável de uma pessoa de estatura média.

A norma também apresenta três situações para o alcance no plano horizontal do volume de trabalho, como mostra a Figura 3.3. O plano formado pelas distâncias A1 (1,50 m) e A2 (0,50 m) abrange funções eventuais onde a pessoa deve trabalhar com o braço estendido. As dimensões B1 (1,00 m) e B2 (0,40 m) representam o plano para atividades sem necessidade de precisão. Para atividades por tempo prolongado, a norma define um plano com dimensões C1 (0,35 m) e C2 (0,25 m).

Para o plano horizontal do volume de trabalho foi definida a área de 1 m por 0,40 m por representar atividades sem necessidade de maior precisão, como encontradas na indústria pesquisada.

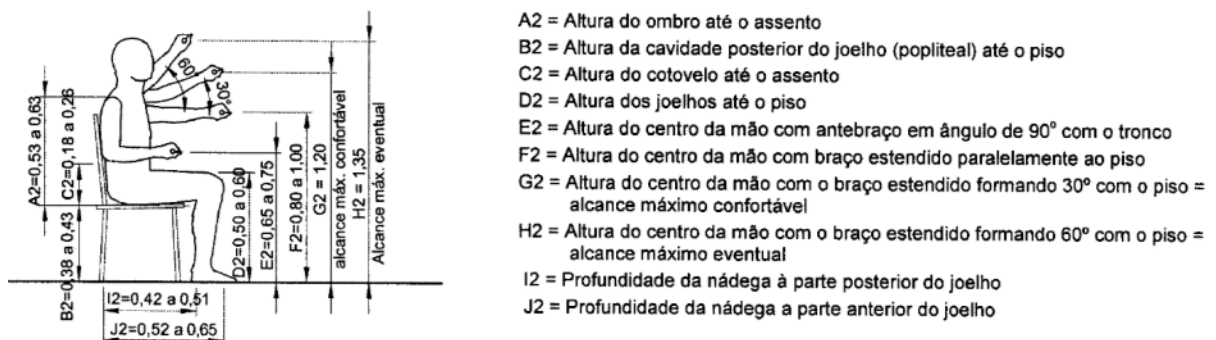


Figura 3.2 – Alcance frontal manual (pessoa sentada) [ABNT, 2004]

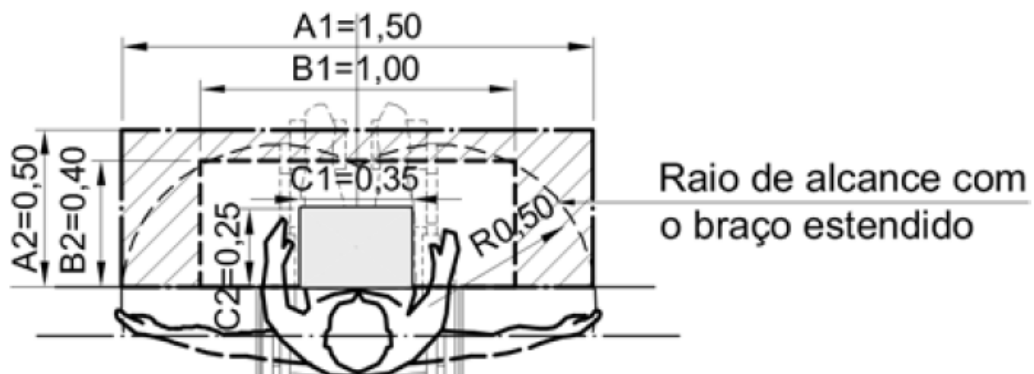


Figura 3.3 – Alcance no plano horizontal (pessoa sentada) [ABNT, 2004]

Como na fábrica de ferramentas considerada existe uma grande gama de produtos, é necessário que a automação utilizada possua alta flexibilidade de aplicação. Um dos parâmetros importantes para este requisito é o número de graus de liberdade do manipulador. O manipulador deve ter 3 graus de liberdade, para alcançar todo o volume de trabalho requerido, associados a 2 graus de liberdade para orientação da garra durante a obtenção e descarte de peças e alimentação de equipamento. Assim, o uso de um robô com 5 graus de liberdade com o auxílio de esteiras de alimentação abrange um grande número das atividades encontradas.

A Tabela 3.1 resume os requisitos básicos considerados necessários para o desenvolvimento do manipulador acionado pneumaticamente.

Tabela 3.1 – Requisitos básicos de projeto

Precisão do efetuator final [mm]	± 2
Massa deslocada [kg]	1
Volume de trabalho (largura x profundidade x altura) [m]	1 x 0,4 x 0,55
Número de graus de liberdade	5

3.2 Estrutura mecânica do manipulador robótico pneumático

O projeto da estrutura mecânica do manipulador foi fundamentado principalmente na escolha da melhor geometria adequada às tarefas a serem realizadas, associando os requisitos necessários com os equipamentos pneumáticos disponíveis no Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC) da UFRGS. Também se procurou desenvolver uma estrutura de fácil construção e montagem baseada em equipamentos comerciais.

A pesquisa bibliográfica, apresentada na Seção 2.4, mostrou que as principais geometrias dos robôs que utilizam atuação pneumática são cartesianas ou antropomórficas.

Apesar de a geometria cartesiana ser apropriada para a aplicação de atuadores pneumáticos por proporcionar um acionamento direto das juntas prismáticas e possuir uma elevada rigidez, seu uso se tornou inviável por causa de sua baixa capacidade de atingir diferentes orientações. Além disso, devido às peculiaridades geométricas, a sua escolha acarretaria em um elevado custo para adaptação física dos postos de trabalho.

O robô antropomórfico, largamente utilizado na indústria devido a sua alta flexibilidade de aplicação, possui uma baixa rigidez e um elevado acoplamento dinâmico entre os graus de liberdade, que tornam mais difícil o seu controle, ainda mais quando associados às não-linearidades inerentes aos sistemas pneumáticos de atuação.

Baseado nestas considerações, optou-se por uma opção intermediária, o robô cilíndrico, que possui juntas prismáticas, uma destreza suficiente para as atividades propostas e um baixo acoplamento dinâmico entre os graus de liberdade. Segundo Ollero, 2001 apud Rios, 2009, esta configuração é aconselhada para trabalhar em uma célula flexível com o robô posicionado no centro e atendendo a várias máquinas dispostas radialmente.

O robô proposto possui 5 graus de liberdade com suas juntas na seqüência R-P-P-R-R, onde R representa uma junta rotacional e P uma junta prismática. A Figura 3.4 apresenta uma representação simplificada dos elos e juntas do robô pneumático.

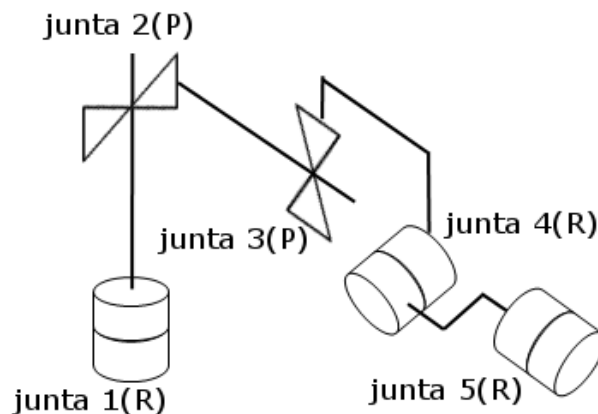


Figura 3.4 – Representação simplificada dos elos e juntas do robô

O uso de cilindros pneumáticos, disponíveis e selecionados para o projeto, apresentados na próxima seção, aliado aos resultados de diversos estudos na área de servoposicionamento, levou à necessidade da aplicação de sistemas de transmissão mecânica nas juntas rotacionais.

Para as juntas 1 e 4 é proposto o uso de sistemas de transmissão por cabos e polias, por proporcionarem pequena folga e construção simples. Esta solução foi observada em diversos trabalhos, ver Apêndice A.

O sistema de transmissão por cabos e polias é composto basicamente por uma polia conectada à junta e cabos sob tração presos à polia e ao êmbolo do cilindro pneumático, conforme mostra a Figura 3.5. A relação de transmissão é dada pelo diâmetro da polia.

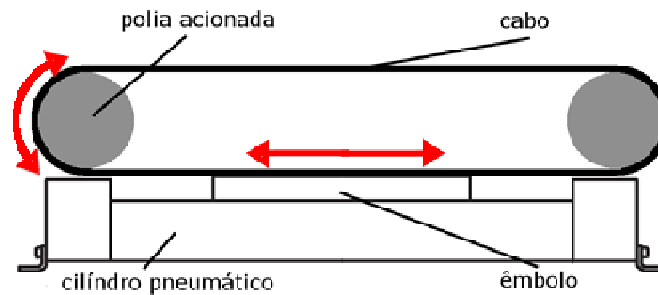


Figura 3.5 – Sistema de transmissão mecânica por cabos e polias proposto

Para a junta 5 foi proposto o uso de um sistema de fuso e came conforme o apresentado em Hoshino e Kawabuchi, 2006, ver Figura A.5. Este sistema é compacto e de fácil construção.

O sistema é composto por uma came conectada à haste do cilindro, guiada para evitar sua rotação. A came é seguida por um fuso preso ao efetuador final. A relação de transmissão é dada pelo passo do fuso.

3.3 Equipamentos pneumáticos

Uma das limitações encontradas na realização do projeto do manipulador robótico foi o dimensionamento da estrutura que, necessariamente, teve que ser executada a partir dos equipamentos pneumáticos disponíveis no LAMECC/UFRGS. Os componentes descritos a seguir são necessários para o desenvolvimento do modelo matemático.

Os atuadores lineares foram selecionados, principalmente, de acordo com o volume de trabalho especificado. Foram definidos cinco cilindros pneumáticos de dupla ação, quatro sem haste e um cilindro com haste.

Cilindros sem haste foram aplicados, porque são mais compactos que os com haste e possuem uma dinâmica simétrica [Abou-Fayssal, 1997].

Aos cilindros atuadores das juntas 2 e 3 foram acoplados guias lineares devido ao maior esforço mecânico a que são submetidos. O modelo de guias proposto para aplicação, KF Festo [Festo, 2010], é dotado de rolamentos por esferas recirculantes que proporcionam um baixo atrito.

As especificações técnicas relevantes de cada atuador para suas respectivas juntas são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Especificações técnicas dos cilindros pneumáticos

Junta	1	2	3	4	5
Modelo/ Fabricante	DGPIL- 32/Festo	DGPIL- 32/Festo	DGPIL- 32/Festo	DGPIL- 32/Festo	DSNU- 20/Festo
Curso [m]	0,45	0,45	0,30	0,30	0,10
Haste	Sem haste	Sem haste	Sem haste	Sem haste	Com haste
Diâmetro do êmbolo [mm]	32	32	32	32	20
Guia/tipo	Sem guia	Com guia/KF	Com guia/KF	Sem guia	Sem guia
Pressão de operação [bar]	4 a 8	4 a 8	4 a 8	4 a 8	4 a 8

A válvula definida para a aplicação no projeto é a servoválvula direcional da Festo modelo MPYE-5-1/8. Devendo ser utilizada uma para cada cilindro pneumático. Esta válvula foi selecionada por ser do tipo centro fechado e possuir um pequeno tempo de resposta (ver Tabela 3.3), por já ter sido largamente utilizada e ter seu modelo detalhado em outros trabalhos [Vieira, 1998; Perondi, 2002; Frasson, 2007]. Suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Especificações técnicas da válvula

Modelo/fabricante	MPYE-5-1/8 / Festo
Tipo	5/3 vias
Pressão de trabalho [bar]	0 a 10
Vazão nominal [l/min]	700
Temperatura do fluido de trabalho [°C]	5 a 40
Temperatura ambiente [°C]	0 a 50
Tensão teórica de trabalho [Vdc]	0 a 10
Tempo de resposta na faixa (2 a 8Vdc) [ms]	5

3.4 Modelagem geométrica

Neste trabalho foi utilizado o software de modelamento de sólidos SolidEdge para desenvolver a modelagem geométrica dos cilindros e sistemas de transmissão mecânica que

formam a estrutura do manipulador. O modelo proposto pode ser visto em perspectiva na Figura 3.6 e em detalhes no Apêndice B.

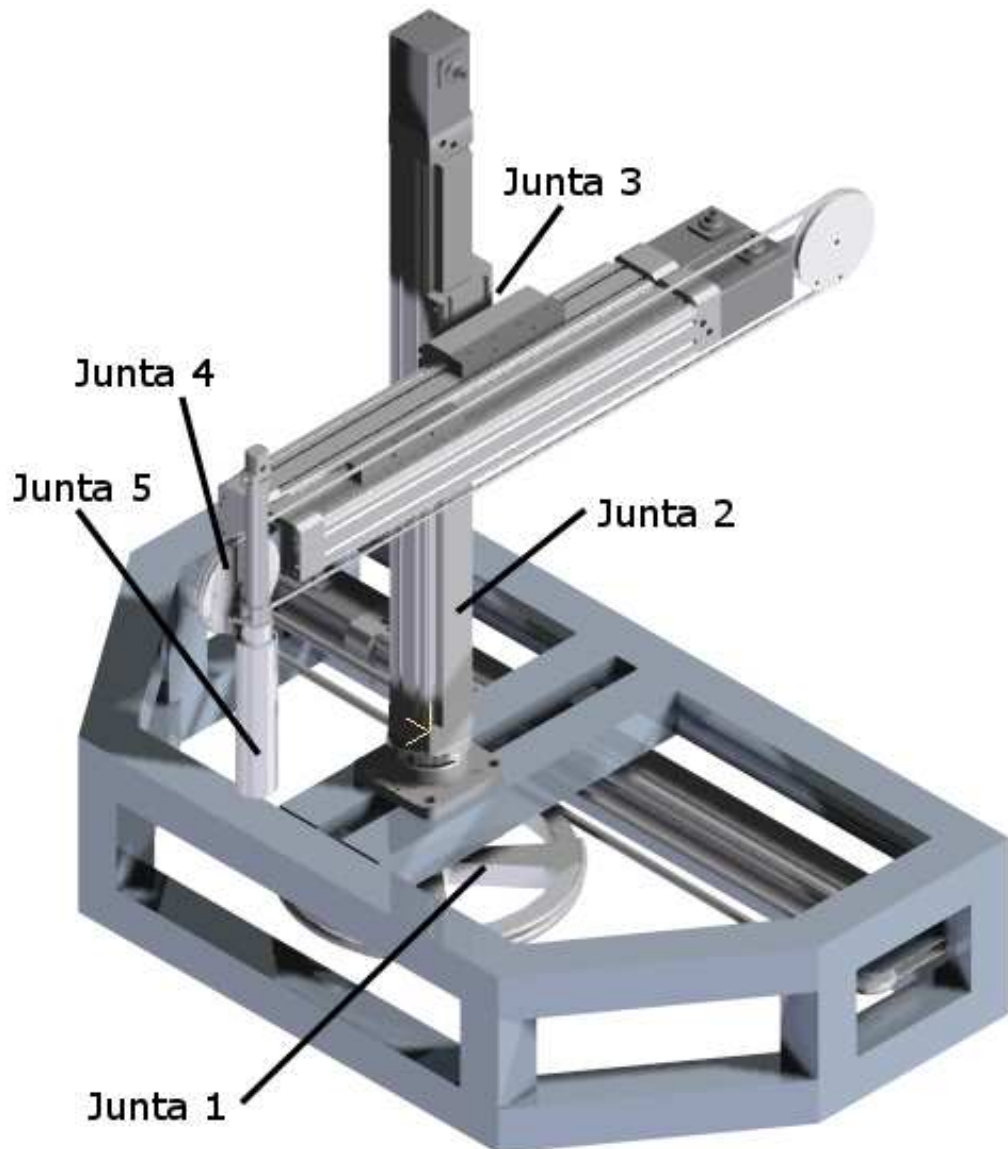


Figura 3.6 – Modelagem geométrica em perspectiva do manipulador

A Figura 3.7 apresenta o sistema de atuação proposto para a primeira junta. O cilindro pneumático sem haste utilizado possui um curso de 0,45 m e está conectado a um sistema de transmissão mecânica por cabo e polias. A polia acionada possui um diâmetro de 0,28 m para melhor aproveitamento do curso do cilindro.

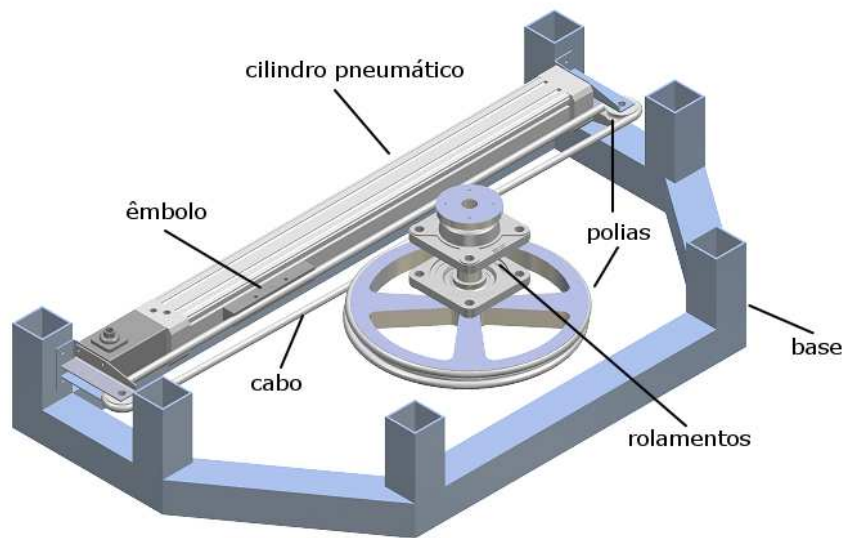


Figura 3.7 – Modelagem geométrica do sistema de atuação da primeira junta

Para as juntas 2 e 3, do tipo prismática, foram utilizados dois cilindros pneumáticos sem haste unidos transversalmente pelo êmbolo, como mostra a Figura 3.8 .

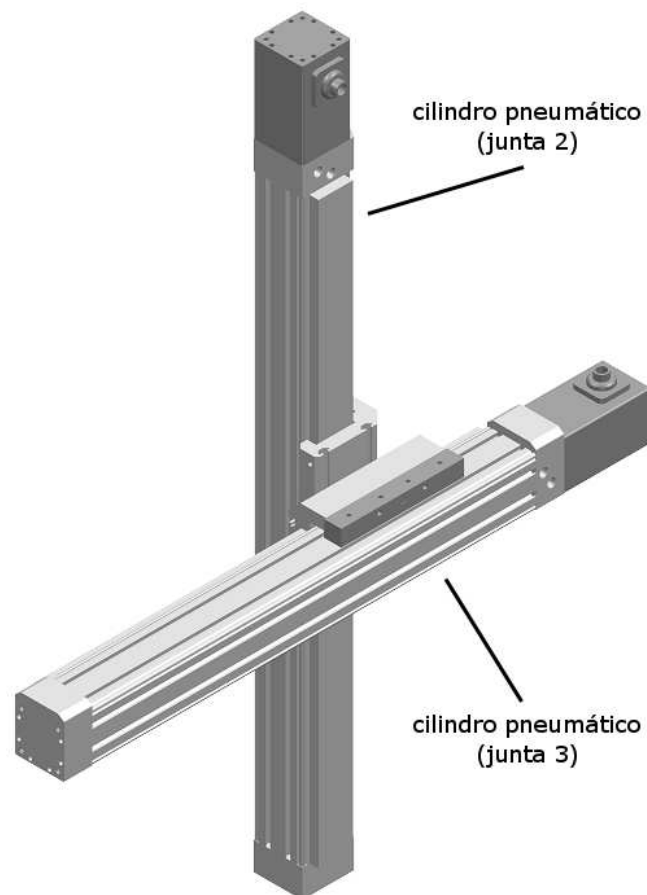


Figura 3.8 – Modelagem geométrica das juntas 2 e 3

Na Figura 3.9 é apresentado o sistema desenvolvido para acionar a quarta junta. No sistema da quarta junta, o cilindro pneumático sem haste de 0,30 m possui funções estruturais. Esta característica proporciona uma redução da massa do elo. A polia acionada possui um diâmetro de 0,28 m para melhor aproveitamento do curso do cilindro.

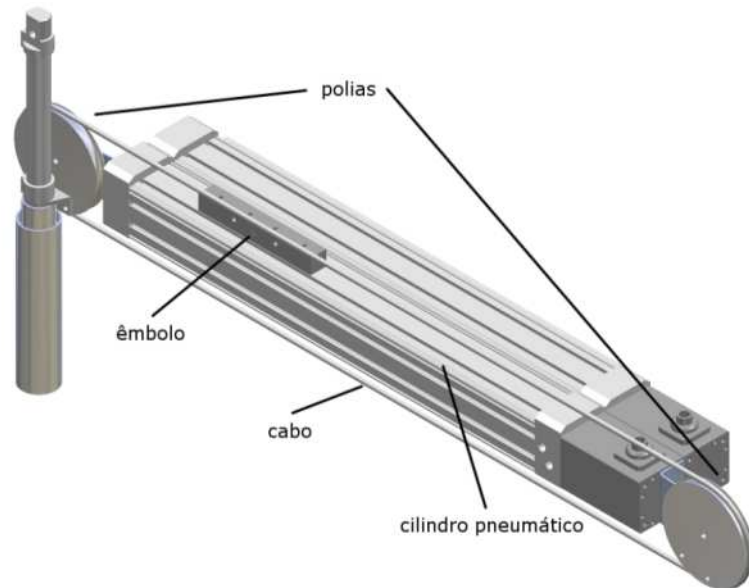


Figura 3.9 – Modelagem geométrica do sistema de atuação da quarta junta

A Figura 3.10 mostra o sistema de transmissão mecânica projetado para a atuação da quinta junta, baseado no sistema de came e fuso. O fuso possui um passo de 0,09 m para melhor aproveitamento do curso do cilindro.

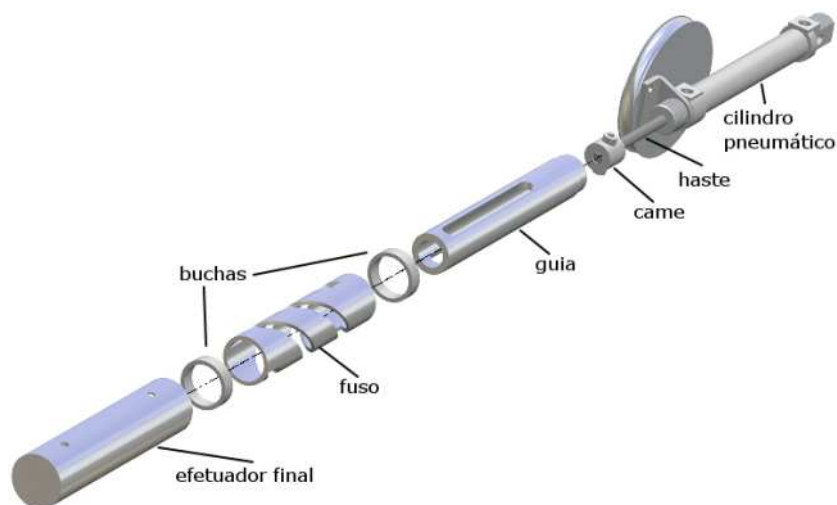


Figura 3.10 – Modelagem geométrica do sistema de atuação da quinta junta

3.5 Determinação dos parâmetros geométricos do modelo

Os valores de momento de inércia, posição do centro de massa e massa de cada elo, obtidos por meio da modelagem geométrica, são necessários para a implementação da modelagem matemática. Estes dados estão dispostos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros geométricos dos elos

Elo	1	2	3	4	5
Posição x do centro de massa (\bar{x}) [m]	-0,00245	0,1415	-0,00130	0	0
Posição y do centro de massa (\bar{y}) [m]	-0,0043	-0,00806	-0,40027	-0,00526	0
Posição z do centro de massa (\bar{z}) [m]	0,2451	-0,00806	0,06477	0,04698	-0,08056
Momento de inércia em relação ao plano x (I_{xx}) [kgm ²]	1,1468	0,0023	1,7568	0,0132	0,0146
Momento de inércia em relação ao plano y (I_{yy}) [kgm ²]	1,1473	0,0222	0,0473	0,0132	0,0146
Momento de inércia em relação ao plano z (I_{zz}) [kgm ²]	0,0228	0,0222	1,7141	0,0003	0,0006
Produto de inércia em relação aos planos x-y (I_{xy}) [kgm ²]	0	-0,0008	0,0038	0	0
Produto de inércia em relação aos planos x-z (I_{xz}) [kgm ²]	-0,0064	-0,0014	0	0	0
Produto de inércia em relação aos planos y-z (I_{yz}) [kgm ²]	-0,0011	0	-0,2169	0	0
Massa (m) [kg]	7,21	1,01	8,52	1,19	1,58

As figuras 3.11 a 3.15 apresentam a modelagem geométrica dos elos com seus respectivos sistemas de coordenadas.

