

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

PROJETO DE UM ROBÔ CARTESIANO COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO

por

Marcelo Frasson de Oliveira

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, outubro de 2007

PROJETO DE UM ROBÔ CARTESIANO COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO

por

Marcelo Frasson de Oliveira
Engenheiro de Controle e Automação

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. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Isaac Newton Lima da Silva

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 10 de outubro de 2007.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à minha família , principalmente à Bia minha segunda mãe, e em especial aos meus pais pelo apoio, amor incondicional e suporte técnico (financeiro) sem o qual este trabalho não seria possível;

Ao meu orientador, Professor Eduardo André Perondi, pela orientação com grande competência e profissionalismo;

À minha namorada Marcela, principalmente pelos carinhos, paciência e compreensão;

Ao colega de mestrado Luciano Leston, pela excelente companhia e pelo apoio nas batalhas travadas durante o mestrado;

Ao bolsista Giovani Dal Ponte, também conhecido por “Júnior”, pela ajuda em algumas fases deste trabalho;

Ao CNPq, pelo incentivo (bolsa de estudos);

Finalmente, dedico um agradecimento especial ao Curso e o Corpo Docente do programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS, pela credibilidade a mim conferida e pelo conhecimento adquirido durante o mestrado.

RESUMO

A grande maioria dos robôs industriais disponíveis no mercado é de alto desempenho, principalmente com relação à precisão de posicionamento. Este aspecto é um dos fatores que mais influencia no seu preço final, levando em consideração toda a complexa cadeia de elementos que fazem com que o robô opere corretamente, desde os motores e componentes mecânicos, passando pela arquitetura e sistemas de controle até o sistema de programação. Tendo isto em vista, este trabalho visa projetar um robô industrial com preço mais acessível, adequado para o uso em processos industriais que não necessitem altos níveis de precisão.

Para a redução de custos de fabricação e de componentes do robô, este trabalho viabiliza o uso de atuadores pneumáticos lineares como fonte motriz, pois os mesmos são relativamente baratos, leves, não poluentes, de fácil montagem e operação, além de apresentarem uma boa relação peso/potência. Para tanto, foi implementado uma estratégia de controle por modos deslizantes com objetivo de superar as dificuldades impostas pelo comportamento não-linear dos componentes pneumáticos.

Com relação à redução de custos de programação e operação do robô, desenvolveu-se um ambiente de programação *off-line*, através de *softwares* de auxílio à manufatura e de engenharia usualmente encontrados em ambientes industriais.

A estratégia fundamental neste trabalho, foi o desenvolvimento de uma metodologia de projeto própria, concebida especificamente para a aplicação em projetos de robôs industriais, com os atributos de facilidade de execução e modularidade das fases envolvidas. A qual, no presente trabalho, apresenta o desenvolvimento de um robô cartesiano com três graus de liberdade acionado por atuadores pneumáticos lineares.

Palavras-chave: robô cartesiano, controle por modos deslizantes, programação *off-line*.

ABSTRACT

The great majority of industrial robots available in the market have high performance, especially relative to position accuracy. This aspect is one of the factors that most influence its final price, taking into account all complicated web elements that makes the robot operates in the correct form, since the actuators and the constructive part, passing by the architecture and control systems until the system of programming. According to these, the present work aims to project an industrial robot with more accessible costs, adequate to use in industrial process that not require high level of accuracy.

For the reduction of manufacture and components costs of the robot, this work make viable to use of pneumatic actuators like a motive source, because are relatively cheap, light, not pollutants, easy assembly and operation, besides presenting a good relation weight/power. For such purpose, the strategy of control was implemented by sliding mode control for the objective to surpass the difficulties imposed by the non-linear behavior of the pneumatic components.

About the reduction of programming and operation costs of the robot, an off-line programming environment was developed through manufacturing aided software and a software of engineering both usually found in industrial environments.

The basic strategy in this work, was the development of an own methodology of project, conceived specifically for the application in projects of industrial robots, with the attributes of easiness of execution and modularization of the wrapped phases. That methodology, in the present work, presents the development of a Cartesian robot with three degrees of freedom actuated by pneumatic servo drive.

Key words: Cartesian robot, sliding mode control, off-line programming.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Descrição do Problema.....	2
1.2 Objetivo Geral	2
1.3 Objetivos Específicos	3
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Estratégias Básicas de Automação	5
2.2 Robô Industrial	6
2.2.1 Componentes	7
2.2.1.1 Manipulador Mecânico.....	7
2.2.1.2 Atuadores	7
2.2.1.3 Sistemas de Transmissão Mecânica	9
2.2.1.4 Sensores.....	9
2.2.1.5 Unidade de Controle.....	9
2.2.1.6 Unidade de Potência.....	10
2.2.1.7 Efetuador ou Órgão Terminal.....	10
2.2.2 Configurações Geométricas dos Robôs.....	10
2.2.3 Interface com o Usuário e Programação.....	11
2.2.3.1 Programação ‘on-line’	12
2.2.3.2 Programação ‘off-line’	12
2.3 Eficiência no Uso de Robôs	13
2.4 Aplicações e Benefícios	14
2.5 Mercado e Tendências.....	14
2.5.1 Mercado Mundial de Robôs Industriais	15
2.5.2 Preços dos Robôs	17

