

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

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ CARTESIANO COM ACIONAMENTO
PNEUMÁTICO

por

Claudio Fernando Rios

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2009

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ CARTESIANO COM ACIONAMENTO
PNEUMÁTICO

por

Claudio Fernando Rios
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Prof. Dr. Horácio A. Vielmo
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 de Julho de 2009.

AGRADECIMENTOS

Aos gigantes dele,
a ele,
aos meus gigantes.

DEDICATÓRIA

À Rosane.

RESUMO

O presente trabalho trata do projeto, construção e análise de desempenho de um robô pneumático com três graus de liberdade. Foi fundamentado no trabalho de Frasson (2007) com alterações na escolha de componentes que permitissem a redução de custos. Tem como objetivo verificar se um robô comandado por válvulas solenóide rápidas, e controlado pela técnica baseada em modos deslizantes (Slide Mode Control), tem desempenho adequado para permitir sua aplicação em processos industriais. Os testes efetuados para constatar seu desempenho foram os de deslocamento em degrau (step) e o seguimento de trajetória. A configuração do robô é cartesiana por permitir que os eixos do robô trabalhem desacoplados, facilitando o estudo dos movimentos. Os resultados dos testes de deslocamento em degrau e os de seguimento de trajetória indicam que o robô mostrou-se eficiente no posicionamento final em relação os valores definidos pela camada limite. Observou-se também que a combinação entre o tempo de resposta da válvula solenóide e a vazão de ar que atravessa à válvula (constante no caso de válvulas solenóide) estabelece a dinâmica dos cilindros e, dependendo da velocidade determinada para o deslocamento do êmbolo resulta impossível manter a movimentação dentro da camada limite escolhida. Desta forma o robô cartesiano com acionamento por eletroválvulas pneumáticas e controlado através da técnica baseada em modos deslizantes, mostrou-se eficiente para tarefas em que é necessário um de posicionamento final dentro da camada limite, como podem ser as de montagem e armazenamento, por exemplo. Já nas aplicações em que o seguimento de trajetória se torna necessário, deve ser feito um estudo considerando o tempo de acionamento das válvulas, a vazão de ar e as velocidades que o robô deve desempenhar para determinar se a largura da camada limite necessária é aceitável para a aplicação pretendida.

Palavras-chave: Controle por modos deslizantes; Automação Industrial; Robô Pneumático.

ABSTRACT

The present work tries the design, construction and analysis of performance of one three degrees of freedom pneumatic robot. This work was substantiated in the work of Frasson (2007) with some alterations in the components choice to reduce costs. This work objective is to verify the robot, being commanded by quick solenoid valves, and controlled by a technique based on Slide Mode Control, permits their application in industrial trials. The tests performed for establish his performance were the displacement in step function and the following of path. This robot has a Cartesian configuration because the axis is free to move alone and the study of axes movement is easy. The tests results indicate that a pneumatic robot had precise perform in the tests of displacement in step, positioning itself inside the streak of default tolerance in each one of the axes. Also the solenoid valve response time and the solenoid valve air flux make a cylinder dynamics and depends on speed choice to piston movement may be impossible to maintain the motion inside of the sliding surface. Then a Cartesian pneumatic robot commanded by fast solenoid valves a having an Slide Mode Control show efficient to deal with assignments which need a final location inside the limit area, as assemblies or storage assignments. In cases where following of path is important, is need an specific study on valves switching time, air flow and speed needed in robot operation to determine if the limit region defined is accepted for the assignments choiced.

Keywords: Sliding mode control, Industrial Automation, Pneumatic Robot.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Descrição do Problema.....	1
1.2	Objetivo Geral	2
1.3	Objetivos Específicos	2
1.4	Estrutura da Dissertação	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Antecedentes Tecnológicos	4
2.1.1	Robô Industrial	4
2.1.2	Componentes	5
2.1.2.1	Manipulador Mecânico.....	5
2.1.2.2	Atuadores.....	6
2.1.2.3	Sistemas de Transmissão Mecânica.	6
2.1.2.4	Sensores.....	7
2.1.2.5	Unidade de Controle.....	9
2.1.2.6	Unidade de Potência.....	9
2.1.2.7	Efetuator ou Órgão Terminal.....	9
2.1.3	Configurações Geométricas dos Robôs.....	10
2.1.4	Interface com o Usuário e Programação	10
2.1.5	Programação	11
2.6	Aplicações em Processos Industriais.....	11
2.2	Estado da arte	12
3.	METODOLOGIA DE PROJETO	16
3.1	Especificações de Projeto	16
3.2	Projeto Conceitual	17
3.2.1	Busca e Seleção da Solução	17

3.3	Projeto Preliminar.....	19
4.	UNIDADE TÉCNICA DE ESTRUTURA DO ROBÔ.....	20
4.1	Volume de Trabalho.....	21
4.2	Estudo e Escolha de Componentes.....	21
4.2.1	Unidade de Preparação de Ar.....	21
4.2.2	Válvula Reguladora de Vazão.....	22
4.2.3	Atuadores Lineares Pneumáticos.....	22
4.2.4	Válvulas solenóide rápidas.....	22
4.3	Projeto Mecânico.....	23
4.3.1	Dimensionamento das Polias Sincronizadoras.....	24
4.3.2	Seleção das Correias Sincronizadoras.....	25
4.3.3	Módulo de Movimentação para os eixos X e Y.....	26
4.3.4	Módulo de Movimentação para o eixo Z.....	27
5.	UNIDADE TÉCNICA DE ARQUITETURA DE CONTROLE.....	28
5.1	Arquitetura de Controle do Robô.....	28
5.1.1	Unidade Central de Controle.....	29
5.1.2	Conversor RS 232/422.....	29
5.1.3	Placa Coletora de Dados.....	29
5.1.4	Transdutor de Deslocamento.....	34
5.1.5	Driver de acionamento.....	33
6.	UNIDADE TÉCNICA DE MODELAGEM MATEMÁTICA.....	36
6.1	Modelo Matemático do Cilindro Pneumático.....	36
6.2	Modelo Matemático da Eletroválvula Direcional.....	38
6.2.1	Subsistema Eletromagnético.....	39
6.2.2	Subsistema Mecânico.....	40
6.2.3	Subsistema Pneumático.....	40
7.	UNIDADE TÉCNICA DE SISTEMA DE CONTROLE.....	41
7.1	Definição do Sistema de Controle.....	41
7.2	Controle por Modos Deslizantes para Servoposicionadores Pneumáticos.....	41
7.2.1	Projeto do Controlador SMC.....	42

7.2.1.1	Fase 1 – Definição da Superfície de Deslizamento	42
7.2.1.2	Fase 2 – Definição da Lei de Controle	44
7.2.2	Ajuste da Camada Limite	45
8.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	46
8.1	Teste de movimentação em degrau no eixo X	46
8.2	Teste de seguimento de trajetória no eixo X	51
8.3	Teste de movimentação em degrau no eixo Y	53
8.4	Teste de seguimento de trajetória no eixo Y	56
8.5	Teste de movimentação em degrau no eixo Z.....	59
8.6	Teste de seguimento de trajetória no eixo Z.....	62
8.7	Análise dos resultados	64
9.	CONCLUSÕES.	66
9.1	Trabalhos Futuros.....	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	APÊNDICE A	71

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área transversal da câmara, m^2
A_1	área transversal da câmara A, m^2
A_2	área transversal da câmara B, m^2
A_e	área do núcleo da bobina, m^2
$b_{(\)}$	função não linear
b_c	coeficiente de amortecimento do carretel, $N/(m/s)$
B_g	densidade de fluxo magnético no ar, Wb/m^2
$c_{coulomb}$	Coefficiente de atrito de Coulomb, $N s/m$
c_p	calor específico do ar a pressão constante, $J/kg K$
c_v	calor específico do ar a volume constante, $J/kg K$
c_{val}	coeficiente de taxa de vazão da válvula
c_{vis}	coeficiente de atrito viscoso, $N s/m$
D_v	Deslocamento efetuado por volta na polia, m
e	erro de posição, m
\dot{e}	derivada primeira do erro de posição, velocidade do erro, m/s
\ddot{e}	derivada segunda do erro de posição, erro de aceleração, m/s^2
\tilde{e}	erro de rastreamento, m
e_v	tensão de alimentação, V
$f(\cdot)$	função dependente do estado
F_c	força de atrito seco (ou de Coulomb), N
F_d	força externa, N
F_m	força de atração gerada pelo núcleo magnético, N
F_s	força de atrito estático, N
g	aceleração da gravidade, m/s^2
H	intensidade magnética, Wb/m^2
i	intensidade de corrente elétrica, A
I	intensidade de corrente da bobina, A
K	Constante da mola, N/m

L	comprimento útil do cilindro atuador, m
L_c	comprimento da correia, m
L_i	indutância ideal, Wb
\dot{m}_A	vazão de massa de ar na câmara A, kg/s
$\dot{m}_{A(entra)}$	vazão de massa de ar entrando na câmara A, kg/s
$\dot{m}_{A(sai)}$	vazão de massa de ar saindo da câmara A, kg/s
\dot{m}_B	vazão de massa de ar na câmara B, kg/s
$\dot{m}_{B(entra)}$	vazão de massa de ar entrando na câmara B, kg/s
$\dot{m}_{B(sai)}$	vazão de massa de ar saindo da câmara B, kg/s
m_c	massa do carretel da válvula, kg
n	ordem do sistema
N	Número de espiras da bobina
NI	Força magneto motora, N
P_A	pressão do ar dentro da câmara A, Pa
\dot{P}_A	taxa de vazão de massa na câmara A, kg/s
P_{alta}	pressão de entrada de ar, Pa
P_B	pressão do ar dentro da câmara B, Pa
\dot{P}_B	taxa de vazão de massa na câmara B, kg/s
P_{baixa}	pressão de saída de ar, Pa
$p_{crít}$	relação de pressões crítica
R	constante do gás, kg J/K
r	relação de calores específicos do ar
R_c	resistência elétrica da bobina, Ohm
r_p	raio primitivo a polia sincronizadora, m
r_{pres}	raio primitivo da polia sincronizadora em relação à resolução, m
r_{pvel}	raio primitivo da polia sincronizadora em relação à velocidade, m
S	superfície de deslizamento
\check{S}	Superfície de deslizamento (escala de S)
s_{val}	Área de passagem da válvula, m ²
$sat()$	função sinal de saturação
$sgn()$	função sinal
T	temperatura, K
t	tempo, s

V_A	volume da câmara A, m ³
V_B	volume da câmara B, m ³
v_s	velocidade de limiar ou de Stribeck, m/s
x	saída de interesse
X_p	deslocamento do êmbolo da posição central, m
X	vetor de estados
x_c	movimento do carretel, m
x_d	saída de referência, m
X_d	vetor dos estados de referência
x_t	espaço do ar a ser transposto pelo fluxo, m
\tilde{x}	erro de rastreamento de posição, m
$\dot{\tilde{x}}$	erro de rastreamento de velocidade, m/s
$\ddot{\tilde{x}}$	erro de rastreamento de aceleração, m/s ²
\tilde{X}	vetor de estado de erro de rastreamento
\dot{y}	velocidade relativa entre as duas superfícies, m/s
z	deformação no movimento de pré-deslizamento, m
σ_0	coeficiente de rigidez elástica, N/m ²
σ_1	coeficiente de amortecimento, Ns/m
σ_2	coeficiente de amortecimento viscoso, Ns/m
φ	camada limite, m
λ	inclinação da superfície de deslizamento
ϕ	fluxo efetivo do circuito magnético, Wb
ζ	coeficiente de amortecimento
ω	frequência natural, Hz
π	3,1416 rad

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Manipulador Mecânico	5
Figura 2.2	Junta Prismática	6
Figura 2.3	Encoder Incremental	7
Figura 2.4	Sinal de saída do sensor de posição e decodificador de quadratura.	8
Figura 2.5	Robô Cartesiano ou Retangular	10
Figura 3.1	Volume de Trabalho do Robô.....	18
Figura 4.1	Esquema Pneumático do Robô.	20
Figura 4.2	Estrutura do Robô	23
Figura 4.3	Módulo de Movimentação Pneumático usado nos eixos X e Y	26
Figura 4.4	Módulo de Movimentação Pneumático usado no eixo Z	27
Figura 5.1	Esquema Elétrico do Robô	28
Figura 5.2	Placa Coletora de Dados	30
Figura 5.3	Esquema Elétrico do Driver de Acionamento	35
Figura 6.1	Diagrama de blocos da eletroválvula solenoide	38
Figura 7.1	Interpretação Gráfica da Região de Deslizamento em Fase Plana com 'Chattering' como resultado de um Chaveamento não Ideal, fonte Situm et al. 2003.....	42
Figura 8.1	Posição do eixo X no teste de degrau.....	47
Figura 8.2	Detalhe do início da movimentação.....	47
Figura 8.3	Detalhe do fim da movimentação.	48
Figura 8.4	Velocidade desenvolvida pelo eixo X no percurso mostrado na Figura 8.1....	48
Figura 8.5	Aceleração desenvolvida pelo eixo X no percurso mostrado na Figura 8.1	49
Figura 8.6	Sinal de saída do controlador no percurso mostrado na Figura 8.1	49
Figura 8.7	Posição do eixo X com teste de degrau e zona morta diminuída.	50
Figura 8.8	Detalhe do chaveamento constante	51
Figura 8.9	Posição - Teste de seguimento de trajetória no eixo X.....	52
Figura 8.10	Velocidade do erro - Teste de seguimento de trajetória no eixo X.....	52
Figura 8.11	Sinal de saída do controlador - Teste de seguimento de trajetória eixo X.....	53

Figura 8.12	Posição do eixo Y, teste de degrau	54
Figura 8.13	Segmento final do deslocamento no eixo Y	54
Figura 8.14	Velocidade desenvolvida pelo eixo Y no percurso mostrado pela Fig. 8.12...	55
Figura 8.15	Aceleração desenvolvida pelo eixo Y no percurso mostrado pela Fig. 8.12...	55
Figura 8.16	Sinal de saída do controlador no percurso mostrado na Fig. 8.12.....	56
Figura 8.17	Posição – Teste de seguimento de trajetória no eixo Y	57
Figura 8.18	Velocidade do erro – Teste de seguimento de trajetória do eixo Y.....	57
Figura 8.19	Aceleração do erro – Teste de seguimento de trajetória do eixo Y	58
Figura 8.20	Sinal de saída do controlador – Teste de seguimento de trajetória no eixo Y. 58	
Figura 8.21	Posição do eixo Z no teste de degrau.....	59
Figura 8.22	Posição final do eixo Z no teste de degrau.	60
Figura 8.23	Velocidade desenvolvida pelo eixo Z no percurso mostrado pela Fig. 8.21	60
Figura 8.24	Aceleração desenvolvida pelo eixo Z no percurso mostrado pela Fig. 8.21	61
Figura 8.25	Sinal de saída do controlador no percurso mostrado pela Fig. 8.21	61
Figura 8.26	Posição – Teste de seguimento de trajetória no eixo Z.....	62
Figura 8.27	Velocidade do erro – Teste de seguimento de trajetória no eixo Z	63
Figura 8.28	Aceleração do erro – Teste de seguimento de trajetória no eixo Z.....	63
Figura 8.29	Sinal de saída do controlador – Teste de seguimento de trajetória no eixo Z ..	64
Figura A.1	Robô Cilíndrico.....	71
Figura A.2	Robô Polar ou Esférico	72
Figura A.3	Robô Angular ou Antropomórfico.....	72
Figura A.4	Robô Scara.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Principais características da unidade de preparação de ar Micro QBS4 fonte: catálogo Micro 06/07	21
Tabela 4.2 Dados característicos da válvula reguladora de vazão, fonte: Catál. Micro 06/07.	22
Tabela 4.3 Especificações técnicas da válvula solenóide (Festo Corporation, 2007).....	23
Tabela 5.1 Instruções disponíveis na placa Coletora de Dados.....	31
Tabela 5.2 Respostas da placa Coletora de Dados para a Instrução 0x07.....	31
Tabela 5.3 Respostas da placa Coletora de Dados para a Instrução 0x03, para uma comunicação sem erros.....	32
Tabela 5.4 Respostas da placa Coletora de Dados para a Instrução 0x03, para uma comunicação falha.....	32
Tabela 5.5 Respostas da placa Coletora de Dados para a Instrução 0x0E.....	32
Tabela 5.6 Especificações Técnicas do Encoder Clarostat Série 600 fonte: State Electronics.....	33
Tabela 5.7 Relação entre pinos do conector da porta paralela, periférico e conteúdo do byte 888.	34
Tabela 8.1 Parâmetros do Teste de Movimentação em Degrau no Eixo X	46
Tabela 8.2 Parâmetros do Segundo Teste de Movimentação em Degrau no Eixo X	50
Tabela 8.3 Parâmetros do Teste de Seguimento de Trajetória no Eixo X.....	51
Tabela 8.4 Parâmetros do Teste de Movimentação em Degrau no Eixo Y.....	53
Tabela 8.5 Parâmetros do Teste de Seguimento de Trajetória no Eixo X.....	56
Tabela 8.6 Parâmetros do Teste de Movimentação em Degrau no Eixo Z.....	59
Tabela 8.7 Parâmetros do Teste de Seguimento de Trajetória no Eixo Z.....	62

1 INTRODUÇÃO

A pneumática vem ocupando um lugar importante na automação industrial por seu custo acessível, facilidade de instalação e manutenção, boa relação entre força e tamanho dos componentes, entre a força e o peso deles e sua alta confiabilidade. O uso da tecnologia pneumática não é mais diversificado porque é difícil controlar a posição dos cilindros em qualquer lugar do seu curso devido à compressibilidade do ar, e tempo de resposta das válvulas. Este problema se agrava a baixas velocidades, porque somadas às dificuldades acima relacionadas, a dinâmica do sistema começa a ser influenciada pelas diferenças entre os valores dos atritos estático e dinâmico, que fazem com que a movimentação se produza de forma inconstante.

Avanços recentes nas áreas de eletrônica e microinformática, aliadas ao desenvolvimento de novas técnicas de controle possibilitam contornar os problemas que restringiam o uso da pneumática e sua aplicação em campos até agora restritos, como o da robótica industrial.

A implantação prática de sistemas pneumáticos controlados torna-se facilitada com o desenvolvimento das válvulas solenóide rápidas, que podem atuar em frequências próximas a 200 Hz, e baratas, se o seu preço for comparado com o das válvulas proporcionais.

A proposta deste trabalho é a construção de um robô que funcione com energia pneumática e realizar a análise do seu desempenho para determinar se é viável o emprego deste tipo de robôs no ambiente industrial.

1.1 Descrição do Problema

Os altos custos de componentes elétricos e eletrônicos para automação viabilizam sua implantação para um número restrito de aplicações. Assim, equipamentos com produção limitada ou com menor valor agregado têm a necessidade de empregar mão-de-obra humana para desempenhar tarefas repetitivas e, em muitos casos, colocando a saúde humana em risco. Esta realidade pode ser mudada com a criação de robôs industriais com precisão suficiente para desempenhar as tarefas desenvolvidas no ambiente industrial por operários e com custos baixos.

Com esta finalidade adotam-se os seguintes requisitos:

- elaborar um projeto de baixo custo;
- adequar o nível de precisão do robô com o da tarefa a ser desenvolvida;
- reduzir o custo do investimento usando a pneumática no lugar da eletricidade onde for possível e;
- escolher técnicas de controle que sejam eficientes para superar as dificuldades apresentadas no controle de posicionamento pneumático, possibilitando atender a requisitos específicos de precisão.

1.2 Objetivo Geral

Projetar e construir um robô controlado através da técnica baseada em modos deslizantes (Slide Mode Control), utilizando válvulas solenóide de baixo custo, e verificar se seu desempenho é adequado para permitir sua aplicação a processos industriais.

1.3 Objetivos Específicos

Desenvolver um robô pneumático de baixo custo que permita substituir a mão de obra humana em tarefas perigosas ou repetitivas, considerando-se os seguintes objetivos específicos:

- definir a configuração do robô e componentes necessários ao sistema;
- implementar a estratégia de controle por modos deslizantes;
- testar o funcionamento do controlador por modos deslizantes no robô construído;

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em nove capítulos:

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais tópicos que se fazem necessários para entendimento global do trabalho. Este capítulo baseia-se em consultas

a trabalhos científicos, catálogos de fabricantes, experiência profissional e levantamentos teóricos.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia de projeto do sistema pneumático e sua implantação num robô cartesiano, bem como a definição dos requisitos do projeto, enquanto que no Capítulo 4, é apresentada a estrutura do robô e seus componentes mecânicos e pneumáticos.

Já no Capítulo 5, é apresentada a arquitetura de controle adotada e no Capítulo 6, é apresentada a modelagem matemática do sistema pneumático. No Capítulo 7, é apresentado o controle por modos deslizantes e sua configuração e no Capítulo 8, são apresentados os resultados experimentais. Finalmente há o Capítulo 9, são apresentadas as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma visão geral da robótica industrial fundamentando os temas tratados nos capítulos seguintes. Na Secção 2.2 é apresentada uma descrição sobre os trabalhos de pesquisa atuais que tratam do controle de equipamentos pneumáticos.

2.1 Antecedentes Tecnológicos

Os robôs industriais surgem da convergência das tecnologias de controle e automação, particularmente do controle de máquinas ferramentas, dos manipuladores teleoperados, usados nas décadas de 40 e 50 para a manipulação de material radiativo e da aplicação de computação em tempo real [Ollero, 2001].

Atualmente, os robôs vêm ganhando espaço nas linhas de produção pela grande flexibilidade associada à programação de movimentos, que vem ao encontro das necessidades crescentes da automação de processos produtivos.

Como passo inicial para a implantação de um sistema automatizado, conforme descrito por Horikawa et al., 2002, em uma indústria é necessário fazer um estudo de custo unitário do produto e do volume de produção para a escolha da estratégia básica de automação. É imprescindível definir se existem condições econômicas que justifiquem a implantação de um processo automático de produção. Se for justificável deve-se estudar o tipo de automação mais apropriada: a rígida ou flexível. Na rígida, por ser efetuada sempre a mesma operação, cria-se um equipamento dedicado. Na flexível, por tratar-se de uma produção variada, há necessidade de ajustes constantes, neste caso é justificável o uso do robô.

2.1.1 Robô Industrial

Desde o seu início, a robótica industrial esteve notoriamente direcionada às funções de manipulação. Existem dois tipos fundamentais de robôs industriais: os robôs fixos e os robôs móveis.

Enquanto os robôs fixos são equipamentos ancorados, os móveis podem se deslocar em diferentes meios, como andar pelo chão, pela água, submergir e até voar.

Um robô industrial é um manipulador programável, multifuncional, projetado para movimentar materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais, usando movimentos

variados programados para a execução de diferentes tarefas [Robot Institute of América, 1979].

2.1.2 Componentes

Nesta seção, são descritos os principais componentes dos robôs manipuladores e suas funções.