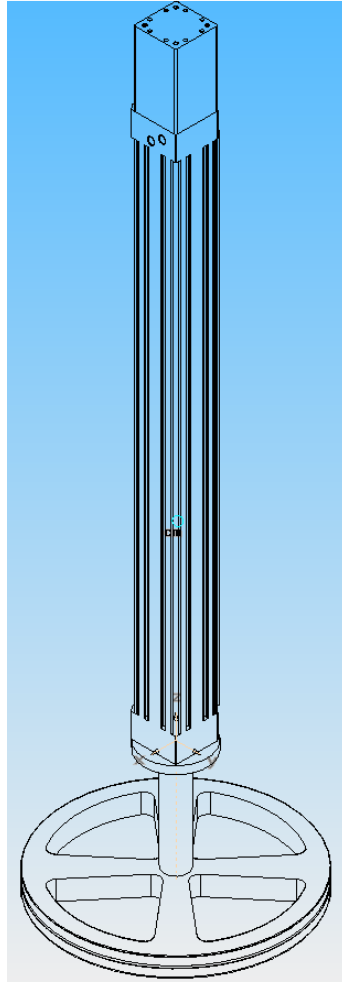


Figura 3.11 – Modelagem geométrica do elo 1 e sistema de coordenadas

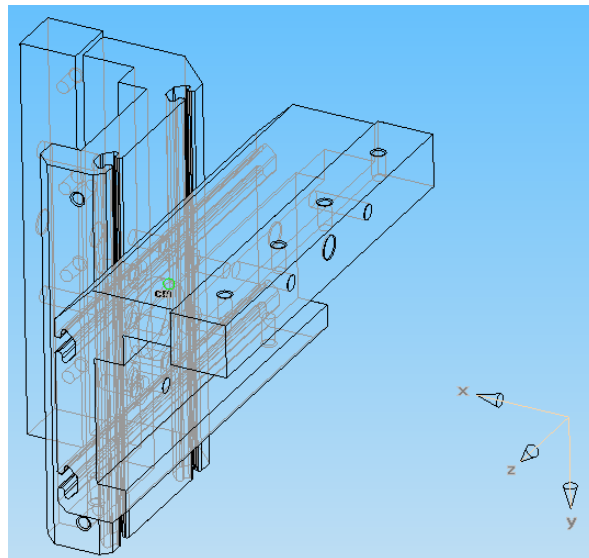


Figura 3.12 – Modelagem geométrica do elo 2 e sistema de coordenadas

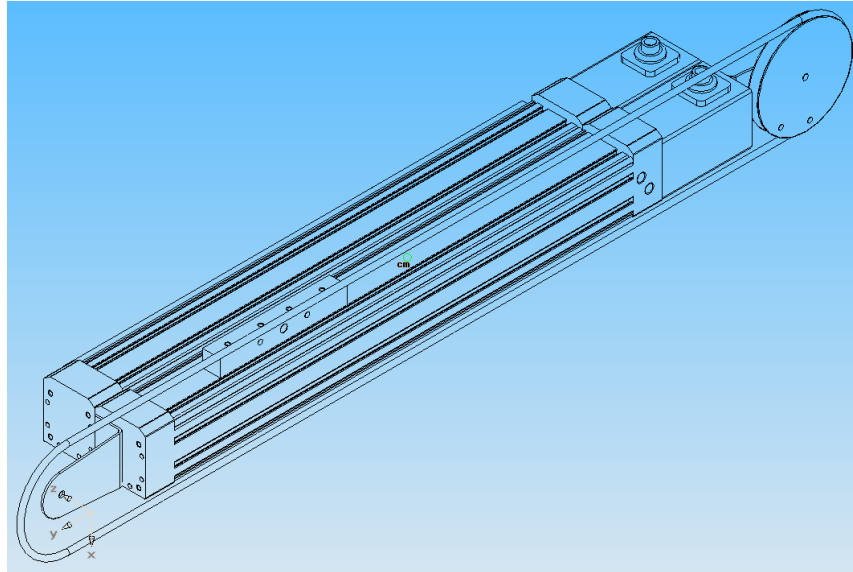


Figura 3.13 – Modelagem geométrica do elo 3 e sistema de coordenadas

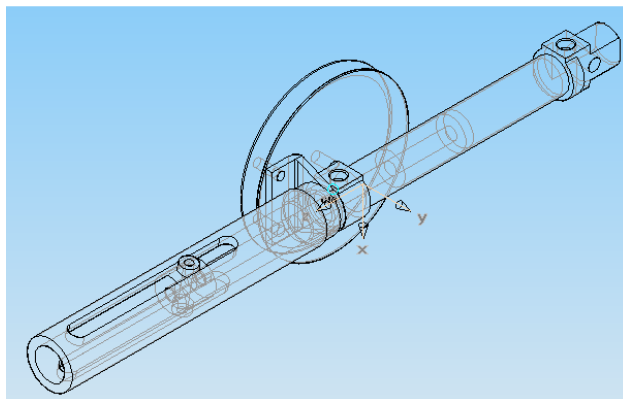


Figura 3.14 – Modelagem geométrica do elo 4 e sistema de coordenadas

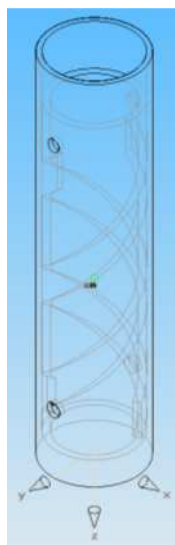


Figura 3.15 – Modelagem geométrica do elo 5 e sistema de coordenadas

4. UNIDADE TÉCNICA DE MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1 Cinemática

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento do equacionamento da cinemática direta e inversa do robô.

A cinemática trata do estudo do movimento sem serem consideradas as forças que o provocam. O problema da cinemática direta do robô consiste na determinação de sua posição e orientação a partir das configurações das juntas. A cinemática inversa visa determinar as variáveis das juntas correspondentes a uma dada posição e orientação do efetuador final.

A posição e orientação dos elos que compõem o manipulador podem ser determinadas pelo uso de sistemas de coordenadas convenientemente escolhidos e fixados aos mesmos. Esta definição deve considerar a clareza, facilidade de representação e implicações computacionais, possibilitando que sistemas de geometria complexa possam ser representados por um número reduzido de parâmetros.

A notação de Denavit Hartenberg (DH) (Fu et al, 1987) é um método sistemático de representação das relações cinemáticas entre um elo e seus adjacentes, para sua determinação são necessários quatro parâmetros por elo. A convenção para determinação dos sistemas de coordenadas e dos parâmetros de DH é apresentada a seguir.

- a) O sistema de coordenadas i é solidário ao elo i , onde i varia de 0 (para base), a n (para o efetuador) em um manipulador com n graus de liberdade. A junta i encontra-se no lado do elo i mais próximo a base;
- b) A coordenada z_i encontra-se alinhado ao eixo de movimento da junta $i+1$. A origem do sistema de coordenadas i localiza-se na intersecção de z_i com z_{i-1} ou da normal entre z_i e z_{i-1} com z_i .
- c) A direção do eixo coordenado x_i é estabelecida pela normal entre os eixos z_{i-1} e z_i e a coordena y_i completa o sistema de coordenada dextrógiro;
- d) A distância entre elos adjacentes, parâmetro d_i , é o comprimento entre a origem do sistema de coordenadas $i-1$ e a intersecção do eixo z_{i-1} com x_i ao longo do z_{i-1} ;
- e) O comprimento do elo i , parâmetro a_i é dado pela distância entre a intersecção do eixo z_{i-1} com x_i e o sistema de coordenadas i seguindo o eixo x_i ;
- f) O ângulo entre elos adjacentes, parâmetro Θ_i é o valor de rotação entre x_{i-1} e x_i em relação a z_{i-1} ;

- g) O ângulo de giro do elo i , parâmetro α_i é estabelecido pelo ângulo da coordenada z_{i-1} e z_i em relação ao eixo x_i .

Na Figura 4.1 é representada graficamente a notação de Denavit Hartenberg.

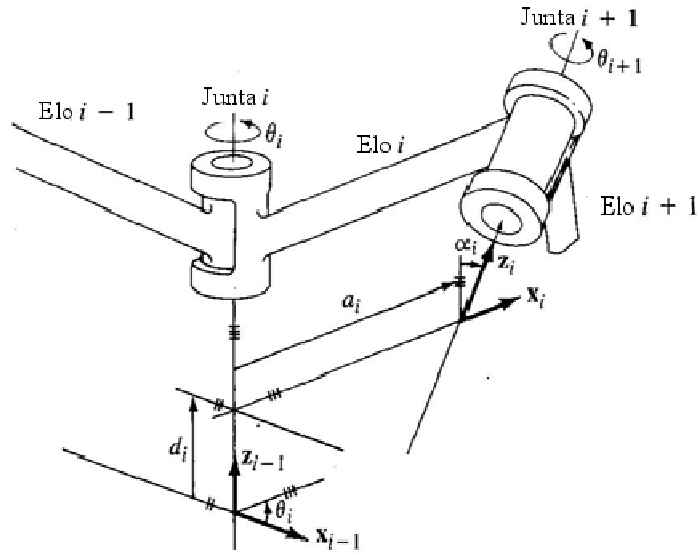


Figura 4.1 – Sistemas de coordenadas dos elos e parâmetros de DH, adaptado de Fu et al, 1987

Matematicamente, esta seqüência pode ser descrita pelo seguinte produto de matrizes:

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}\mathbf{T}_i &= \mathbf{T}_{z,d} \mathbf{T}_{z,\theta} \mathbf{T}_{z,a} \mathbf{T}_{z,\alpha} = \\
 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} &\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\text{sen}\alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \text{sen}\theta_i & \text{sen}\alpha_i \text{sen}\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\text{sen}\alpha_i \cos\theta_i & a_i \text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

onde ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$ é a matriz de transformação que relaciona uma dada posição e orientação no sistema de coordenadas i com o sistema de coordenadas $i-1$

Para se obter a matriz de transformação global e a partir dela definir a posição e orientação do efetuador final com relação ao sistema de coordenadas inercial, é realizada a multiplicação das sucessivas matrizes de transformação do manipulador de grau n .

$${}^0 T_i = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots {}^{i-1} T_i = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{s} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

onde i varia de 1 a n . Os vetores \mathbf{n} , \mathbf{s} e \mathbf{a} formam a matriz de orientação e o vetor \mathbf{p} apresenta a posição do efetuador, os mesmos são representados graficamente na Figura 4.2.

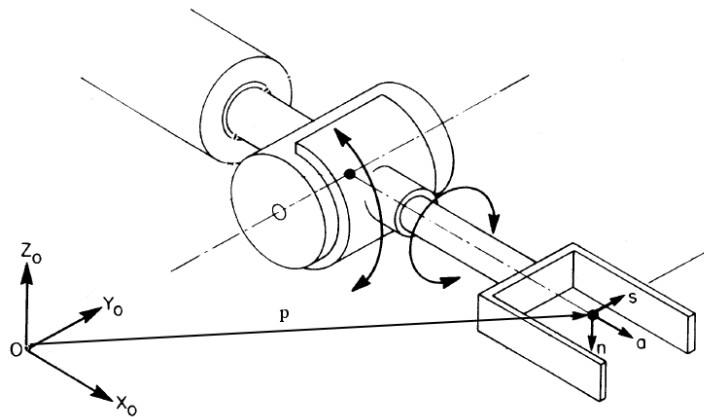


Figura 4.2 – Sistema de coordenadas do efetuador e vetores \mathbf{n} , \mathbf{s} e \mathbf{a} , adaptado de Fu et al, 1987

Para auxiliar a análise da estrutura do manipulador pneumático, a Figura 4.3 apresenta a representação simplificada dos elos e juntas com os sistemas de coordenadas definidos pela notação de DH, como em [Watanabe et al, 2008] e [Ali et al, 2010].

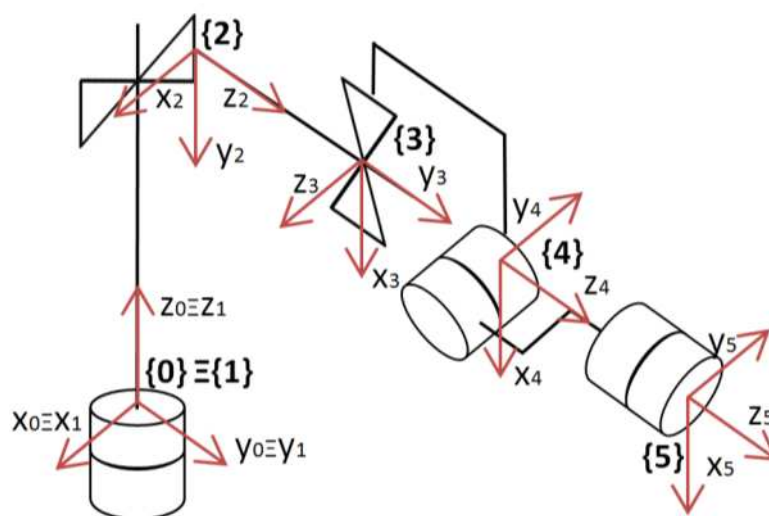


Figura 4.3 – Sistemas de coordenadas na representação simplificada dos elos e juntas do robô pneumático¹

¹ Na Figura 4.3 os sistemas de coordenadas da origem {0} e do eixo 1 {1} são representados coincidentemente para melhor visualização, porém existe um movimento relativo entre os mesmos

A partir do modelo geométrico apresentado na Seção 3.2 se pode determinar os parâmetros de Denavit Hartenberg e definir suas matrizes homogêneas de transformação.

Tabela 4.1 – Parâmetros de Denavit Hartenberg do robô pneumático

Elos	α [rad]	a [m]	Θ [rad]	d [m]
1	0	0	Θ_1	0
2	$-\pi/2$	-0,192	0	d_2
3	$\pi/2$	0	$\pi/2$	d_3
4	$-\pi/2$	0	Θ_4	0
5	0	0	Θ_5	0,209

Os parâmetros Θ e d são as variáveis das juntas rotacionais e prismáticas, respectivamente, do sistema. A seguir estão apresentadas as matrizes de transformação referente a cada parte do robô:

Base:

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Translação vertical:

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -0,192 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Translação horizontal:

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Arfagem do efetuador:

$${}^3\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\text{sen}\theta_4 & 0 \\ \text{sen}\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Rotação do efetuador:

$${}^4\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\text{sen}\theta_5 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,209 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Realizando a multiplicação das matrizes de transformação apresentada na Equação (4.3), são obtidas a posição e orientação do efetuador final

$${}^0\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c\theta_1 s\theta_5 - c\theta_5 s\theta_1 s\theta_4 & s\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 - c\theta_1 c\theta_5 & -c\theta_4 s\theta_1 & -0,192c\theta_1 - 0,209c\theta_4 s\theta_1 - d_3 s\theta_1 \\ c\theta_1 c\theta_5 s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_5 & -c\theta_5 s\theta_1 - c\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 & c\theta_1 c\theta_4 & 0,209c\theta_1 c\theta_4 - 0,192s\theta_1 + d_3 c\theta_1 \\ -c\theta_4 c\theta_5 & c\theta_4 s\theta_5 & s\theta_4 & d_2 + 0,209s\theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Onde, $c\theta_i = \cos\theta_i$ e $s\theta_i = \text{sen}\theta_i$.

O espaço de trabalho do manipulador robótico pode ser obtido pelas equações do vetor de posição \mathbf{p} . As condições limitantes para os valores das juntas são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores limites das juntas

Junta	Valores limites
1	$(-\pi/2 \ \pi/2)$ [rad]
2	$(0 \ 0,45)$ [m]
3	$(0 \ 0,3)$ [m]
4	$(-\pi/2 \ \pi/2)$ [rad]
5	$(0 \ 2\pi)$ [rad]

Nas figuras 4.4 a 4.6 é apresentada a representação dimensional do espaço de trabalho e suas vistas auxiliares para maior facilidade de visualização.

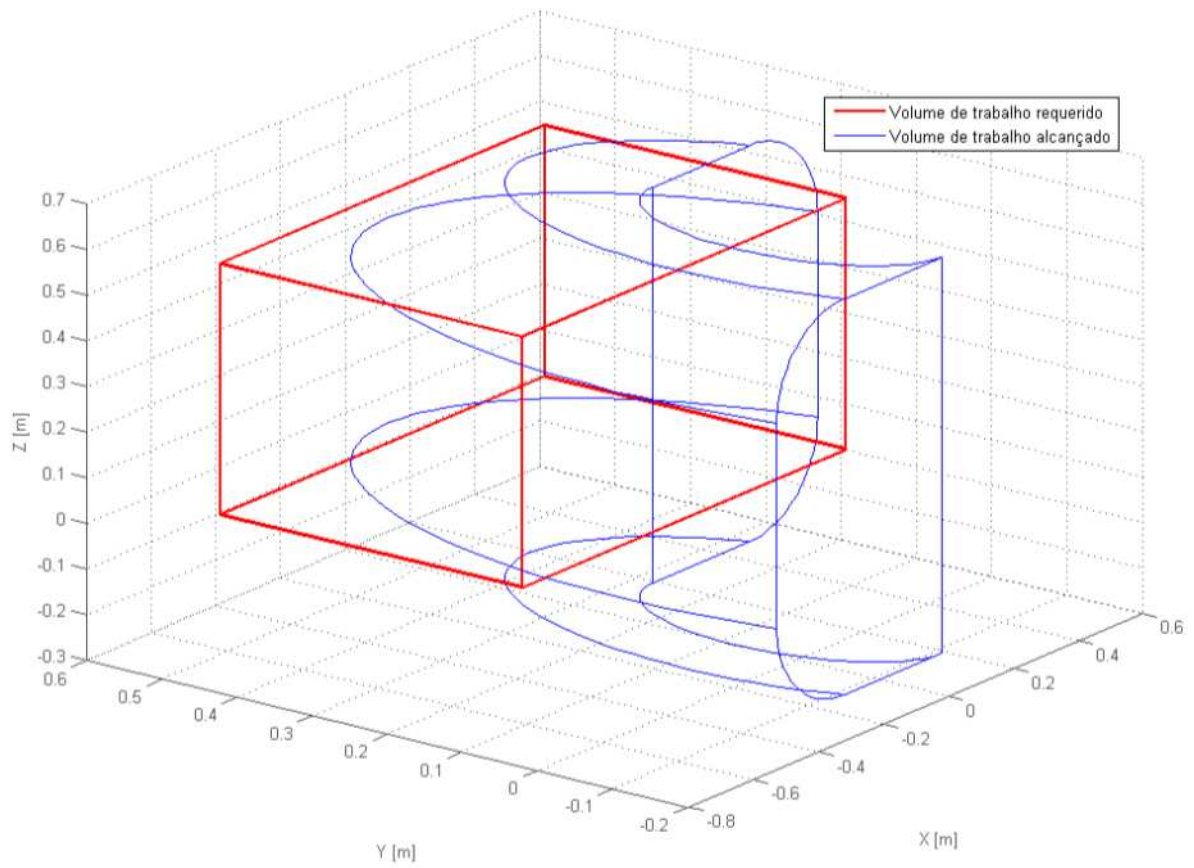


Figura 4.4 – Representação dimensional do espaço de trabalho

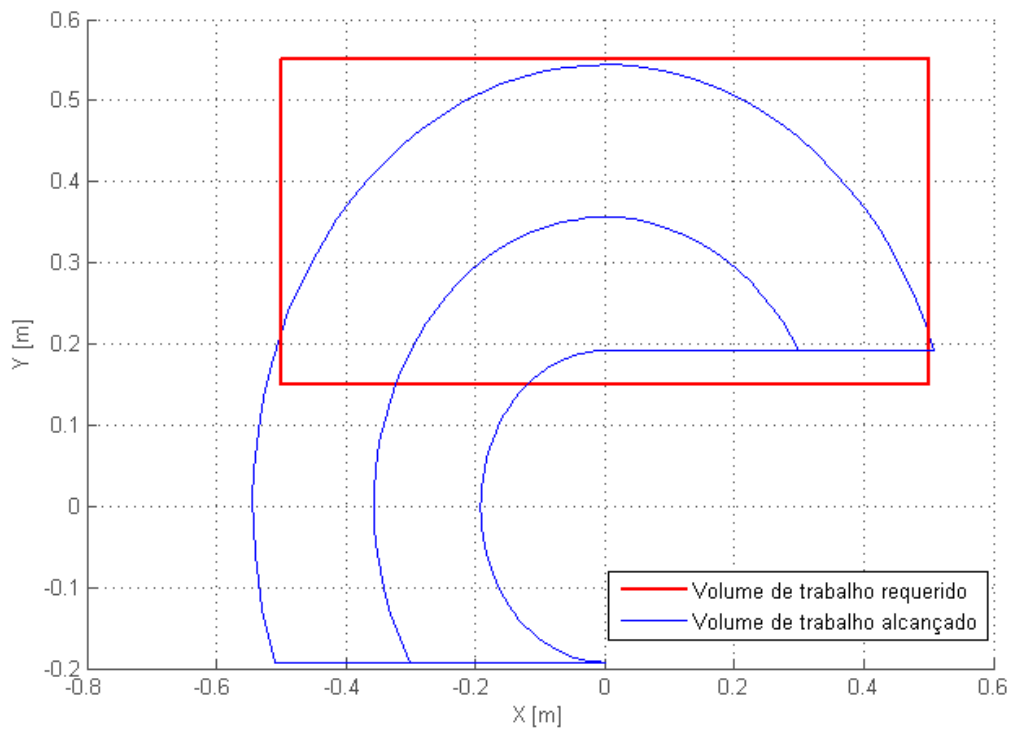


Figura 4.5 – Vista do plano x-y do espaço de trabalho

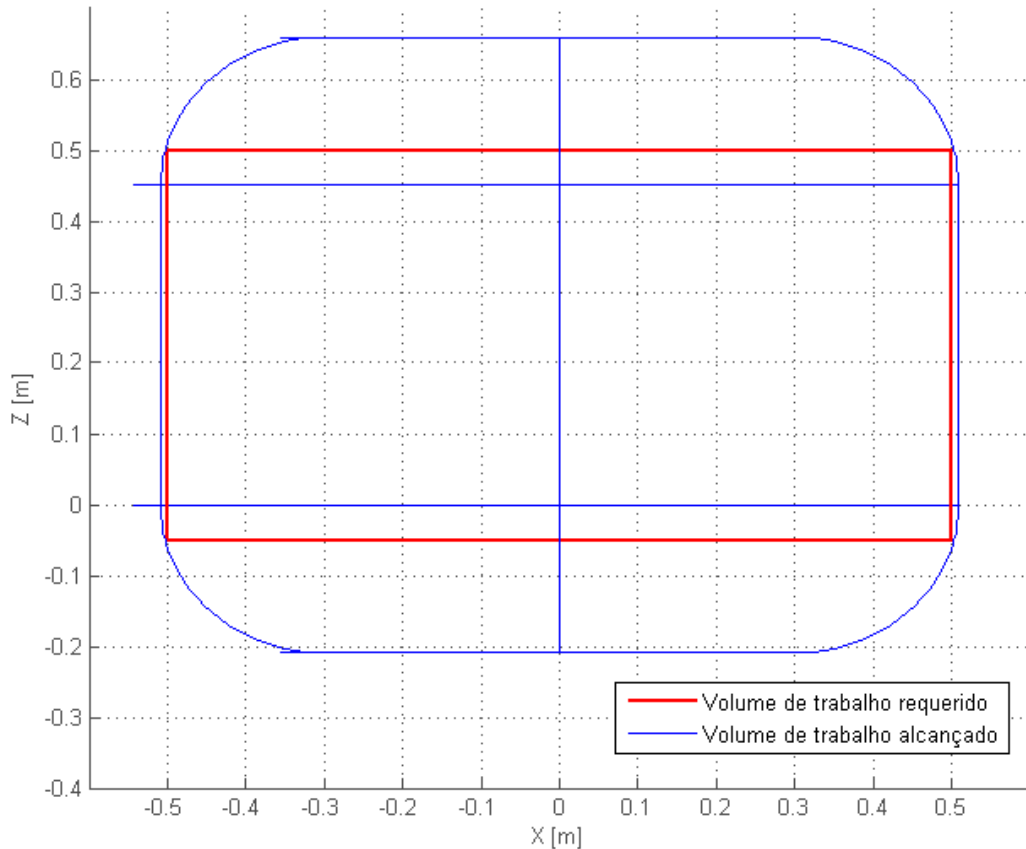


Figura 4.6 – Vista do plano x-z do espaço de trabalho

O espaço das juntas é o espaço definido por todos os vetores de variáveis de juntas do manipulador. Normalmente, as variáveis dos atuadores não equivalem às das juntas, pois existem sistemas de transmissão mecânica intermediários.

A relação de transmissão do movimento por meio do elemento acionador é dada por:

$$\mathbf{q} = \mathbf{N}(\mathbf{y} - \boldsymbol{\lambda}) \quad (4.9)$$

onde \mathbf{q} é o vetor de variáveis generalizadas das juntas, \mathbf{y} é o vetor de variáveis dos atuadores, \mathbf{N} é a matriz de fatores constantes dependentes do tipo de transmissão e $\boldsymbol{\lambda}$ é o vetor de *offset*.

Por utilizarem um sistema de transmissão mecânica, as juntas da base e de arfagem e de rolagem do efetuador necessitam da mudança de base de juntas para a de atuadores. Os elementos de \mathbf{N} e $\boldsymbol{\lambda}$ são obtidos do modelo geométrico pelo tamanho das polias e passo do fuso e considerando os êmbolos dos cilindros pneumáticos centrados com o robô na posição inicial, respectivamente. Os valores são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Fatores das relações de transmissão das juntas

Junta	N [rad/m]	λ [m]
Base	$\frac{1}{0,14}$	0,25
Arfagem do efetuador	$\frac{1}{0,05}$	0,15
Rolagem do efetuador	$\frac{2\pi}{0,09}$	0,05

O problema da cinemática inversa apresenta equacionamento mais elaborado que o da cinemática direta, pois podem ocorrer situações onde não existe solução ou, por outro lado, onde são possíveis duas ou mais soluções. Existem dois métodos de solução: analítica ou numérica.

O método numérico é baseado em técnicas iterativas, como a da pseudo-inversa do jacobiano e da transposta do jacobiano [Sciavicco e Siciliano, 2005] e o método dos mínimos quadrados amortecido [Wampler, 1986]. Os algoritmos numéricos utilizados para solucionar a cinemática inversa têm como principal vantagem o fato de apresentarem caráter geral e serem independentes do modelo do manipulador. Porém, como citado por Kucuk e Bingul, 2005, estes métodos são lentos, sua convergência não é garantida e dependem fortemente da estimativa inicial.

O método analítico, também conhecido como solução em forma fechada, leva à obtenção de todas as soluções existentes, permitindo identificar possíveis singularidades. Este método não é genérico como o numérico e é aplicável normalmente a robôs simples que possuem um grande número de parâmetros de D-H nulos [Romano e Dutra, 2002]. O método utiliza análise geométrica ou algébrica.

Na análise geométrica, a geometria espacial do manipulador é decomposta em diversos planos e, pelos elementos de geometria plana, é resolvido o equacionamento para os ângulos das juntas. Na análise algébrica, busca-se relacionar a posição e orientação desejada na forma de uma matriz homogênea com relação à matriz de transformação.

O método utilizado neste trabalho é o analítico, realizado por uma análise algébrica. Como é observado por meio da Equação 4.8, a matriz de transformação possui termos com apenas uma ou duas variáveis que podem ser igualados aos termos correspondentes na matriz homogênea de posição e orientação desejadas, como é apresentado na Equação (4.10).

$$\begin{bmatrix} -c\theta_1 s\theta_5 - c\theta_5 s\theta_1 s\theta_4 & s\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 - c\theta_1 c\theta_5 & -c\theta_4 s\theta_1 & -0,192c\theta_1 - 0,209c\theta_4 s\theta_1 - d_3 s\theta_1 \\ c\theta_1 c\theta_5 s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_5 & -c\theta_5 s\theta_1 - c\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 & c\theta_1 c\theta_4 & 0,209c\theta_1 c\theta_4 - 0,192s\theta_1 + d_3 c\theta_1 \\ -c\theta_4 c\theta_5 & c\theta_4 s\theta_5 & s\theta_4 & d_2 + 0,209s\theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{d_x} & s_{d_x} & a_{d_x} & p_{d_x} \\ n_{d_y} & s_{d_y} & a_{d_y} & p_{d_y} \\ n_{d_z} & s_{d_z} & a_{d_z} & p_{d_z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

A solução para o ângulo θ_4 é obtida igualando-se os termos na posição referente ao par ordenado (3,3) da matriz de transformação global e de posição e orientação desejada, como destacado na Equação (4.10).

$$\theta_4 = \text{sen}^{-1}(a_{d_z}) \quad (4.11)$$

A variável d_2 é obtida a partir da comparação dos termos localizados em (3,4) das matrizes da Equação (4.10).

$$d_2 = p_{d_z} - 0,209\text{sen}(\theta_4) \quad (4.12)$$

Para o ângulo θ_1 é utilizada a razão entre os termos localizados em (1,3) e (2,3) e para o ângulo θ_5 os valores de (3,2) e (3,1) como mostram as equações (4.14) e (4.15):

$$\theta_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{a_{d_x}}{a_{d_y}}\right) \quad (4.14)$$

$$\theta_5 = \tan^{-1}\left(\frac{s_{d_z}}{n_{d_z}}\right) \quad (4.15)$$

A incógnita d_3 é computada pela comparação dos termos localizados em (2,4) da matriz de transformação e de posição e orientação desejada.

$$d_3 = \frac{-0,209\cos(\theta_1)\cos(\theta_4) + 0,192\text{sen}(\theta_1) + p_{d_y}}{\cos(\theta_1)} \quad (4.16)$$

Destaca-se nas equações (4.14), (4.15) e (4.16) a existência de uma região dentro do espaço de trabalho ($\theta_1 = -\pi/2$, $\theta_1 = \pi/2$, $\theta_4 = -\pi/2$ e $\theta_4 = \pi/2$) onde não existe

solução para a cinemática inversa. Esses pontos são conhecidos como pontos de singularidade.

4.2 Dinâmica

A seguir são apresentadas as equações que regem a dinâmica do robô pneumático proposto. O equacionamento fornecerá o modelo físico dinâmico do robô para a posterior implementação computacional, simulação e controle.

O estudo da dinâmica do robô é realizado com sua divisão em dois subsistemas: o sistema pneumático, composto pelas válvulas direcionais proporcionais, tubulações e cilindros e o sistema mecânico, formado pelos elos e juntas. Como os mecanismos de transmissão de movimento das juntas foram concebidos para minimizar as folgas, a conexão entre os dois subsistemas é considerada uma simplificação onde a conexão é rígida.

Os sistemas físicos reais são não-lineares e têm infinitos graus de liberdade, o que torna impossível sua total representação matemática. Por isso, simplificações são necessárias e alguns efeitos são desprezados ou apenas parcialmente considerados. A correta modelagem de um sistema visa à redução do esforço computacional mantendo a fidelidade ao sistema real necessária à sua correta aplicação.

4.2.1 Subsistema pneumático

O modelo utilizado para o subsistema pneumático envolve o estudo de três partes correlacionadas, sendo cada uma com seu conjunto de equações. Estas partes representam a dinâmica das pressões nas câmaras dos cilindros, as vazões da válvula e a dinâmica do atrito.

Assim como em [Perondi, 2002; Sobczyk S., 2009; Suzuki, 2010], as hipóteses simplificadoras admitidas para este subsistema são:

- a energia cinética do gás é desprezada;
- as diferenças de pressões por efeitos dissipativos ocorrem apenas nos orifícios de passagem na válvula proporcional, desprezando as demais;
- as temperaturas nas câmaras do cilindro e da válvula assumem valores iguais à temperatura de suprimento que é considerada constante;
- o ar se comporta como gás perfeito, ou seja, a lei geral de estados dos gases é válida;

- os calores específicos a pressão e volume constantes não alteram ao longo dos processos;
- os vazamentos de ar são desprezados;
- a dinâmica da válvula não é considerada;
- os processos termodinâmicos nas câmaras são considerados isentrópicos;
- os processos de expansão, compressão e as trocas internas de calor ocorrem de forma rápida e o fluxo de calor através das paredes do cilindro é considerado desprezível, ou seja, o sistema é considerado adiabático e reversível.

O cálculo da dinâmica das pressões nas câmaras dos cilindros é apresentado por diversos autores como Perondi, 2002 e definido a partir da lei de conservação de massa para fluidos compressíveis. Os resultados são apresentados nas equações (4.17) e (4.18)

$$\dot{p}_{ai} = -\frac{A_i r \dot{y}_i}{V_{vmai} + A_i y_i} p_{ai} + \frac{rRT}{V_{vmai} + A_i y_i} q_{mai} \quad (4.17)$$

$$\dot{p}_{bi} = \frac{A_i r \dot{y}_i}{V_{vmbi} + A_i (L_i - y_i)} p_{bi} + \frac{rRT}{V_{vmbi} + A_i (L_i - y_i)} q_{mbi} \quad (4.18)$$

onde p é a pressão interna, A é a área da seção transversal do êmbolo, r é a relação entre os calores específicos a pressão e a volume constante, T é a temperatura média absoluta, R é a constante universal dos gases, \dot{y} e y são a velocidade e posição do êmbolo respectivamente, V_{vm} é o volume morto das câmaras e q_m é a vazão mássica.

Como é observado nas equações (4.17) e (4.18), as dinâmicas das pressões nos cilindros dependem de fatores como a pressão interna, a posição e velocidade do êmbolo e principalmente da vazão mássica.

Utilizando as simplificações anteriormente citadas, a caracterização das vazões mássicas na válvula é definida pela teoria da mecânica de fluidos para escoamentos de fluido compressíveis em orifícios [Bobrow e McDonell, 1998]. Para situações onde a razão entre a pressão a jusante e a montante do orifício é menor que a pressão crítica (que, teoricamente, apresenta valor igual a 0,528), a vazão mássica teórica é dada pela Equação (4.19). Nos outros casos é aplicada a Equação (4.20).

$$q_m = A_0 p_u \sqrt{\frac{r}{RT} \left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{r+1}{r-1}}} \quad (4.19)$$

$$q_m = A_0 p_u \sqrt{\frac{2r}{(r-1)RT} \left(\left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{2}{r}} - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{1+r}{r}} \right)} \quad (4.20)$$

Nas equações (4.19) e (4.20), A_0 é a área do orifício de passagem (que, no caso de uma válvula proporcional depende do sinal de controle u), p_u é a pressão a jusante e p_d é a pressão a montante do orifício.

A modelagem da vazão mássica a partir das equações (4.19) e (4.20) pode se afastar do comportamento real das válvulas utilizadas em sistemas servopneumáticos [Bobrow e McDonell, 1998; Perondi, 2002; McDonell, 1996; Suzuki, 2010]. Especificidades geométricas de cada equipamento aliadas às simplificações adotadas estão entre as causas prováveis das diferenças obtidas entre os resultados teóricos e os experimentais [Perondi, 2002; Suzuki, 2010].

Para a caracterização das vazões mássicas nas válvulas, foram utilizados no modelo matemático os resultados apresentados em Perondi, 2002. Nesse trabalho, a vazão é definida como o produto de uma função que depende do sinal de controle ($f_u(u)$) por uma função das pressões a montante e jusante ($f_p(p_u, p_d)$) e pela vazão mássica máxima da válvula ($[q_m]_{max}$), como mostra a Equação (4.21).

$$q_m = [q_m]_{max} f_p(p_u, p_d) f_u(u) \quad (4.21)$$

Esta equação depende de valores experimentais, mas apresenta a mesma estrutura das equações (4.19) e (4.20). Evidentemente, equipamentos como válvulas e cilindros não são absolutamente simétricos. Por isso é necessário definir as vazões máximas e as funções f_u e f_p para cada processo, enchimento e exaustão, e para cada câmara separadamente. A Equação (4.22) define a vazão para quando a pressão da câmara é menor que a de suprimento (p_{sup}) enquanto que a Equação (4.23) define a vazão para quando a pressão da câmara é maior que a atmosférica (p_{atm}).

$$q_m^{ench}(p_u, p_d, u) = [q_m^{ench}]_{max} f_p^{ench}(p_u, p_d) f_u^{ench}(u) \quad (4.22)$$

$$q_m^{exau}(p_u, p_d, u) = [q_m^{exau}]_{max} f_p^{exau}(p_u, p_d) f_u^{exau}(u) \quad (4.23)$$

As vazões mássicas máximas obtidas por Perondi, 2002 são apresentadas na Tabela 4.4

Tabela 4.4 – Vazões mássicas máximas

Câmara	Enchimento	Exaustão
<i>a</i>	$[q_{ma}^{ench}]_{max}=0,0089$	$[q_{ma}^{exau}]_{max}=0,0115$
<i>b</i>	$[q_{mb}^{ench}]_{max}=0,0083$	$[q_{mb}^{exau}]_{max}=0,0109$

A seguir são apresentadas as funções de sinal de controle e pressão. As mesmas são funções polinomiais de 3ª ordem obtidas pelo método de mínimos quadrados normalizadas para os valores máximos de sinal de controle (u_{max}) e pressões extremas ($\bar{u} = u/u_{max}$ e $\bar{p}_j = (p_j - p_{atm})/(p_{sup} - p_{atm})$).

$$f_{pa}^{ench}(\bar{p}_a) = -1,888\bar{p}_a^3 + 1,157\bar{p}_a^2 - 0,191\bar{p}_a + 1,007 \quad (4.24)$$

$$f_{pa}^{exau}(\bar{p}_a) = 0,346\bar{p}_a^3 - 1,747\bar{p}_a^2 + 2,312\bar{p}_a + 0,09 \quad (4.25)$$

$$f_{pb}^{ench}(\bar{p}_b) = -2,395\bar{p}_b^3 + 1,851\bar{p}_b^2 - 0,362\bar{p}_b + 1,014 \quad (4.26)$$

$$f_{pb}^{exau}(\bar{p}_b) = -2,395\bar{p}_b^3 + 1,851\bar{p}_b^2 - 0,362\bar{p}_b + 1,1014 \quad (4.27)$$

$$f_{ua}^{ench}(\bar{u}) = 1,2\bar{u}^3 - 3,5\bar{u}^2 + 3,58\bar{u} - 0,3 \quad (4.28)$$

$$f_{ua}^{exau}(\bar{u}) = 1,265\bar{u}^3 - 3,282\bar{u}^2 + 3,148\bar{u} - 0,112 \quad (4.29)$$

$$f_{ub}^{ench}(\bar{u}) = 1,198\bar{u}^3 - 3,446\bar{u}^2 + 3,42\bar{u} - 0,161 \quad (4.30)$$

$$f_{ub}^{exau}(\bar{u}) = 1,2\bar{u}^3 - 3,5\bar{u}^2 + 3,6\bar{u} - 0,3 \quad (4.31)$$

A válvula proporcional modelada é do tipo de centro fechado e possui uma zona morta não definida pelas equações (4.24) a (4.31). Como representação e suavização da zona morta Perondi, 2002, propõe uma aproximação linear, como mostra a Figura 4.7.

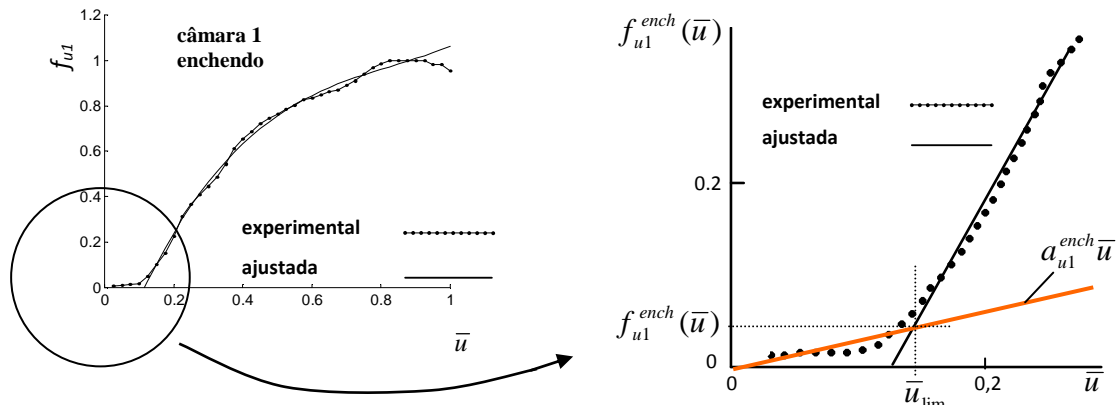


Figura 4.7 – Aproximação linear da zona morta da válvula proporcional [Perondi, 2002]

A aproximação linear da zona morta, aplicada para valores de \bar{u} menor que um valor de limiar \bar{u}_{lim} e apresentada na Tabela 4.5 para os dois processos considerados, é dada pelas equações (4.32) e (4.33).

$$f_{uj}^{ench*}(\bar{u}) = a_{uj}^{ench} \bar{u} \tag{4.32}$$

$$f_{uj}^{exau*}(\bar{u}) = a_{uj}^{exau} \bar{u} \tag{4.33}$$

onde $j=a,b$ são referentes às câmaras do cilindro, $a_{uj}^{ench} = f_{uj}^{ench}(\bar{u}_{lim})/\bar{u}_{lim}$ e $a_{uj}^{exau} = f_{uj}^{exau}(\bar{u}_{lim})/\bar{u}_{lim}$.

Tabela 4.5 – Valores de \bar{u}_{lim}

Processo	Valor de \bar{u}_{lim}
câmara <i>a</i> enchendo e câmara <i>b</i> esvaziando	0,14
câmara <i>b</i> enchendo e câmara <i>a</i> esvaziando	0,09

O atrito ocorre principalmente nas peças em contato e com movimento relativo. Sua modelagem é complexa, pois envolve fenômenos aleatórios e variantes no tempo. Além disso, seu comportamento pode ser altamente não linear e suas características dependem da

velocidade, temperatura, sentido de movimento, lubrificação e do desgaste entre as superfícies [Valdiero, 2005].

No presente trabalho é definida como dominante a força de atrito que ocorre no atuador pneumático, sendo desconsiderado o efeito dos atritos existentes na estrutura do manipulador. Segundo Perondi, 2002, o atrito nos atuadores pneumáticos é ocasionado principalmente pelo contato do anel de vedação com o corpo do cilindro.

O modelo LuGre, proposto por Canudas de Wit et al, 1995, foi utilizado nesse trabalho como modelo matemático do atrito pois representa seus principais efeitos, como o atrito de Stribeck, de Coulomb, viscoso e estático, além de características como histerese, força de quebra variável e de deformações elásticas no movimento de pré-deslizamento.

Este modelo está baseado no estudo do atrito a nível microscópico, onde o contato ocorre por pequenos elementos elásticos. A força de atrito é composta por uma parte proporcional à média das microdeformações dos elementos elásticos, uma parcela proporcional à taxa de variação das deformações e outra devida ao atrito viscoso. Assim, a força de atrito é expressa pela Equação (4.34)

$$F_a = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (4.34)$$

onde σ_0 é o coeficiente de rigidez elástica, z é a média das microdeformações dos elementos elásticos, σ_1 é o coeficiente de amortecimento, σ_2 é o coeficiente viscoso e v é a velocidade relativa entre as superfícies. A dinâmica da média das microdeformações z é definida pela seguinte equação de primeira ordem:

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|\sigma_0}{g(v)} z \quad (4.35)$$

onde o termo $g(v)$ é uma função que representa o atrito de Stribeck, definida em Canudas de Wit et al, 1995, como:

$$g(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2} \quad (4.36)$$

na qual F_c se refere à força de atrito seco (ou de Coulomb), F_s é a força de atrito estático e v_s é a velocidade de Stribeck. Estas parcelas da força de atrito compostas com a força de atrito viscoso ilustradas graficamente na Figura 4.8.

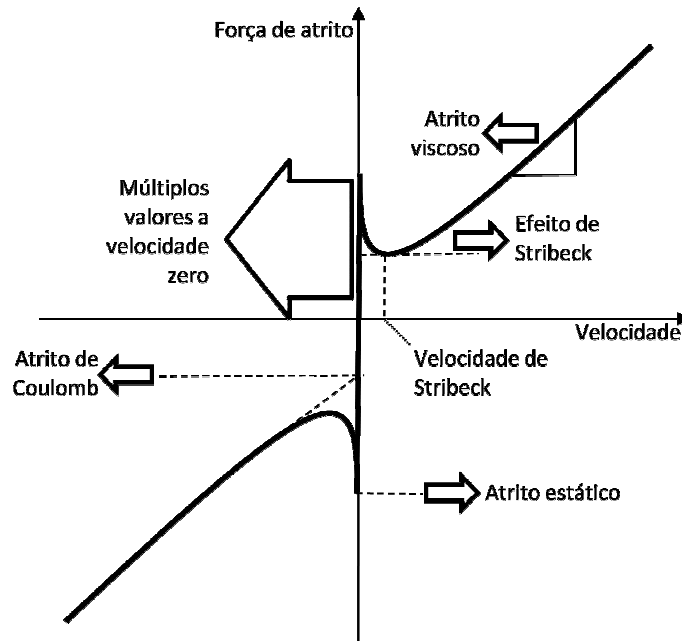


Figura 4.8 – Mapa estático do atrito

Perondi e Guenther, 2003, apresentam em seu trabalho os valores dos parâmetros para o atrito em um pistão pneumáticos obtidos por meio de testes e simulações, para as duas direções de movimento. Nesse trabalho foram utilizadas as médias dos valores dos parâmetros, como mostra a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Valores dos parâmetros para o atrito

σ_0 [N/m ²]	σ_1 [Ns/m]	σ_2 [Ns/m]	v_s [m/s]	F_c [N]	F_s [N]
$6,3 \cdot 10^6$	8460	89,86	0,02	32,9	38,5

Os vetores das forças líquidas fornecidas pelos atuadores do subsistema pneumático (F_l) ao subsistema mecânico podem ser definidos pela diferença entre as forças pneumáticas (F_p) e o atrito nos cilindros (F_a).

$$F_l = N^{-1}(F_p - F_a) = N^{-1}[A(p_a - p_b) - F_a] \quad (4.37)$$

lembrando que N é a matriz de relações de transmissão mecânica e A é a matriz das áreas dos êmbolos, sendo ambas diagonais.

4.2.2 Subsistema mecânico

Nesta seção é apresentado o modelo matemático da dinâmica do subsistema mecânico composto pelos elos e juntas.