2.1.2.1 Manipulador Mecânico

Um manipulador mecânico convencional é uma cadeia cinemática aberta formada por um conjunto de elos ligados por articulações, como mostrado na Figura 2.1. As articulações possibilitam o movimento relativo entre os elos sucessivos.

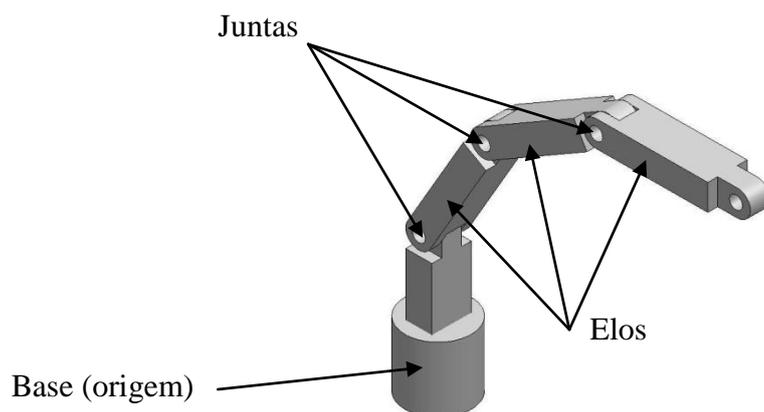


Figura 2.1. Manipulador Mecânico

O manipulador mecânico é formado pelos seguintes elementos:

- **Base (origem)** – que é a base de sustentação do manipulador.
- **Elos** – elementos que fornecem robustez e rigidez.
- **Juntas** – dispositivos mecânicos que proporcionam mobilidade entre os elos do manipulador. Existem três tipos de juntas: de rotação, prismática e esférica.

No presente trabalho, optou-se pela construção de um robô cartesiano de 3 graus de liberdade, que é composto, portanto, de três juntas prismáticas. As juntas prismáticas fornecem um grau de liberdade cada que consiste de uma translação no eixo da articulação, como apresentado na Figura 2.2

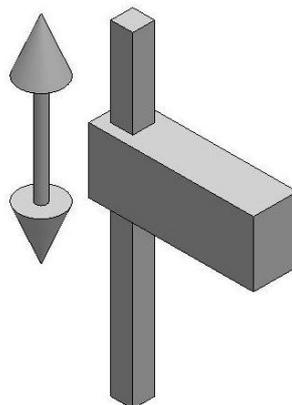


Figura 2.2 Junta Prismática

2.1.2.2 Atuadores.

São os componentes que fornecem a força motriz ao robô. Podem ser de três tipos: elétricos, hidráulicos ou pneumáticos. No presente trabalho foram empregados atuadores pneumáticos já que eles fornecem força e velocidade de magnitude apropriada para o uso em robótica, dispensando o uso de redutores mecânicos. Os atuadores pneumáticos são geralmente cilindros pneumáticos que transformam a pressão do ar em força e deslocamento. São relativamente econômicos, rápidos e têm uma relação potência/peso muito adequada para uso em robótica. Apresentam a desvantagem de serem difíceis de controlar devido à compressibilidade do ar, influência de atrito e regiões mortas nas válvulas.

2.1.2.3 Sistemas de Transmissão Mecânica.

Há dois tipos possíveis de transmissão de forças e momentos dos atuadores para os elos ou as juntas. São elas:

- **Transmissão por acionamento direto** – a transmissão é feita diretamente do atuador para as juntas e/ou elos sem a presença de mecanismos. Para este tipo de transmissão, o atuador deverá fornecer alto valor de força e velocidade igual à de trabalho. Conforme comentado nas Secções 2.1 e 2.2, no presente caso usaram-se pistões pneumáticos como atuadores, estes componentes são classificados como de transmissão por acionamento direto.

- **Transmissão por acionamento indireto** - a transmissão é feita através de mecanismos redutores mecânicos. É muito usado em motores elétricos por que a característica de funcionamento deles é ter rotação elevada e baixo torque. Fazendo esta transmissão consegue-se reduzir a velocidade a valores aceitáveis e se aumenta o torque. Em contrapartida, é aumentada a inércia da junta e eleva-se o custo do robô.

2.1.2.4 Sensores

Os sensores usados em robótica são separados em dois grupos: sensores internos e externos.

a. Sensores Internos

São sensores para monitorar os sinais de referência do robô como posição, velocidade e aceleração das juntas. Entre eles podem ser destacados os transdutores de deslocamento (encoders) incrementais que são empregados no robô montado neste trabalho.

Estes sensores convertem um deslocamento rotacional em um sinal digital. Uma vista geral de sua estrutura é mostrada na Figura 2.3. A medição de deslocamento é feita contando as interrupções de um sinal de luz que passa por um disco com cortes, como mostrado na Figura 2.4. Um fotodiodo converte as alternâncias entre luz e escuro em sinais elétricos que são enviados para um sistema de controle externo através da fiação de saída do encoder.

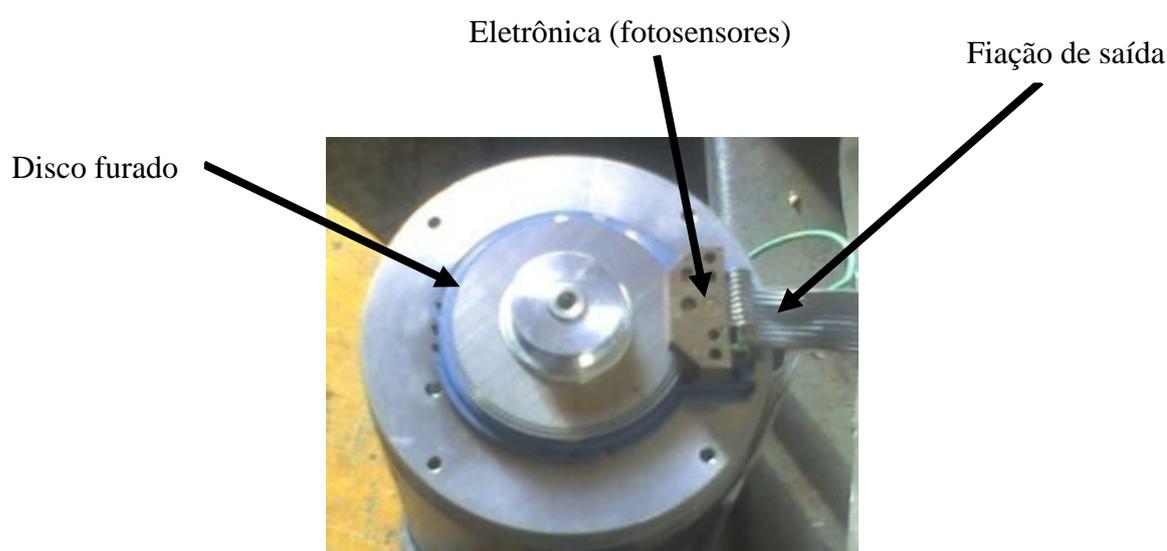


Figura 2.3 Encoder Incremental

Os encoders podem ser de dois tipos: incrementais e absolutos, os primeiros são os mais comuns e os mais baratos.

Os encoders incrementais fornecem informação instantânea sobre o movimento do eixo rotativo ou o deslocamento linear da peça. Geralmente fornecem um ciclo de onda quadrada por incremento de movimentação. Este incremento define a resolução do encoder.

Nestes encoders é usado um segundo canal de saída de dados de posição, defasado em 90° do primeiro. Analisando em conjunto de sinais, pode-se aumentar em quatro vezes a resolução inicial do encoder, permitindo reconhecer também o sentido de giro. Este artifício, para possibilitar o aumento da resolução do encoder, é denominado decodificador de quadratura. Na Figura 2.4 são mostrados os sinais elétricos de saída dos dois canais, chamados de A e B, e a contagem de pulsos de forma normal e modificados com o emprego do decodificador de quadratura.

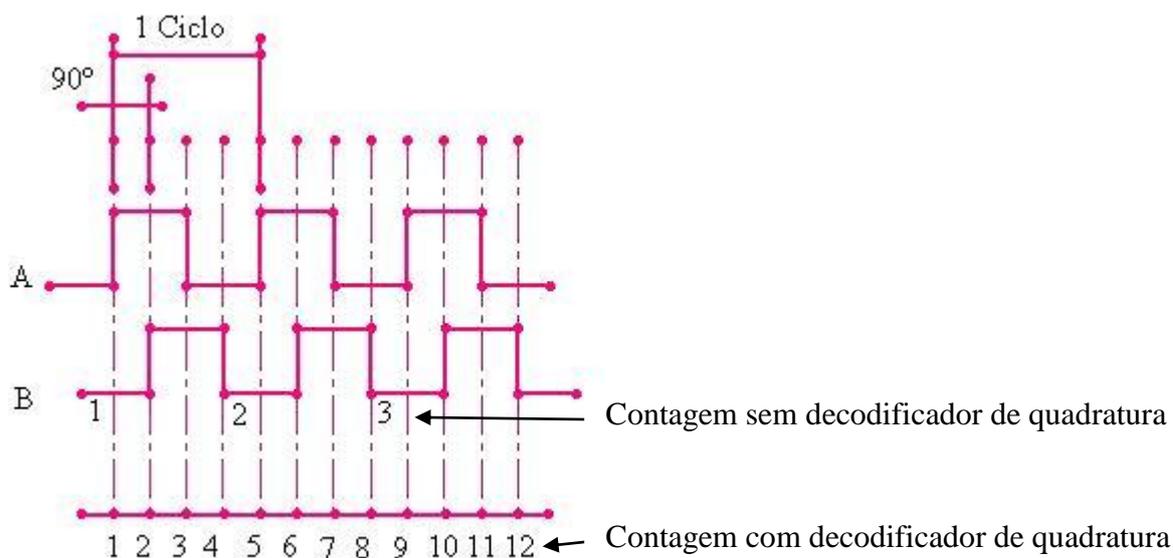


Figura 2.4 Sinal de saída do sensor de posição e decodificador de quadratura.

b. Sensores externos

São sensores empregados para permitir a iteratividade do robô com o ambiente de trabalho. Os sensores de proximidade, sensores de visão e barreiras de segurança são alguns exemplos deste tipo de sensores.

2.1.2.5 Unidade de Controle

A unidade de controle é um sistema microprocessado que recebe os sinais dos sensores e os transforma em dados. Executa também o algoritmo de controle e envia os sinais para acionamento dos atuadores. Geralmente, é composta por vários elementos, como placas de captura de sinais, controladores lógicos programáveis, drivers de potência, computadores industriais, etc.

2.1.2.6 Unidade de Potência

A unidade de potência é a responsável pelo suprimento de energia para os atuadores do robô. Assim, pode ser um compressor pneumático com unidade de condicionamento de ar, como no caso do robô construído neste trabalho, ou uma unidade hidráulica para um atuador hidráulico, ou uma fonte de alimentação de tensão alternada ou de tensão contínua, dependendo do tipo de motor, para robôs com atuadores elétricos.

2.1.2.7 Efetuador ou Órgão Terminal

São os dispositivos acoplados ao robô, geralmente no último elo, com a função de desempenhar a tarefa específica definida para o robô. Há dois grupos principais de efetadores que são:

- **Garras** – têm como função movimentação de material e são utilizadas para montagens, posicionamentos, retirada de peças de áreas perigosas, etc. Há uma grande variedade de garras dependendo da forma e do tipo de material que será manipulado.
- **Ferramentas especiais** – estes efetadores têm funções diferentes ao de movimentação. Também existe uma grande variedade disponível dependendo do tipo de trabalho a ser executado.

2.1.3 Configurações Geométricas dos Robôs

Os tipos de classificação de robôs, conforme sua estrutura mecânica, são: Cartesiano (ou Retangular), Cilíndrico, Polar (ou Esférico), Angular (ou Antropomórfico) e Scara.

A configuração do robô Cartesiano (ou Retangular), adotada no presente trabalho é constituída por três juntas prismáticas e seu uso é comum em estruturas industriais como pórticos para o transporte de cargas. A definição da posição é feita pelas coordenadas cartesianas (x , y e z).

A representação gráfica de um tipo de configuração cartesiana é mostrada na Figura 2.5.

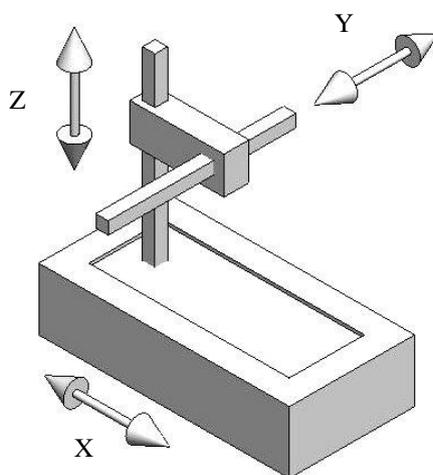


Figura 2.5. Robô Cartesiano ou Retangular

Em este tipo de configuração, o trabalho do controlador do robô é bastante simplificado por ter seus eixos linearmente independentes. Seu maior inconveniente é a limitação que o efetuador tem para acessar pontos em áreas fechadas, com isso, seu volume de trabalho é limitado se comparado com outras configurações. No Anexo 1 estão apresentadas as demais configurações.

2.1.4 Interface com o Usuário.

A interface com o usuário é um programa que roda no computador e opera o robô em todo o seu volume de trabalho, recebe as informações do usuário sobre a movimentação pretendida através de informações adquiridas pelo teclado somadas as existentes em um

programa instalado no disco rígido do computador. Comunica-se com o robô através das portas paralela e serial, trata dos sinais de entrada e saída e aciona os periféricos. Neste trabalho, o robô pneumático tem uma interface própria desenvolvida na linguagem Borland C em ambiente operacional MS DOS 6.22.

2.1.5 Programação

Para comandar o robô deve ser criada uma sequência de instruções informando posições que devem ser atingidas e velocidades a ser desenvolvidas. Esta sequência de instruções é chamada de programação. Ela pode ser manual se criada por programadores ou automática se o trabalho for desenvolvido por programas de CAM (Computer-Aided Manufacturing). A programação manual para comandar o robô é classificada nas categorias ‘*on-line*’ e ‘*off-line*’. A programação ‘*on-line*’ é desenvolvida diretamente pelo usuário no próprio robô, já a programação ‘*off-line*’, empregada neste trabalho, fundamenta-se na reprodução computacional do ambiente de trabalho do robô permitindo que nele sejam programados, depurados e simulados os movimentos que o robô deverá efetuar fisicamente para executar as tarefas designadas [Frasson, 2007].

Algumas das vantagens do uso da programação ‘*off-line*’ são listadas a seguir:

- o desenvolvimento do programa é feito sem interferir na operação normal do robô;
- a programação do robô e o tempo de configuração são rápidos;
- diminuição do risco de colisões e acidentes humanos.

2.1.6 Aplicações em Processos Industriais

A distribuição dos robôs empregados em processos industriais nos Estados Unidos, segundo Robotic Industries Association, Robotic Market, 2006, é:

- 7% do total são aplicações em processos de montagem que envolve massas manipuladas de até 4,54 kg;
- 8% do total são aplicações em processos de manipulação de materiais que envolvem massas de até 4,54 kg;

- 4% do total são aplicações em processos de remoção de materiais (oxicorte, corte por jato de água, lixamento, furação etc.);
- 5% do total são utilizados em processos de aplicação de camadas superficiais (pintura a spray, aplicação de cola e/ou resina etc.);
- 19% do total são aplicações em processos de solda a arco;
- 17% do total são aplicações em processos de solda a ponto;
- 36% do total são aplicações em processos de manipulação de materiais que envolvem cargas maiores de 4,54 kg;
- 4% do total são aplicações em inspeção, montagem e outros processos que envolvem cargas maiores de 4,54 kg.

2.2 Estado da arte

Na bibliografia pode ser encontrada uma ampla gama de trabalhos sobre o controle de atuadores pneumáticos. Limita-se aqui a apresentar uma breve descrição de alguns trabalhos importantes que empregam a estratégia de controle baseada em modos deslizantes.

Šitum et al., 2003, empregam a técnica de controle baseada em modos deslizantes para controlar o posicionamento de um atuador pneumático. Neste trabalho, é ressaltada a dificuldade de obter um modelo matemático preciso para acionamentos pneumáticos devido às não linearidades características da compressibilidade do ar, efeitos do atrito e mudanças nos parâmetros do processo no decorrer do tempo. Também é afirmado que o controle por modos deslizantes é capaz de lidar com plantas que não possuem modelos dinâmicos. O maior inconveniente para que este controle se torne uma solução universal é a necessidade de que o sistema apresente uma resposta rápida para o chaveamento das válvulas, porém por serem componentes limitados, aparece o fenômeno conhecido como '*chattering*', que é o acionamento intermitente das válvulas por forte atividade de controle, causando o desgaste prematuro destes componentes.

Como conclusão, é afirmado que o controlador por modos deslizantes proposto é capaz de controlar o sistema com razoável precisão. Ele é simples de dimensionar, fácil de implementar e praticamente não necessita de um modelo matemático do sistema. Tem baixa

sensibilidade para perturbações e pode ser empregado satisfatoriamente em aplicações industriais de baixas exigências.

Em Paul et al., 1992, é afirmado que a robustez intrínseca do controlador por modos deslizantes facilita a escolha dos ganhos de chaveamento do controlador. Como, neste tipo de controle, o estado permanece na superfície de deslizamento, o movimento do atuador é muito suave, possibilitando o uso dos cilindros pneumáticos em robôs manipuladores.

No experimento, foram usadas duas válvulas solenóides próximas aos cilindros para alimentar suas câmaras e foi ressaltado que o controlador por modos deslizantes é muito sensível à velocidade de chaveamento do sistema.

Como conclusão argumenta-se que o experimento demonstra a viabilidade do uso do controle por modos deslizantes para controlar o movimento de atuadores pneumáticos. Foi destacado que a movimentação do êmbolo foi muito suave. Um fato a destacar é que não foram empregados sensores de pressão o que faz este sistema mais econômico. O critério limitante do uso deste controlador é a vida útil das válvulas pneumáticas por efeito do ‘*chattering*’.

Em Van Varsenveld e Bone, 1996, é apresentado um trabalho usando a modulação de largura de pulso na tensão de alimentação das válvulas solenóide. Foi implementado um controlador proporcional, integral e derivativo (P.I.D) com compensação de atrito.

A troca de válvulas proporcionais por válvulas solenóide, neste trabalho, proporcionou uma redução de custos de 20 para 1. A movimentação suave do cilindro ficou comprometida devido ao tempo de resposta da válvula e a natureza discreta do acionamento (liga – desliga).

Relata-se, também, que trabalhos anteriores como Paul et al., 1994, Matsuti et al., 1990, Linnett et al, 1989, e Noritsugu, 1987, tiveram implementadas também válvulas solenóides para o controle de posição de atuadores pneumáticos. Estas experiências foram satisfatórias para atingir uma movimentação suave do cilindro em resposta a degraus de entrada, porém algumas limitações não foram superadas, como a baixa precisão de posicionamento, o valor de deslocamento mínimo e a capacidade de seguir rápida e precisamente rampas e trajetórias. Como conclusão, afirmou-se que pode ser implantado um controle pneumático de posição rápido, preciso e barato em uma grande variedade de aplicações práticas.

Conclui-se que o controle de posição foi satisfatoriamente implementado usando válvulas solenóide. Elas foram acionadas por um algoritmo de largura de pulso modulada (PWM) que possibilitou uma velocidade de abertura de válvula aproximadamente linear. O maior erro de posicionamento encontrado foi de 0,21 mm. O atuador respondeu a comandos

de deslocamentos menores a 0,11 mm e o desempenho deste foi robusto para mudanças de massa do sistema e o desempenho geral do atuador é comparável ao obtido por trabalhos onde foram usadas servoválvulas proporcionais.

Em Surgenor e Vaughan., 1997, afirmou-se que os resultados de novos experimentos demonstram que um controlador por modos deslizantes, apropriadamente desenhado, é capaz de chegar a precisão da ordem de 0,2 mm no posicionamento. Na experiência efetuada, foram verificadas as respostas do sistema para 2,2; 8,5 e 25 kg respectivamente. Foi usado um cilindro de diâmetro de 25 mm com haste de diâmetro 10 mm e curso de 120 mm, comandado por uma válvula proporcional. Aplicando a técnica por modos deslizantes, verificou-se que o controle manteve-se robusto mesmo com a carga variando entre 2,2 e 25 kg. O tempo de assentamento foi inferior a 0,25 s e a precisão de posicionamento foi inferior a 0,2 mm para todas as massas e com as mesmas configurações do controlador.

Como conclusão, afirmou-se que o controlador por modos deslizantes mostrou-se experimentalmente mais robusto que os controladores PVA e PVΔP e que também é capaz de manter o desempenho, mesmo que o carregamento seja aumentado em valores superiores até a 10 vezes o valor inicial.

Nguyen et al., 2005, implementaram um controle para cilindro pneumático sem haste com controle pela técnica baseada nos modos deslizantes empregando quatro válvulas solenóide com duas vias e duas posições de acionamento rápido. O fenômeno do ‘*chattering*’ foi sensivelmente reduzido pela criação de uma zona morta próxima do valor de erro zero. Verificou-se experimentalmente que a válvula demorava 0,007 s para responder ao sinal de controle. Após alguns ajustes experimentais definiu-se a superfície de deslizamento como:

$$\check{s} = \frac{\dot{e}}{\omega^2} + \frac{\dot{e} 2\zeta}{\omega} + e \quad (1)$$

sendo \check{S} , a superfície de deslizamento, e o erro de posição, \dot{e} a variação do erro no tempo, \ddot{e} a derivada da variação do erro no tempo, ζ o índice de amortecimento (que neste caso foi assumido com o valor de 0,15) e ω , a frequência natural, que neste caso assume o valor de 40 rad/s.

A superfície \check{S} é uma escala de S dada por $\check{S} = (S / \omega^2)$. Este artifício foi introduzido para facilitar a escolha de ω , ζ e φ (φ é a largura da ‘zona morta’ ou ‘camada limite’). Aumentando o valor do índice de amortecimento ζ acima de 0,15, o controlador apresentou

erros menores de posicionamento, mas aumentou a oscilação, pois ζ é um coeficiente que multiplica a velocidade na superfície de deslizamento. Assim, o ruído da velocidade é amplificado pelo fator ζ . Este problema, foi eliminado com a escolha de um valor elevado de ω ($\omega = 40$ rad/s). Como $1/\omega^2$ é pequeno, foi anulada a influência da aceleração no cálculo do sinal de saída. Foi variada a carga entre 50% e 400% do valor testado e percebeu-se que o resultado obtido foi quase idêntico ao nominal, conseguindo precisão de posicionamento da ordem de 0,1 mm, porém, a custo de alta atividade de controle e elevado consumo de energia elétrica.

Concluiu-se que foi construído um controlador pneumático simples por modos deslizantes, com funcionamento muito bom. Foi provado que, para funcionar, o sistema só necessita de válvulas solenóide simples e um sensor de posição. Como resultado, obteve-se um sistema robusto devido à alta tolerância às incertezas da dinâmica do sistema e à zona morta, que evita o chaveamento desnecessário, aumentando a vida útil da válvula.

Em Guoliang e Xuanyin, 2001, foi idealizado um robô cartesiano pneumático para escrever ideogramas da língua chinesa empregando basicamente um algoritmo de controle proposto por Bobrow, 1998.

Conclui-se que o robô pneumático com múltiplos graus de liberdade construído neste trabalho pode apresentar precisão suficiente para substituir caros robôs usados em diferentes áreas das indústrias.

3. METODOLOGIA DE PROJETO

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho na qual estão presentes os atributos do projeto para o desenvolvimento de um robô pneumático cartesiano. Foi escolhido o modelo proposto por Pahl e Beitz ,1996.

As fases de desenvolvimento do projeto são:

- **Especificações de Projeto** – Nesta fase foram coletadas as informações pertinentes ao produto a ser desenvolvido, e, com estes dados compilados, foram definidos os requisitos do projeto, que são as metas funcionais a serem atingidas pelo produto.
- **Projeto Conceitual** – Nesta fase devem ser consolidados os conceitos tecnológicos funcionais e morfológicos do robô. Também é efetuada a seleção de soluções.
- **Projeto Preliminar** – Nesta fase são determinadas as informações técnicas, referentes ao robô pneumático.
- **Projeto Detalhado** – Nesta fase é produzida a documentação para a produção industrial e a avaliação do robô. Como este trabalho trata de um robô experimental, esta etapa não será desenvolvida.

3.1 Especificações de Projeto

Para a verificação de desempenho de um robô pneumático, são definidas as seguintes especificações de projeto:

1. Robô com três graus de liberdade desacoplados
2. Cursos dos eixos: eixo X e Y 400 mm, eixo Z 100 mm.
3. Força disponibilizada pelos atuadores dos eixos: eixos X e Y, avanço 1800N e recuo 1620 N. Eixo Z, avanço 190 N e recuo 170 N.
4. Válvulas direcionais com frequência de acionamento superior a 200 Hz.
5. Resolução de leitura de posicionamento dos eixos igual ou inferior a 0,5 mm.

6. Velocidade de deslocamento dos eixos inferior a 250 mm/s
7. Distância entre as válvulas e as câmaras dos cilindros 250 mm.
8. Informações reunidas e apresentadas no Capítulo 2: Preço reduzido, boa relação peso/potência, precisão suficiente para fazer trabalhos industriais

3.2 Projeto Conceitual

O objetivo do projeto conceitual é determinar a concepção tecnológica, funcional e morfológica do robô industrial, através da busca, seleção, criação e representação da solução.

3.2.1 Busca e Seleção da Solução

Esta seção segue a organização proposta por Frasson, 2007, referente aos principais componentes de um robô industrial.

Manipulador mecânico

Para atingir as especificações de projeto optou-se por empregar a estrutura de uma máquina de oxicorte desativada que já possui guias para deslocamento nos eixos X e Y. Nela serão montados os equipamentos necessários para torná-la um robô com três graus de liberdade. O módulo de movimentação pneumático do eixo Z possui um conjunto de rolamento linear e trilho (itens 13 e 14 da Figura 4.4) para possibilitar a movimentação do terceiro eixo a ser acrescentado à estrutura acima referida.

Atuadores

Como o robô deve ter custos reduzidos, os atuadores escolhidos foram cilindros pneumáticos, que tem como característica uma boa relação potência/peso e dispensam o uso de sistemas de transmissão mecânica.

Sensores

A definição dos sensores será apresentada na unidade técnica de estrutura do robô (Capítulo 4).

Arquitetura de controle

A definição deste item será apresentada na unidade técnica de arquitetura de controle (Capítulo 5).

Sistema de Potência

O sistema de potência a ser empregado é baseado em ar comprimido, muito difundido em ambientes industriais, barato e não agressivo para o meio ambiente.

Efetuator ou Órgão Terminal

Neste trabalho não será definido um efetuator ou órgão terminal (por se tratar de um modelo experimental).

Configuração do Volume de Trabalho

O volume de trabalho uma configuração cartesiana é definido pelo curso dos atuadores. Em este trabalho, a base do volume de trabalho é dado pelos cursos dos cilindros X e Y que é 400 mm, e a altura do volume de trabalho pelo curso do cilindro Z que é 100 mm. A Figura 3.1 mostra o volume de trabalho.

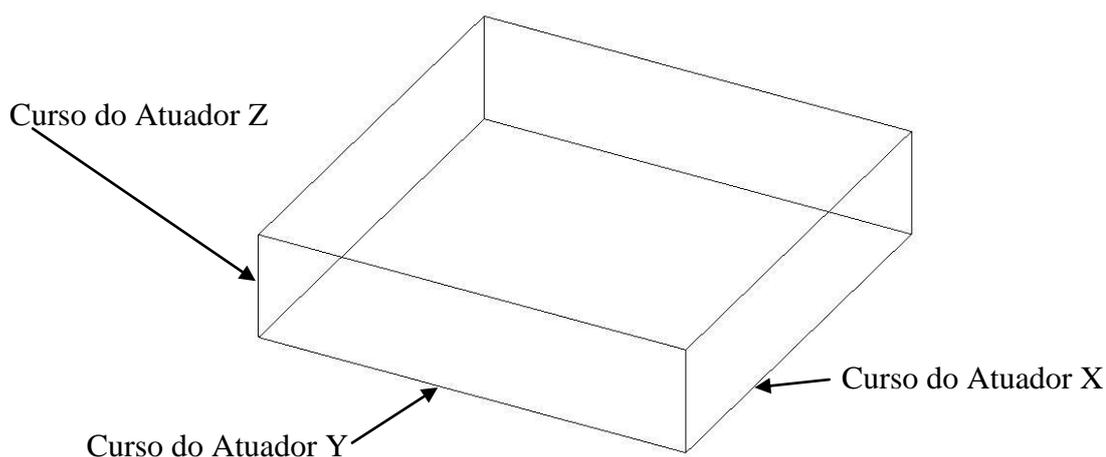


Figura 3.1.- Volume de Trabalho do Robô.

Interface com o Usuário

A programação realizada pelo usuário do robô via programação 'off-line' pode ser através da utilização de um sistema CAD/CAM, se este tiver um pós processador adequado para gerar um arquivo em formato de texto na sintaxe do programa lido pelo robô. Outra alternativa é a realização da programação através de um programa específico, que lê arquivos de desenho e os converte em arquivos de texto apropriados. Além disso, é possível realizar a programação manual, na qual o programador escreve em um editor de texto os comandos e os carrega no robô.

3.3 Projeto Preliminar

Definida a concepção da solução e a estrutura de execução do projeto, dá-se início ao desenvolvimento dos diversos sistemas do robô.

O projeto preliminar será desenvolvido através de unidades técnicas de conhecimento, que são:

- Unidade Técnica de Estrutura do Robô, (Capítulo 4)
- Unidade Técnica de Arquitetura de Controle, (Capítulo 5)
- Unidade Técnica de Modelagem Matemática, (Capítulo 6)
- Unidade Técnica de Sistema de Controle, (Capítulo 7)

4. UNIDADE TÉCNICA DE ESTRUTURA DO ROBÔ

Esta seção apresenta o estudo e a definição da estrutura física e dos componentes mecânicos do robô, com base no esquema pneumático mostrado na Figura 4.1. Os componentes elétricos estão descritos no Capítulo 5.

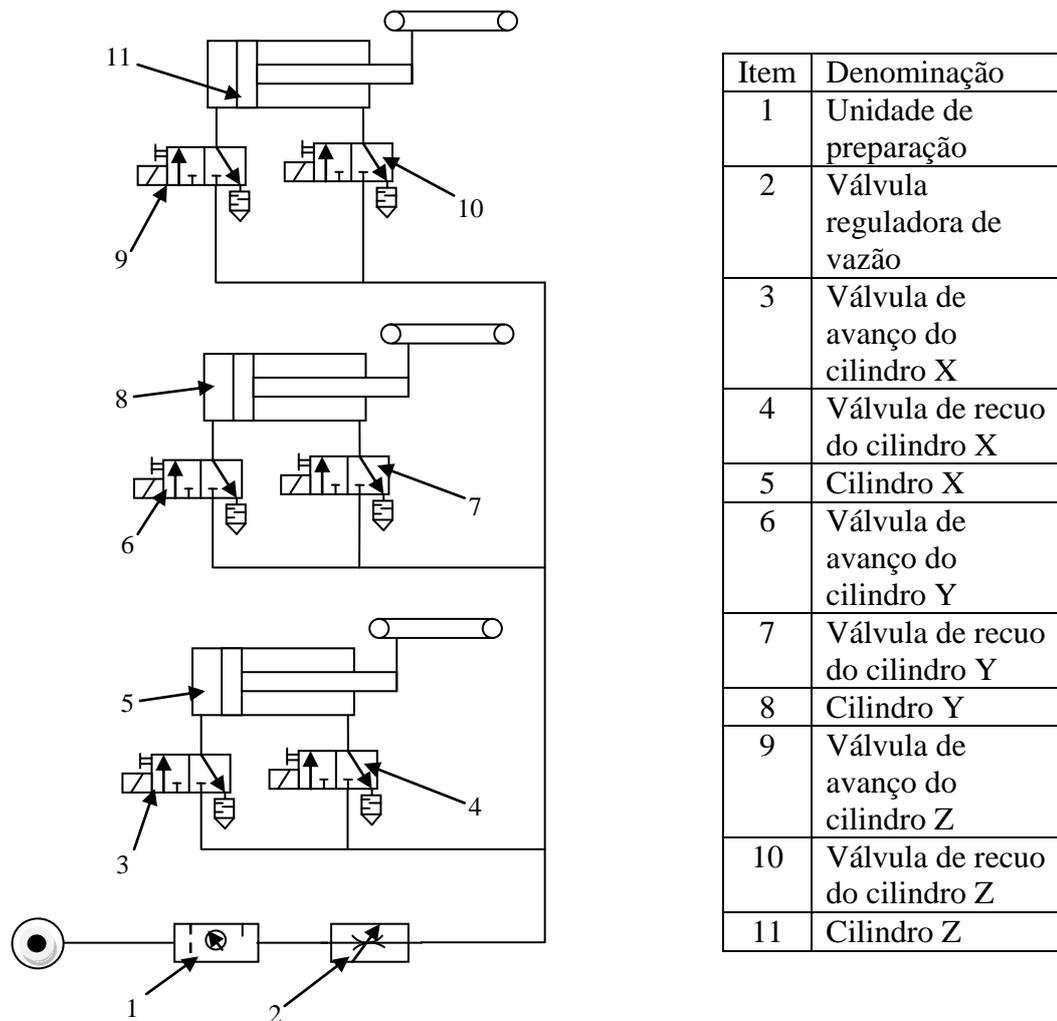


Figura 4.1. Esquema Pneumático do Robô.

No circuito mostrado na Figura 4.1, o ar pressurizado é alimentado pela rede pneumática e passa por uma unidade de preparação (1) onde sua pressão é reduzida até o valor de trabalho (610 kPa), e filtrada para retirar partículas e umidade. Depois atravessa a válvula reguladora de vazão (2) onde a vazão de ar é limitada para evitar que os atuadores se movimentem a velocidades superiores às que os transdutores de deslocamento possam medir. A seguir a tubulação do ar é dividida em três, para alimentar cada um dos sistemas transdutores e dividida outra vez em dois para alimentar as válvulas de avanço (3, 6 e 9) e de

recuo (4, 7 e 10) de cada cilindro transdutor (5, 8 e 11). Fixo à haste de cada cilindro há um transdutor de deslocamento (Item 5 da Figura 5.11) que mede a posição do atuador e a informa ao computador através da placa coletora de dados (Item 6 da Figura 5.1).

4.1 Volume de Trabalho.

O volume de trabalho do robô cartesiano pneumático é determinado pelo curso dos atuadores lineares pneumáticos nos seus respectivos eixos [Frasson, 2007]. Para atender às especificações do robô, os cursos são: eixo X 400 mm, eixo Y 400 mm e eixo Z 100 mm. O robô deve, portanto, ser capaz de posicionar o efetuador em qualquer ponto dentro de um cubo de dimensões 400 x 400 x 100 mm (volume de trabalho).

4.2 Estudo e Escolha de Componentes

A definição dos componentes foi feita tendo como meta a montagem de um robô de baixo custo e que, depois de superada sua fase experimental, possa ter aplicação em processos industriais.

4.2.1 Unidade de Preparação de Ar

A unidade de preparação de ar, fabricada pela empresa Micro Automação. É composta por um filtro de ar, uma válvula reguladora de pressão e um lubrificador. O modelo escolhido é o QBS4, e suas principais características estão relacionadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Principais características da unidade de preparação de ar Micro QBS4 fonte: catálogo Micro 06/07

Posição de Trabalho	Vertical, com os copos para baixo.
Temperatura Máxima de Trabalho	333 K
Poder Filtrante	50 μm
Pressão de Trabalho	De 0 até 1 GPa

4.2.2 Válvula Reguladora de Vazão.

A válvula reguladora de vazão é colocada no sistema para restringir a velocidade máxima de deslocamento do atuador garantindo que, se a válvula estiver totalmente aberta, a velocidade deste não supere os 250 mm/s estipulados como limite nas especificações de projeto. Na Tabela 4.2 estão relacionadas as principais características desta válvula.

Tabela 4.2 Dados característicos da válvula reguladora de vazão, fonte: Catálogo Micro 06/07.

Posição de Trabalho	Indiferente
Fluido	Ar comprimido filtrado com ou sem lubrificação
Temperatura de trabalho	De 253K até 353 K
Pressão de Trabalho	De 50 kPa até 1 GPa

4.2.3 Atuadores Lineares Pneumáticos

Os atuadores lineares foram escolhidos por seu baixo custo, facilidade de manutenção e reposição. São cilindros de dupla ação e haste simples podendo trabalhar com pressões máximas de até 1 GPa. Os atuadores escolhidos para os eixos X e Y deste robô são cilindros pneumáticos normalizados marca Dover com diâmetro de 63 mm e curso de 450 mm. Se trabalharem com uma pressão de 600 kPa, estes cilindros fornecem uma força aproximada de 1800 N no avanço e 1620 N no recuo. Para o eixo Z foi escolhido um cilindro pneumático marca Bosch de diâmetro 20 mm e curso 100 mm. Alimentado com uma pressão de 600 kPa, ele fornecerá uma força de 190 N no avanço e 170 N no recuo.

4.2.4 Válvulas solenóide rápidas

A escolha da válvula solenóide é de fundamental importância para o bom desempenho do robô. Além de robusta e confiável deve ter acionamento rápido, pois o tempo consumido para efetuar o acionamento causa retardo e imprecisão no controle dos atuadores. Desta forma foi escolhida a válvula fabricada pela empresa Festo Automation modelo MHE3-MS1H-3/2G-1/8K para uso em este projeto. As especificações técnicas da válvula estão relacionadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Especificações técnicas da válvula solenóide (Festo Corporation, 2007)

Modelo/Fabricante	MHE3-MS1H-3/2G-1/8K/Festo
Tipo	3/2 vias
Pressão de trabalho	De 90 kPa a 800 kPa
Vazão nominal teórica	1,667 dm ³ /s
Frequência Máxima	300 Hz
Temperatura do fluido de trabalho	De 268 K até 333 K
Temperatura ambiente	De 268 até 333 K
Tensão teórica de trabalho	0 a 10 V DC
Tempo de resposta na faixa (2 a 8Vdc)	5 ms a 200 Hz
Tensão de serviço DC	24 V DC
Meio operacional Grau de filtragem	40 µm
Peso	60 g

4.3 Projeto Mecânico

Conforme previamente comentado, para a construção do robô foi aproveitada uma estrutura mecânica, já existente, de um equipamento de oxicorte fabricado pela White Martins mostrado na Figura 4.2.

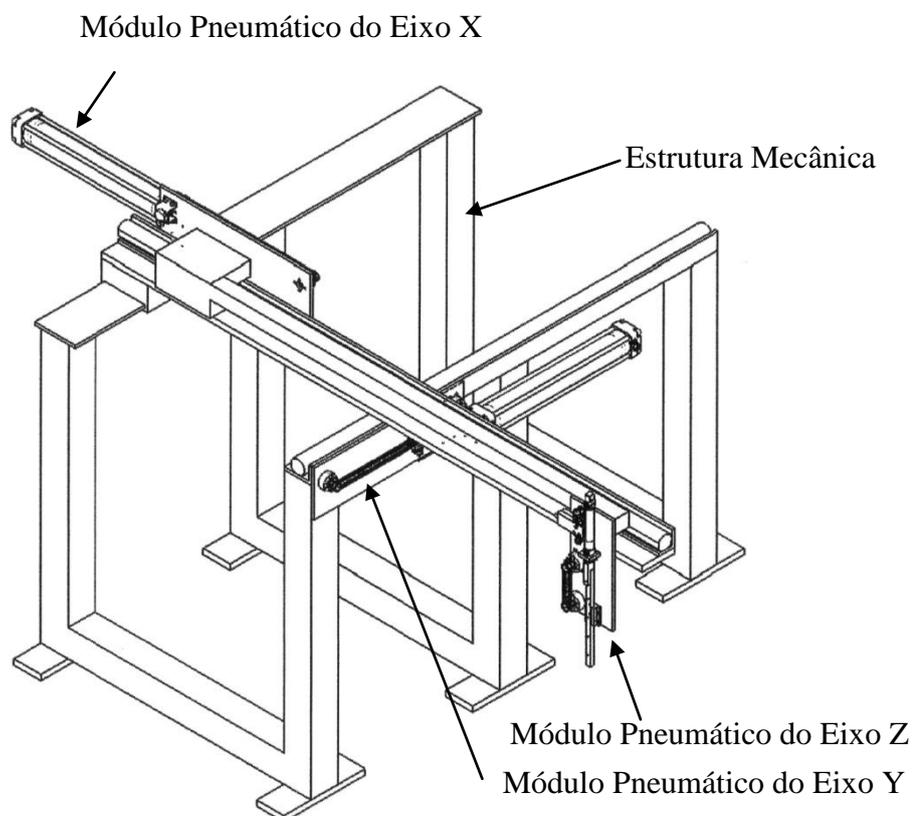


Figura 4.2 Estrutura do Robô

Nessa estrutura, foram fixados três módulos de movimentação pneumática, um para cada grau de liberdade. Foi aproveitado o sistema de guias originais do sistema para garantir a movimentação perpendicular dos eixos X e Y. A movimentação do eixo Z, perpendicular aos dois anteriores, é garantido por um conjunto de rolamento e guia linear montado no módulo deste eixo.

O modulo de movimentação é uma unidade composta por um atuador, válvulas direcionais e sensor de posição.

4.3.1 Dimensionamento das Polias Sincronizadoras.

O dimensionamento do diâmetro da polia sincronizadora foi realizado respeitando dois parâmetros: a resolução da leitura de posicionamento deve ser inferior a 0,5 mm e a velocidade rotacional do encoder deve ser inferior a 5 Hz quando o atuador se movimenta à velocidade máxima de 250 mm/s. O deslocamento do efetuador para cada volta de polia é igual a:

$$D_v = 2\pi rp \quad (2)$$

Onde D_v é o deslocamento do efetuador por volta da polia, 2π é o ângulo percorrido pela polia em uma volta, e rp é o valor do raio primitivo da polia sincronizadora.

O encoder, por estar unido à polia, gira também uma volta, produzindo 512 pulsos (por ter o seu sinal de saída conectado ao decodificador de quadratura). A seguir é apresentado o calculo do raio primitivo máximo que a polia sincronizadora pode ter para que a resolução de leitura seja menor ou igual a 0,5 mm. Assim:

$$rp_{res} \leq \frac{0,5 \text{ mm/pulso } 512 \text{ pulsos/volta}}{2\pi \text{ 1/volta}} \quad (3)$$

Portanto,

$$rp_{res} \leq 40,74 \text{ mm} \quad (4)$$

Por outro lado, o encoder não pode desenvolver uma velocidade maior que 300 rotações por minuto ou 5 rotações por segundo (Hz), assim:

$$250 \frac{mm}{s} \leq 2\pi r p_{vel} mm 5 Hz, \text{ assim} \quad (5)$$

$$r p_{vel} \geq \frac{250 mm/s}{2\pi 5 Hz} \quad (6)$$

$$r p_{vel} \geq 7,95 mm \quad (7)$$

O raio primitivo da polia deve estar compreendido entre os valores de 7,95 mm e 40,74 mm, o que significa que a polia deve ser escolhida entre os modelos 10 XL 037 e 48 XL 037. Quanto menor for a polia, maior será a resolução, portanto mais precisos os valores de posição lidos e de velocidade e aceleração calculados. Também a vida útil do encoder será reduzida por ter que girar mais vezes para efetuar a mesma ação. Considerando tratar-se de um robô experimental, optou-se pela maior precisão, assim as polias escolhidas são as 12 XL 037 3/8” que fornecem uma resolução de 0,119 mm por pulso de encoder.

4.3.2 Seleção das Correias Sincronizadoras.

A polia sincronizadora 12 XL 037 tem um raio primitivo de 9,705 mm, e os cursos dos atuadores dos eixos X e Y são de 400 mm. Assim, o comprimento da correia deve ser maior que o perímetro primitivo da polia mais duas vezes o curso do atuador, portanto, o comprimento das correias X e Y é maior que:

$$2\pi 9,705 mm + 2 450 mm = 960,97mm \quad (8)$$

A correia que preenche estes requisitos é a 400 XL 3/8”, com comprimento primitivo de 1016 mm e distância entre centros das polias de 477,51mm.

No caso do eixo Z, como o curso é de 100 mm, o comprimento é maior que:

$$2\pi 9,705 mm + 2 100 mm = 260,97mm \quad (9)$$

A correia para este eixo será a 110 XL 3/8”, com comprimento primitivo de 279,4 mm e distância entre centros das polias de 109,215 mm.

4.3.3 Módulo de Movimentação para os Eixos X e Y

Este módulo é mostrado na Figura 4.3 (vista explodida). O módulo desenvolvido para acionar os eixos X e Y é composto por:

- (1) uma placa de aço que serve como estrutura;
- (2) um suporte para fixar o atuador;
- (3) uma nervura para aumentar a rigidez do suporte;
- (4) um atuador marca Dover de diâmetro 63mm x 450 mm de curso;
- (5) quatro rolamentos 608 2RS;
- (6) duas polias sincronizadoras 12 XL 037 de 3/8" de largura;
- (7) um eixo da polia;
- (8) um eixo do encoder;
- (9) um acoplamento para encoder;
- (10) um suporte para encoder;
- (11) um encoder Clarostat 600-12-CBL;
- (12) duas válvulas Festo MHE3-MS1H-3/2G-1/8-K;

Além disso, fazem parte a correia e os parafusos de fixação.

A Figura 4.3. mostra uma vista explodida da montagem com a identificação dos componentes acima relacionados.