Os dois métodos mais conhecidos para obter as equações de movimento de manipuladores são a formulação lagrangeana e a formulação de Newton-Euler.

Na formulação lagrangeana, o modelo dinâmico é proposto em termos de trabalho e energia armazenados utilizando coordenadas generalizadas apropriadas. Esse método, em conjunto com a notação de Denavit Hartenberg, possui as vantagens de ser formulado sistematicamente e de ter análise e implementação computacional simplificada. Entretanto, o método necessita de um grande número de operações matemáticas [Fu et al,1987].

A modelagem dinâmica pela formulação de Newton-Euler (NE) segue a interpretação direta da segunda lei de Newton do movimento. Apesar do método não deixar explícitas na solução final as parcelas de torque referente à inércia, força centrífuga, de Coriolis e gravidade, sua eficiência computacional é superior à formulação lagrangeana. Devido a esta última característica, esse método foi aplicado para a obtenção do equacionamento da dinâmica do manipulador pneumático proposto.

A formulação de Newton-Euler forma dois conjuntos de equações recursivas: direto e reverso. O conjunto direto propaga as velocidades e acelerações da base em direção ao efetuador final. Tendo os estados do manipulador, o conjunto de equações reversas propaga os torques e forças em direção à base.

Foram realizadas as seguintes simplificações para o subsistema mecânico:

- os elos são considerados como corpos rígidos, ou seja, os efeitos dos deslocamentos elásticos são considerados suficientemente pequenos para serem desprezados;
- os atritos nas juntas foram desconsiderados.

A seguir é apresentado o conjunto direto de equações recursivas para as juntas referenciadas de $i=1:n$. Para melhor apresentação, elas são divididas para os diferentes tipos de junta utilizados: rotacional ou prismática.

$${}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i = \begin{cases} {}^i\mathbf{R}_{i-1}({}^{i-1}\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_{i-1} + \mathbf{z}_0\dot{q}_i) & \text{para junta rotacional} \\ {}^i\mathbf{R}_{i-1}({}^{i-1}\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_{i-1}) & \text{para junta prismática} \end{cases} \quad (4.38)$$

$${}^i\mathbf{R}_0\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \begin{cases} {}^i\mathbf{R}_{i-1}[{}^{i-1}\mathbf{R}_0\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + \mathbf{z}_0\ddot{q}_i + ({}^{i-1}\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_{i-1}) \times \mathbf{z}_0\dot{q}_i] & \text{para junta rotacional} \\ {}^i\mathbf{R}_{i-1}({}^{i-1}\mathbf{R}_0\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1}) & \text{para junta prismática} \end{cases} \quad (4.39)$$

$${}^i\mathbf{R}_0\dot{\mathbf{v}}_i = \begin{cases} \begin{aligned} & ({}^i\mathbf{R}_0\dot{\boldsymbol{\omega}}_i) \times ({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{p}_i^*) + \\ & + ({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times [({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times ({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{p}_i^*)] + \\ & + {}^i\mathbf{R}_{i-1}({}^{i-1}\mathbf{R}_0\dot{\mathbf{v}}_{i-1}) \end{aligned} & \text{para junta rotacional} \\ \begin{aligned} & {}^i\mathbf{R}_0(\mathbf{z}_0\ddot{q}_i + {}^{i-1}\mathbf{R}_0\dot{\mathbf{v}}_{i-1}) + ({}^i\mathbf{R}_0\dot{\boldsymbol{\omega}}_i) \times ({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{p}_i^*) + \\ & + 2({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times ({}^i\mathbf{R}_{i-1}\mathbf{z}_0\dot{q}_i) + \\ & + ({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times [({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times ({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{p}_i^*)] \end{aligned} & \text{para junta prismática} \end{cases} \quad (4.40)$$

$${}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{a}}_i = ({}^i\mathbf{R}_0\dot{\boldsymbol{\omega}}_i) \times ({}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{s}}_i) + {}^i\mathbf{R}_0\dot{\mathbf{v}}_i + ({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times [({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times ({}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{s}}_i)] \quad (4.41)$$

As equações reversas são:

$${}^i\mathbf{R}_0\mathbf{f}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1}({}^{i+1}\mathbf{R}_0\mathbf{f}_{i+1}) + m_i {}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{a}}_i \quad (4.42)$$

$${}^i\mathbf{R}_0\mathbf{n}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1}[{}^{i+1}\mathbf{R}_0\mathbf{n}_{i+1} + ({}^{i+1}\mathbf{R}_0\mathbf{p}_i^*) \times ({}^{i+1}\mathbf{R}_0\mathbf{f}_{i+1})] + ({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{p}_i^* + {}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{s}}_i) \times (m_i {}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{a}}_i) + ({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{I}_i {}^i\mathbf{R}_0)({}^i\mathbf{R}_0\dot{\boldsymbol{\omega}}_i) + ({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i) \times [({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{I}_i {}^i\mathbf{R}_0)({}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i)] \quad (4.43)$$

$$\mathbf{F}_{li} = \begin{cases} (({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{n}_i)^T ({}^i\mathbf{R}_{i-1}\mathbf{z}_0)) & \text{para junta rotacional} \\ (({}^i\mathbf{R}_0\mathbf{f}_i)^T ({}^i\mathbf{R}_{i-1}\mathbf{z}_0)) & \text{para junta prismática} \end{cases} \quad (4.44)$$

Onde:

${}^i\mathbf{R}_0$ é a inversa da matriz de rotação obtida de uma parte da matriz de transformação

${}^0\mathbf{T}_i$

$${}^0\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i\sin\theta_i & \sin\alpha_i\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i\cos\theta_i & -\sin\alpha_i\cos\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

${}^i\mathbf{R}_0\boldsymbol{\omega}_i$ é a velocidade angular do elo i representada no sistema de coordenadas i ;

${}^i\mathbf{R}_0\mathbf{v}_i$ é a velocidade cartesiana do elo i representada no sistema de coordenadas i ;

${}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{a}}_i$ é a aceleração cartesiana do centro de gravidade do elo i representada no sistema de coordenadas i ;

${}^i\mathbf{R}_0\mathbf{p}_i^*$ é a posição da origem do sistema de coordenadas i em relação ao sistema de coordenadas $i-1$ representada no sistema de coordenadas i ;

${}^i\mathbf{R}_0\bar{\mathbf{s}}_i$ é a posição do centro de gravidade do elo i , $(\bar{x}_i, \bar{y}_i$ e $\bar{z}_i)$, em relação ao sistema de coordenadas i representada no sistema de coordenadas i ;

${}^i\mathbf{R}_0\mathbf{f}_i$ é a força atuante no elo i representada no sistema de coordenadas i ;

${}^i\mathbf{R}_0\mathbf{n}_i$ é o momento atuante no elo i representado no sistema de coordenadas i ;

m_i é a massa do elo i ;

${}^i\mathbf{R}_0\mathbf{I}_i$ ${}^i\mathbf{R}_0$ é o tensor de inércia do elo i , obtido da parte de inércias da matriz de propriedades inerciais do elo (Eq. (5.24)), em torno do seu centro de massa representado em um sistema de coordenadas com origem neste centro de massa e tendo a mesma orientação do sistema de coordenadas associado ao elo i ;

\mathbf{F}_{li} é a força ou torque na junta i , e $\mathbf{z}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$.

Os valores das massas e dos momentos de inércia foram obtidos a partir da modelagem geométrica realizada em um software CAD e estão apresentados na Seção 3.5.

5. UNIDADE TÉCNICA DE SISTEMA DE CONTROLE

O método de controle utilizado na unidade técnica de sistema de controle é o de realimentação de estados. Para sua aplicação é necessário a representação da modelagem matemática na forma de espaço de estados sendo o ajuste dos ganhos do controlador realizado pela técnica de alocação de pólos.

5.1 Representação em espaço de estados

Um sistema dinâmico pode ser representado como um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem [Franklin et al, 2006]. Uma das vantagens desta abordagem é de que o aumento do número de variáveis ou de entradas e saídas não aumenta a complexidade do problema.

Um sistema dinâmico é representado pela Equação (5.1):

$$y^{(k)} + a_1 y^{(k-1)} + \dots + a_{k-1} \dot{y} + a_k y = b_0 u \quad (5.1)$$

onde u é o sinal de controle, b_0 é o coeficiente do sinal de controle, a_1, \dots, a_{k-1}, a_k representam os coeficientes do sistema e $y, \dot{y}, \dots, y^{(k-1)}$ e $y^{(k)}$ são as variáveis de estado.

As variáveis de estado são o menor conjunto de variáveis necessárias para se determinar o estado do sistema dinâmico, podendo ser agrupadas em um vetor chamado vetor de estados (\mathbf{x}), como na Equação (5.2).

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(k-1)} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

É possível escrever as derivadas dos estados com respeito ao tempo como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ -a_1 x_k - \dots - a_{k-1} x_2 - a_k x_1 + b_0 u \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Em notação matricial, o sistema definido pela Equação (5.3) é escrito como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{A}}\mathbf{x} + \underline{\mathbf{B}}u \quad (5.4)$$

$$y = \underline{\mathbf{C}}\mathbf{x} + \underline{\mathbf{D}}u \quad (5.5)$$

onde

$$\underline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_k & -a_{k-1} & -a_{k-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\underline{\mathbf{C}} = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 0] \quad \underline{\mathbf{D}} = 0 \quad (5.7)$$

A matriz $\underline{\mathbf{A}}$ representa a matriz de estado, $\underline{\mathbf{B}}$ é a matriz de entrada, $\underline{\mathbf{C}}$ é denominada matriz de saída e $\underline{\mathbf{D}}$ é a matriz de transmissão direta. As equações (5.4) a (5.7) apresentam o sistema dinâmico da Equação (5.1) na representação em espaços de estados.

Para representar o modelo dinâmico desenvolvido na Seção 4.2 na representação de espaço de estados é necessário, primeiramente, realizar a linearização do sistema.

Diversos autores apresentam em seus estudos resultados para a linearização de servoposicionadores pneumáticos.

Liu e Bobrow, 1988, desenvolveram um modelo de quarta ordem onde as variáveis de estados são a posição, a velocidade e as pressões das câmaras do cilindro.

Abou-Fayssal, 1997, realizou simplificações no modelo de Liu e Bobrow, 1988 e desenvolveu dois sistemas de terceira ordem, um com posição, velocidade e diferença de pressões das câmaras e outro com posição, velocidade e aceleração como variáveis de estado. Este último modelo também foi utilizado por Xia, 2001, para simulações e ajuste do controle.

Perondi, 2002, apresenta a linearização do sistema e valores para um modelo de terceira ordem em função da aceleração, velocidade e posição. Este modelo linear também é aplicado em [Perondi e Guenther, 1999a; Perondi e Guenther, 1999b; Perondi e Guenther, 2000; Sobczyk S., 2005; Suzuki, 2010].

A seguir é apresentada a linearização do subsistema não linear descrito na Seção 4.2.1. Segundo Perondi, 2002, o equacionamento está desenvolvido para o caso onde a câmara a

enche e a câmara b esvazia, sendo o outro caso análogo a este. Inicialmente, são necessárias as seguintes simplificações.

- a linearização é realizada a partir da expansão (em torno de um ponto médio de operação caracterizado pelo subíndice “0”) e truncamento (no termo de primeira ordem) da série de Taylor;
- as características de escoamento da vazão do ar são consideradas simétricas nos dois sentidos de deslocamento do êmbolo ($f_{pa}^{ench}(p_a) = f_{pb}^{ench}(p_b)$, $f_{pa}^{exau}(p_a) = f_{pb}^{exau}(p_b)$, $f_{ua}^{ench}(u) = f_{ub}^{ench}(u) = f_u^{ench}(u)$ e $f_{ua}^{exau}(u) = f_{ub}^{exau}(u) = f_u^{exau}(u)$), assim como as vazões máximas ($[q_{ma}^{ench}]_{max} = [q_{mb}^{ench}]_{max} = [q_m^{ench}]_{max}$ e $[q_{ma}^{exau}]_{max} = [q_{mb}^{exau}]_{max} = [q_m^{exau}]_{max}$);
- as vazões mássicas e pressões nos pórticos das válvulas são idênticas às das câmaras dos cilindros;
- o ponto médio de operação para a posição é o centro do cilindro e para a temperatura é a temperatura ambiente; a taxa de variação da pressão ao longo do tempo e a velocidade de deslocamento do êmbolo são consideradas nulas;
- os ganhos de vazão são as médias dos ganhos de vazão das câmaras dos cilindros;
- as pressões das câmaras no ponto médio de operação são consideradas iguais e, segundo Virvalo, 1989, valem $p_0 = (2/3)p_{sup}$;
- a força de atrito é aproximada por uma força viscosa equivalente;
- os volumes mortos das câmaras e os coeficientes vazão-pressão são considerados suficientemente pequenos para poderem ser desprezados.

Lembrando que a equação da vazão no orifício da válvula para o caso de enchimento da câmara a é escrita como

$$q_{ma} = [q_m^{ench}]_{max} f_p^{ench}(p_a) f_u^{ench}(u) \quad (5.8)$$

sua expansão em série de Taylor resulta

$$\Delta q_{ma} = K_{qa} \Delta u + K_{pa} \Delta p_a \quad (5.9)$$

onde, $p_a = [q_m^{ench}]_{max} \frac{\partial q_{ma}}{\partial p_a} \Big|_{\substack{p_0 \\ u_0 \\ T_0}}$ é o coeficiente vazão-pressão e $K_{qa} = [q_m^{ench}]_{max} \frac{\partial q_{ma}}{\partial u} \Big|_{\substack{p_0 \\ u_0 \\ T_0}}$ é

o ganho de vazão dos orifícios de entrada. As variáveis p_0 , u_0 e T_0 são, respectivamente, os valores da pressão, tensão e temperatura no ponto de operação em torno do qual o sistema é linearizado. Para a câmara b tem-se:

$$q_{mb} = [q_m^{exau}]_{max} f_p^{exau}(p_b) f_u^{exau}(u) \quad (5.10)$$

$$\Delta q_{mb} = K_{qb} \Delta u + K_{pb} \Delta p_b \quad (5.11)$$

onde, $K_{pb} = [q_m^{exau}]_{max} \frac{\partial q_{mb}}{\partial p_b} \Big|_{\substack{p_0 \\ u_0 \\ T_0}}$ é o coeficiente vazão-pressão e $K_{qb} = [q_m^{exau}]_{max} \frac{\partial q_{mb}}{\partial u} \Big|_{\substack{p_0 \\ u_0 \\ T_0}}$ é

o ganho de vazão dos orifícios de saída.

Considerando as simplificações anteriormente citadas, as equações para as vazões (4.24) e (4.25) são reescritas genericamente como,

$$q_{ma} = -\dot{p}_a \frac{Ay+V_0}{rRT} + p_a \dot{y} \frac{A}{RT} \quad (5.12)$$

$$q_{mb} = \dot{p}_b \frac{Ay+V_0}{rRT} + p_b \dot{y} \frac{A}{RT} \quad (5.13)$$

onde, $V_0 = \frac{V}{2} = \frac{AL}{2}$. As expansões das equações (5.12) e (5.13) em torno do ponto central de operação resultam

$$\Delta q_{ma} = \frac{\partial q_{ma}}{\partial \dot{y}} \Big|_{\substack{p_0 \\ \dot{y}_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta \dot{y} + \frac{\partial q_{ma}}{\partial \dot{p}_a} \Big|_{\substack{p_0 \\ V_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta \dot{p}_a + \frac{\partial q_{ma}}{\partial y} \Big|_{\substack{p_0 \\ V_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta y + \frac{\partial q_{ma}}{\partial p_a} \Big|_{\substack{p_0 \\ V_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta p_a = p_0 \frac{A}{RT} \Delta \dot{y} - \frac{V}{2rRT} \Delta \dot{p}_a \quad (5.14)$$

$$\Delta q_{mb} = \frac{\partial q_{mb}}{\partial \dot{y}} \Big|_{\substack{p_0 \\ \dot{y}_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta \dot{y} + \frac{\partial q_{mb}}{\partial \dot{p}_b} \Big|_{\substack{p_0 \\ V_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta \dot{p}_b + \frac{\partial q_{mb}}{\partial y} \Big|_{\substack{p_0 \\ V_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta y + \frac{\partial q_{mb}}{\partial p_b} \Big|_{\substack{p_0 \\ V_0 \\ T_0 \\ y_0}} \Delta p_b = p_0 \frac{A}{RT} \Delta \dot{y} + \frac{V}{2rRT} \Delta \dot{p}_b \quad (5.15)$$

Igualando as equações (5.9) com (5.14) e (5.10) com (5.15), levando em conta as simplificações e denotando K_q como a média dos ganhos de vazão, chega-se ao seguinte sistema de equações:

$$\Delta q_{ma} = \frac{Ap_0}{RT} \Delta \dot{y} - \frac{V}{2rRT} \Delta \dot{p}_a = K_q \Delta u \quad (5.16)$$

$$\Delta q_{mb} = \frac{Ap_0}{RT} \Delta \dot{y} + \frac{V}{2rRT} \Delta \dot{p}_b = K_q \Delta u \quad (5.17)$$

Isolando $\Delta \dot{p}_a$ e $\Delta \dot{p}_b$ nas equações (5.16) e (5.17) é obtido o seguinte sistema linear:

$$\Delta \dot{p}_a = \frac{2rAp_0}{V} \Delta \dot{y} - \frac{2rRTK_q}{V} \Delta u \quad (5.18)$$

$$\Delta \dot{p}_b = -\frac{2rAp_0}{V} \Delta \dot{y} + \frac{2rRTK_q}{V} \Delta u \quad (5.19)$$

A equação de equilíbrio dinâmico no êmbolo do cilindro atuador (Eq. (4.42)) pode ser reescrita de uma forma genérica com a substituição da força de atrito por uma parcela de força viscosa equivalente $C_f \dot{y}$ como

$$F_{li} = [\mathbf{N}^{-1}]_{ii} ([\mathbf{A}]_{ii} (p_{ai} - p_{bi}) - C_f \dot{y}_i) \quad (5.20)$$

que, expandida linearmente, resulta

$$\Delta F_{li} = [\mathbf{N}^{-1}]_{ii} ([\mathbf{A}]_{ii} (\Delta p_{ai} - \Delta p_{bi}) - C_f \Delta \dot{y}_i) \quad (5.21)$$

A derivação no tempo da expressão do equilíbrio dinâmico (Eq. (5.21)), com a substituição nela das equações (5.18) e (5.19) resulta no subsistema pneumático da junta i linearizado

$$\Delta \dot{F}_{li} = [\mathbf{N}^{-1}]_{ii} \left([\mathbf{A}]_{ii} \left(\frac{4rA_{ii}p_0}{V_i} \Delta \dot{y} - \frac{4rRTK_q}{V_i} \Delta u \right) - C_f \Delta \ddot{y}_i \right) \quad (5.22)$$

A linearização do subsistema mecânico desenvolvido na Seção 4.2.2 é realizada a partir das seguintes simplificações:

- As dinâmicas dos graus de liberdade são desacopladas;
- A força gravitacional é desconsiderada;
- Os pontos médios de operação para as posições das juntas são apresentados na Tabela 5.1 e as velocidades são nulas;

Tabela 5.1 – Pontos médios de operação para as posições das juntas

Junta	1	2	3	4	5
Posição [m]	0	0,25	0,15	0	0

A dinâmica resultante é dada em função da inércia, da aceleração e da força fornecida pelo subsistema pneumático. Como foi citado na Seção 4.2.2, o método de Newton Euler não explicita na solução final a parcela de torque referente à inércia, por isso foi utilizada a formulação lagrangeana para o cálculo da inércia do manipulador pneumático.

A matriz de inércia, denotada por \mathbf{H} , tem seus termos calculados recursivamente por

$$[\mathbf{H}]_{ii} = tr \left(({}^0\mathbf{T}_{i-1} \mathbf{Q}_i^{i-1} \mathbf{T}_i) \mathbf{J}_i ({}^0\mathbf{T}_{i-1} \mathbf{Q}_i^{i-1} \mathbf{T}_i)^T \right) \quad (5.23)$$

onde i varia de 1 a n , tr é a função traço, \mathbf{J} é a matriz de propriedades inerciais apresentada na Equação (5.24) e \mathbf{Q}_i é a matriz de derivada parcial da matriz de transferência apresentada nas equações (5.25) e (5.26).

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} (-I_{xx}^i + I_{yy}^i + I_{zz}^i)/2 & I_{xy}^i & I_{xz}^i & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy}^i & (I_{xx}^i - I_{yy}^i + I_{zz}^i)/2 & I_{yz}^i & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz}^i & I_{yz}^i & (I_{xx}^i + I_{yy}^i - I_{zz}^i)/2 & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

onde \bar{x}_i , \bar{y}_i e \bar{z}_i são as componentes da posição do centro de massa do elo i .

Para juntas rotacionais, as matrizes \mathbf{Q}_i são definidas como

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Já, para as juntas prismáticas elas ficam:

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

A equação dinâmica do subsistema mecânico pode ser escrita de uma maneira genérica como

$$[\mathbf{H}]_{ii} \frac{\ddot{y}_i}{[N^{-1}]_{ii}} = F_{li} \quad (5.27)$$

que, expandida linearmente no ponto médio de operação, resulta

$$[\mathbf{H}_0]_{ii} \frac{\Delta \ddot{y}_i}{[N^{-1}]_{ii}} = \Delta F_{li} \quad (5.28)$$

onde \mathbf{H}_0 é a matriz de inércia do robô no ponto médio de operação. Realizando a derivada temporal da equação dinâmica linearizada do subsistema mecânico, Eq. (5.28), e igualando a Eq. (5.22), é obtida a equação do modelo linearizado do manipulador pneumático.

$$\Delta \ddot{y}_i + \frac{([N^{-1}]_{ii})^2 c_f}{[\mathbf{H}_0]_{ii}} \Delta \dot{y}_i + \frac{([N^{-1}]_{ii})^2 4r[\mathbf{A}]_{ii}^2 p_0}{[\mathbf{H}_0]_{ii} v_i} \Delta y_i = \frac{([N^{-1}]_{ii})^2 4[\mathbf{A}]_{ii} r R T K_q}{[\mathbf{H}_0]_{ii} v_i} \Delta u_i \quad (5.29)$$

Definindo o conjunto de variáveis de estado como

$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} \Delta y_i \\ \Delta \dot{y}_i \\ \Delta \ddot{y}_i \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

a representação em espaços de estados do modelo linearizado do robô resulta

$$\dot{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{A}}_i \mathbf{x}_i + \underline{\mathbf{B}}_i \Delta u_i \quad (5.31)$$

$$y_i = \underline{\mathbf{C}}_i \mathbf{x}_i + \underline{\mathbf{D}}_i \Delta u_i \quad (5.32)$$

onde,

$$\underline{\mathbf{A}}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_{2i} & -a_{1i} \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{B}}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_{0i} \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

$$\underline{\mathbf{C}}_i = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 0] \quad \underline{\mathbf{D}}_i = 0 \quad (5.34)$$

$$\text{com } a_{1i} = \frac{([N^{-1}]_{ii})^2 C_f}{[H_0]_{ii}}, \quad a_{2i} = \frac{([N^{-1}]_{ii})^2 4r[A]_{ii}^2 p_0}{[H_0]_{ii} V_i} \quad \text{e } b_{0i} = \frac{([N^{-1}]_{ii})^2 4[A]_{ii} r R T K q}{[H_0]_{ii} V_i}.$$

5.2 Controle por realimentação de estados

Na estratégia de controle por realimentação de estados, os valores dos estados (medidos ou estimados) são comparados com referências para gerar o sinal de controle. Sua implementação computacional utiliza a representação do sistema dinâmico em espaço de estados.

Segundo Chen, 1999, o uso deste método é condicionado ao sistema ser controlável, ou seja, se a entrada de controle a ele aplicada é capaz de afetar diretamente cada um dos seus estados, não existindo estados independentes do sinal de controle. Perondi e Guenther, 1999a, verificaram em seu trabalho que o sistema de terceira ordem como o apresentado na Equação 5.30, é controlável.