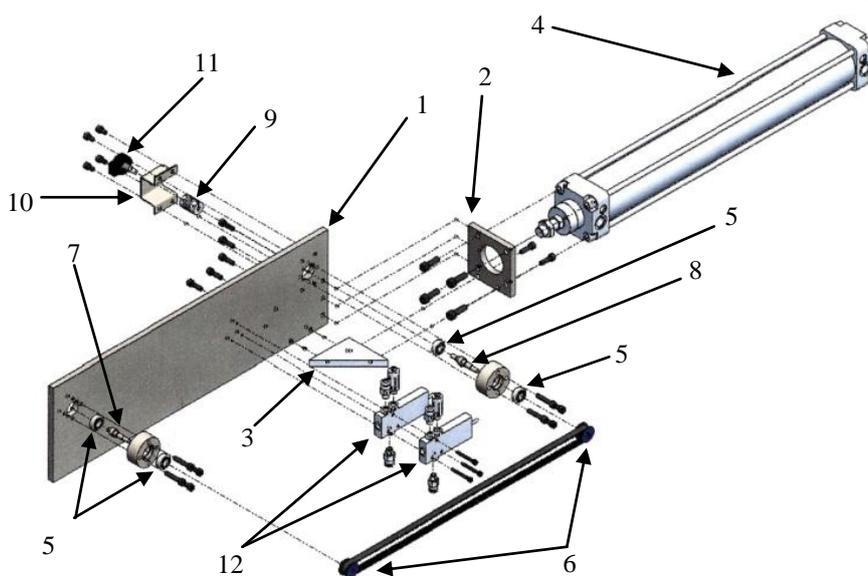


Figura 4.3 Módulo de Movimentação Pneumático usado nos eixos X e Y (vista explodida)

4.3.4 Módulo de Movimentação para o Eixo Z

A Figura 4.4. mostra uma vista explodida da montagem com a identificação dos componentes relacionados.

Este módulo é composto por:

- (1) uma placa de aço que serve como estrutura;
- (2) um suporte para fixar o atuador;
- (3) um atuador marca Bosch de diâmetro 20 mm x 100 mm de curso;
- (4) quatro rolamentos 608 2RS;
- (5) duas polias sincronizadoras 12 XL 037 de 3/8" de largura;
- (6) um eixo da polia;
- (7) um eixo do encoder;
- (8) um acoplamento para encoder;
- (9) um suporte para encoder;
- (10) um encoder Clarostat 600-12-CBL;
- (11) duas válvulas Festo MHE3-MS1H-3/2G-1/8-K;
- (12) um rolamento linear marca AMT modelo MSA 15 A;
- (13) trilho para rolamento linear Mod. MSA 15 E comprimento 305 mm;

Além disso fazem parte a correia e os parafusos de fixação.

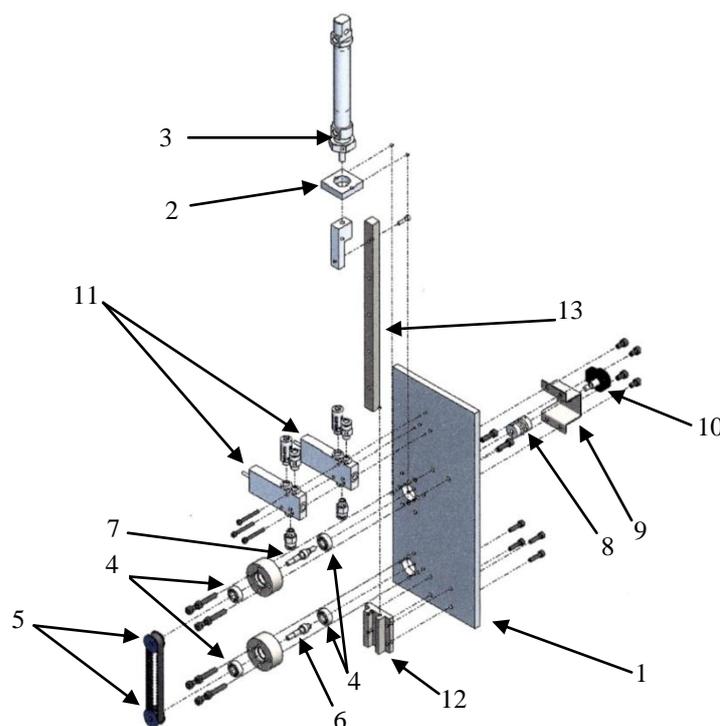


Figura 4.4 Módulo de Movimentação Pneumático usado no eixo Z (vista explodida)

5. UNIDADE TÉCNICA DE ARQUITETURA DE CONTROLE

Neste capítulo, descreve-se a unidade técnica de arquitetura de controle a qual abrange o estudo e definição da arquitetura de controle do robô cartesiano pneumático, bem como a descrição dos componentes e sua implementação. No presente trabalho, a arquitetura empregada é do tipo não integrada flexível, sendo responsável por:

- Aquisição de dados dos sensores.
- Envio dos sinais de controle para os servoatuadores.
- Armazenamento e execução dos algoritmos de controle.

5.1 Arquitetura de Controle do Robô

O esquema da arquitetura de controle está mostrado na Figura 5.1 cujos componentes e suas funções são descritos na sequência.

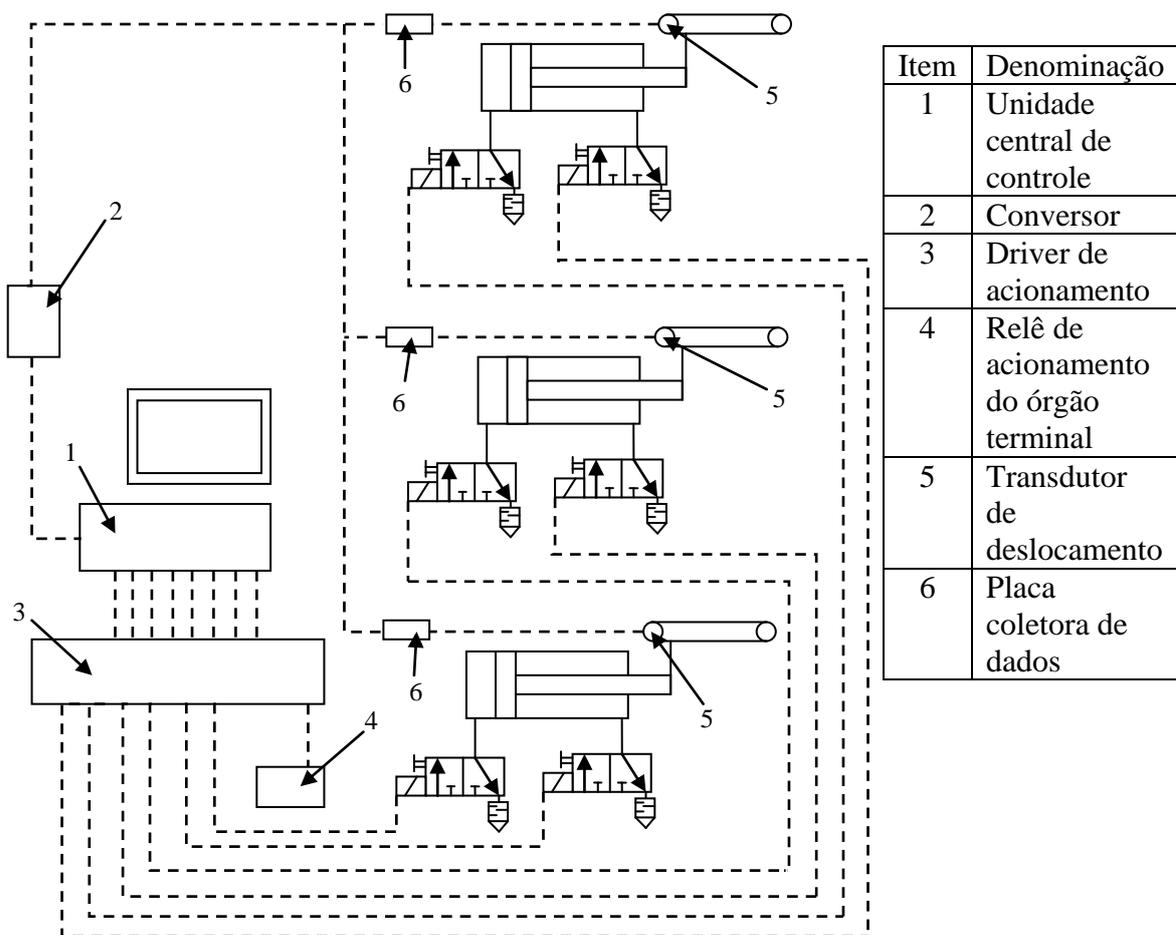


Figura 5.1 Esquema Elétrico do Robô.

5.1.1 Unidade Central de Controle

A plataforma emprega um microcomputador Pentium 233 para processamento e armazenamento do programa de controle, configuração e execução do programa. O sistema operacional empregado é o D.O.S. 6.22. O microprocessador possui um disco rígido de 32GB e uma memória RAM de 250 kB. Propositadamente, foi escolhido um computador antigo por seu baixo custo. Na porta serial do computador está conectado um conversor RS232 /RS 422 descrito na Secção 5.1.2 e, na porta paralela, foram instalados sete drivers de acionamento descritos na Secção 5.1.4. Possui também um teclado e um monitor para possibilitar a comunicação entre o robô e o operador.

5.1.2 Conversor RS 232/422

Como o computador necessita comunicar-se com três periféricos (uma placa coletora de dados para cada eixo), é necessário converter a porta RS 232 disponível em uma rede RS 422. Assim, cada uma das placas coletoras atende à solicitação do computador sendo identificada pelo seu endereço de rede. O circuito eletrônico mostrado na Figura 5.2 é o encarregado de fazer a conversão entre os dois protocolos de rede de comunicação (RS232 em RS 422).

5.1.3 Placa Coletora de Dados

O computador trabalha em sistema operacional Microsoft D.O.S e, assim, dispõe de um temporizador interno acessível por instrução de programa que tem uma resolução de 1/13 de segundo. As alterações de tempo são disponibilizadas a cada 0,05 ou 0,06 s, período de tempo muito grande para o recebimento de dados, se for considerado que a dinâmica do atuador deverá permanecer dentro das especificações de projeto. Sampaio, 2009, desenvolveu uma placa coletora de dados que possui um temporizador digital comandado por cristal com resolução de 0,00025 s, base de tempo que permite o controle do atuador pneumático dentro da especificação necessária. Além do temporizador, essa placa é composta por um leitor de transdutor incremental (encoder rotativo ou linear) com decodificador de quadratura, uma saída de potência de 700 W com tensão variável definida por comando de programa de -24 a +24 V DC que serve para acionar motores elétricos ou servoválvulas direcionais e uma porta de comunicação serial com protocolo RS 422, que possibilita sua ligação à rede de

comunicação proveniente do computador.

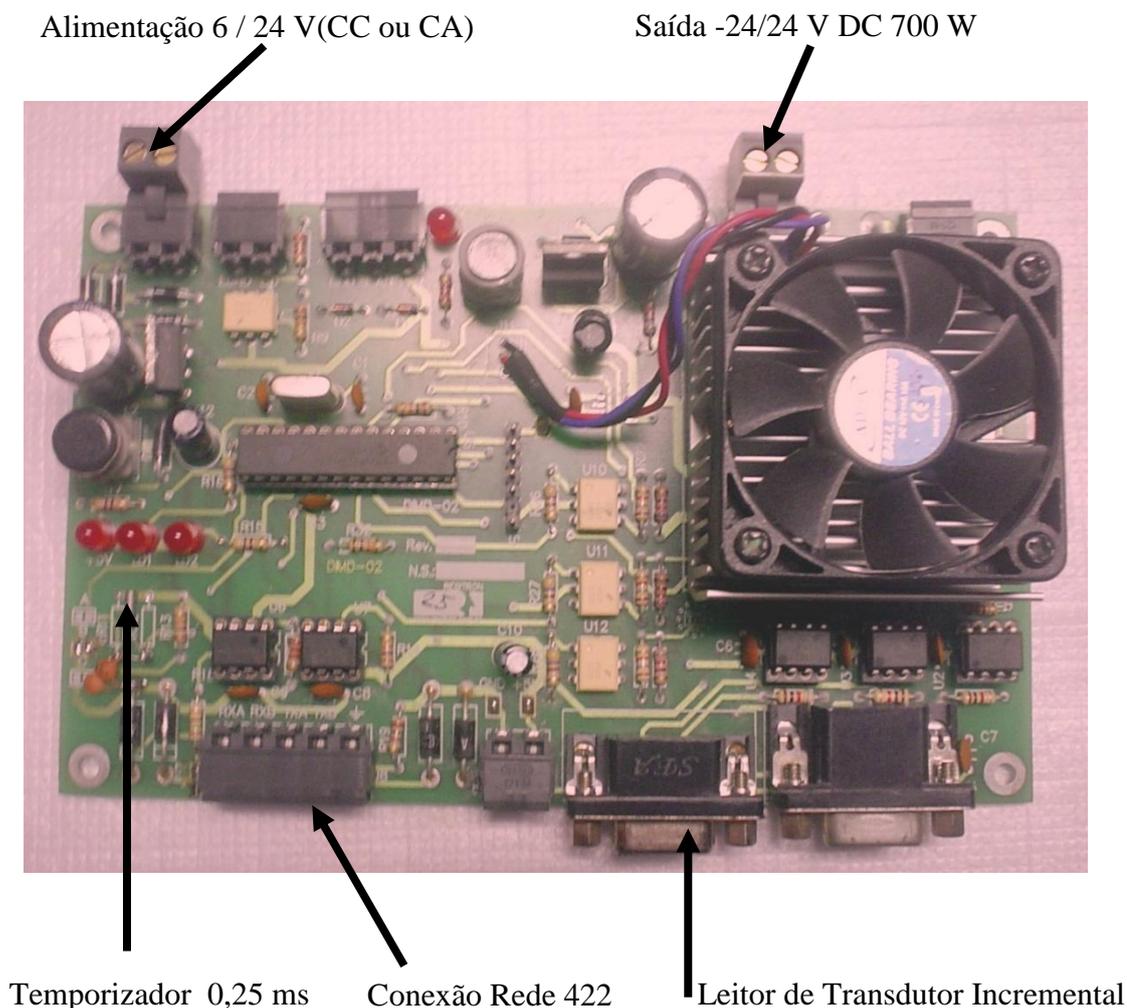


Figura 5.2 Placa Coletora de Dados

Neste trabalho foram usadas três placas coletoras de dados, uma para cada eixo. A função delas é receber os sinais dos transdutores de deslocamento de cada cilindro, decodificá-lo e enviar a informação da posição do atuador e do instante de tempo em que a medição foi feita. Para efetuar esta comunicação, cada placa coletora de dados tem um endereço de rede fixo definido na programação do seu microcontrolador que são os números hexadecimais 0x24, 0x25 e 0x26 para os eixos X, Y e Z, respectivamente. Para efetuar qualquer comunicação com as placas coletoras de dados, o computador deve enviar pela porta serial três bytes com as seguintes informações:

No primeiro byte, o endereço da placa (que pode ser 0x24, 0x25 ou 0x26, dependendo

do eixo). No segundo byte, o código da instrução e, no terceiro byte o valor da soma dos dois bytes anteriores. A função do terceiro byte é a de verificação. Ele é usado pelo receptor para verificar a integridade dos dados transmitidos. O receptor soma todos os bytes recebidos e compara o valor da soma com o conteúdo do último byte. Caso o resultado coincida, continua operando com o programa. Se não coincidir, envia um byte com a instrução 0x18, que indica que a soma está errada e os dados devem ser reenviados.

A placa deve reconhecer se o número que está recebendo é um dado ou um endereço. Isto é conseguido alterando a paridade da comunicação; se ela for ímpar, é transmitido um endereço, caso contrário, um dado.

Para este trabalho estão disponíveis as seguintes instruções:

Tabela 5.1 – Instruções disponíveis na Placa Coletora de Dados

INSTRUÇÃO	AÇÃO
0x07	Identificar se a placa está enviando e recebendo dados corretamente.
0x03	Informar a contagem do transdutor de deslocamento e tempo.
0x0E	Tornar zero o valor armazenado no contador do transdutor da placa.

Como respostas da placa para o computador existem as seguintes possibilidades:

Para a instrução enviada 0x07;

Tabela 5.2 – Respostas da Placa Coletora de Dados para a Instrução 0x07.

RESPOSTA	CÓDIGO
Se estiver enviando e recebendo dados corretamente.	0x06
Se acontecer um erro de comunicação	0x18
Se não estiver enviando ou recebendo dados corretamente.	O computador toma as decisões programadas para este caso.

Para a instrução enviada 0x03, o computador solicita para a placa a leitura do transdutor de deslocamento e o instante em que essa leitura foi feita. Então, se a comunicação for correta, a

placa responderá com o envio de 6 bytes, enviados em sequência, com o conteúdo especificado na Tabela 5.3. Se houver erros de comunicação a resposta da placa será uma das descritas na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 – Resposta da Placa Coletora de Dados à Instrução 0x03, para uma comunicação sem erros.

BYTE	CONTEÚDO
1º	Byte mais significativo do valor do contador de posição.
2º	Byte intermediário do valor do contador de posição.
3º	Byte menos significativo do valor do contador de posição.
4º	Byte mais significativo do valor do contador de tempo.
5º	Byte menos significativo do valor do contador de tempo.
6º	Soma dos cinco bytes enviados.

Tabela 5.4 – Resposta da Placa Coletora de Dados à Instrução 0x03, para uma comunicação falha.

RESPOSTA	CÓDIGO
Se acontecer um erro de comunicação	0x18
Se não estiver enviando ou recebendo dados corretamente.	O computador toma as decisões programadas para este caso.

Para a instrução enviada 0x0E, o computador solicita que a placa zere o contador do transdutor de posição e a resposta da placa, está informado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. - Resposta da Placa Coletora de Dados à Instrução 0x0E.

RESPOSTA	CÓDIGO
Se zerar.	0x06
Se acontecer um erro de comunicação	0x18
Se não estiver enviando ou recebendo dados corretamente.	O computador e toma as decisões programadas para este caso.

Na instrução de leitura do contador do transdutor, os bytes 4 e 5 informam o número de vezes que passaram 0,00025s. Para calcular o tempo em segundos, o valor recebido deve ser multiplicado por este valor.

Deve ser também considerado que o valor máximo que pode ser armazenado é 0xFFFF, que é a representação hexadecimal do número 65.535. Se ultrapassado este valor, o contador recomeça sua contagem a partir de zero. Isso acontece a cada 16,38375s. Para evitar erros de leitura, o programa do computador verifica constantemente o valor do tempo lido e o corrige quando ocorre o estouro da capacidade de armazenamento do contador.

Na instrução de leitura da contagem do transdutor de posição também foi verificado um problema que surgia quando era feita a leitura de um número negativo motivado pelo número de bytes que faziam a comunicação do dado. O computador deve receber números de 1, 2 ou 4 bytes para acelerar a transmissão de dados. Neste trabalho, foi determinado o envio de 3 bytes. Nesta situação o valor do byte faltante era preenchido aleatoriamente alterando a leitura transmitida. Este problema foi solucionado através da armazenagem no contador de um valor inicial igual à metade da capacidade de contagem. Como este valor é superior ao possível deslocamento do cilindro (998,21 m) a contagem não poderá resultar negativa. O programa instalado no computador (que faz a leitura da posição) subtrai o valor inicial do valor lido para obter o valor medido do deslocamento.

5.1.4 Transdutor de Deslocamento

O encoder usado é o CLAROSTAT modelo 600EN-128-CBL, suas especificações estão relacionados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 Especificações Técnicas do Encoder Clarostat Série 600 fonte :State Electronics

Velocidade Máxima	5 Hz (300 rpm)
Tensão de Alimentação	5 V DC +/- 5% @ 30 mA
Pulsos de Saída	128 por canal
Número de canais	2 separados em quadratura 90° +/- 45°
Tensão de Saída Nível Alto	Mínimo 2,4 V com 10 kΩ ligado a terra
Tensão de Saída Nível Baixo	Máximo 0,4 V
Vida Útil	Superior a 10.000.000 de revoluções

O transdutor tem uma resolução de 128 pulsos por volta. Ao ser conectado ao decodificador de quadratura existente na Placa Coletora de Dados consegue-se a resolução de 512 pulsos por volta.

5.1.5 Driver de Acionamento

O acionamento das válvulas solenóide e do órgão terminal é feito através da porta paralela LPT 1 existente no computador no endereço 0x378 ou 888 em base decimal. Ao colocar no endereço 888 um número diferente de zero, algum ou alguns dos oito pinos do conector da porta correspondente a este endereço (pino 2 a pino 9 do conector) passará a ser energizado com uma tensão de 5V DC (TTL). Conhecendo a correspondência entre o número colocado no endereço e o pino energizado, usou-se esta tensão para polarizar um transistor Darlington e chaveou-se através dele a alimentação de 24 V DC para as válvulas pneumáticas. A Figura 5.3 mostra o esquema elétrico do driver.

A correspondência entre os pinos do conector da porta paralela, a válvula que o driver correspondente aciona e o número que deve ser escrito no endereço 888 estão na tabela a seguir:

Tabela 5.7 – Relação entre pinos do conector da porta paralela, periférico e conteúdo do byte 888.

Pino do conector DB25	Acionamento	Número a colocar no endereço 888 para ligar o acionamento.
2	Avanço Cilindro X	01 => (00000001) ₂
3	Avanço Cilindro Y	02 => (00000010) ₂
4	Avanço Cilindro Z	04 => (00000100) ₂
5	Acionamento Livre	08 => (00001000) ₂
6	Recuo Cilindro X	16 => (00010000) ₂
7	Recuo Cilindro Y	32 => (00100000) ₂
8	Recuo Cilindro Z	64=> (01000000) ₂
9	Não usado	-----

Para desligar o periférico, deve-se subtrair o valor do pino correspondente do valor

existente no endereço. Para acionar mais de uma saída simultaneamente, devem ser somados os valores correspondentes e colocados no endereço 888. Para ligar o avanço dos cilindros X e Y e recuar o Z, o número a ser colocado no endereço 888 é $01+02+64=67$. Para continuar avançando os cilindros X e Y, parar o Z e ligar o acionamento livre, o número passará a ser $67-64+08=11$.

Este número é calculado automaticamente pelo programa de controle baseado nos dados obtidos através das placas de aquisição de dados processados pelo programa de trajetórias e pelo sistema de controle.

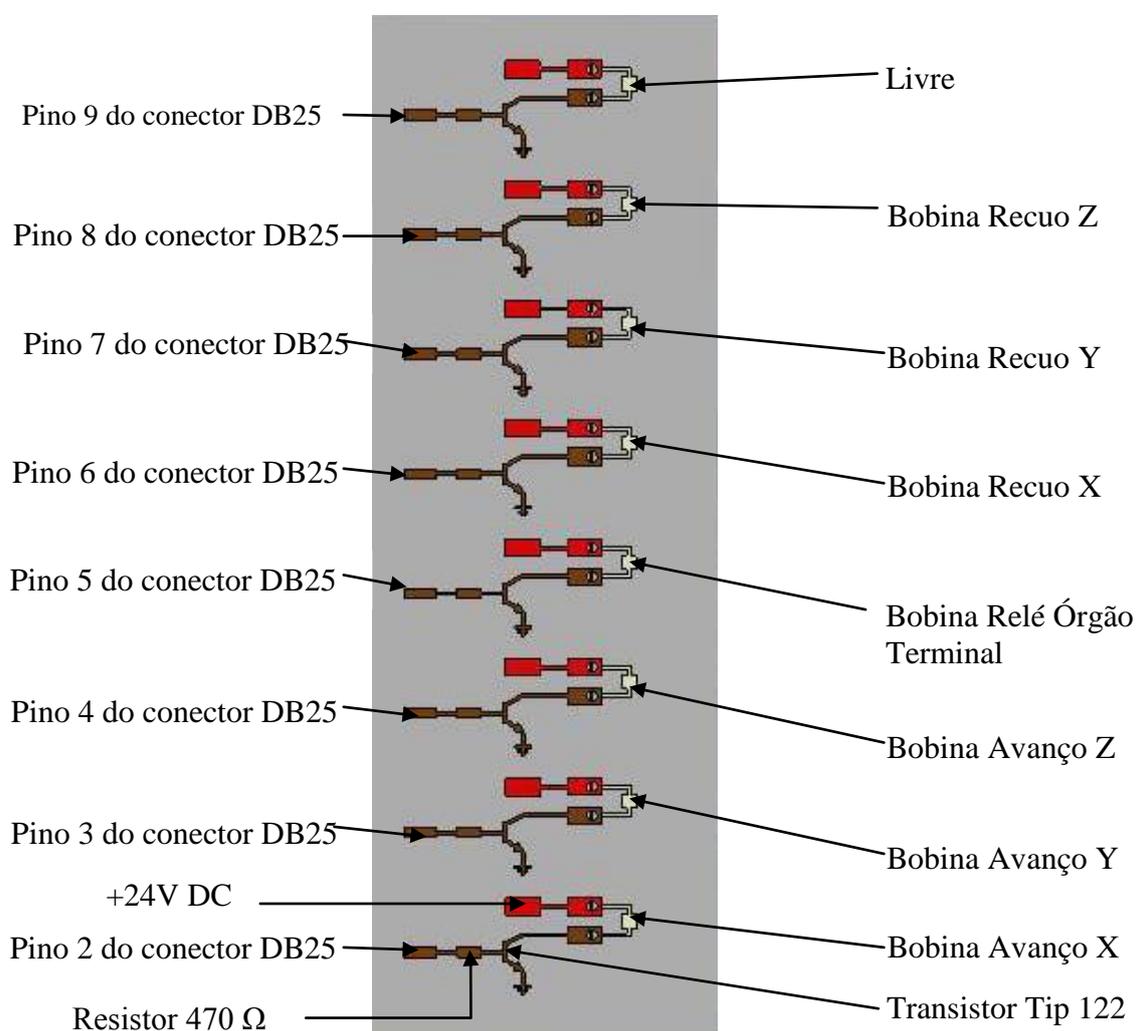


Figura 5.3 Esquema Elétrico do Driver de Acionamento

6. UNIDADE TÉCNICA DE MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática consiste no estabelecimento de um conjunto de equações que representa aproximadamente o funcionamento do sistema físico real. Através da modelagem matemática extraem-se informações importantes sobre o sistema real que são utilizadas para o desenvolvimento do sistema de controle a ser implementado, tais como: ordem do sistema, tempos de resposta, amortecimento, não-linearidades e perturbações (Perondi, 2002). Proporciona também os recursos para desenvolver sistemas computacionais que permitam testar estratégias de controle e visualizar o comportamento dinâmico da planta, possibilitando dimensionar seus componentes conhecendo as forças, velocidades e acelerações que atuam sobre eles. Esta unidade contempla a definição e descrição do modelo matemático dos cilindros pneumáticos e das eletroválvulas direcionais.

6.1 Modelo Matemático do Cilindro Pneumático

A dinâmica do pistão pneumático pode ser equacionada através das relações pressão/vazão nas câmaras do cilindro e de equilíbrio dinâmico da relação pistão/carga mecânica.

O sistema pneumático usado no robô está mostrado na Figura 4.1. Cada câmara do cilindro é alimentada por uma válvula solenóide rápida de três vias e duas posições normalmente fechada. O cilindro é unido à estrutura do robô para efetuar o movimento do grau de liberdade correspondente. Como o cilindro é de dupla ação com haste simples, existem áreas diferentes nas duas câmaras devido à presença da haste apenas uma delas. Para descrever a dinâmica da vazão de ar, supõe-se que o processo seja adiabático, isto é, que não haverá trocas de calor através da superfície de controle. O ar será considerado um gás ideal. A vazão de ar para as câmaras A e B do cilindro podem ser aproximadas por (Nguyen et al. 2005):

$$\dot{P}_A = \frac{r}{V_A} (RT\dot{m}_A - P_A \dot{V}_A) \quad (10)$$

$$\dot{P}_B = \frac{r}{V_B} (RT\dot{m}_B - P_B \dot{V}_B) \quad (11)$$

Onde, P_A e P_B são as pressões dentro das câmaras A e B, P_a, V_A e V_B são os volumes das câmaras A e B, m^3 , \dot{m}_A e \dot{m}_B são as taxas de fluxo de massa nas câmaras A e B, kg/s, T é a temperatura do ar fornecida, K, r é a relação entre os calores específicos do ar ($r = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$), R é a constante universal dos gases ($R = c_p - c_v = 0,287$ kJ/kg/K). Se o curso do cilindro for L , e A a área transversal da câmara, então o volume V_A fica:

$$V_A = A_1 \left(\frac{L}{2} + x_p \right) \quad (12)$$

e o volume V_B da câmara B:

$$V_B = A_2 \left(\frac{L}{2} - x_p \right) \quad (13)$$

Onde A_1 e A_2 são as áreas transversais das câmaras A e B respectivamente e x_p representa o deslocamento do êmbolo da posição central.

Com as equações (10) e (11) tem-se:

$$\dot{P}_A = \frac{r}{A_1 \left(\frac{L}{2} + x \right)} (RT \dot{m}_A - P_A \dot{V}_A) \quad (14)$$

$$\dot{P}_B = \frac{r}{A_2 \left(\frac{L}{2} - x \right)} (RT \dot{m}_B - P_B \dot{V}_B) \quad (15)$$

A vazão total de massa para as câmaras A e B é

$$\dot{m}_A = \dot{m}_A(ent) - \dot{m}_A(sai) \quad (16)$$

$$\dot{m}_B = \dot{m}_B(ent) - \dot{m}_B(sai) \quad (17)$$

Sendo \dot{m}_A e \dot{m}_B o vazão de massa nas câmaras A e B, $\dot{m}_A(ent)$ e $\dot{m}_B(ent)$ a vazão de massa de ar que entra nas câmaras A e B e $\dot{m}_A(sai)$ e $\dot{m}_B(sai)$ a vazão de massa de ar que sai das câmaras A e B respectivamente.

A taxa da vazão de ar através da válvula é regulada pela área do orifício, que é expressa como:

$$\dot{m} = \dot{m}(P_{alta}, P_{baixa}) =$$

$$\sqrt{\frac{2r}{r-1}} \sqrt{\left(\frac{P_{baixa}}{P_{alta}} \right)^{\frac{2}{r}} - \left(\frac{P_{baixa}}{P_{alta}} \right)^{\frac{r+1}{r}}} \frac{C_{val} S_{val}}{\sqrt{T}} P_{alta}, \quad \text{para } \frac{P_{baixa}}{P_{alta}} > 0,528 \quad (18)$$

$$\dot{m} = \dot{m}(P_{alta}, P_{baixa}) =$$

$$\left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{1}{r-1}} \sqrt{\frac{2r}{r+1}} \frac{(C_{val} S_{val})}{\sqrt{T}} P_{alta}, \quad \text{para } \frac{P_{baixa}}{P_{alta}} \leq 0,528 \quad (19)$$

Onde, C_{val} é o coeficiente de taxa de vazão da válvula, S_{val} é a área de passagem da válvula, m^2 , P_{alta} e P_{baixa} são os valores de pressão alta e baixa respectivamente, P_a , T é a temperatura absoluta do ar, K. Desta forma a dinâmica do cilindro e seu carregamento ficam determinados pela equação:

$$M\ddot{x} = (A_1 P_A - A_2 P_B) - c_{vis}\dot{x} - c_{coulomb}(\text{sign}(\dot{x})) \quad (20)$$

Onde, M é a massa total do cilindro, A é a área do cilindro, C_{vis} é o coeficiente de atrito viscoso e $C_{coulomb}$ é o coeficiente de atrito de Coulomb.

6.2 Modelo Matemático da Eletroválvula Direcional.

A válvula foi concebida para ser um elemento de controle que fornece uma vazão rápido de ar para as câmaras de um atuador pneumático, podendo ser considerada como um conversor eletro-pneumático [Erzan et al., 2006].

A característica da válvula é governada por um par de equações eletromecânicas e de fluxo, sendo que a relação entre elas está interligada. O diagrama de blocos mostrado na Figura 6.1 indica o fluxo do sinal da conversão eletropneumática.

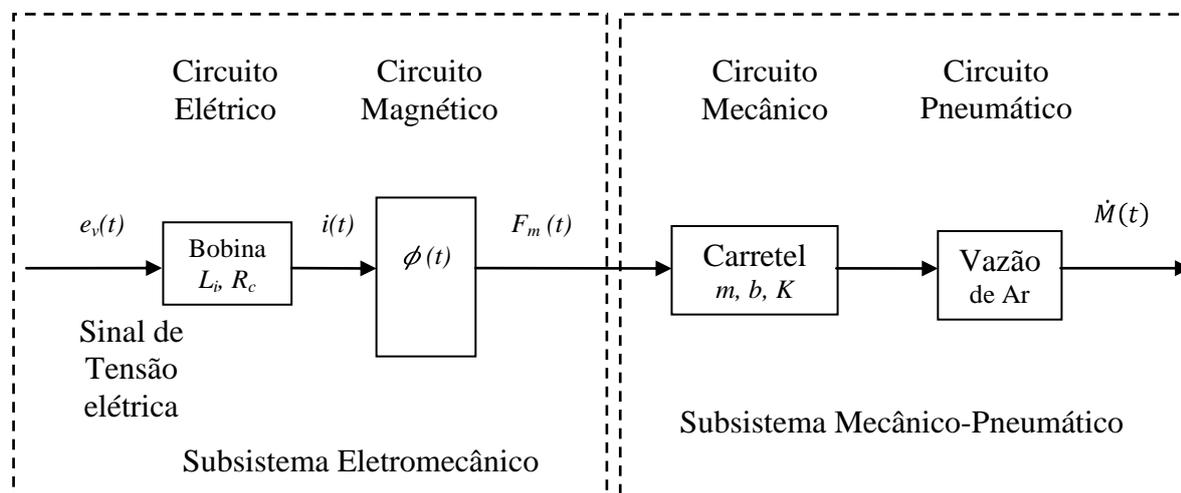


Figura 6.1 Diagrama de blocos da eletroválvula solenoide

As principais equações da válvula eletropneumática são apresentadas a seguir.

6.2.1 Subsistema Eletromagnético

Este subsistema é dividido em circuito elétrico e circuito magnético. O circuito elétrico é a bobina de acionamento da válvula e é representada como uma indutância ideal L_i em série com uma resistência R_c da própria bobina. Assim, aplica-se a lei de Kirchoff, para obter:

$$e_v(t) = R_c i(t) + d \frac{(N\phi(t))}{dt} \quad (21)$$

Onde e_v é a tensão elétrica de alimentação da bobina, V, R_c é a resistência elétrica da bobina, Ohm, i é a intensidade de corrente elétrica que atravessa a bobina, A, N é o número de espiras da bobina, ϕ é o fluxo efetivo do circuito magnético.

A força magneto-motora é função do número de espiras do fio da bobina e da intensidade de corrente que circula por esta. O fluxo magnético deve ser suficientemente grande para gerar uma força capaz de deslocar o carretel da bobina. Sua equação é:

$$NI = \frac{2 B_g x_t}{\mu} + \sum H_i l_i \quad (22)$$

Onde, NI é a força magneto-motora, N , B_g é a densidade do fluxo no ar [wb/m^2] e x_t é o valor da folga entre a bobina e o núcleo preenchida por ar, m , μ representa a permeabilidade do ar, H/m. O primeiro termo da equação, $(\frac{2 B_g x_t}{\mu})$ indica a força magneto-motriz necessária para estabelecer o fluxo no espaço x_t do ar com densidade B_g . O segundo termo, $\sum H_i l_i$, representa a força magneto motriz necessária para estabelecer o fluxo dentro das peças metálicas do circuito.

A força de atração gerada pelo fluxo magnético $\phi_{(t)}$ é descrita como:

$$F_m = \frac{\phi^2}{A_e \mu} = \frac{B_g^2 A_e}{\mu} \quad (23)$$

Onde F_m representa a força de atração gerada pelo campo magnético, N, A_e representa a área do núcleo da bobina, m^2 . Também, o fluxo magnético $\phi_{(t)}$ é função da intensidade de corrente i , do deslocamento do carretel x_c . Desta forma, a Equação (23) pode ser escrita como:

$$F_m = \frac{\mu A_e (NI)^2}{4(x_t - x_c)^2} \quad (24)$$

6.2.2 Subsistema Mecânico

Aplicando a segunda lei de Newton, a equação do movimento do carretel da válvula pode ser escrita como:

$$F_m(t) = m_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + b \frac{dx_c(t)}{dt} + K x_c(t) + F_d(t). \quad (25)$$

Onde m_c é a massa do carretel, kg, b o coeficiente de amortecimento do carretel, N/(m/s), K é a constante da mola da válvula, N/m e F_d é a força externa, N.

6.2.3 Subsistema Pneumático

A função das peças eletromecânicas da válvula é a de controlar a vazão do ar através do orifício de saída. Como o fluido pneumático é compressível, se a razão entre as pressões de alimentação e de exaustão for maior que o valor crítico P_{cr} (0,528) e a vazão de massa será uma função não linear destas pressões. Caso contrário, quando a razão for menor ou igual a P_{cr} , o fluido desloca-se em velocidade sônica e depende linearmente da pressão de alimentação.

As equações que regem estes comportamentos são as identificadas como (18) e (19) na Secção 6.1.

7. UNIDADE TÉCNICA DE SISTEMA DE CONTROLE

Esta unidade é responsável pela definição e projeto do controlador proposto para o robô. O principal objetivo é que o robô pneumático apresente desempenho dinâmico que o capacite a desempenhar tarefas de automação industrial.

7.1 Definição do Sistema de Controle

Com base no trabalho de Frasson (2007), foi definida a utilização da estratégia de controle por modos deslizantes para o robô. O controle por modos deslizantes mostrou-se adequado para a definição do seu uso neste trabalho, apresentando as seguintes características: facilidade de projeto, não necessidade de um modelo matemático preciso, aplicabilidade a sistemas não-lineares e robustez a variações paramétricas.

Outro fator determinante foi o trabalho realizado por Ning e Bone (2005), o qual apresenta resultados experimentais de um servoposicionador pneumático controlado através da técnica baseada em modos deslizantes. O trabalho relata que, para uma carga de 108 N seguindo um sinal de referência senoidal de frequência 0,5 Hz e amplitude de 250 mm, a resposta do servoposicionador apresentou erros de seguimento de trajetória da ordem de 0,4 mm, valor adequado para aplicação em alguns processos industriais.

7.2 Controle por Modos Deslizantes para Servoposicionadores Pneumáticos

Os sistemas de controle por estrutura variável (*Variable Structure Control - VSC*) se caracterizam pela execução de trocas bruscas da estrutura do controlador da planta, de acordo com uma determinada regra pré-estabelecida com o objetivo de atingir algum comportamento desejável do sistema (Frasson, 2007). O método mais difundido dos sistemas de controle por estrutura variável é o controle por Modos Deslizantes que geralmente é aplicado para a solução de problemas de controle em sistemas com incertezas paramétricas no modelo. Este método baseia-se no chaveamento entre leis de realimentação com o objetivo de conduzir a trajetória dos estados do sistema em direção a uma superfície arbitrária no espaço de estados definida em projeto (conhecida como *superfície de deslizamento* ou *superfície de chaveamento*). Uma vez atingida a superfície de deslizamento, o chaveamento das leis de controle deve confinar a trajetória do sistema de forma que ela deslize sobre a superfície até o

equilíbrio (Figura. 7.1). Mais detalhes podem ser encontrados em Surgenor (1995), Perondi e Guenther (2000), Yang Xia (2001), Perondi (2002), Šitum et al. (2003) e Silva e Silveira (2007).

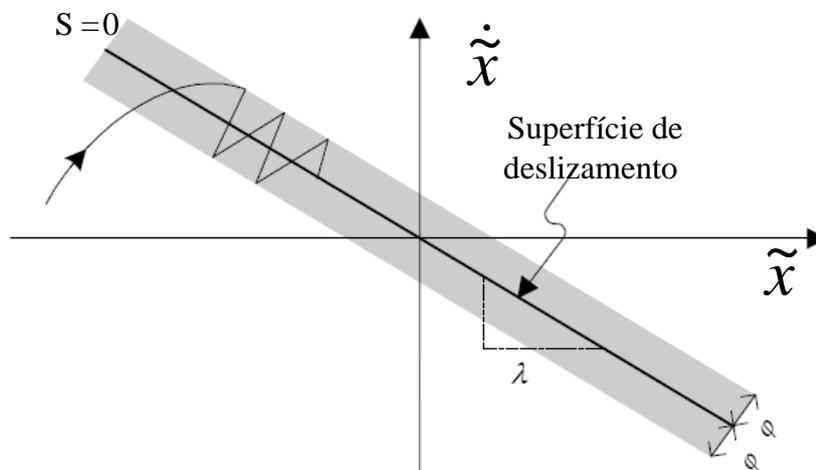


Figura 7.1 Interpretação gráfica da região de deslizamento em fase plana com ‘chattering’ como resultado de um chaveamento não ideal, fonte: Šitum et al. (2003)

7.2.1 Projeto do Controlador SMC

O projeto do controlador por modos deslizantes pode ser dividido em duas etapas:

- a primeira etapa é a definição da superfície de deslizamento.
- a segunda etapa é o projeto dos sinais de controle que chavearão as válvulas, de forma a dirigir o estado da planta para a superfície de deslizamento e mantê-lo em regime de deslizamento (Perondi e Guenther, 2000).

7.2.1.1 Fase 1 – Definição da Superfície de Deslizamento

A equação no espaço de estados generalizada para sistemas com uma entrada e uma saída (SISO – Single Input Single Output) é definida por Šitum et al. (2003) como:

$$\dot{x}^n = f(X, t) + b(X, t)u(t) \quad (29)$$

Onde x é a saída de interesse e n é a ordem do sistema, $u(t)$ é o valor escalar de sinal de entrada, X é o vetor de estados formado por x e pelas derivadas de x até a ordem $(n-1)$,

ou seja, $X = [x \quad \dot{x} \quad \dots \quad x^{(n-1)}]^T$. As funções $f(X,t)$ e $b(X,t)$ são funções não-lineares dependentes do estado.

Como condição inicial considera-se que no modelo representado pela Eq. (29), as funções $f(X,t)$ e $b(X,t)$ assumidas contínuas possam apresentar erros ou incertezas por vários motivos, como distorções na modelagem matemática. Cria-se, assim, erro de rastreamento que relaciona o vetor de estados (X) com o estado de referência ($X_d = [x_d \quad \dot{x}_d \quad \dots \quad x_d^{(n-1)}]$). Este vetor deve ser alcançado pelo vetor de estados X . O vetor de erro de rastreamento negativo é expresso através da Eq. (30).

$$\tilde{e} = X - X_d = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \dot{\tilde{x}} \\ \vdots \\ \tilde{x}^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (30)$$

O erro de rastreamento é a diferença entre a saída de interesse (x) e a referência (x_d). Como é desejado que o do erro de rastreamento seja nulo ($\tilde{e} = 0$), deve ser implementada uma lei de controle que garanta que tenda a zero à medida que o tempo avança. A superfície de deslizamento é definida por:

$$S(\tilde{e}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{e} = 0 \quad (31)$$

Onde: S é a superfície de deslizamento, \tilde{e} é o erro de rastreamento, m , e λ é uma constante positiva que representa a inclinação da superfície S em relação ao plano de fase. A Eq. (31) representa um conjunto de $n-1$ equações diferenciais de 1ª ordem, que define uma superfície de ordem $(n - 1)$ no espaço de estados.

Para um sistema dinâmico de ordem 3 ($n = 3$), a superfície de deslizamento obtida é:

$$s(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 \tilde{x} = \ddot{\tilde{x}} + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} \quad (32)$$

Considerando $c_2 = 2\lambda$ e $c_1 = \lambda^2$, e usando a expressão $\tilde{e} = X - X_d$ define-se a superfície de deslizamento como:

$$S = c_1(x - x_d) + c_2\dot{x} + \ddot{x} \quad (33)$$

A Eq. (33) define a superfície de deslizamento para o problema de seguimento de uma trajetória de 3ª ordem, em que $x - x_d$ é o erro de posição, \dot{x} é o erro de velocidade (\dot{e}) e \ddot{x} é o erro de aceleração (\ddot{e}).

Para facilitar a determinação dos coeficientes c_1 e c_2 e eliminar os ruídos provenientes dos valores da aceleração obtidos pela derivada de segunda ordem da posição é definida uma superfície escalar \hat{S} (Nguyen et al., 2005) como:

$$\hat{S} = (x - x_d) + \frac{c_2\dot{x}}{c_1} + \frac{\ddot{x}}{c_1} \quad (34)$$

7.2.1.2 Fase 2 – Definição da Lei de Controle

Nguyen et al. (2005) propõem um controlador com sinal de controle para válvulas ‘on-off’ dado por:

$$u = -\text{sgn}(S) \quad (35)$$

Onde $\text{sgn}(S)$ é a função sinal em relação à superfície de deslizamento S .

O chaveamento em altas frequências acarreta *chattering*¹ no sinal de saída do sistema. A solução, para minimizar tal fenômeno, consiste na criação da chamada camada limite (*boundary layer*) no sinal de controle. Desta forma a lei de controle fica:

$$u = -\text{sat}(S) \quad (36)$$

Onde $\text{sat}(S)$ é definida como $\text{sgn}(S/\varphi)$ quando $|S| > \varphi$, e igual a 0 quando $|S| \leq \varphi$. Assim,

¹ *Chattering* – oscilação na vizinhança da superfície de deslizamento

define-se a lei de controle por:

$$\begin{cases} se & S = 0 & \rightarrow & u = 0 \\ se & S \neq 0 & \rightarrow & u = u_s \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} se & |S| > |\varphi| & \rightarrow & u_s = -\text{sgn}(S) \\ se & |S| \leq |\varphi| & \rightarrow & u_s = 0 \end{cases} \quad (38)$$

7.2.2 Ajuste da Camada Limite

Para o ajuste da camada limite, foi efetuado um trabalho experimental, devido à bibliografia consultada, relacionada nas referências, não apresentar métodos científicos para a definição do φ .