Como visto na Seção 2.4, existem trabalhos nos quais o controle baseado na realimentação de estados foi utilizado em manipuladores pneumáticos de dois graus de liberdade com geometria cartesiana e antropomórfica. Um dos motivos geralmente apontado para esta escolha é a sua facilidade de implementação. Essa técnica de controle também pode

ser vista aplicada em servoposicionadores pneumáticos nos trabalhos de Liu e Bobrow, 1988; Perondi e Guenther, 1999a; Perondi e Guenther, 1999b e Suzuki, 2010.

Nesse trabalho, o controle é baseado nas variáveis de estado da posição, velocidade e aceleração de cada grau de liberdade. Para o projeto, é considerado cada atuador linearizado em torno do ponto médio de seu curso (Seção 5.1). A escolha desse vetor de estados para o controlador o torna conhecido como controlador PVA (Posição, Velocidade e Aceleração) [Ning e Bone, 2005].

Para o projeto do controlador, é aplicada a seguinte lei de controle ao sistema formado pelas equações (5.31) e (5.32):

$$\Delta u_i = \mathbf{K}_i \tilde{\mathbf{x}}_i \quad (5.35)$$

onde $\tilde{\mathbf{x}}_i$ passa a ser o vetor de diferenças entre os estados desejados $[y_{di} \quad \dot{y}_{di} \quad \ddot{y}_{di}]^T$ e os estados medidos $[\Delta y_i \quad \Delta \dot{y}_i \quad \Delta \ddot{y}_i]^T$ (Eq. 5.36) e \mathbf{K}_i é o vetor de ganhos $[k_{pi} \quad k_{vi} \quad k_{ai}]$ para a junta i

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = \begin{bmatrix} y_{di} - \Delta y_i \\ \dot{y}_{di} - \Delta \dot{y}_i \\ \ddot{y}_{di} - \Delta \ddot{y}_i \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Observa-se pela Eq. (5.37), que caracteriza a dinâmica do sistema em malha fechada, que é possível escolher arbitrariamente e independentemente a posição dos pólos do sistema pela seleção apropriada dos ganhos, pois cada ganho opera apenas um coeficiente da equação característica.

$$s^3 + (b_0 k_a + a_1) s^2 + (b_0 k_v + a_2) s + b_0 k_p = 0 \quad (5.37)$$

A Figura 5.1 ilustra a aplicação da estratégia de realimentação de estado para o caso de seguimento de trajetória:

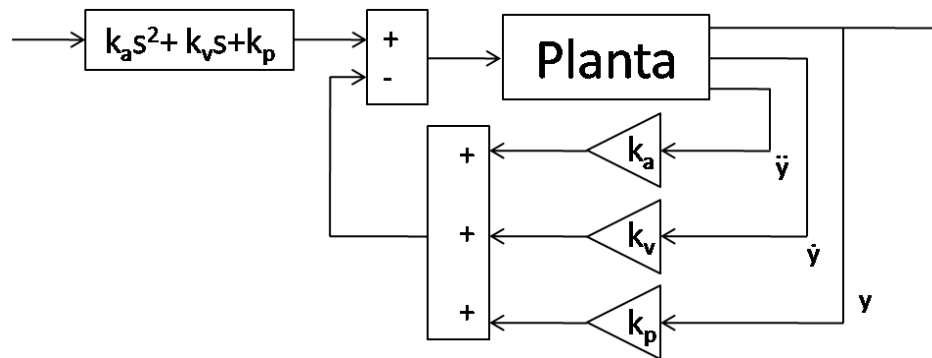


Figura 5.1–Realimentação dos estados, controlador PVA – Posição, Velocidade e Aceleração

5.3 Projeto por alocação dos pólos

A implementação do controle por realimentação de estados permite o uso do método de alocação de pólos, onde os pólos em malha fechada desejados podem ser determinados baseados nas exigências do regime transitório da resposta e/ou na resposta em frequência [Ogata, 2000]. O posicionamento dos pólos por esse método requer premissas como a controlabilidade do sistema (conforme visto na Seção 5.2), o conhecimento de todos os estados e a necessidade de que os atuadores imponham a dinâmica desejada operando na sua faixa linear (ou seja, não devem saturar).

A Figura 5.2 apresenta os parâmetros relacionados ao posicionamento dos pólos no plano complexo. O termo σ é o valor da parcela real do pólo, ω_n é a frequência natural, ω_d é a frequência natural amortecida e ζ é o índice de amortecimento.

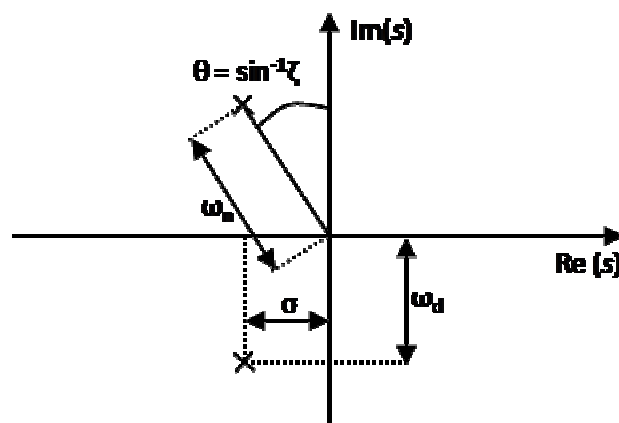


Figura 5.2 – Parâmetros relacionados ao posicionamento dos pólos no plano complexo

Como visto na Seção 5.1, o sistema dinâmico linearizado é de terceira ordem e, segundo Perondi, 2002, esses sistemas de servoposicionamento pneumático são caracterizados

por possuírem em malha aberta dois pólos complexos conjugados pouco amortecidos e um pólo real. Os pólos de cada um dos 5 eixos do manipulador em malha aberta são apresentados na Tabela 5.2 e ilustrados na Figura 5.3.

Tabela 5.2 – Pólos dos sistemas em malha aberta

Eixo	p_1	p_2	p_3
1	$-0,312+5,32i$	$-0,312-5,32i$	0
2	$-3,58+17,7i$	$-3,58-17,7i$	0
3	$-3,9+22,7i$	$-3,9-22,7i$	0
4	$-2,06+16,6i$	$-2,06-16,6i$	0
5	$-15+19,4i$	$-15-19,4i$	0

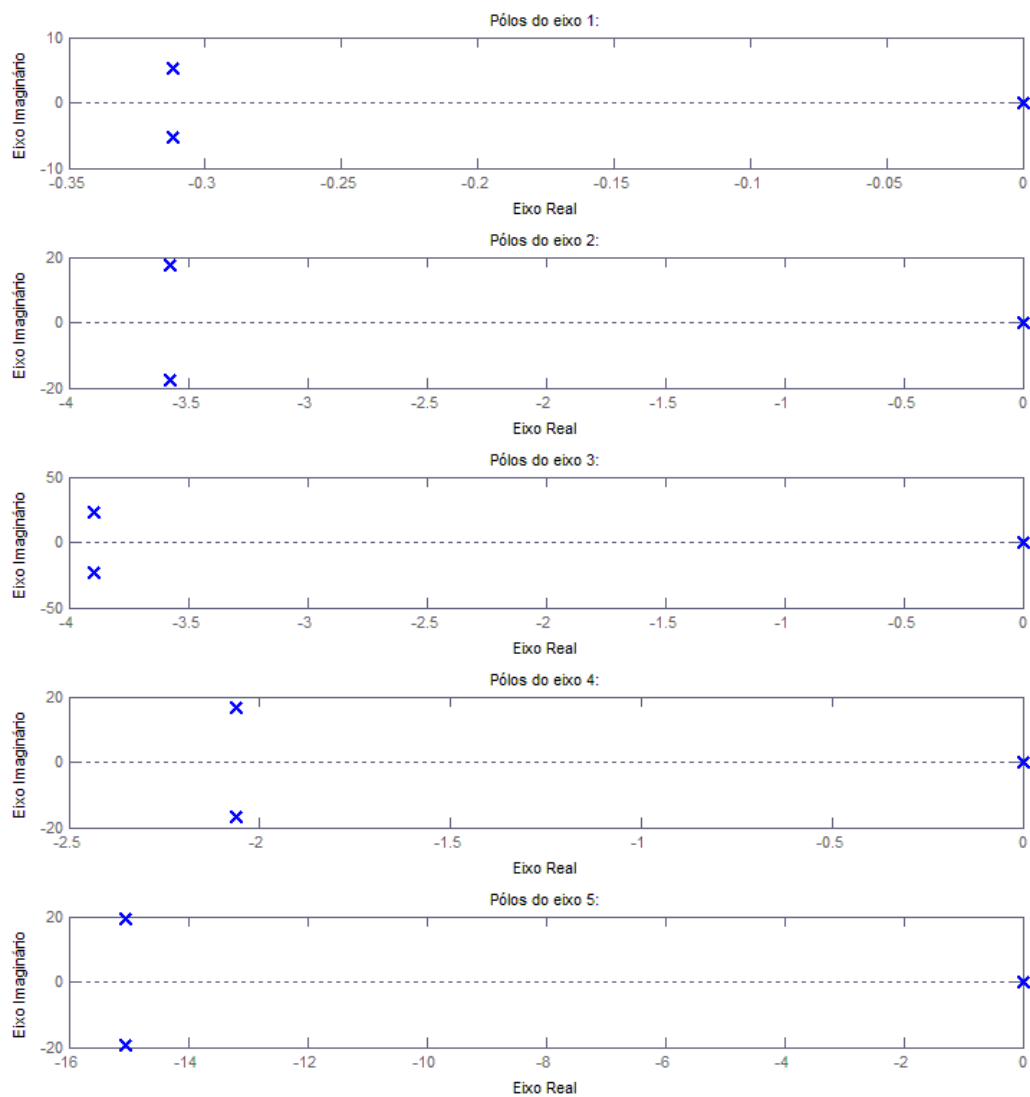


Figura 5.3 – Pólos dos sistemas em malha aberta

Para sistemas de 2ª ordem, a determinação dos pólos pode ser feita a partir de suas características transitórias, como o tempo de assentamento (t_s), tempo de atraso (t_d), tempo de subida (t_r), sobrepasso (M_p) ou tempo de pico (t_p). A Figura 5.4 apresenta graficamente esses parâmetros em um sistema com excitação tipo degrau unitário.

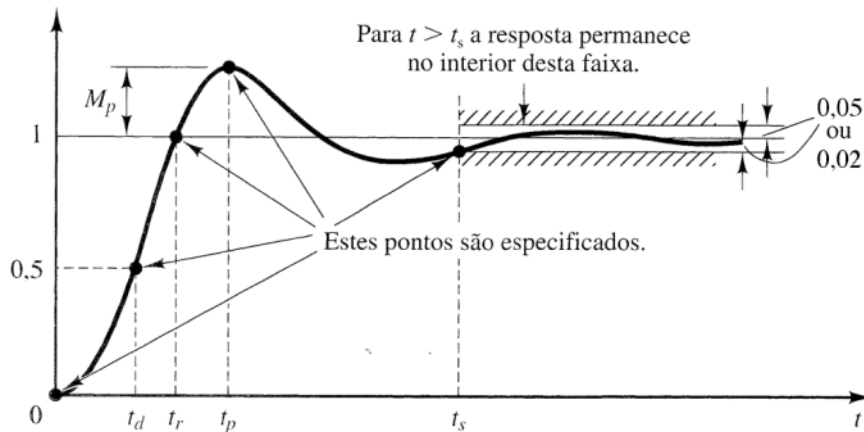


Figura 5.4 – Características da resposta de um sistema a 2ª ordem a uma excitação degrau unitário, [Ogata, 2000]

Onde:

- tempo de assentamento: é o tempo necessário para que a resposta alcance valores dentro de uma faixa em torno do sinal de referência. Esta faixa é especificada por uma porcentagem absoluta do valor final e são utilizados valores como 1%, 2% e 5%;
- tempo de atraso: é o tempo necessário para que a resposta alcance 50% do valor de referência pela primeira vez;
- tempo de subida: é o tempo entre a partida do sistema na condição inicial até atingir o valor de referência;
- sobrepasso: é a diferença entre o primeiro pico de resposta e o valor de referência;
- tempo de pico: é o tempo transcorrido até a resposta atingir o primeiro pico do sobrepasso;

Uma equação característica de um sistema de terceira ordem pode ser definida genericamente em função do índice de amortecimento (ζ), do tempo de assentamento (t_s) na faixa percentual de 2% e da multiplicidade da parte real dos pólos complexos (P) como

$$\left(s - P\zeta\left(\frac{-\ln(0,02)}{\zeta t_s}\right)\right)\left(s^2 + 2\zeta\left(\frac{-\ln(0,02)}{\zeta t_s}\right)s + \left(\frac{-\ln(0,02)}{\zeta t_s}\right)^2\right) = 0 \quad (5.38)$$

Segundo Ogata, 2000, para uma resposta transitória aceitável, suficientemente rápida e amortecida, o coeficiente de amortecimento deve estar situado entre 0,4 e 0,8, valores menores acarretam um sobrepasso excessivo e um sistema com um valor grande responde de forma lenta.

Assim, a posição dos pólos desejados (que caracterizam a dinâmica desejada) deve definir uma dinâmica dominante de segunda ordem. Uebling et al, 1997 e Suzuki, 2010 realizaram o projeto posicionando o terceiro pólo a 10 vezes a projeção real dos pólos imaginários.

A comparação da equação do sistema genérico de terceira ordem (Eq. (5.38)) e a equação do sistema em malha fechada controlado pela técnica de realimentação de estados (Eq. (5.37)) resulta nas seguintes equações para o cálculo dos ganhos do sistema em função de uma dada dinâmica desejada:

$$k_{pi} = \left(\left(\frac{P}{\zeta^2}\right)\left(\frac{\ln(0,02)}{t_s}\right)^3\right)/b_{0i} \quad (5.39)$$

$$k_{vi} = \left(\left((2P\zeta^2 - 1)\left(\frac{\ln(0,02)}{t_s}\right)^2\right) - a_{2i}\right)/b_{0i} \quad (5.40)$$

$$k_{ai} = \left(\frac{(P-2)\ln(0,02)}{t_s} - a_{1i}\right)/b_{0i} \quad (5.41)$$

Neste trabalho é utilizado um valor de coeficiente de amortecimento de 0,8 para os 5 eixos. O tempo de assentamento é definido como 0,5 s para uma faixa de 2% para os 4 primeiros eixos. Para o último eixo é utilizado um tempo de assentamento de 0,2 s para uma faixa de 2% para tornar rápida a resposta dinâmica desse sistema, pois, em testes preliminares, um valor de 0,5 s tornou sua resposta excessivamente lenta. A Tabela 5.3 apresenta os valores dos ganhos calculados para os eixos do manipulador.

Tabela 5.3 – Valores dos ganhos calculados

Eixo	k_p	k_v	k_a
1	210,37	36,3	2,62
2	18,32	2,43	0,21
3	11,21	1,18	0,13
4	21,21	2,94	0,25
5	15,12	0,98	0,026

A Figura 5.5 e a Tabela 5.4 apresentam os pólos dos 5 eixos do manipulador em malha fechada representando as dinâmicas desejadas.

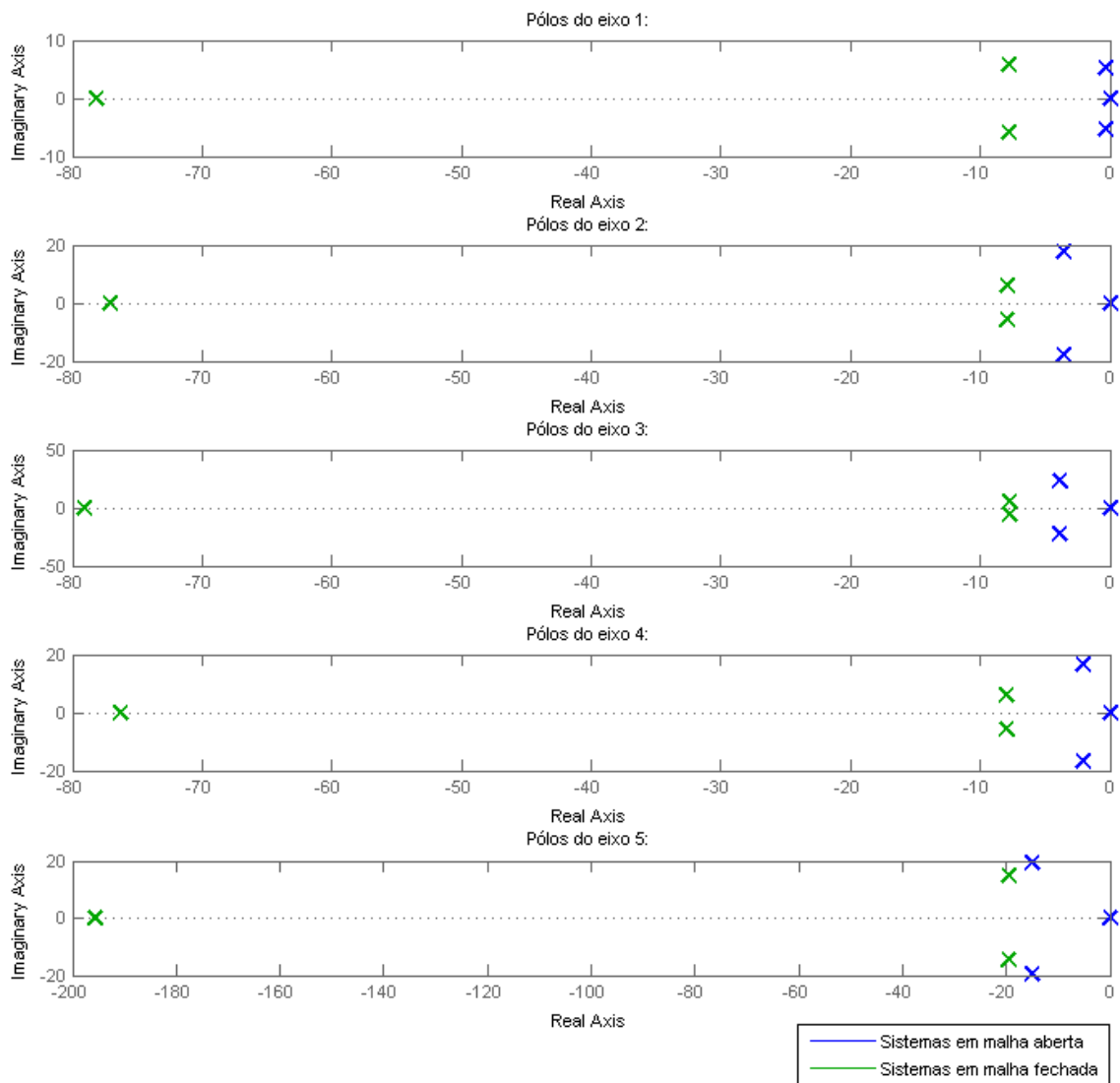


Figura 5.5 – Pólos dos sistemas em malha fechada

Tabela 5.4 – Pólos dos sistemas em malha fechada

Eixo	p_1	p_2	p_3
1	$-7,82+5,87i$	$-7,82-5,87i$	$-78,2$
2	$-7,82+5,87i$	$-7,82-5,87i$	$-78,2$
3	$-7,82+5,87i$	$-7,82-5,87i$	$-78,2$
4	$-7,82+5,87i$	$-7,82-5,87i$	$-78,2$
5	$-19,6+14,7i$	$-19,6-14,7i$	-196

6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a implementação computacional do modelo do manipulador pneumático desenvolvido. São inicialmente definidas as trajetórias a serem seguidas pelo manipulador nas simulações. Posteriormente, são apresentados os resultados numéricos visando à validação teórica do modelo e do controlador proposto.

6.1 Implementação computacional

Foi utilizado como ambiente computacional para implementação e simulação do modelo do robô proposto o software Matlab-Simulink.

O Matlab é um programa numérico que utiliza uma linguagem própria de alto nível para programação. Atualmente seu uso é difundido dentro de universidades e áreas de pesquisa e desenvolvimento de indústrias [MathWorks, 2006].

O Simulink é um programa computacional que opera no ambiente do Matlab e é próprio para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Sua interface gráfica é baseada em diagramas de blocos. O software permite programar utilizando funções pré-definidas (*toolbox*) de diferentes áreas do conhecimento, como, por exemplo, controle e robótica.

Para auxiliar no desenvolvimento do modelo, utilizou-se o *Robotics Toolbox for Matlab* [Corke, 1996]. Este *toolbox*, apropriado para o estudo da robótica, possui algumas funções pré-definidas para dinâmica e cinemática de robôs, assim como ferramentas visuais e de transformação.

Na Figura 6.1 é apresentado o diagrama de blocos criado para o controle do robô pneumático.

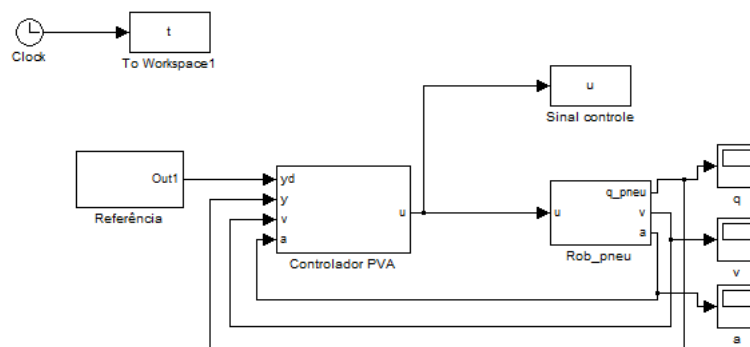


Figura 6.1 – Diagrama de blocos do sistema

Na Figura 6.2 são destacados os blocos do subsistema pneumático, cilindros e sistemas de transmissões, e do subsistema mecânico (estrutura mecânica do manipulador).

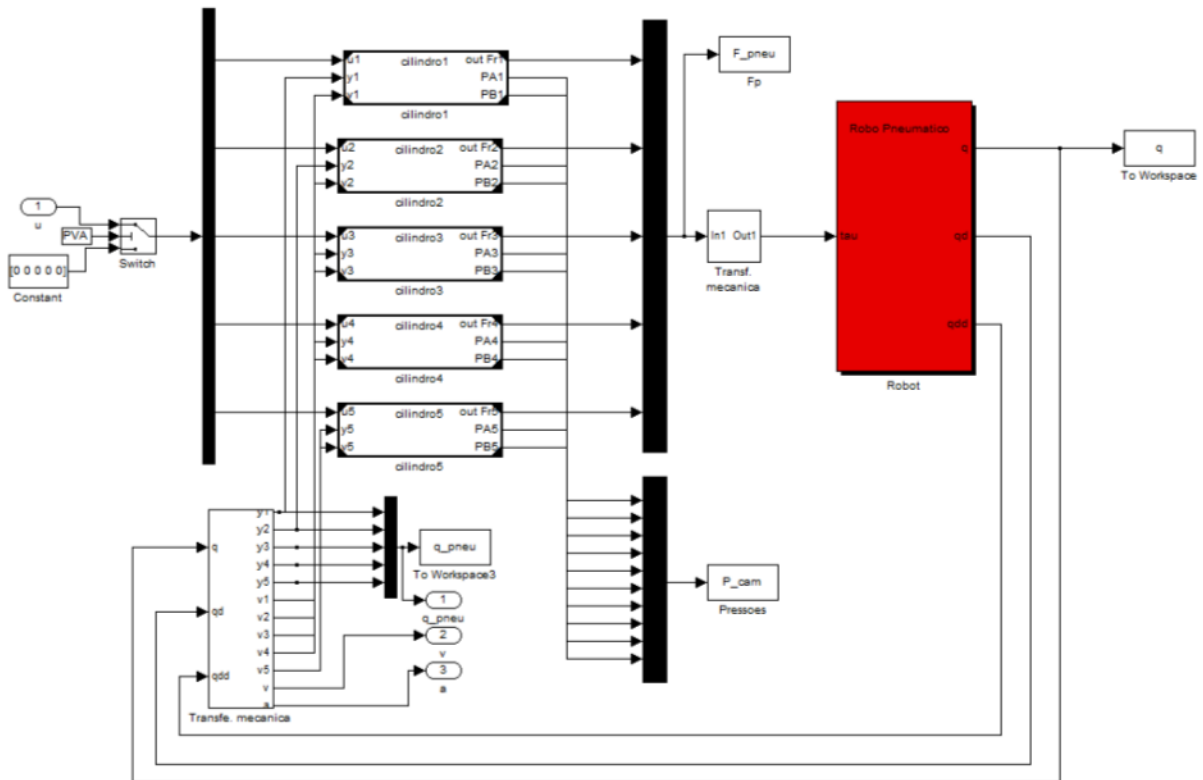


Figura 6.2 – Diagrama de blocos do robô pneumático

Para a simulação foi utilizado o solver ODE45, esta função utiliza o método de Runge-Kutta para a solução de equações diferenciais ordinárias com passo de tempo variável [MathWorks, 2006]. Os valores de tempo foram definidos entre 10^{-2} s e 10^{-10} s e as tolerâncias relativas e absolutas adimensionais utilizadas foram de 10^{-14} .