O ajuste foi feito com vários experimentos. Inicialmente com funções degrau (*step*) verificando o ‘overshoot’ que cada cilindro apresentava com e sem carga. Num segundo estágio, foram alterados os parâmetros c_1 , c_2 e a vazão de ar até conseguir trabalhar adequadamente com o valor de φ escolhido. Uma vez determinado o valor de φ foram efetuados os testes apresentados no capítulo 8. Percebeu-se que à medida que o valor de φ é reduzido, a oscilação do sinal de controle aumenta (maior atuação da válvula), resultando em um menor erro de posição. Entretanto, a oscilação do sinal de controle aumenta continuamente resultando em um trabalho excessivo da válvula, com diminuição de sua vida útil.

Neste contexto, avaliaram-se de forma quantitativa os sinais de controle, definindo um valor de φ que fornecesse ao sistema o menor erro possível com uma oscilação do sinal de controle apropriada. O resultado deste estudo foi um refinamento na determinação da camada limite relacionado com a carga do sistema.

8. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram efetuados diversos testes para determinar o desempenho do robô a diferentes solicitações. A lei de controle usada, baseada na técnica dos modos deslizantes, foi a sugerida por Nguyen et al. (2005) já referida neste trabalho como (1) que será reproduzida a seguir,

$$\ddot{s} = \frac{\ddot{e}}{\omega^2} + \frac{\dot{e} 2\zeta}{\omega} + e \quad (1)$$

Esta equação, como foi comentado anteriormente, fornece uma superfície de deslizamento em escala em relação à superfície de deslizamento teórica, porém o uso deste artifício matemático facilita a seleção dos parâmetros da frequência (ω) e do índice de amortecimento (ζ).

Entre os testes efetuados, foram escolhidos e analisados os representativos das características do funcionamento do robô para serem apresentados a seguir.

8.1 Teste de movimentação em degrau no eixo X

A função degrau corresponde a um sinal constante aplicado repentinamente ao sistema no tempo t igual a zero [OGATA, K.,1998]. Este sinal, aplicado instantaneamente, faz que o controlador identifique um erro de posicionamento e gere um sinal de comando para abrir a válvula solenóide e deslocar o embolo do cilindro para a posição definida pelo sinal da função degrau anulando, com este deslocamento, o erro de posicionamento

Os parâmetros empregados no teste são mostrados na Tabela 8.1.

Tabela 8.1- Parâmetros do teste de movimentação em degrau no eixo X.

PARÂMETRO	VALOR
Deslocamento	100 mm
Índice de Amortecimento, ζ	5
Frequência Natural, ω	500 Hz
Largura da Camada Limite, ϕ	0,3 mm
Pressão de Trabalho	600 kPa

A Figura 8.1 mostra o deslocamento do atuador X no teste de degrau.

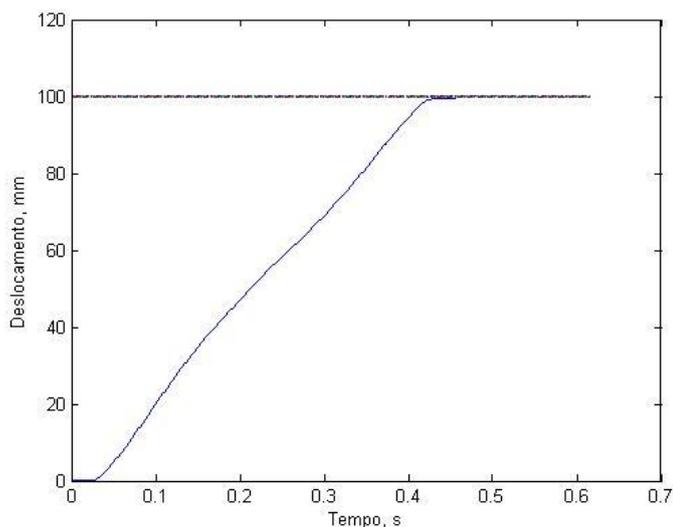


Figura 8.1 Posição do eixo X no teste de degrau.

Ao analisar a Figura 8.1, que mostra a posição do atuador no tempo, verifica-se que a velocidade média de deslocamento foi de 230 mm/s ($100 \text{ mm} / 0,4346 \text{ s}$).

A Figura 8.2 mostra uma ampliação da Figura 8.1 para permitir a visualização do início do movimento.

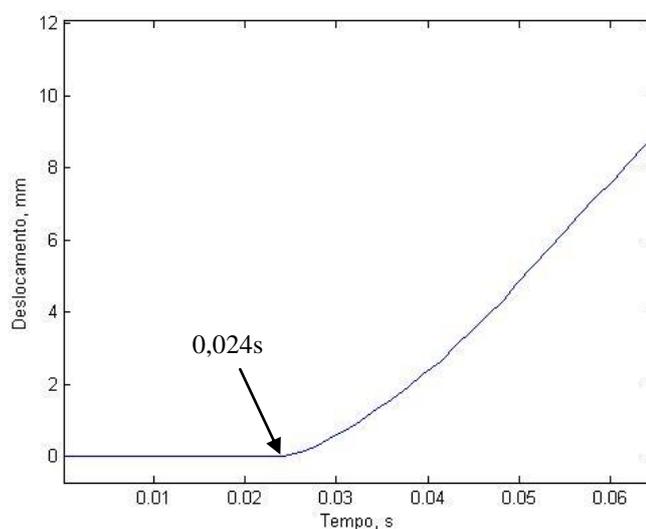


Figura 8.2 Detalhe do início do movimento.

Analisando a Figura 8.2 verifica-se que a partir do momento em que foi emitido o sinal do começo do movimento do pistão do eixo X pelo computador, houve um atraso de 0,024s para que o deslocamento iniciasse. Este atraso é devido ao tempo necessário para a energização da bobina da válvula pneumática, o deslocamento mecânico do seu carretel, e o preenchimento da mangueira de alimentação e das câmaras do cilindro com ar comprimido a uma pressão suficientemente alta para vencer as forças de atrito.

A Figura 8.3 é uma ampliação da Figura 8.1 mostra a posição final do movimento.

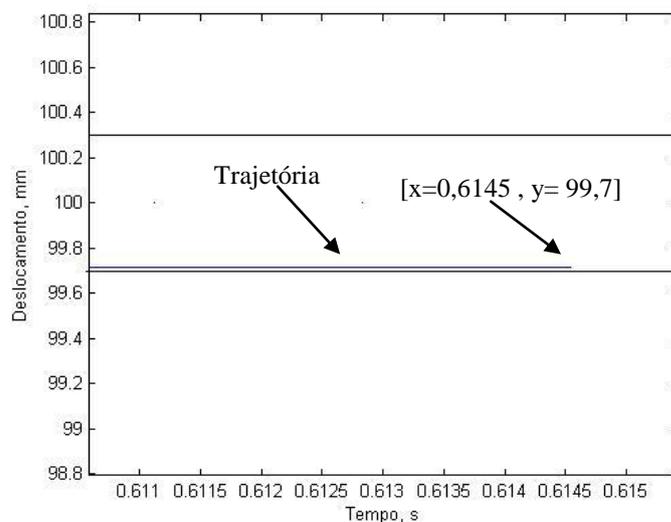


Figura 8.3 Detalhe do fim do movimento.

A Figura 8.3 permite verificar que o erro final de posicionamento do cilindro foi de 0,3 mm, valor encontrado dentro da zona de tolerância definido por ϕ .

A Figura 8.4 mostra a velocidade desenvolvida pelo cilindro neste teste. Percebe-se o aparecimento de ruído (originado pelo cálculo da velocidade através da derivada do sinal medido de pressão).

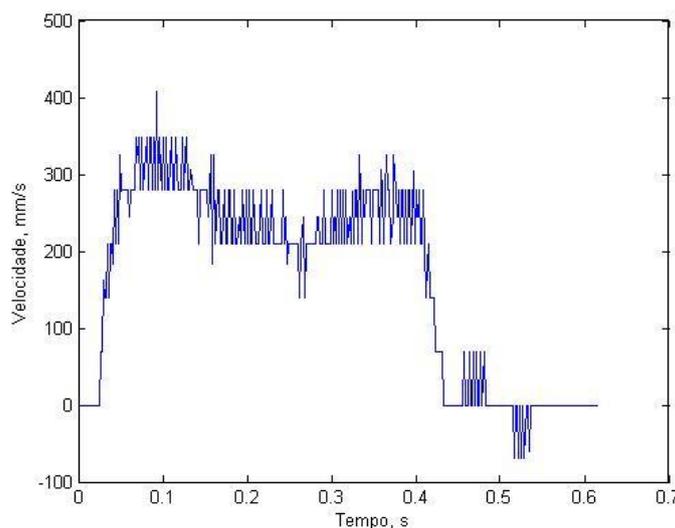


Figura 8.4 Velocidade desenvolvida no eixo X no percurso mostrado na Figura 8.1

A Figura 8.5 mostra a aceleração desenvolvida pelo cilindro. A aceleração foi

calculada pela derivação de segunda ordem da posição do cilindro em relação ao tempo.

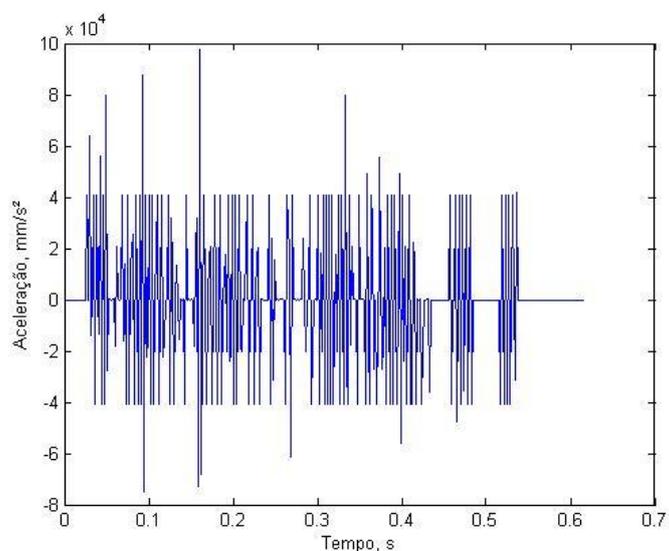


Figura 8.5 Aceleração desenvolvida no eixo X no percurso mostrado na Figura 8.1

Percebe-se na Figura 8.5 a incidência de ruídos no sinal de aceleração. Portanto, se possível, deve ser descartada a parcela da aceleração no cálculo do sinal de saída. A eliminação foi conseguida empregando altos valores de ω , (500 Hz neste caso) como sugerido por Nguyen, 2005.

A Figura 8.6 mostra o sinal de saída do controlador que efetua os chaveamentos das válvulas.

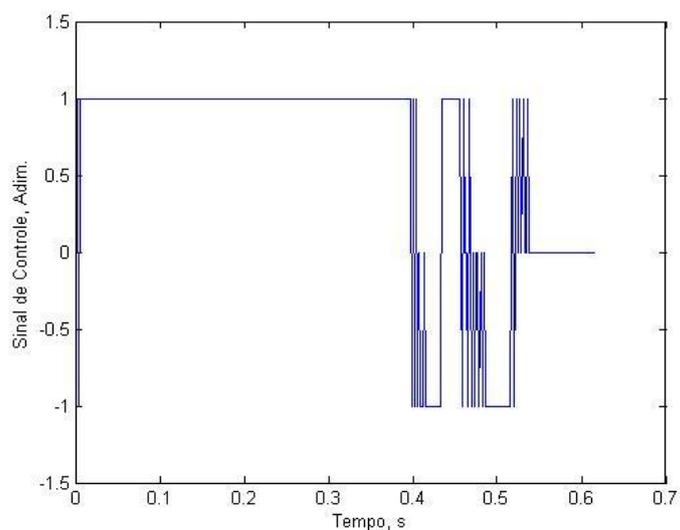


Figura 8.6 Sinal de saída do controlador no percurso mostrado na Figura 8.1.

Percebe-se que nos primeiros 0,396s (correspondendo a um deslocamento de 93,88mm), a válvula de avanço ficou sempre acionada. A partir desse ponto, inicia o chaveamento necessário para direcionar a dinâmica do cilindro para a superfície de deslizamento.

Como teste ao mostrado na Figura 8.1, foi realizado outro com as seguintes características:

Tabela 8.2- Parâmetros do segundo teste de movimentação em degrau no eixo X.

PARÂMETRO	VALOR
Deslocamento	100 mm
Índice de Amortecimento, ζ	5
Frequência Natural, ω	500 Hz
Largura da Camada Limite, ϕ	0,25 mm
Pressão de Trabalho	600 kPa

Cabe ressaltar que a única mudança efetuada foi a diminuição da tolerância em 0,05 mm por lado (o valor de ϕ é 0,3 mm na experiência da Figura 8.1 e passou para 0,25 neste teste).

A Figura 8.7 mostra o resultado do teste. Pode-se perceber que o controlador não manteve a dinâmica do eixo na superfície de deslizamento após atingir a posição do degrau, originando um chaveamento mantido.

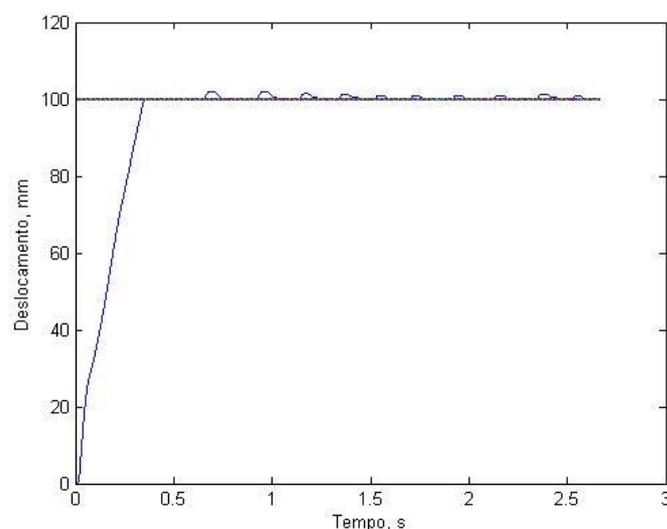


Figura 8.7 Posição do eixo X com teste de degrau e tolerância diminuída.

A Figura 8.8 é uma ampliação do trecho final da Figura 8.7, onde pode ser visto que a dinâmica do sistema originou um chaveamento mantido, impossibilitando que o atuador permanecesse dentro da faixa de tolerância e que as válvulas pudessem ser desligadas.

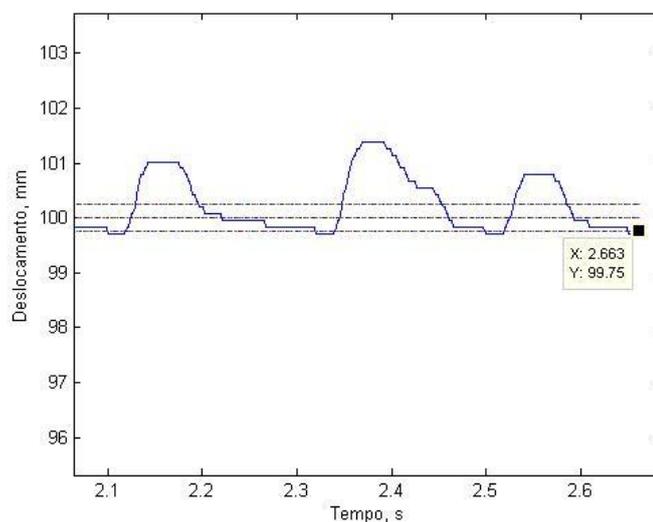


Figura 8.8 Detalhe do chaveamento constante.

8.2 Teste de seguimento de trajetória no eixo X

O teste de seguimento de trajetória para o eixo X foi feito nas seguintes condições:

Tabela 8.3- Parâmetros do teste de seguimento de trajetória do eixo X.

PARÂMETRO	VALOR
Deslocamento	100 mm
Velocidade	50 mm/s
Índice de Amortecimento, ζ	5
Frequência Natural, ω	500 Hz
Largura da Camada Limite, ϕ	0,3 mm
Pressão de Trabalho	600 kPa

A Figura 8.9 mostra o deslocamento do atuador X no teste de seguimento de trajetória. Observa-se que, ao iniciar o deslocamento, acontece um desvio significativo de trajetória, isto se deve ao crescimento do erro de posição e velocidade que acontece no início do teste, nos instantes anteriores à abertura da válvula.

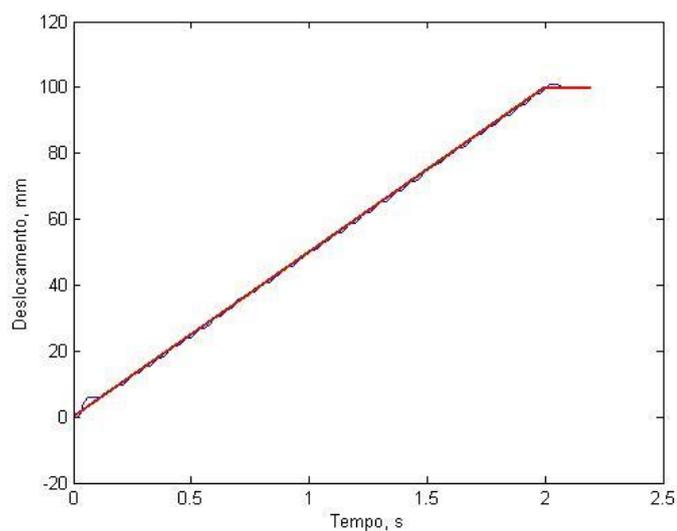


Figura 8.9 Posição - Teste de seguimento de trajetória no eixo X.

Este problema poderia ser diminuído com a implantação de uma curva de aceleração para tornar progressiva a movimentação do cilindro, assim o valor de referência aumentaria de forma suave. A aplicação desta rampa, nesta fase de testes, será descartada para evitar alterações nos resultados.

A Figura 8.10 mostra a variação do erro no tempo (velocidade do erro) desenvolvida pelo atuador do eixo X quando efetuou o deslocamento indicado na Figura 8.9.

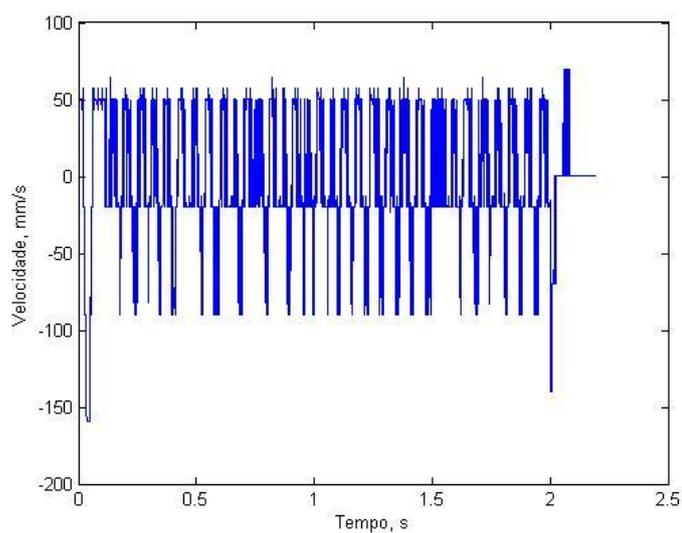


Figura 8.10 Velocidade do erro - Teste de seguimento de trajetória no eixo X.

A Figura 8.11 mostra o sinal de saída do controlador para o movimento registrado na

Figura 8.9

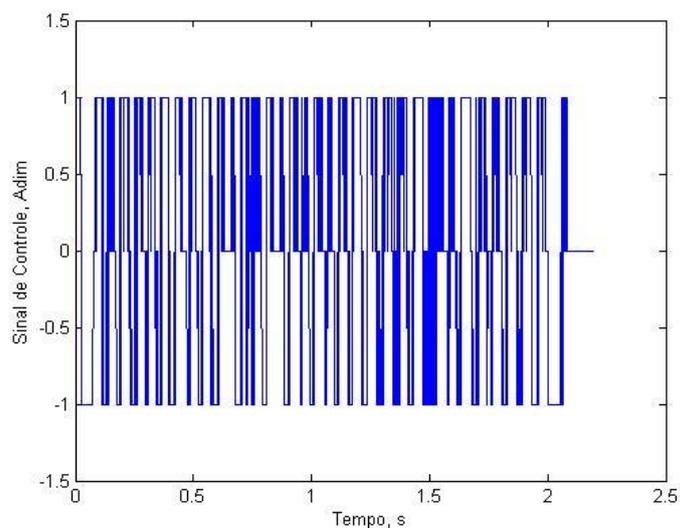


Figura 8.11 Sinal de saída do controlador - Teste de seguimento de trajetória eixo X.

8.3 Teste de Movimentação em Degrau no eixo Y

O teste foi realizado com os parâmetros abaixo descritos e o resultado do teste é mostrado na Figura 8.12.

Tabela 8.4- Parâmetros do teste de movimentação em degrau no eixo Y.

PARÂMETRO	VALOR
Deslocamento	100 mm
Índice de Amortecimento, ζ	5
Frequência Natural, ω	500 Hz
Largura da Camada Limite, ϕ	0,3 mm
Pressão de Trabalho	600 kPa

O segmento inicial da Figura 8.12 mostra um atraso no deslocamento do êmbolo. Este fenômeno é característico no início do movimento de acionadores pneumáticos, quando o trecho do circuito de alimentação compreendido entre a válvula e o cilindro encontra-se despressurizado. Este fenômeno foi anteriormente relatado no teste correspondente no eixo X quando foi percebido ao efetuar a análise da Figura 8.1 e mostrado em detalhe e mensurado na Figura 8.2.

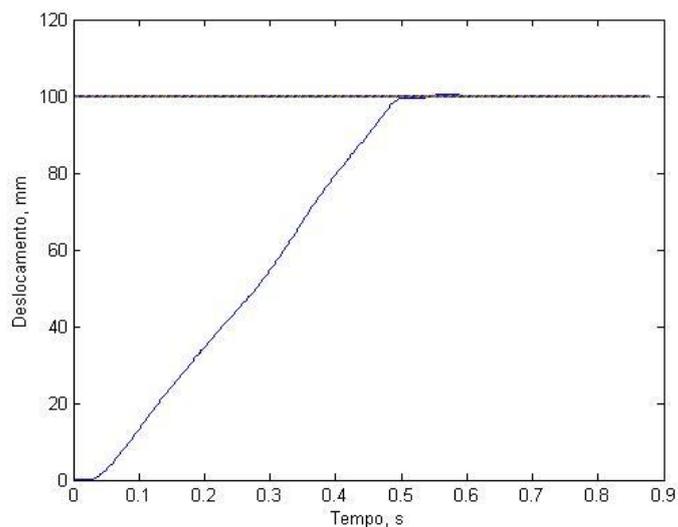


Figura 8.12 Posição no eixo Y, teste de degrau

A Figura 8.13 é uma ampliação do segmento final da trajetória de deslocamento no eixo Y. Nela pode observar-se que o erro final de posicionamento do atuador foi de 0,2 mm ficando, então, dentro da largura da camada limite (φ) de 0,3 mm estabelecida para este teste.