Foram realizados ensaios com 4 carregamentos diferentes: sem carga, com cargas de 0,5 kg e 1 kg. Estes valores representam a maior parte dos carregamentos encontrados durante a análise dos requisitos de projeto. Foi utilizado ainda um carregamento com valor de 5 kg para analisar o controle sob grandes mudanças de parâmetros. As massas adicionais foram consideradas como elementos acoplados ao último elo. Nesta configuração (com as massas acopladas ao último elo), foi necessário alterar alguns parâmetros geométricos do quinto elo. Estes valores estão apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros geométricos do quinto elo com diferentes carregamentos

Carga [kg]	0,5	1	5
Posição x do centro de massa [mm]	0	0	0
Posição y do centro de massa [mm]	0	0	0
Posição z do centro de massa [mm]	-61,99	-47,85	-19
Momento de inércia em relação ao plano x [kgm ²]	0,014	0,015	0,016
Momento de inércia em relação ao plano y [kgm ²]	0,023	0,037	0,09
Momento de inércia em relação ao plano z [kgm ²]	0,009	0,023	0,07
Produto de inércia em relação aos planos x-y [kgm ²]	0	0	0
Produto de inércia em relação aos planos x-z [kgm ²]	0	0	0
Produto de inércia em relação aos planos y-z [kgm ²]	0	0	0

Os parâmetros dos outros elos foram definidos na Seção 3.5 e podem ser vistos na Tabela 3.4.

A Tabela 6.2 apresenta os demais parâmetros necessários para a implementação e simulação do modelo do robô.

Tabela 6.2 – Parâmetros de simulação

Temperatura de trabalho [K]	293,15
Pressão de suprimento [Pa]	$6 \cdot 10^5$
Pressão atmosférica [Pa]	$1 \cdot 10^5$
Pressão iniciais nas câmaras [Pa]	$3,85 \cdot 10^5$
Constante universal do ar [J/kgK]	286,9
Calor específico do ar [J/kgK]	$2,75298 \cdot 10^{-8}$
Relação entre os calores específicos do ar	1,4
Ganho médio da vazão dos orifícios de saída da servoválvula [kg/s]	$4,8 \cdot 10^{-3}$
Volume morto das câmaras [m ³]	$1,96 \cdot 10^{-6}$

6.2 Simulações

6.2.1 Simulações em malha aberta

Os testes em malha aberta foram realizados focando na verificação da resposta física do modelo matemático desenvolvido e na determinação da tolerância numérica adequada para a realização das simulações. O ensaio em malha aberta consiste na simulação do robô pneumático em sua posição média de operação, ver Tabela 3.2, e com as válvulas fechadas. A Figura 6.3 apresenta a resposta com a tolerância de 10^{-14} (considerada, pela análise dos resultados obtidos, adequada).

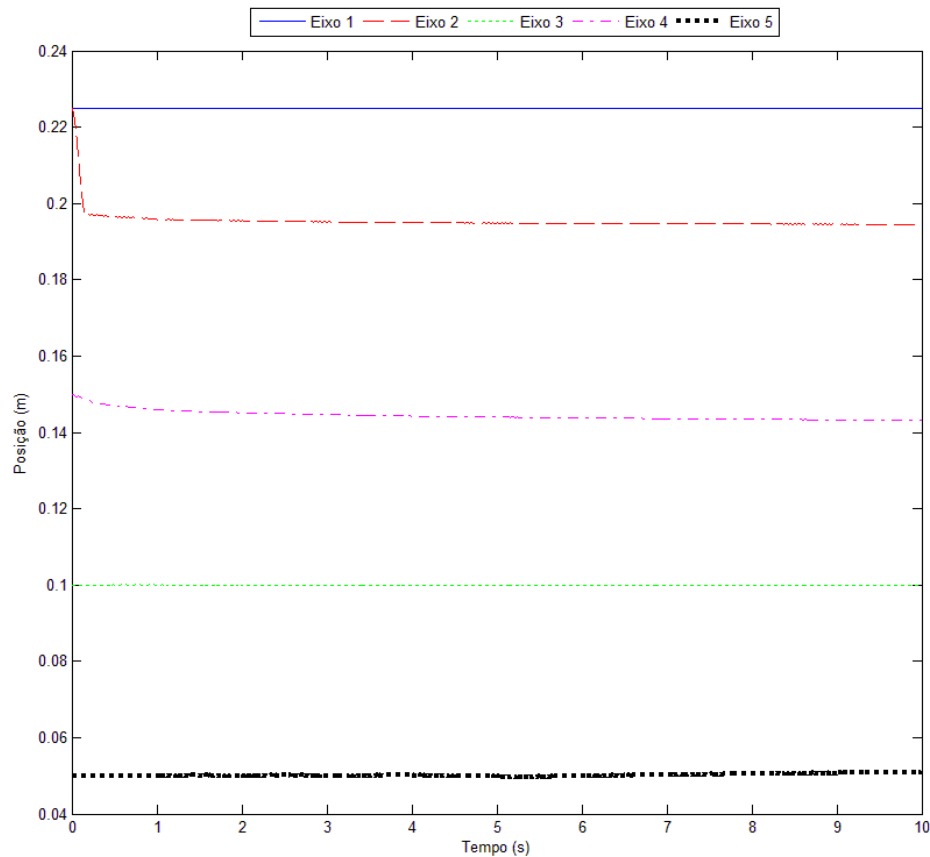


Figura 6.3 – Posicionamento dos cilindros pneumáticos no ensaio em malha aberta

Na Figura 6.3 é verificado que ocorrem variações das posições dos atuadores dos eixos 2 e 4 devido a ação da gravidade. Os respectivos atuadores assumem posições de equilíbrio quando a força peso se iguala a força produzida pela diferença de pressões. Esta situação está exemplificada na Figura 6.4, onde é mostrada a evolução da diferença de pressão multiplicada pela área do atuador associado ao eixo 2.

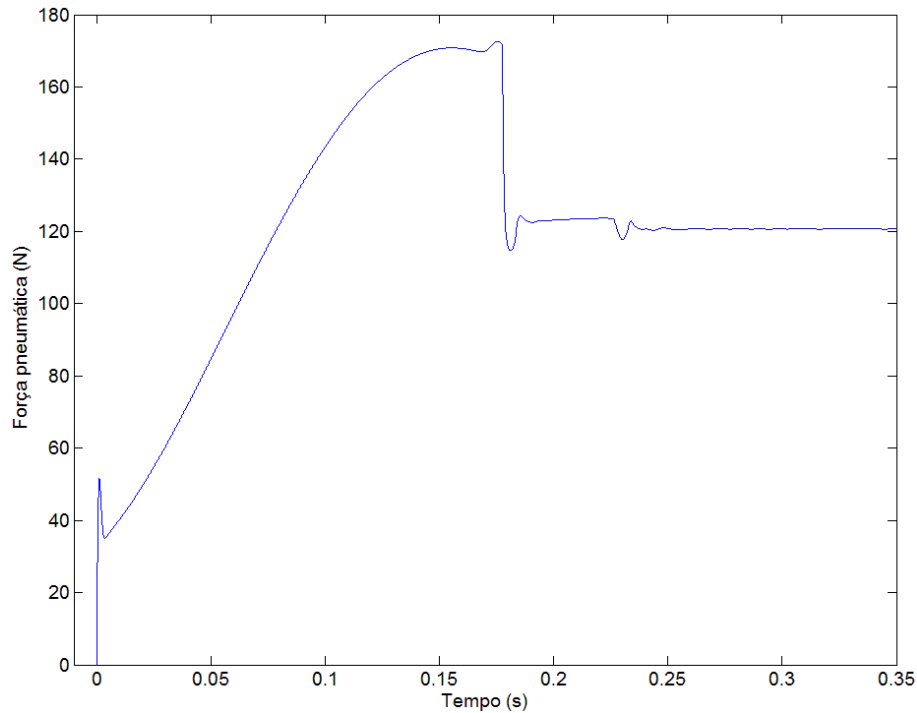


Figura 6.4 – Força pneumática do atuador do eixo 2

6.2.2 Simulações em malha fechada

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação com a implementação do controle baseado em realimentação de estados ao modelo do robô.

6.2.2.1 Movimentação ponto a ponto

A movimentação ponto a ponto consiste no posicionamento do efetuador final entre dois pontos do volume de trabalho definidos em uma função degrau no espaço dos atuadores pneumáticos. Nesta simulação foi utilizado o controle proposto na Seção 5.3 para o caso de regulação, onde existe apenas a referência para posição. Os ganhos aplicados foram definidos na Seção 5.4. Esse ensaio foi realizado para analisar a precisão do posicionamento final do manipulador.

Foram escolhidos dois pontos localizados próximos às fronteiras do volume de trabalho do requisito de projeto: $P_1=[0,2593; 0,3714; 0,0772]$ e $P_2=[-0,4325; 0,2686; 0,3375]$. A simulação teve uma duração de 8 s com a mudança de referência no tempo de 1 s. A Figura 6.5 apresenta a referência de posição dos atuadores pneumáticos.

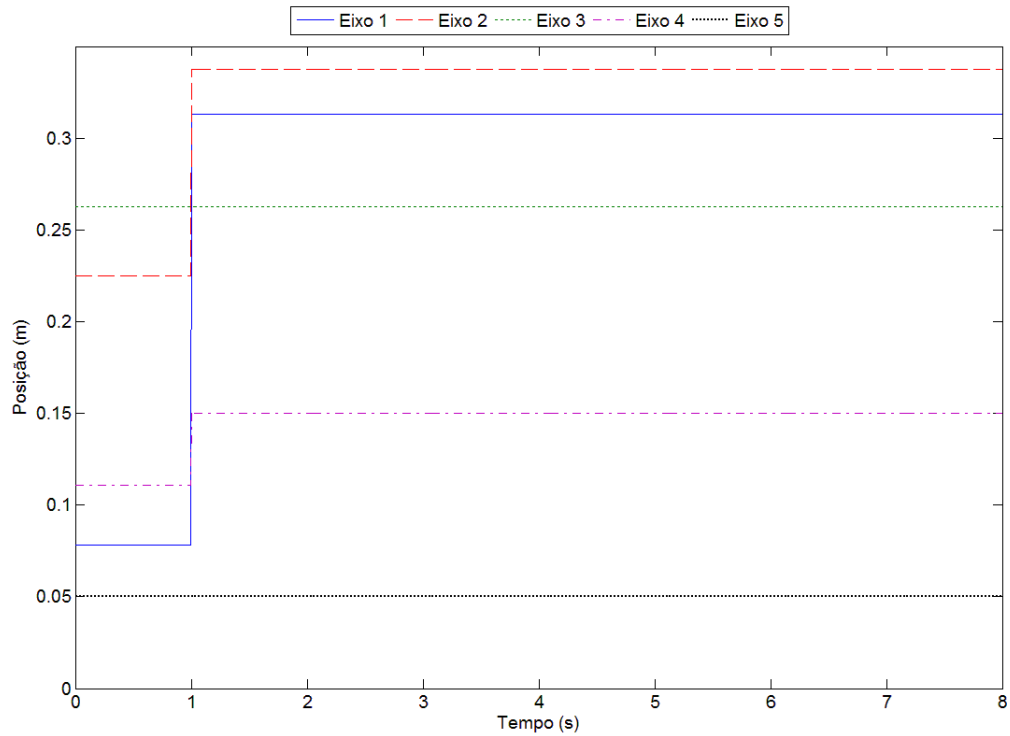


Figura 6.5 – Referência dos atuadores pneumáticos para a movimentação ponto a ponto

As figuras 6.6, 6.7 e 6.8 apresentam a posição das coordenadas x, y e z, respectivamente, com os 4 tipos de carregamentos simulados.

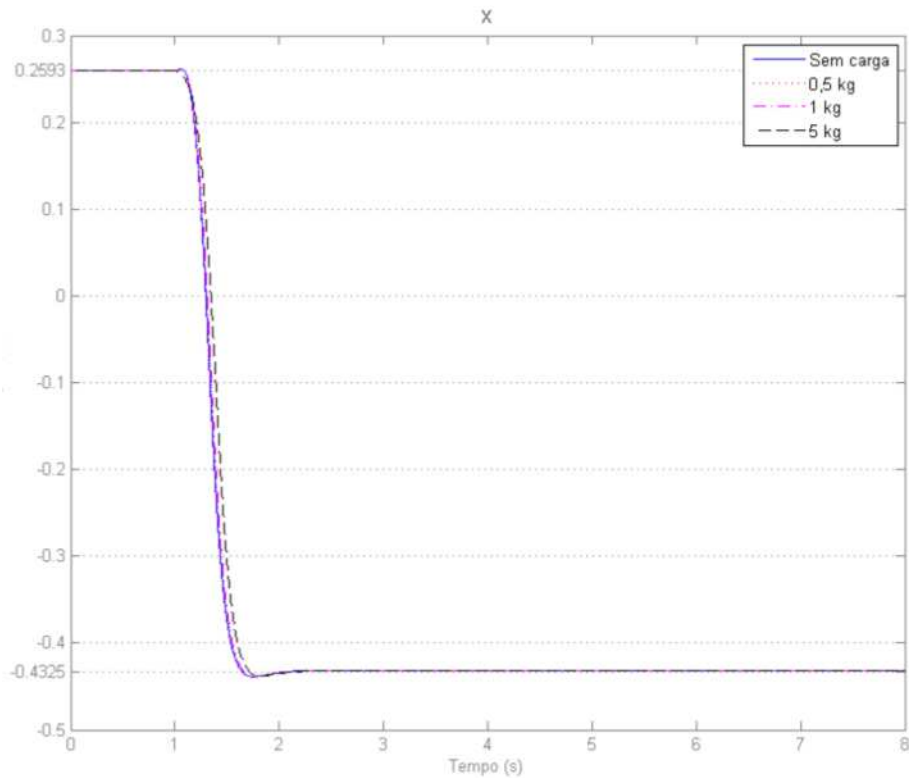


Figura 6.6 – Posicionamento na coordenada x para a movimentação ponto a ponto

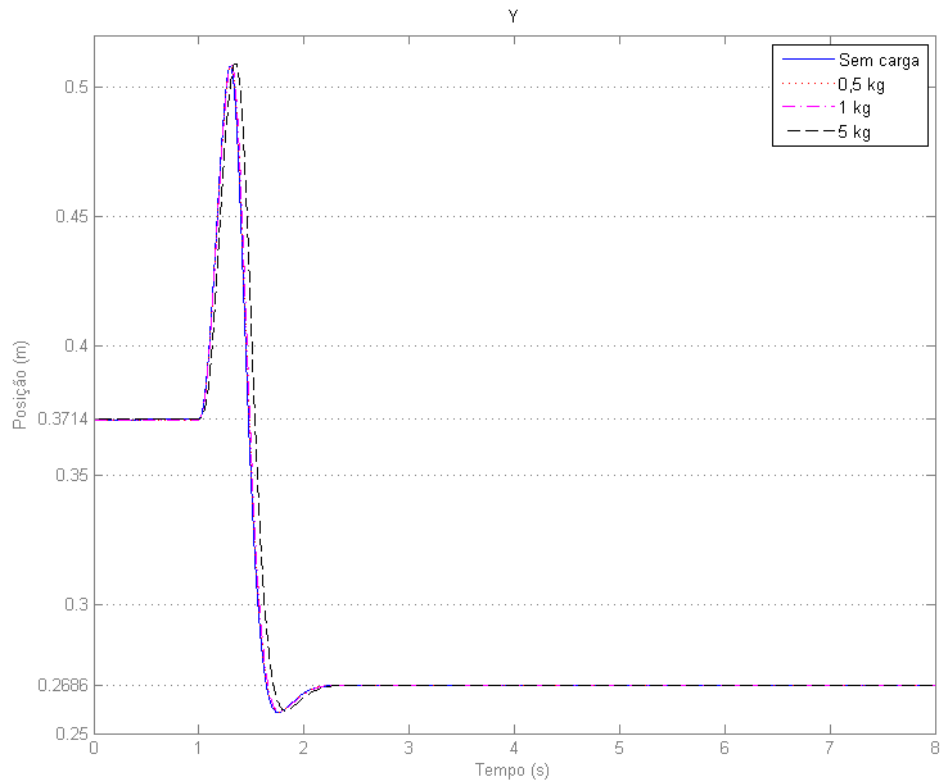


Figura 6.7 – Posicionamento na coordenada y para a movimentação ponto a ponto

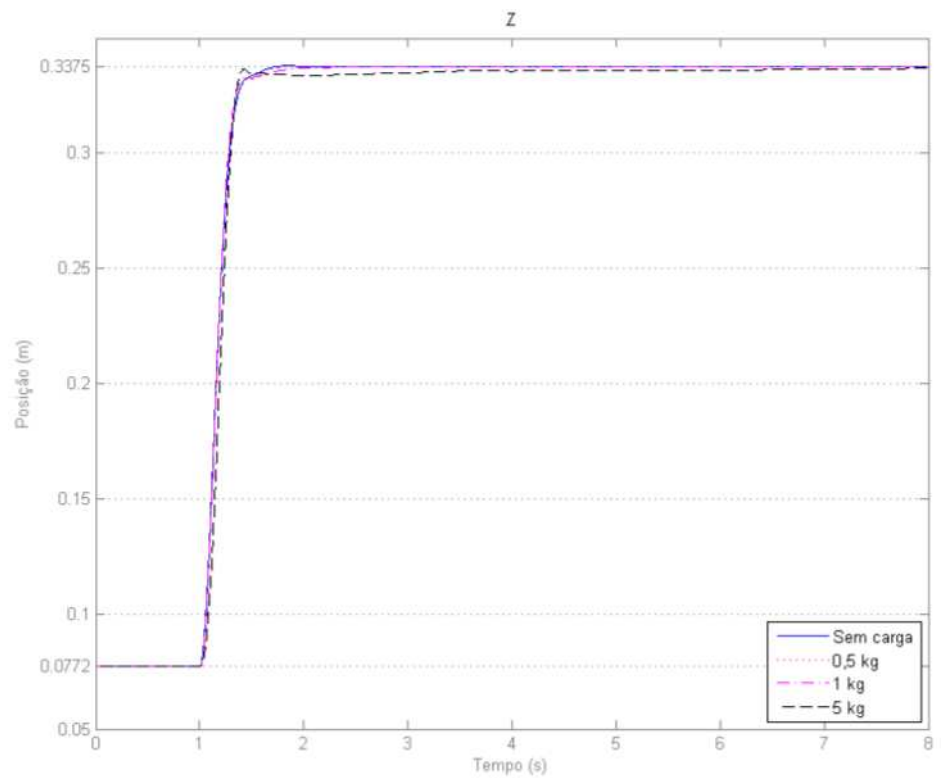


Figura 6.8 – Posicionamento na coordenada z para a movimentação ponto a ponto

Os ensaios mostraram um erro de posicionamento nulo depois de 7 segundos após a mudança do ponto de referência.

Além disto, pela Figura 6.7 é verificado um sobrepasso médio de 4% na coordenada y, isto ocorre devido à grande inércia do manipulador com relação ao primeiro eixo, característica dos manipuladores com geometria cilíndrica que pode ser observado na Figura 4.3.

Na Figura 6.9 é apresentado o resultado dos sinais de controle dos atuadores dos eixos. Os sinais de controle para os eixos 1 e 2 apresentam regiões de saturação devido as rápidas variações das suas referências.

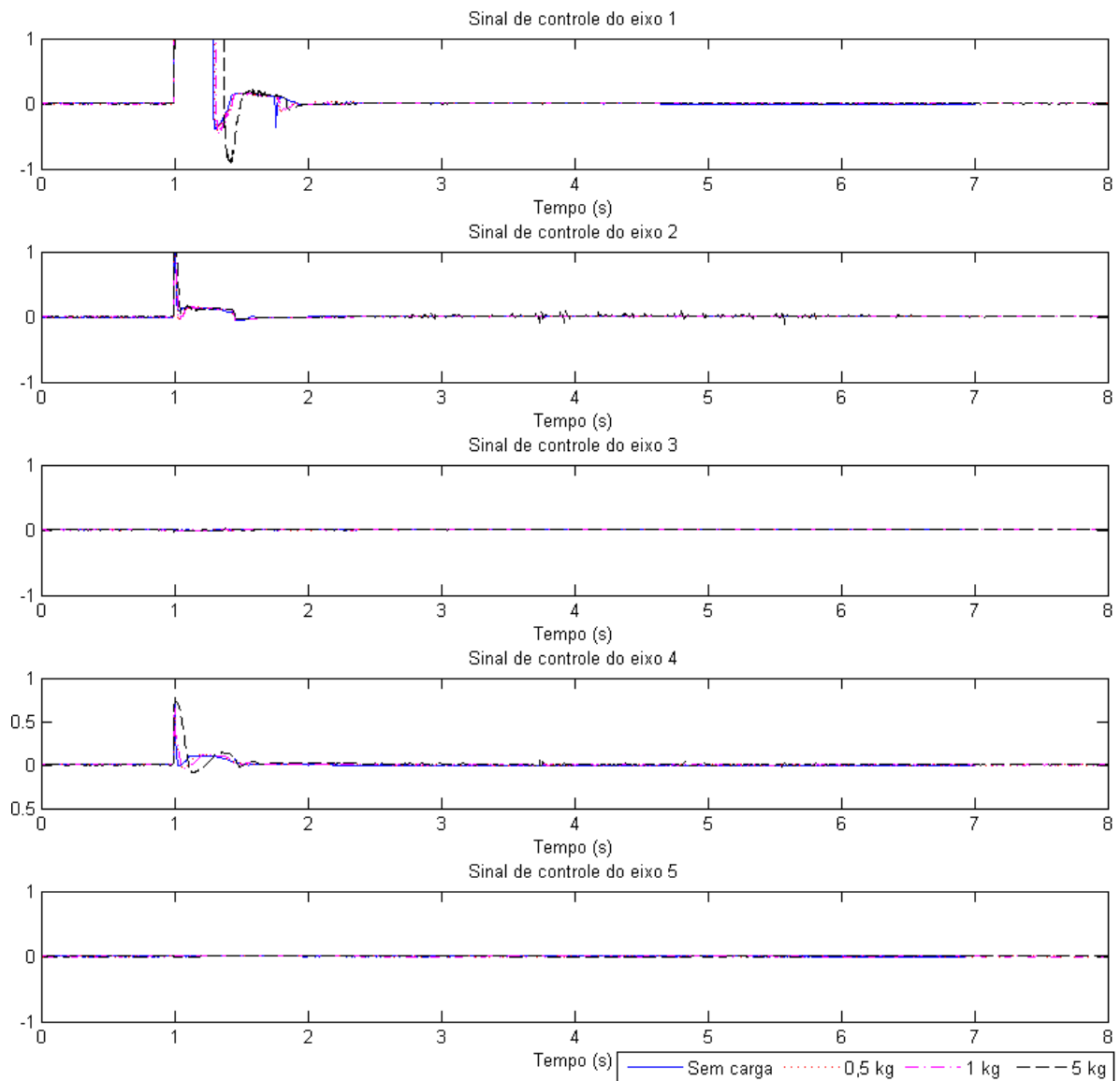


Figura 6.9 – Sinais de controle para a movimentação ponto a ponto

6.2.2.2 Seguimento de trajetória

O teste de seguimento de trajetória consiste no controle do movimento do efetuador final entre dois pontos do volume de trabalho seguindo uma trajetória suave e aproximadamente linear. Este ensaio permite verificar a capacidade do manipulador em seguir uma trajetória e a análise do sinal de controle necessário para a mesma.

Os pontos escolhidos para o início e para o fim da trajetória são os mesmos da movimentação ponto a ponto: $P_1=[0,2593; 0,3714; 0,0772]$ e $P_2=[-0,4325; 0,2686; 0,3375]$. A simulação teve uma duração de 10 s e o trajeto de referência está representado em perspectiva na Figura 6.10

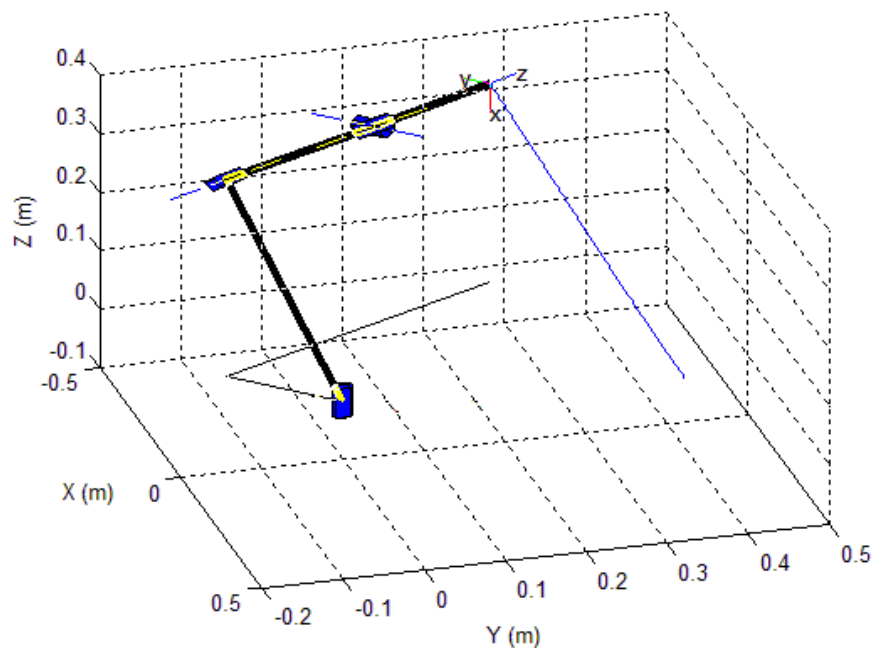


Figura 6.10 – Vista em perspectiva da trajetória de referência

As figuras 6.11 a 6.15 apresentam as posições dos cilindros pneumáticos e o trajeto de referência no espaço dos cilindros pneumáticos. A partir dessas figuras, é observado que o controle proposto para o manipulador não sofre grande influência de posição com relação à variação das massas ensaiadas. Também é observado que os erros de posicionamento final dos atuadores responsáveis pelo posicionamento são aproximadamente nulos para todos os carregamentos ensaiados.

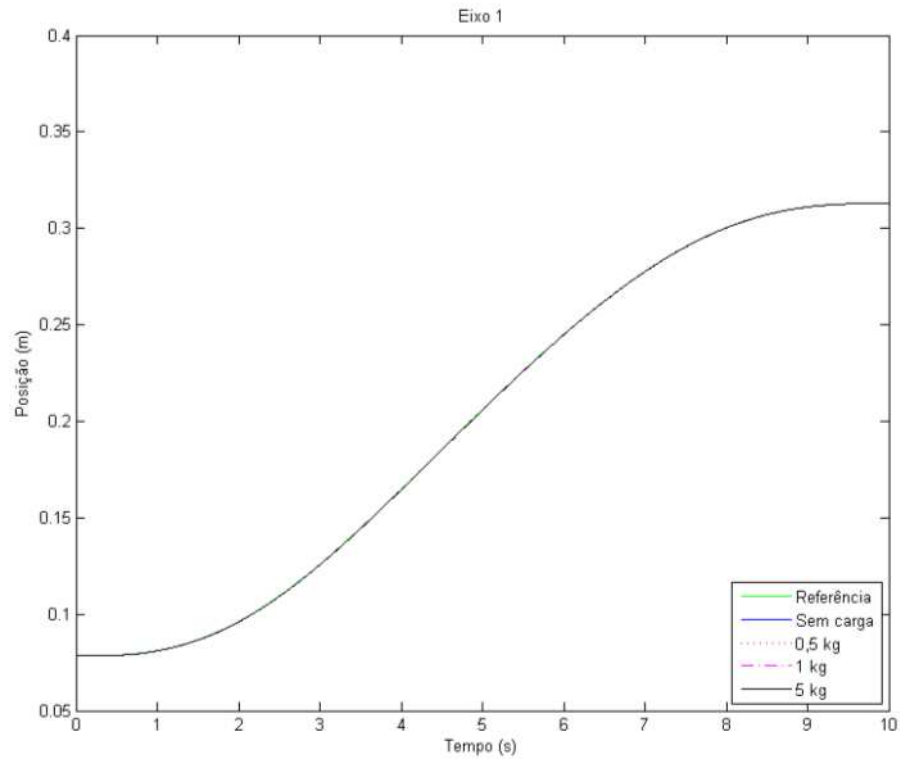


Figura 6.11 – Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 1 para o teste de seguimento de trajetória

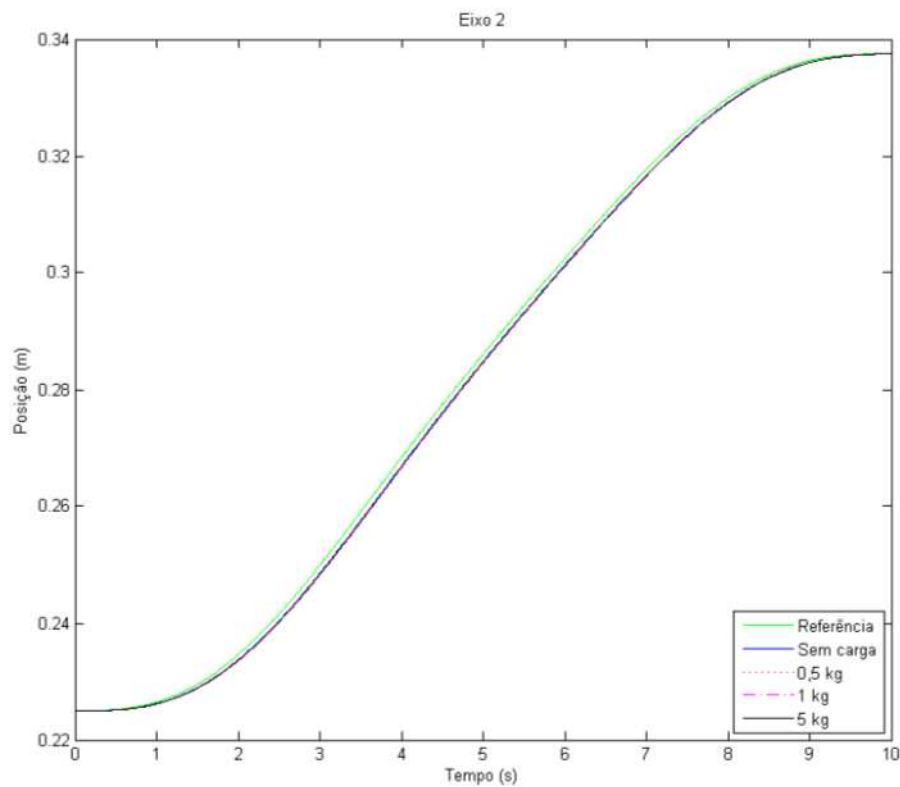


Figura 6.12 – Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 2 para o teste de seguimento de trajetória

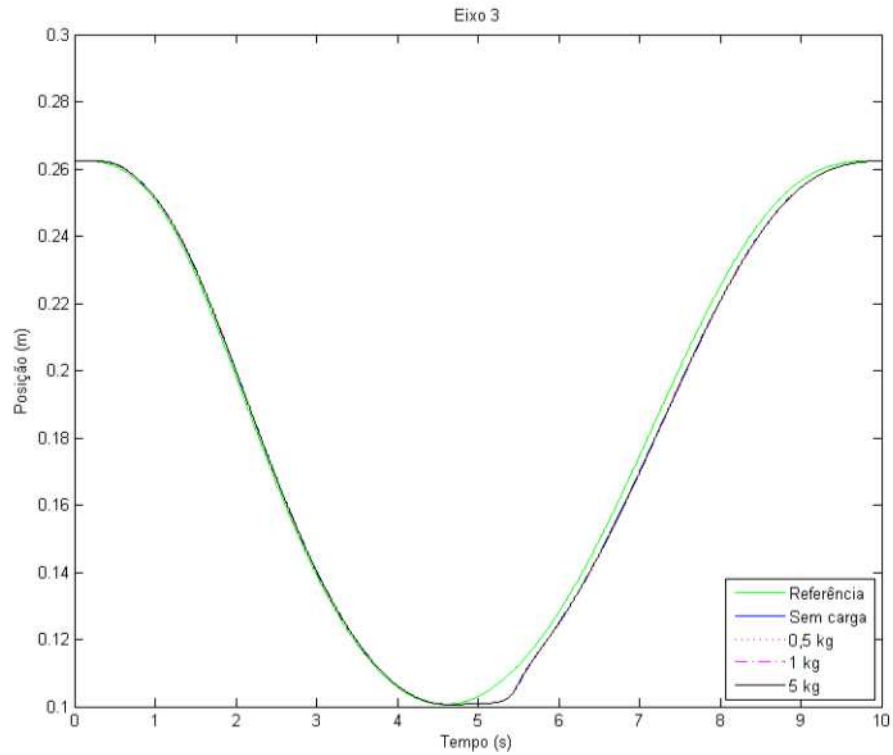


Figura 6.13 – Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 3 para o teste de seguimento de trajetória

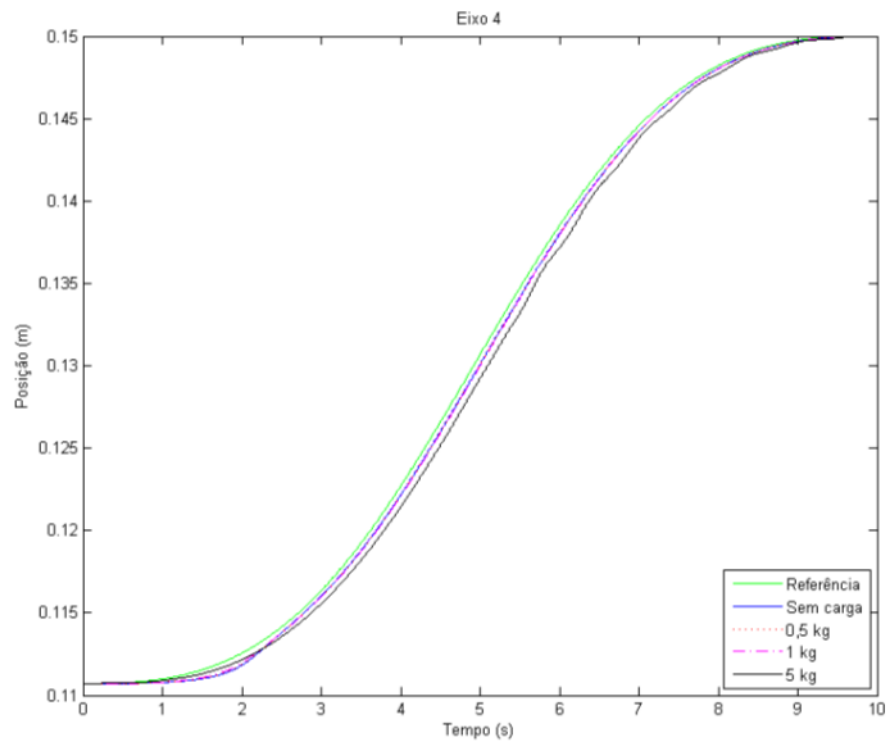


Figura 6.14 – Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 4 para o teste de seguimento de trajetória

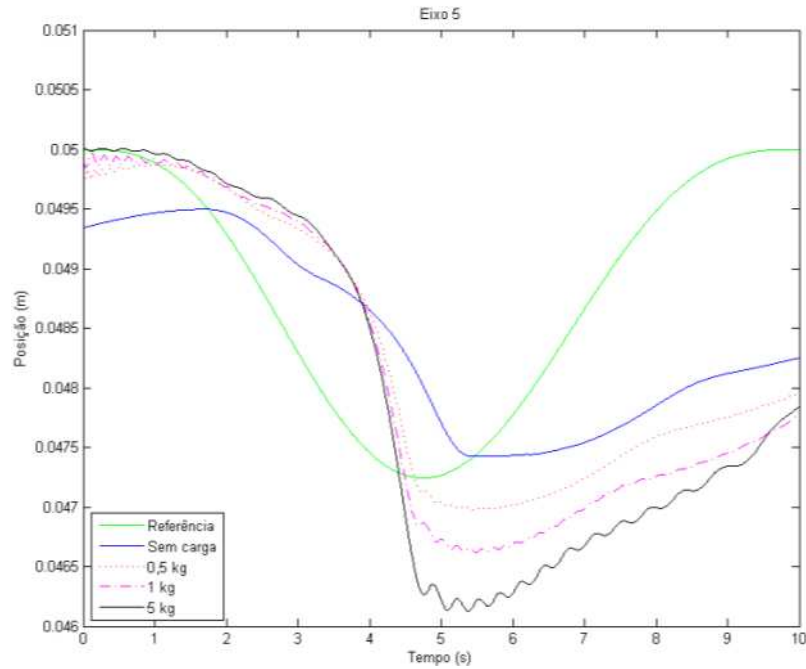


Figura 6.15 – Posições dos cilindros pneumáticos do eixo 5 para o teste de seguimento de trajetória

A seguir serão apresentados os resultados do seguimento de trajetória em detalhes para o carregamento de 1 kg.

As figuras 6.16 e 6.17 mostram o posicionamento e o erro de posicionamento, respectivamente, nas coordenadas x, y e z e o erro absoluto ao longo do tempo.

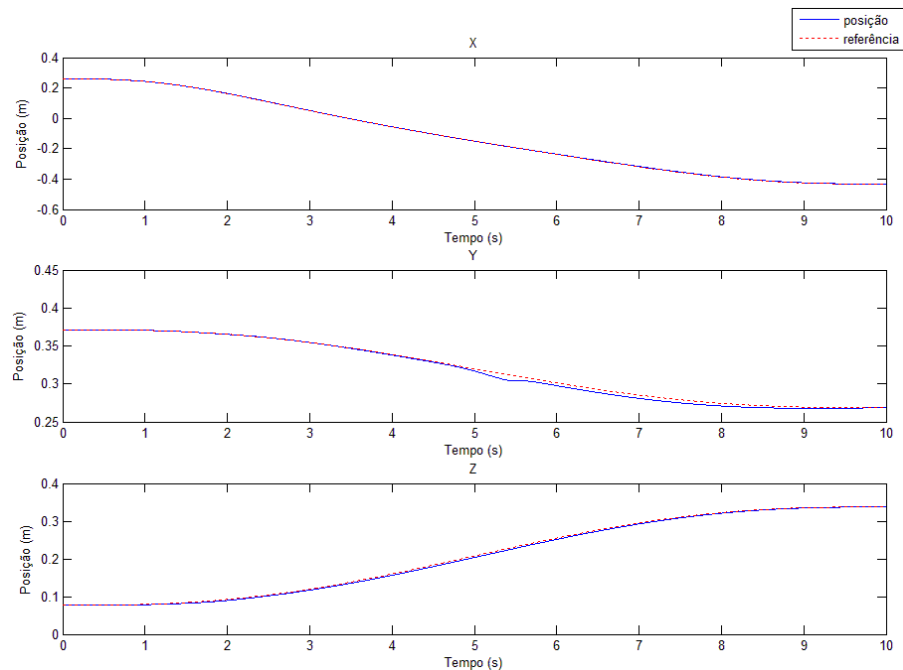


Figura 6.16 – Posicionamento nas coordenadas x, y e z para o seguimento de trajetória

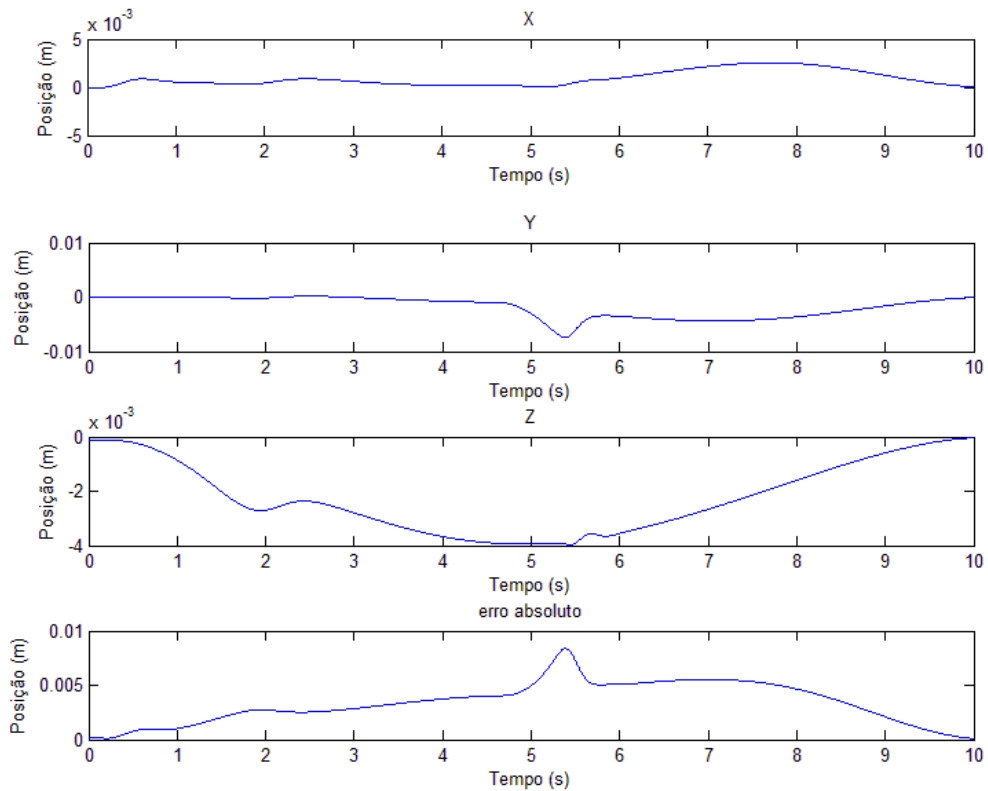


Figura 6.17 – Erro de posicionamento nas coordenadas x, y e z para o seguimento de trajetória para o carregamento de 1 kg

Pelos resultados apresentados na Figura 6.17 um erro máximo de 7 mm na coordenada y e um erro absoluto máximo de 8 mm são observados. Esses erros são devido ao fato do atuador do eixo 3 parar neste ponto, sendo necessário a força pneumática compensar o atrito estático e a inércia, conforme mostra a Figura 6.18.

Verifica-se também pela Figura 6.18 que a movimentação de um eixo não exerce grande influência sobre os deslocamentos dos demais.

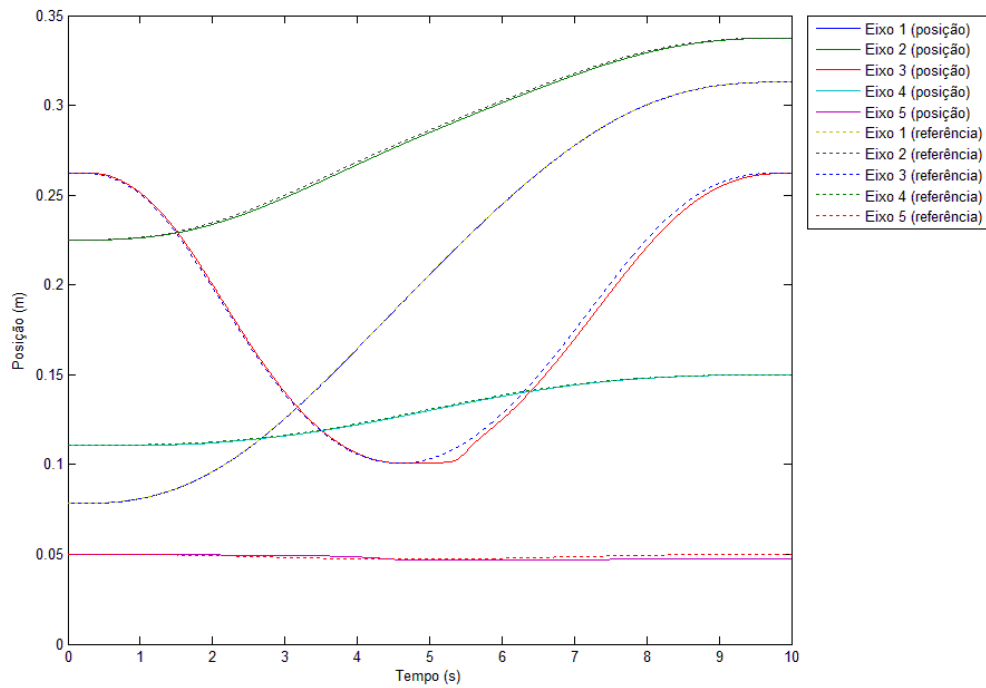


Figura 6.18 – Posições dos cilindros pneumáticos para o teste de seguimento de trajetória para o carregamento de 1 kg

Os sinais de controle da simulação em questão são apresentados na Figura 6.19. É visto que os sinais são suaves, pois não existe a ocorrência de chaveamento e saturações.

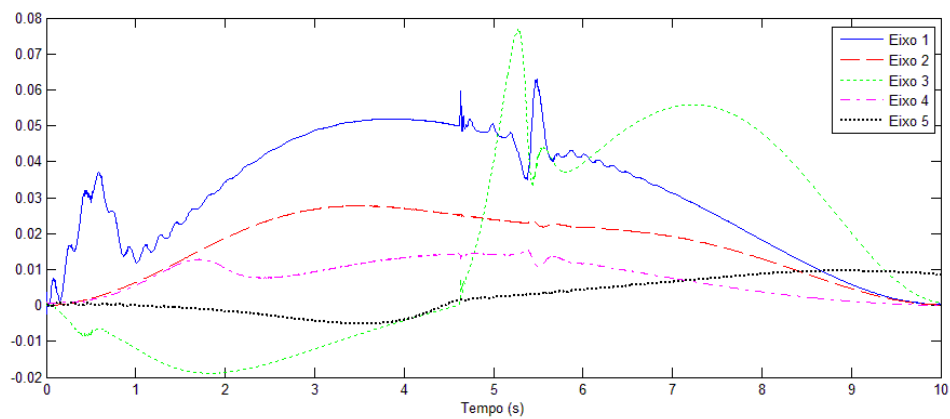


Figura 6.19 – Sinal de controle para o teste de seguimento de trajetória para o carregamento de 1 kg

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o projeto de um manipulador robótico acionado por meio de cilindros pneumáticos. Os requisitos deste projeto foram obtidos a partir do estudo de uma indústria de ferramentas mecânicas manuais. Os objetivos específicos do trabalho foram a definição da configuração do manipulador, o desenvolvimento de seu modelo matemático e a proposta de uma estratégia de controle.