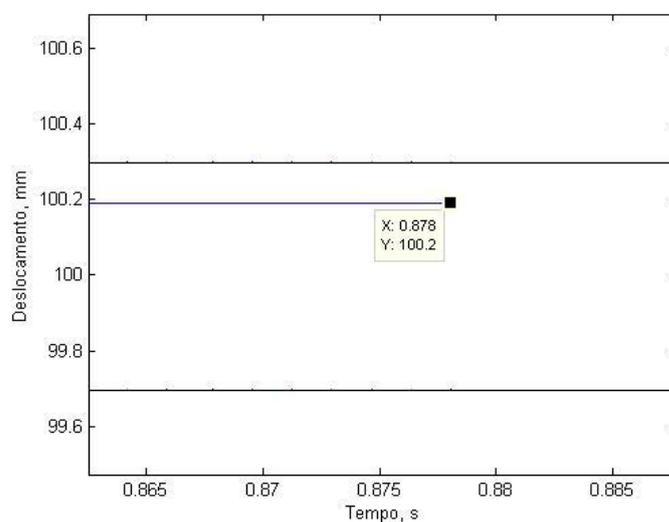


Figura 8.13 Segmento final da trajetória do deslocamento no eixo Y

A Figura 8.14 mostra a velocidade desenvolvida pelo atuador na trajetória descrita na Figura 8.12. Nesta Figura se percebe ruído no valor da velocidade calculada originado por ser a velocidade um valor calculado a partir de uma série de valores de posição e tempo obtidos da forma discreta.

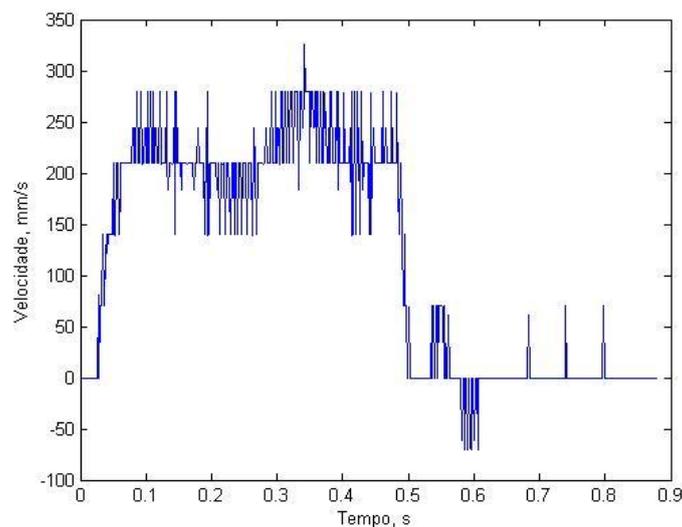


Figura 8.14 Velocidade desenvolvida no eixo Y no percurso mostrado pela Figura 8.12

A Figura 8.15 mostra a aceleração calculada pela derivada de segunda ordem dos valores de posição e tempo da trajetória do eixo Y. Como há muito ruído nesses dados eles serão anulados no cálculo do sinal de saída como foi feito anteriormente para o eixo X.

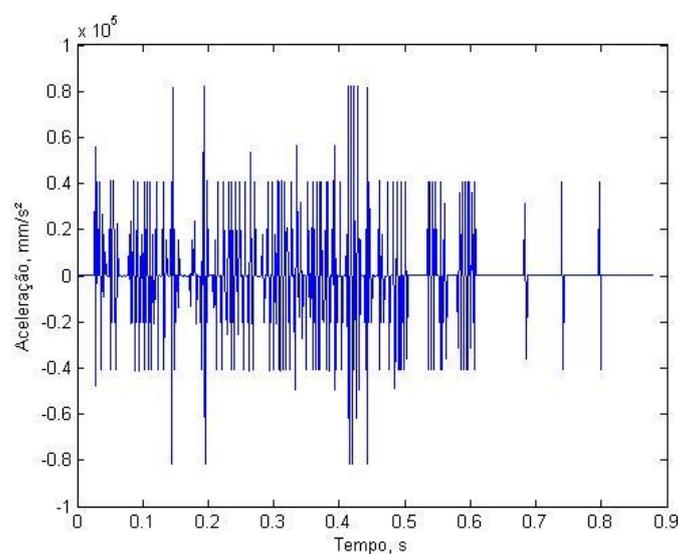


Figura 8.15 Aceleração desenvolvida no eixo Y no percurso mostrado pela Figura 8.12

A Figura 8.16 mostra os sinais de saída do controlador para o percurso efetuado no eixo Y. Percebe-se que nos 0,45 s iniciais da movimentação o sinal de saída permaneceu constantemente ligado, acionando a válvula de avanço do cilindro Y, passando em sequência a desligar a válvula inicialmente e, posteriormente a acionar a válvula de recuo do cilindro.

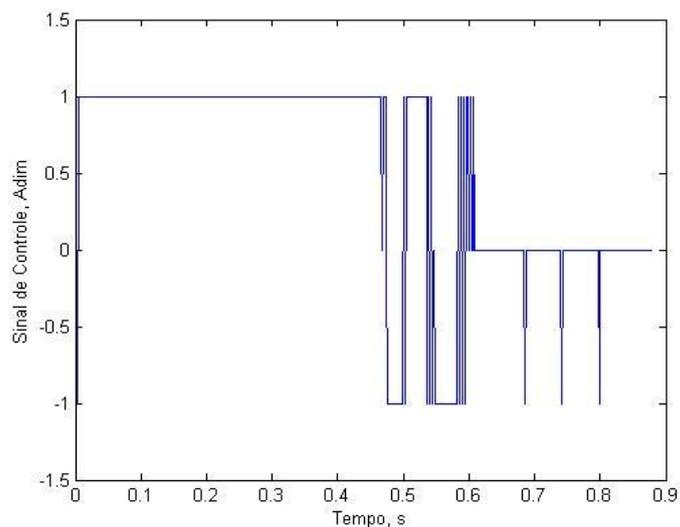


Figura 8.16 Sinal de saída do controlador no percurso mostrado na Figura 8.12

8.4 Teste de Seguimento de Trajetória no eixo Y

O teste de seguimento de trajetória para o eixo Y foi feito nas seguintes condições:

Tabela 8.5- Parâmetros do teste de seguimento de trajetória no eixo X.

PARÂMETRO	VALOR
Deslocamento	100 mm
Velocidade	50 mm/s
Índice de Amortecimento, ζ	8,33
Frequência Natural, ω	500 Hz
Largura da Camada Limite, ϕ	0,3 mm
Pressão de Trabalho	600 kPa

A Figura 8.17 mostra o deslocamento do atuador Y no teste de seguimento de trajetória.

Ao analisar esta figura percebe-se nos 0,25 s iniciais do deslocamento o aparecimento de um erro de posição de valor próximo a 10 mm, isto é devido ao atraso no início da movimentação, analisado nos testes de deslocamento em degrau nos eixos X e Y e da própria inércia do sistema para chegar à velocidade determinada pela trajetória a ser seguida sem rampa de aceleração. Também se percebe, ao longo da trajetória erros de posicionamento, menores que o inicial, porém que superam à largura da camada limite determinada para este teste.

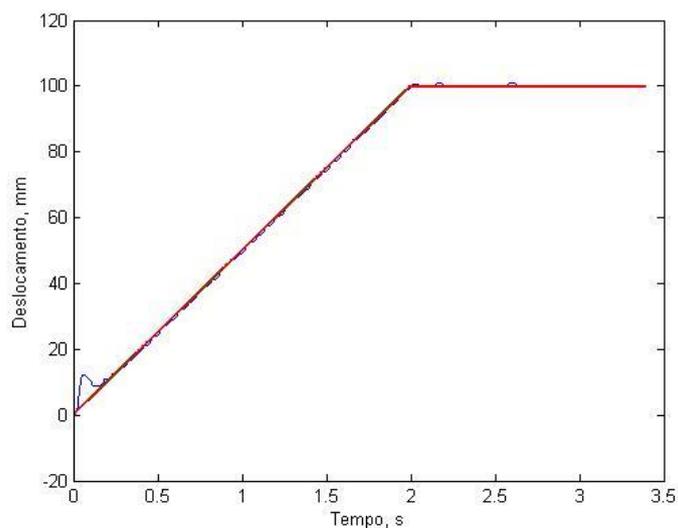


Figura 8.17 Posição – Teste de seguimento de trajetória no eixo Y

A Figura 8.18 mostra a velocidade do erro de posição.

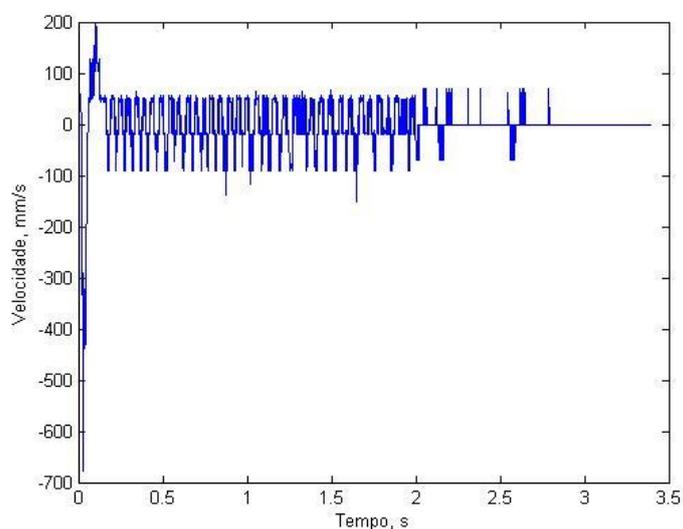


Figura 8.18 Velocidade do erro – Teste de seguimento de trajetória do eixo Y

A Figura 8.18 mostra que a variação do erro de posição no tempo teve valor negativo no início do movimento chegando a superar valores de -650 mm/s, enquanto a inércia do sistema não permitia que o controlador interferisse na movimentação. Passado este primeiro momento se observa um pico positivo de 200 mm/s e a partir deste a variação do erro no tempo oscilou entre valores positivos e negativos durante todo o deslocamento do cilindro.

A Figura 8.19 mostra a aceleração do erro de posição.

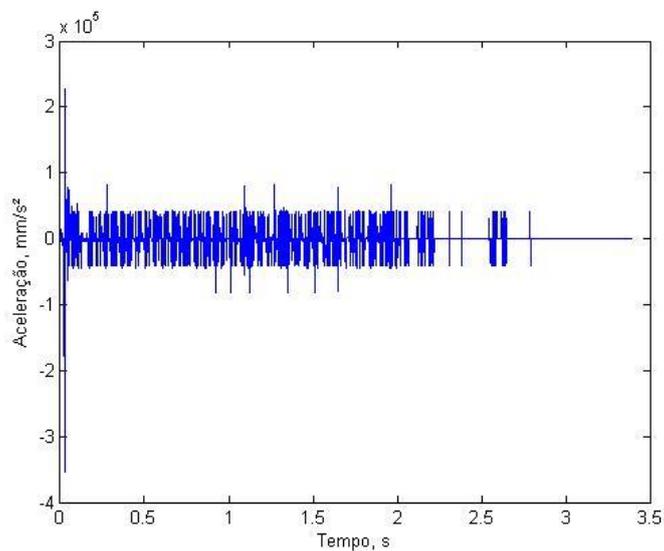


Figura 8.19 Aceleração do erro – Teste de seguimento de trajetória no eixo Y

O gráfico da aceleração do erro, mostrado na Figura 8.19, evidencia a incidência do ruído criado na integração em segundo dos erros calculados para a posição do pistão no tempo.

A Figura 8.20 mostra o sinal de saída do controlador.

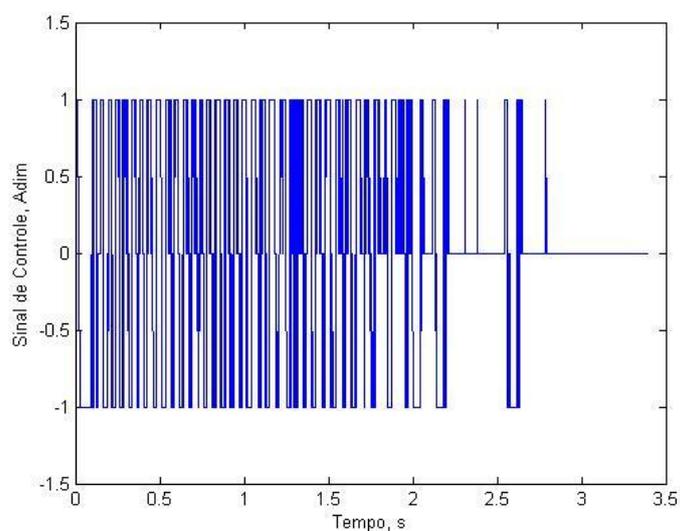


Figura 8.20 Sinal de saída do controlador – Teste de seguimento de trajetória no eixo Y

8.5 Teste de movimentação em degrau no eixo Z

O teste de movimentação em degrau no eixo Z foi feito nas seguintes condições:

Tabela 8.6- Parâmetros do teste de movimentação em degrau no eixo Z.

PARÂMETRO	VALOR
Deslocamento	50 mm
Índice de Amortecimento, ζ	5
Frequência Natural, ω	500 Hz
Largura da Camada Limite, ϕ	0,3 mm
Pressão de Trabalho	600 kPa

A Figura 8.21 mostra o deslocamento do atuador Z no teste de degrau.

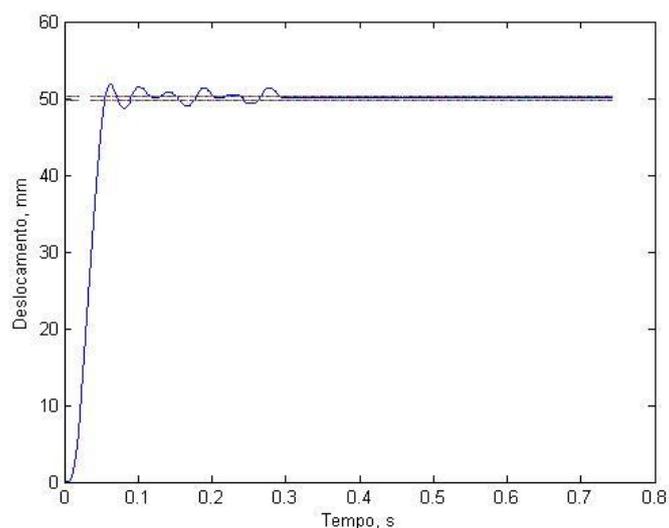


Figura 8.21 Posição no eixo Z no teste de degrau

Este e os outros testes de movimentação do eixo Z, foram aplicados com a mesma vazão de ar empregada nos testes efetuados nos eixos X e Y. O diâmetro do cilindro existente no eixo Z é de 20 mm enquanto que os disponíveis em X e Y são de 63 mm. Esta diminuição no diâmetro faz com que a área do cilindro Z seja igual a 1/10 da área dos cilindros X ou Y aumentando a velocidade de deslocamento do cilindro e dificultando a ação de controle devido ao tempo de retardo característico no acionamento das válvulas solenóide. A Figura 8.22 mostra o erro de posicionamento no fim do deslocamento de 0,05 mm

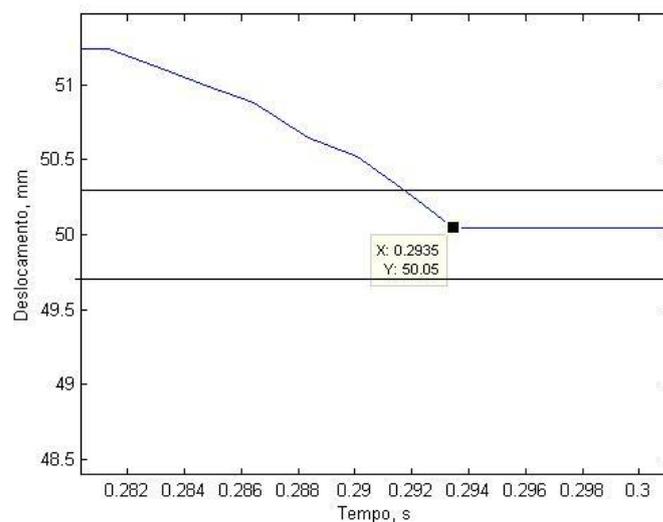


Figura 8.22 Posição final do eixo Z no teste de degrau.

Uma análise da Figura 8.22 indica que, mesmo com velocidade de deslocamento maior o controlador foi suficientemente robusto como para conseguir o posicionamento final dentro da largura da camada limite.

A Figura 8.23 mostra a velocidade desenvolvida no eixo Z no teste de degrau.

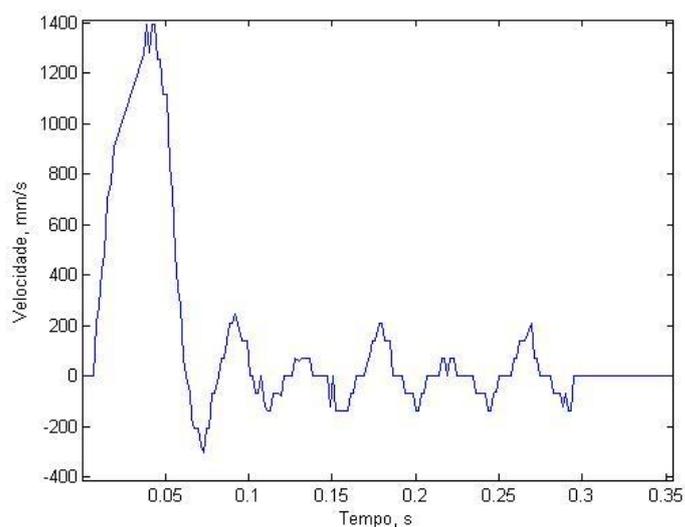


Figura 8.23 Velocidade desenvolvida no eixo Z no percurso mostrado na Figura 8.21

A Figura 8.24 mostra a aceleração sofrida pelo atuador do eixo Z ao desenvolver a trajetória indicada na Figura 8.21.

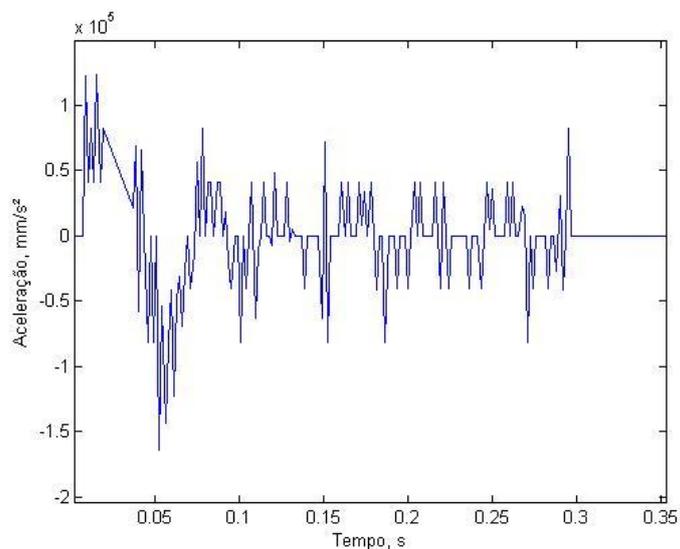


Figura 8.24 Aceleração desenvolvida no eixo Z no percurso mostrado na Figura 8.21

A Figura 8.25 mostra o sinal de saída do controlador do teste de degrau do eixo Z

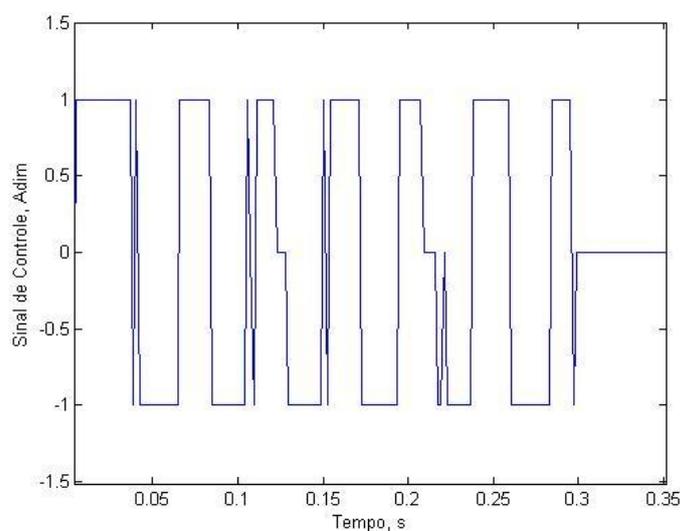


Figura 8.25 Sinal de saída do controlador no percurso mostrado pela Figura 8.21

Na análise deste teste deve ser destacada a influência da velocidade no controle, utilizando a técnica dos modos deslizantes, para o comando de válvulas solenóide. A resposta para um deslocamento em degrau mostrou oscilações no segmento final, característicos de valores insuficientes de índice de amortecimento e finalmente o posicionamento do êmbolo dentro largura da camada limite.

8.6 Teste de seguimento de trajetória no eixo Z

O teste de seguimento de trajetória no eixo Z foi feito nas seguintes condições:

Tabela 8.3- Parâmetros do teste de seguimento de trajetória no eixo Z.

PARÂMETRO	VALOR
Deslocamento	50 mm
Velocidade	50 mm/s
Índice de Amortecimento, ζ	8,33
Frequência Natural, ω	500 Hz
Largura da Camada Limite, ϕ	1 mm
Pressão de Trabalho	600 kPa

A Figura 8.26 mostra o deslocamento do atuador Z no teste de seguimento de trajetória.