A divisão do projeto em unidades técnicas de conhecimento auxiliou na identificação dos aspectos mais importantes no desenvolvimento do robô. As unidades técnicas de estrutura mecânica, modelagem matemática e sistema de controle se mostraram básicas e necessárias ao complexo projeto de um robô.

Dentro da unidade técnica de estrutura mecânica, a escolha dos atuadores e sistemas de transmissão mecânica e a geometria cilíndrica com 5 graus de liberdade foram suficientes para suprir os requisitos de trabalho, como mostrou, por exemplo, a comparação entre os volumes de trabalho (Figura 4.4).

O modelo matemático proposto apresentou uma resposta adequada, como mostraram as simulações em malha aberta e fechada. Porém, sem a existência de um protótipo físico, os parâmetros utilizados, baseados na literatura e em cálculos efetuados, podem divergir da realidade, principalmente os relacionados ao atrito.

O uso de um ambiente computacional com o auxílio de bibliotecas facilitou a implementação e a obtenção das respostas do modelo desenvolvido, entretanto, devido à complexidade do sistema e à necessidade de uma pequena tolerância no método de integração, acarretou simulações com tempos de processamento computacional relativamente elevados.

O sistema de controle desenvolvido, por realimentação dos estados de posição, velocidade e aceleração (PVA) baseado em um modelo linearizado de terceira ordem, foi eficaz para a realização das tarefas propostas. Os resultados mostraram que a estratégia utilizada levou o robô a alcançar a precisão definida nos requisitos de projeto e demonstrou robustez à variação de carregamentos.

As simulações também mostraram a existência de um pequeno efeito de acoplamento dinâmico entre os eixos do robô devido à geometria cilíndrica escolhida. Esta relativa independência da dinâmica dos eixos possibilitou o controle adequado do manipulador pelo controle independente das juntas.

6.1 Trabalhos futuros

- Construir o manipulador pneumático para obtenção dos parâmetros e comparação com o modelo matemático;
- Desenvolver as outras unidades técnicas do conhecimento para este manipulador;
- Implementar outras estratégias de controle como o baseado em linearização por realimentação dos estados [Suzuki, 2010], não-linear em cascata com compensação de atrito [Perondi, 2002] e em cascata e a estrutura variável com adaptação de parâmetros e compensação de atrito [Sobczyk S., 2009]. Para tanto, essas técnicas devem ser ampliadas, permitindo a prova de estabilidade para as diversas situações de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Abou-Fayssal, H. **Design, Analysis, and Control of a Pneumatic Cartesian Robot**, Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Canada, 1997.

Ali, M. A.; Park, H. A.; Lee, C. S. G., **Closed-Form Inverse Kinematic Joint Solution for Humanoid Robots**, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, p.704-703, 2010.

Asada, H.; Slotine, J. E., **Robot Analysis and Control**, Wiley-Interscience, 1986.

Bobrow, J. E.; McDonell, B.W. Modeling, Identification, and Control of a Pneumatically Actuated, Force Controllable Robot. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 14, p.732-742, 1998.

Buzzetto, F. A. **Implementação de um Novo Método de Gerenciamento de Projetos em uma Empresa de Componentes Eletrônicos**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Canudas de Wit, C.; Olsson, H.; Astrom, K.; Lischinsky, P. A new model for control of systems with friction. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 40, n. 3, p.419-425, 1995.

Carlotto, L.; Gehrman, D.; Valdiero, A. C.; Andrighetto, P. L., Desenvolvimento de um Manipulador Robótico de 2 Graus de Liberdade com Acionamento Pneumático. **Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, 2005.

Chen, C. T. **Linear System Theory and Design**, 3rd ed., Oxford University Press, Inc., 1999.

Corke, P. I. A Robotics Toolbox for MATLAB, **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v.3, p 24-32, 1996.

Festo, Catálogo 2010. Disponível em: <<http://www.festo.com>>. Acesso em: ago. 2010.

Franklin, G. F.; Powell, J. D.; Emami-Naeini, A. **Feedback Control of Dynamic System**, 6th ed., Pearson Prentice Hall, 2006.

Frasson M. **Projeto de um Robô Cartesiano com Acionamento Pneumático**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

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

Guihard, M.; Fontaine, J.; M'Sirdi, N. Comparative Study of Adaptive Controllers for a Pneumatic Driven Leg. **IEEE Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems**, v. 2, p.1164-1171, 1994.

Hoshino, K.; Kawabuchi, I., Mechanism of Humanoid Robot Arm with 7 DOFs Having Pneumatic Actuators, **IEICE Transactions on Fundamentals**, v. E89-A, p.3290-3297, 2006

Hoshino, K.; Krishantha, W. D. G., Calligraphic Motion by Humanoid Robot Arm Using Air Cylinder Actuators as Endoskeletons, **IEEE Proceedings of International Conference on Mechatronics**, p.1-6, 2007.

Kucuk, S.; Bingul, Z., Robot Workspace Optimization Based on a Novel Local and Global Performance Indices, **IEEE Proceedings of the International Symposium on Industrial Electronics**, v.4, p. 1593-1598, 2005.

Kumazawa, V. D.; Hess-Coelho, T. A.; Rinaudi, D.; Carbone, G., Ceccarelli, M., Kinematic Analysis and Operation Feasibility of a 3-DOF Asymmetric Parallel Mechanism, **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 2009.

Liu, S.; Bobrow, J., An Analysis of a Pneumatic Servo System and its Application to a Computer-controlled Robot, **ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, v.110, p.228-235, 1988.

MathWorks. Matlab. 2006. Disponível em: < <http://www.mathworks.com>>. Acesso em: mar. 2010.

Mattiazzo, G.; Mauro, S.; Raparelli, T.; Velardocchia, M., Control of a Six-axis Pneumatic Robot, **Journal of Robotic System**, v.19, p.363-378, 2002.

McDonell, B. W., **Modeling, Identification, and Control of a Pneumatically Actuated Robotic Manipulator**, PhD thesis, University of California, USA, 1996.

MTE, **NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços de Eletricidade**, Ministério do Trabalho e Emprego, 2004.

Ning, S.; Bone, G., Experimental Comparison of Two Pneumatic Servo Position Control Algorithms, **Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation**, v.1, p. 37-42, 2005.

Ogata, K. **Controle Moderno**. Prendice/Hall do Brasil, 2000.

Perondi, E. A.; Guenther, R. Controle com compensação de atrito de um servoposicionador pneumático. **Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, 1999a.

Perondi, E. A.; Guenther, R. Controle em malha fechada de um servoposicionador pneumático. **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 1999b.

Perondi, E. A.; Guenther, R. Controle de um Servoposicionador Pneumático por Modos Deslizantes. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2000.

Perondi, E. A.; Guenther, R. Modelagem de um Servoposicionador Pneumático com Atrito. **Ciência & Engenharia**, v. 12, n. 1, p. 43-52, 2003.

Perondi, E. A., **Controle Não-linear em Cascata de um Servoposicionador Pneumático com Compensação do Atrito**, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande de Santa Catarina, 2002.

Rachkov, M.Y.; Crisóstomo, M.; Marques, L.; Almeida, A. T. de, Positional Control of Pneumatic Manipulators for Construction Tasks, **Automation in Construction**, v.11, p. 655-665, 2002.

Richardson, R.; Jackson, A.; Culmer, P.; Bhakta, B., Pneumatic Impedance Control of a 3-d.o.f. Physiotherapy Robot, **Advanced Robotics**, v.20, p.1321-1339, 2006.

Rios, C. F., **Projeto e Construção de um Robô Cartesiano com Acionamento Pneumático**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

Romano, V. F.; Dutra, M. S., **Introdução à Robótica Industrial**. In: Vitor Romano. (Org.). **Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos**, 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, pp. 1-19, 2002.

Schirmer, L., **Modelagem do Robothron – Um Manipulador de Barras Paralelas**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Automação Industrial, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2005.

Schulte, H.; Guelton, K., Descriptor Modelling Towards Control of a Two Link Pneumatic Robot Manipulator: A T-S Multimodel Approach, **Journal of Nonlinear Analysis: Hybrid Systems**, v.3, p.124-132, 2009.

Sciavicco, L.; Siciliano, B., **Modeling and Control of Robot Manipulators**, 6th ed., Springer, 2005.

Simas, H.; Dias, A.; Martins, D., Kinematic Model for Eclipse and Eclipse-II Parallel Robot. **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 2009.

Sobczyk S., M. R., **O Controle em Cascata e a Estrutura Variável de um Servoposicionador Pneumático**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

Sobczyk S., M. R., **Controle em Cascata e a Estrutura Variável com Adaptação de Parâmetros e Compensação de Atrito de um Servoposicionador Pneumático**, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

Spong, M. W.; Vidyasagar, M., **Robot Dynamics and Control**, John Wiley & Sons, Inc., 1989.

Suzuki, R. M., **Controle baseado em linearização por Realimentação dos Estados Aplicado a um Servoposicionador Pneumático**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Uebing, M.; Vaughan, M. D.; Surgenor, B. W., On Linear Dynamic Modeling of a Pneumatic Servo System, **Scandinavian International Conference on Fluid Power**, p.363-378, 1997.

Valdiero, A. C., **Controle de Robôs Hidráulicos com Compensação de Atrito**, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande de Santa Catarina, 2005.

Vieira, A. D., **Análise Teórico Experimental de Servoposicionadores Lineares Pneumáticos**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande de Santa Catarina, 1998.

Virvalo, T., Designing a Pneumatic Position Servo System, **Power International**, v.35, p.141-147, 1989.

Wampler, C. W., Manipulator Inverse Kinematics Solutions Based on Vector Formulations and Damped Least-squares Methods, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.16, p. 93-101, 1986.

Watanabe, K.; Nagayasu, H.; Kawakami, N.; Tachi, S., Mechanical Compliance Control System for a Pneumatic Robot Arm, **Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference**, p.2789-2794, 2008.

Xia, Y, **Continuous Sliding Mode Control of a Cartesian Pneumatic Robot**, Master thesis, Departament of Mechanical Engineering, Queen's University, Canada, 2001.

Yu, D.; Cong, D., Error Modeling and Kinematic Calibration of Parallel Robots, **Chinese Control and Decision Conference**, p.2162-2167, 2008.

APENDICE A – Exemplos de sistema de transmissão mecânica

Neste apêndice são apresentados alguns exemplos de transmissões mecânicas extraídas da literatura.

A Figura A.1 mostra o uso de fusos associados a alavancas para realizar a movimentação das juntas. Schirmer, 2005, destaca que esta configuração alivia os esforços sobre as juntas e que, entretanto, os movimentos das articulações são limitados e dependentes do comprimento do fuso guia.

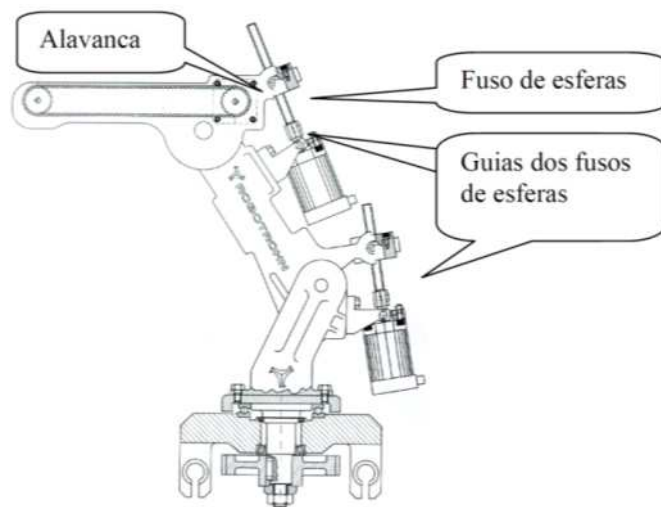


Figura A.1 – Sistema de transmissão por fuso e alavanca [Schirmer, 2005]

Mattiazzo et al, 2002 e Rachkov et al, 2002 desenvolveram um sistema de transmissão indireto baseado em um conjunto pinhão/cremalheira para transformar o movimento linear dos atuadores pneumáticos em rotacional, apresentado na Figura A.2. Por utilizar engrenamento reto, ocorrem folgas que reduzem a precisão do manipulador.

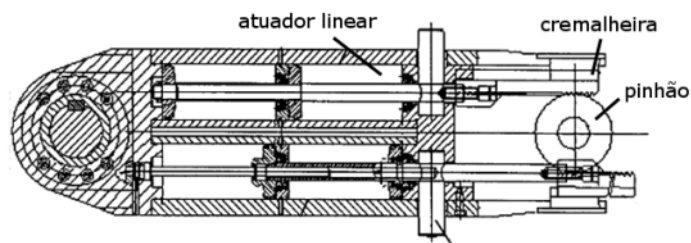


Figura A.2 – Sistema de transmissão por um conjunto pinhão/cremalheira, adaptado de Mattiazzo et al, 2002

O uso de cabos e polias como modo de transmissão mecânica pode ser visto nos trabalhos de Schulte e Guelton, 2009, Bobrow e McDonell, 1998, Guihard et al, 1994 e

McDonnell, 1996. Sua principal vantagem é a ocorrência apenas de folgas de pequena amplitude, característica importante para o controle do manipulador. A Figura A.3 apresenta este sistema conectado a um atuador pneumático.

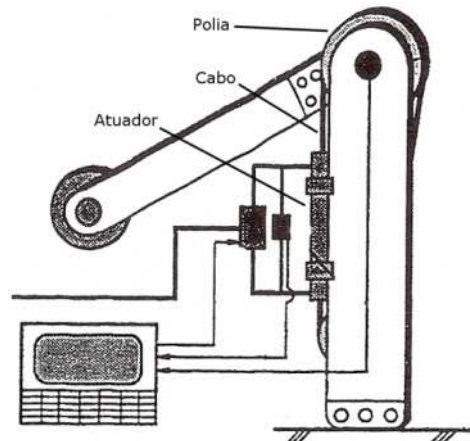


Figura A.3 – Sistema de transmissão por cabo e polia, adaptado de McDonnell, 1996

O sistema de transmissão por alavancas é de fácil montagem e manutenção, porém a força de atuação varia com a posição do atuador. Este tipo de sistema foi utilizado em Carlotto et al, 2005 , Richardson et al, 2006 e Valdiero, 2005. A Figura A.4 mostra o sistema aplicado a um manipulador hidráulico de dois graus de liberdade.

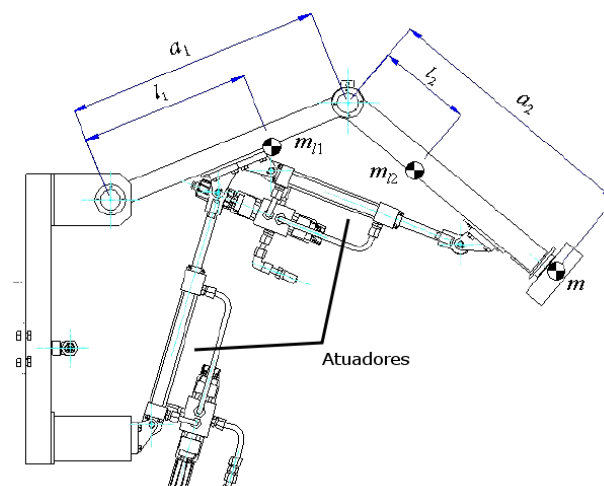


Figura A.4 – Sistema de transmissão por alavancas, adaptado de Valdiero, 2005

Hoshino e Kawabuchi, 2006, desenvolveram um sistema de transmissão mecânica utilizando um fuso e came. O sistema, utilizado para transformar movimentos lineares em

rotacionais, é compacto e mantém os eixos concêntricos. Uma vista explodida do modelo proposto pode ser observada na Figura A.5.

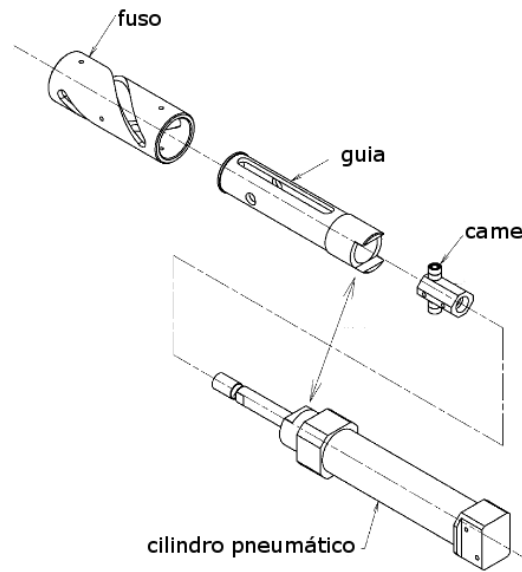


Figura A.5 – Sistema de transmissão por fuso e came, adaptado de Hoshino e Kawabuchi, 2006

APENDICE B – Modelagem geométrica do manipulador robótico pneumático em detalhes

A Figura B.1 apresenta a vista frontal e lateral do manipulador robótico pneumático e suas principais dimensões em milímetros.

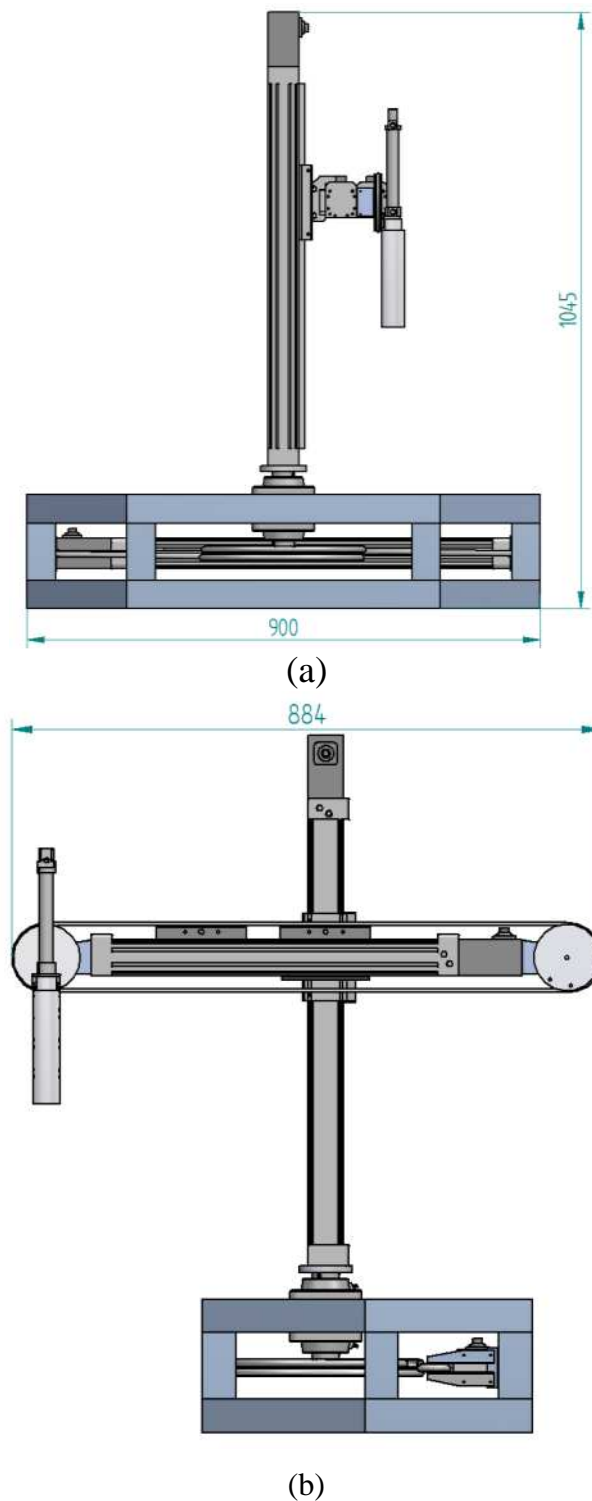


Figura B.1 – Vistas do manipulador robótico pneumático: (a) vista frontal (b) vista lateral

A Figura B.2 apresenta uma vista explodida com relação aos elos do manipulador robótico pneumático.

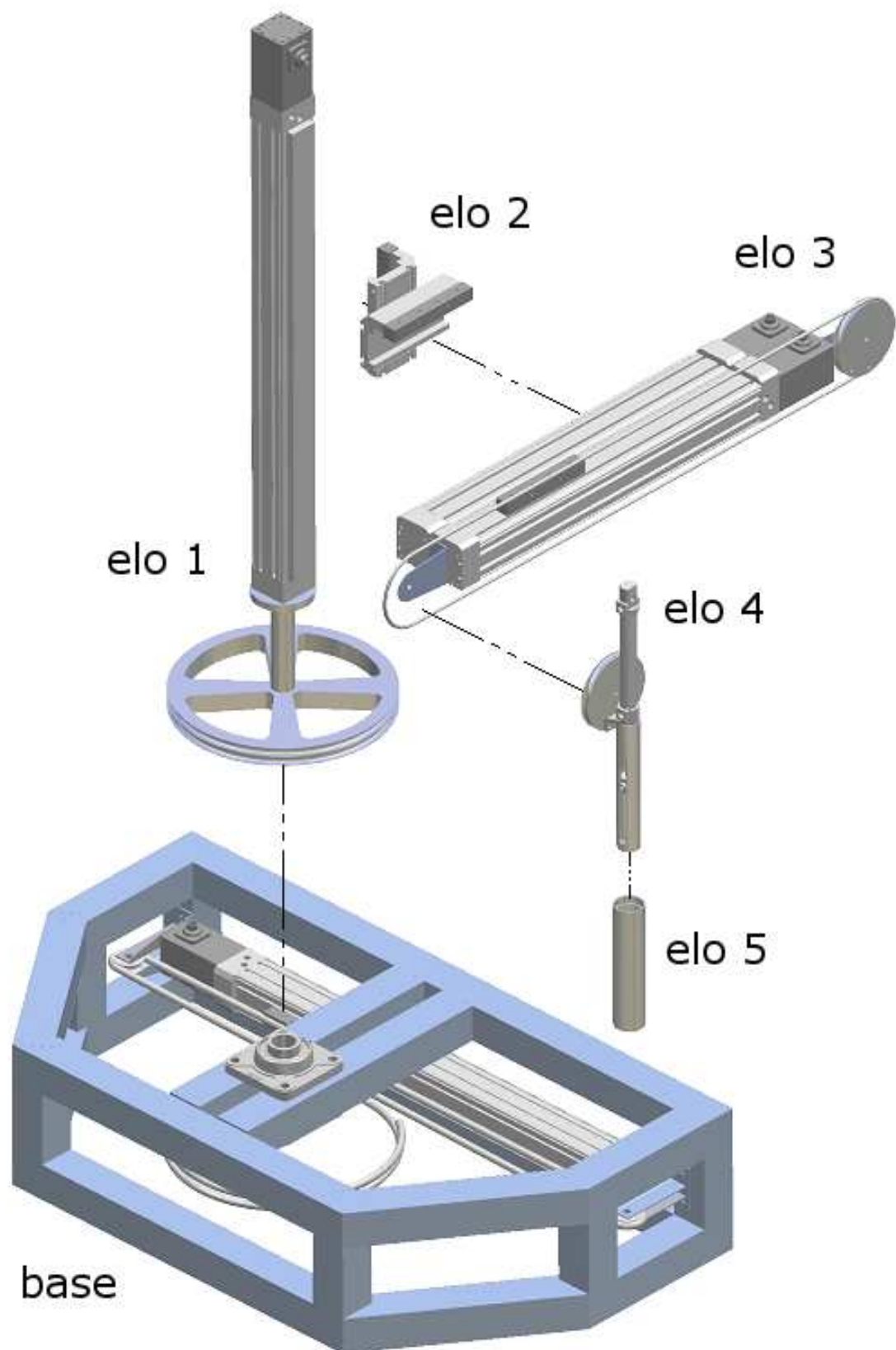


Figura B.2 – Vista explodida do manipulador robótico pneumático