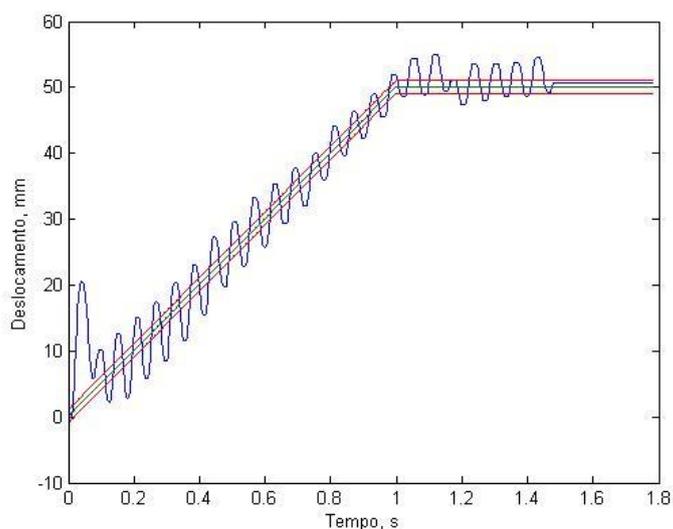


Figura 8.26 Posição-Teste de seguimento de trajetória no eixo Z

A figura 8.26 mostra a impossibilidade que o controlador tem em manter o deslocamento do cilindro Z dentro da largura da camada limite. Esta impossibilidade se fundamenta na combinação de três fatores: a velocidade do êmbolo que é função da vazão e da pressão do ar que alimenta a válvula, o tempo de resposta do sistema que depende, principalmente, do tempo de acionamento das válvulas e a largura determinada para a camada limite que depende da precisão da operação que o robô irá desempenhar.

A Figura 8.27 mostra a velocidade com que o erro de posição muda quando descreve a trajetória mostrada na Figura 8.26.

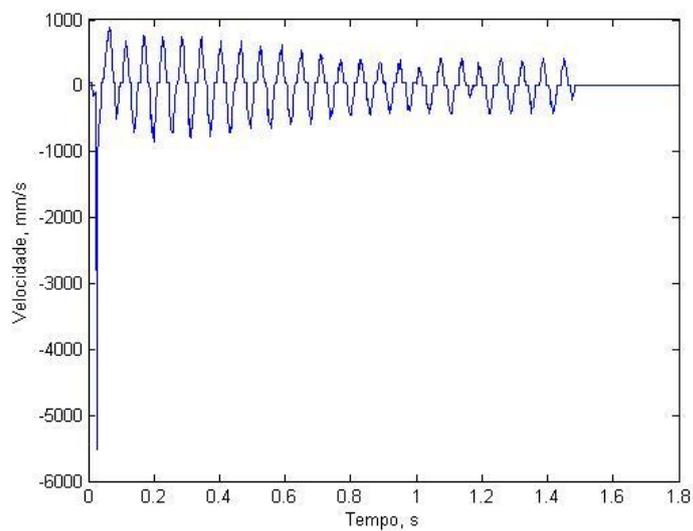


Figura 8.27 Velocidade do erro – Teste de seguimento de trajetória no eixo Z

A Figura 8.28 mostra a variação da aceleração do erro no teste de seguimento de trajetória no eixo Z.

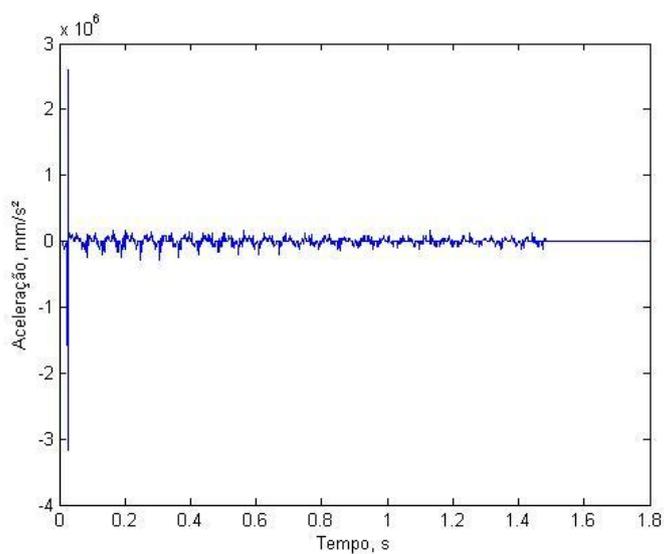


Figura 8.28 Aceleração do erro – Teste de seguimento de trajetória no eixo Z

A Figura 8.29 mostra o sinal de saída do controlador para o movimento efetuado pelo cilindro descrito na Figura 8.28.

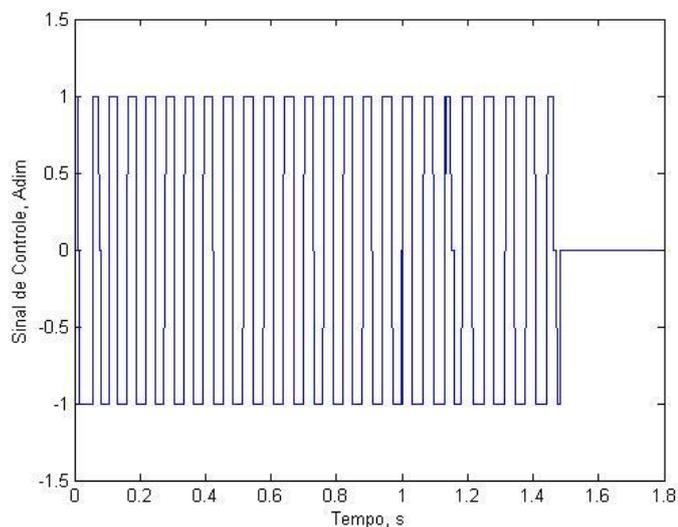


Figura 8.29 Sinal de saída do controlador – Teste de seguimento de trajetória no eixo Z

8.7 Análise dos resultados

Após ter efetuado e analisado uma série de testes pode-se concluir que:

- O sistema composto por válvulas solenóide rápidas e controle por modos deslizantes foi eficiente nos testes que avaliaram posicionamentos finais precisos. Isto está ratificado pelas Figuras 8.3, 8.13 e 8.22.
- Para seguimento de trajetórias o sistema apresenta resposta oscilatória, principalmente quando a velocidade do cilindro com a válvula totalmente aberta é consideravelmente superior ao da trajetória a seguir. Nestes casos, o tempo necessário para chaveamento da válvula não é suficiente para manter o cilindro dentro dos limites da superfície de deslizamento. Esta afirmação pode ser comprovada através da Figura 8.27. Para que este cilindro tenha um comportamento mais próximo ao esperado, a vazão de ar deve ser limitada. Assim, para que um sistema controlado pela técnica baseada em modos deslizantes usando válvulas solenóide tenha bom resultado, os cilindros devem ter áreas de dimensões similares ou deverá ter uma restrição de a passagem de ar para equiparar a velocidade dos

cilindros e possibilitar que eles permaneçam com desempenho que possibilite um chaveamento eficiente das válvulas.

9. CONCLUSÕES

Há inúmeros processos industriais que podem ser automatizados, porém o elevado custo dos sistemas de automação disponível na atualidade, incluindo a robótica, não possibilita essa atividade. Para aumentar o nível de automação industrial torna-se necessário reduzir seus custos. Isto pode ser conseguido implementando soluções que operem com formas de energia alternativas à elétrica, e que tenham componentes de custo mais baixo.

Uma destas alternativas é a pneumática, que apresenta várias características importantes para a automação industrial, como a de ser uma forma de energia não poluidora, disponível na maioria das empresas, propicia baixo risco de acidentes pessoais, seus componentes são robustos e encontrados com relativa facilidade no mercado, seus atuadores desenvolvem potências elevadas a velocidades compatíveis com as necessárias nas aplicações de robótica e dispensam o uso de redutores mecânicos de velocidade. A principal desvantagem do uso da pneumática é o controle de posição. O ar é um fluido compressível, as válvulas pneumáticas têm atrasos no seu acionamento, a movimentação dos seus atuadores é influenciada por forças de atrito, entre outros motivos, são as justificativas do seu emprego limitado na automação.

Recentemente, com o avanço da computação e da eletrônica industrial, surgiram teorias de controle que, em tese, possibilitariam o controle de atuadores pneumáticos dentro de limites aceitáveis de precisão de movimentação para aplicações em ambiente industrial. Uma das tecnologias desenvolvidas e a de controle por modos deslizantes que pode ser adaptada para o controle de válvulas solenóide. Empregando a energia pneumática, um controlador baseado na técnica dos modos deslizantes e válvulas solenóide de acionamento rápido em este trabalho foi desenvolvido um robô cartesiano para verificar, através de testes, se o desempenho alcançado atingia padrões aceitáveis para seu uso em aplicações industriais.

Os testes aplicados a este robô foram o de deslocamento instantâneo através de uma função degrau e o de seguimento de trajetória reta sem rampa de aceleração. Previamente à execução dos testes mostrados no Capítulo 8 foram efetuadas sequências de movimentações em cada atuador para ajustar corretamente os parâmetros de frequência natural (ω) e índice de amortecimento (ζ) integrantes da equação do controlador por modos deslizantes para que a movimentação fosse efetuada de forma precisa.

O resultado dos testes mostra que com as técnicas de controle e os componentes pneumáticos modernos algumas operações industriais, principalmente as que dependem somente de precisão no posicionamento final da trajetória podem ser automatizadas a custos

mais baixos, como a automação de montagens de conjuntos, alimentação de peças em máquinas, armazenamento, etc. Em casos de processos onde a trajetória desenvolvida também é importante, como é o caso de soldas contínuas, corte por plasma e laser, é necessário que seja feito um estudo mais apurado sobre as necessidades de precisão no deslocamento para cada aplicação, verificando se a precisão oferecida pelo robô atinge as necessidades mínimas. Foram identificados pequenos erros de trajetória no deslocamento dos atuadores, ocasionados pela inércia das válvulas, estes defeitos podem ser minimizados pela aplicação de rampas de aceleração e, em casos da necessidade de maior precisão, podem ser trocadas as válvulas solenóide por válvulas proporcionais.

O trabalho confirmou que a pneumática, com os recursos de componentes rápidos e baratos e tecnologias de controle modernas, pode ser usada como uma alternativa econômica para a robotização de processos industriais.

9.1 Trabalhos Futuros

Propostas para trabalhos futuros são:

- Estudar o desempenho do robô pneumático usando válvulas proporcionais no lugar das válvulas rápidas.
- Estudar o desempenho do robô em seguimento de trajetória com uso de rampas de aceleração.
- Desenvolvimento de programação off-line para robôs pneumáticos.
- Testes práticos de robôs pneumáticos em diferentes processos industriais.
- Desenvolvimento de válvulas solenóide mais rápidas.
- Desenvolvimento de servoválvulas mais econômicas.
- Desenvolvimento de robôs pneumáticos industriais móveis aproveitando a relação força /peso favorável deste tipo de acionamento.
- Desenvolvimento de programas de controle de robôs em sistemas operacionais abertos (LINUX) permitindo o uso de recursos modernos que oferecem os computadores como conexão USB, acionamento remoto, visão remota, etc.

REFERÊNCIAS

- AHN, K., YOKOTA, S., 2005. **Intelligent Switching Control of Pneumatic Actuator Using on/off Solenoid Valves**. *Mechatronics* 15, pp. 683-702 .
- ANDRIGHETTO, P. L.; VALDIERO, A. C.; CARLOTTO, L., 2006. **Study of the Friction Behavior in Industrial Pneumatic Actuators**. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, vol. 2, pp. 369-376.
- BAVARESCO, D., 2007. **Modelagem Matemática e Controle de um Atuador Pneumático**. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- BOBROW, J.E.; MCDONELL, W., 1998. **Modeling, Identification, and Control of a Pneumatically Actuated, Force Controllable Robot**. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, n. 5, pp. 732-742.
- ERZAN, T. E.; YÜKSEL, I.; KAMIS Z., 2006. **Development of Electropneumatic Fast Switching Valve and Investigation of its Characteristics**. *Mechatronics*, Volume 16, issue 6, July 2006, pp. 365-378.
- FAYSSAL, H. A., 1997. **Design, Analysis, and Control of a Pneumatic Cartesian Robot**. Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Canadá.
- Festo Corporation. Catálogo. 2007. Disponível em: <<http://www.festo.com>>. Acesso em: dez 2007.
- FRASSON, M., 2007. **Projeto de um Robô Cartesiano com Acionamento Pneumático**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GUENTHER, R.; PERONDI, E. A.; PIERI, E. R.; VALDIERO, A. C., 2006. **Cascade Controlled Pneumatic Positioning System with Lugre Model Based Friction Compensation**. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Engineering*, vol. XXVIII, n. 1, pp. 48-57.
- GUOLIANG, T.; XUANYIN, W., 2001. **Research on Pneumatic-servo Calligraphy Robot**. *Proceedings of The Fifth International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, pp. 219-222, Hangzhou, China.
- HORIKAWA, O.; MARUYAMA, N; SANTOS FILHO, D. J. et al., 2002. **Seleção de Robôs Industriais**. In: Vitor Romano. (Org.). *Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, pp. 126-138.

LIU, S.; BOBROW, J., 1988. **An Analysis of a Pneumatic Servo System and its Application to a Computer-controlled Robot.** ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 110.

NGUYEN, T.; LEAVITT, J.; JABBARI, F.; BOBROW, J., 2007, **Accurate Sliding-Mode Control of Pneumatic Systems Using Low-Cost Solenoid Valves.** IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, N° 2.

NING, S.; BONE, G.M., 2005. **Experimental Comparison of Two Pneumatic Servo Position Control Algorithms.** Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, pp. 37-42, Niagara Falls, Canadá.

OGATA, K., 1998. **Engenharia de Controle Moderno.** Prentice Hall do Brasil LTDA., Rio de Janeiro, RJ.

OLLERO, A, B.,2001. **Robótica, Manipuladores y Robots móviles.** Marcombo S.A., Barcelona, España.

PAHL, G.; BEITZ, W., 1996. **Engineering Design: A Systematic Approach.** Springer-Verlag: Londres.

PAUL, A. K.; MISHRA J. K.; RADKE M. G., 1994. **Reduced Order Sliding Mode Control for Pneumatic Actuator.** IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.2, N° 3, pp 271-276.

PERONDI, E. A., 2002. **Controle não-linear em Cascata de um Servoposicionador Pneumático com Compensação de Atrito.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

PERONDI, E. A.; GUENTHER, R., 1999a. **Controle com Compensação de Atrito de um Servoposicionador Pneumático.** Anais do IV Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Santiago, Chile.

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

RAOUFI, A.; SURGENOR, B.W., 2005. **Control of a Pneumatic Gantry Robot for Grinding: Performance with Conventional Techniques.** IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Ontário.

Robotic Industries Association. **Robotic Market 2006.** Disponível em: <<http://www.roboticsonline.com>>. Acesso em: dez 2006.

SAMHOURI, M.; RAOUFI, A.; SURGENOR, B., 2005. **Control of a Pneumatic Gantry Robot for Grinding: A Neuro-fuzzy Approach to PID Tuning.** IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Ontário.

SAMPAIO, F. L. M., 2009. **Especificações Técnicas da Placa de Aquisição Serial de Dados.** Caxias do Sul, RS.

ŠITUM Ž. J.; KOSIĆ, D.; ESSERT, M., 2005. **Nonlinear Mathematical Model of a Servo Pneumatic System.** 9th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Antalya, Turkey.

ŠITUM Ž.; PETRIĆ, J.; CRNEKOVIĆ, M., 2003. **Sliding Mode Control Applied to Pneumatic Servo Drive.** Proceedings of 11th Mediterranean Conference on Control & Automation, Rhodes, Greece.

ŠITUM, Ž.; NOVAKOVI, B.; PETRIĆ, J., 2001. **Identification and Control of Pneumatic Servodrives.** Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Control and Automation, Dubrovnik, Croácia.

ŠITUM Ž.; ZILIĆ, T.; ESSERT, M., 2007. **High Speed Solenoid Valves in Pneumatic Servo Applications.** Proceedings of 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens, Greece

SURGENOR, B. W.; VAUGHAN, N. D.; UEBLING, M., 1995. **Continuous Sliding Mode Control of a Pneumatic Positioning System.** Proceedings of Eighth Bath International Fluid Power Workshop, pp. 270-285.

SURGENOR, B. W.; VAUGHAN, N. D., 1997. **Continuous Sliding Mode Control of a Pneumatic Actuator.** Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 119 pp. 578-581.

VAN VARSEVELD, R., BONE, G., 1997. **Accurate Precision Control of a Pneumatic Actuator Using on/off Solenoid Valves.** IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 2, N° 3, pp. 195-204.

YANG XIA., 2001. **Continuous Sliding Mode Control of a Cartesian Pneumatic Robot.** Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

APÊNDICE A – Outras configurações de robôs.

A.1 Robô Cilíndrico.

Esta configuração é formada por duas articulações prismáticas e uma de rotação. A primeira articulação é geralmente de rotação e sua posição é definida por coordenadas cilíndricas. Este tipo de configuração é aconselhada para trabalhar numa célula flexível com o robô posicionado no centro e atendendo a várias máquinas dispostas radialmente [Ollero, 2001]. A Figura A.1 mostra uma das estruturas de uma configuração cilíndrica.

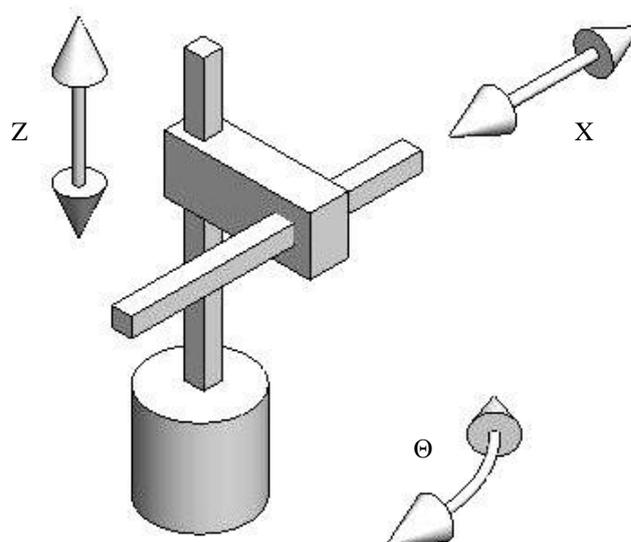


Figura A.1. Robô Cilíndrico

A.2 Robô Polar ou Esférico.

Esta configuração caracteriza-se por duas articulações de rotação e uma prismática, o efetador tem sua posição expressa em coordenadas polares. Com isso, este tipo de robô, se caracteriza por ter um bom volume de trabalho, inferior somente à angular que será tratada a seguir.

A Figura A.2 representa uma das estruturas de configuração polar ou esférica.

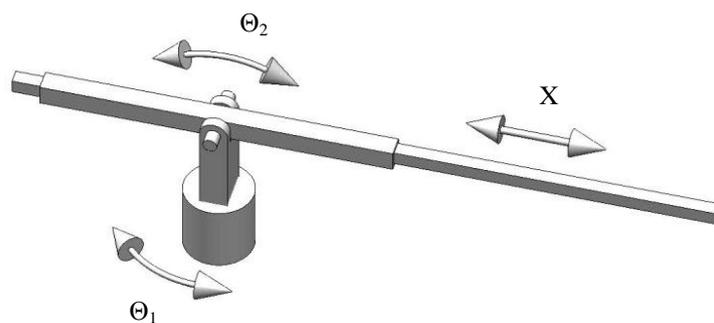


Figura A.2. Robô Polar ou Esférico

A.3 Robô Angular ou Antropomórfico.

Esta configuração é composta por três articulações de rotação e o efetuador tem sua posição definida em coordenadas angulares. Este tipo de estrutura tem a particularidade de permitir fácil acesso a espaços fechados e de ter uma construção simplificada. Estes robôs são muito empregados como manipuladores industriais, especialmente em posicionamentos complexos.

A Figura A.3 representa a estrutura de configuração angular.

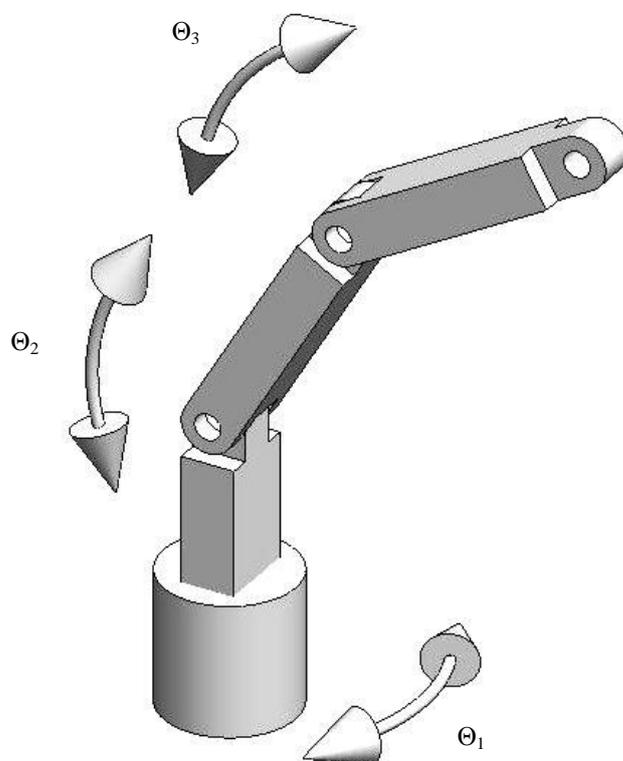


Figura A.3. Robô Angular ou Antropomórfico

A.4 Robô Scara.

Esta configuração é composta por duas articulações de rotação em relação a dois eixos paralelos e uma articulação de deslocamento perpendicular ao plano de rotação dos eixos referidos anteriormente. Ela foi idealizada para efetuar montagens num plano. A Figura A.4 representa a estrutura do robô scara.

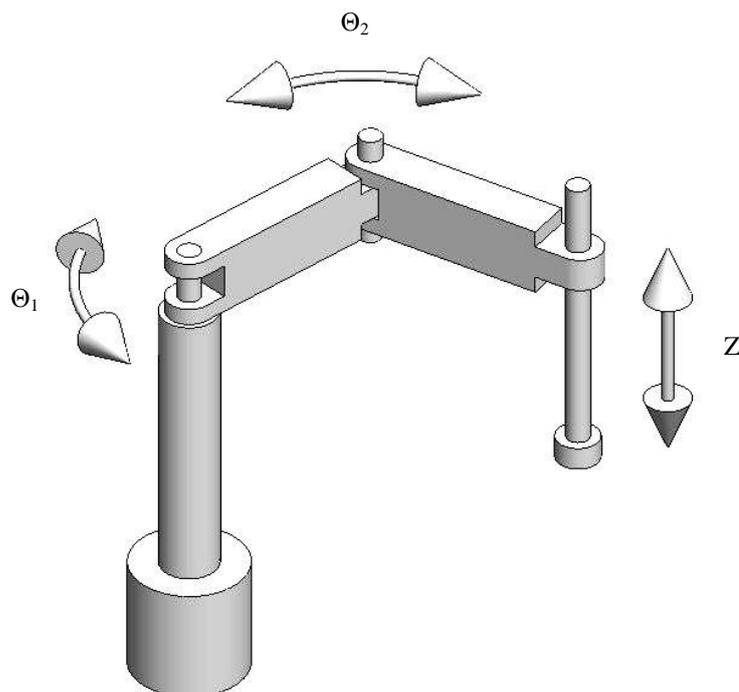


Figura A.4. Robô Scara