2.5.3	Parâmetros de Desempenho	18
2.5.4	Aplicações em Processos Industriais.....	19
2.5.5	Dificuldades, Melhorias e Perspectivas.....	20
2.6	Estudo de Casos	22
3	METODOLOGIA DE PROJETO	24
3.1	Especificações de Projeto	26
3.1.1	Requisitos de Produto.....	27
3.1.2	Requisitos de Projeto.....	29
3.2	Projeto Conceitual	31
3.2.1	Busca e Seleção da Solução	31
3.2.2	Criação e Representação da Solução.....	35
3.3	Projeto Preliminar	36
4	UNIDADE TÉCNICA DE ESTRUTURA DO ROBÔ.....	37
4.1	Volume de Trabalho	37
4.2	Estudo e Escolha de Componentes.....	37
4.2.1	Atuadores Lineares Pneumáticos	37
4.2.2	Servoválvulas Direcionais.....	39
4.2.3	Transdutores	39
4.2.3.1	Transdutores de Posição	39
4.2.3.2	Transdutores de Pressão	40
4.2.4	Componentes para Manutenção da Rede Pneumática.....	41
4.2.5	Componentes para a Montagem do Sistema Pneumático	41
4.3	Análises Estruturais.....	41
4.4	Carga Estática Máxima	43
4.4.1	Definição do Tipo de Guia	44
4.4.2	Cálculo da Carga Máxima.....	44
4.5	Orçamento de Componentes	45
5	UNIDADE TÉCNICA DE ARQUITETURA DE CONTROLE.....	46
5.1	Arquitetura Integrada Flexível	47
5.2	Arquitetura Integrada Fechada	49

5.3	Arquitetura Não-Integrada Flexível	50
5.4	Arquitetura de Controle para o Robô Cartesiano Pneumático	51
6	UNIDADE TÉCNICA DE MODELAGEM MATEMÁTICA	54
6.1	Modelo Matemático do Cilindro Pneumático	55
6.1.1	Dinâmica das Pressões nas Câmaras do Cilindro.....	55
6.1.2	Equilíbrio das Forças no Cilindro	56
6.2	Modelo Matemático da Servoválvula.....	57
6.3	Modelo Matemático do Atrito.....	58
6.4	Modelo Final	59
7	UNIDADE TÉCNICA DE SISTEMA DE CONTROLE.....	61
7.1	Definição do Sistema de Controle.....	61
7.2	Controle por Modos Deslizantes para Servoposicionadores Pneumáticos	65
7.2.1	Projeto do Controlador SMC.....	65
7.2.1.1	Fase 1 – Definição da Superfície de Deslizamento	66
7.2.1.2	Fase 2 – Definição da Lei de Controle	67
7.3	Simulações do Comportamento Dinâmico do Servoposicionador Pneumático com Controlador SMC	68
7.3.1	Ajuste da Camada Limite	73
7.4	Simulações do Desempenho do Robô Cartesiano Pneumático	75
8	UNIDADE TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO <i>OFF-LINE</i>	81
8.1	Módulo Gerador de Trajetória.....	83
8.1.1	Desenvolvimento do Processo Industrial	83
8.1.1.1	Design da Trajetória	83
8.1.1.2	Desenho do Volume de Trabalho.....	84
8.1.1.3	Montagem do Sistema.....	84
8.1.1.4	Ajustes de Operação	84
8.1.1.5	Definição da Trajetória.....	86
8.1.2	Programa Gerador de Trajetória.....	87
8.2	Módulo de Monitoramento Virtual	89

9	CONCLUSÕES	92
9.1	Trabalhos Futuros.....	93
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXOS I	101
	ANEXOS II	102
	ANEXOS III	103

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área do embolo (m^2)
A_o	área transversal de passagem do gás em um orifício (m^2)
c_p	calor específico do ar a pressão constante (J/Kg K)
c_v	calor específico do ar a volume constante (J/Kg K)
e	erro de posição (m)
\dot{e}	erro de velocidade (m/s)
\ddot{e}	erro de aceleração (m/s^2)
$f(.)$	função dependente do estado
F_1	força gravitacional resultante no eixo Y (N)
F_2	força gravitacional resultante no eixo Z (N)
F_a	força de atrito (N)
F_{AT}	força máxima do cilindro (N)
F_c	força de atrito seco (ou de Coulomb) (N)
F_c	força de atrito seco (ou de Coulomb) (N)
F_e	força externa (N)
$F_{y_{máx}}$	força máxima admitida ao longo de y do atuador (N)
$F_{z_{máx}}$	força máxima admitida ao longo de z (N)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
L	comprimento útil do cilindro atuador (m)
L_{atY}	comprimento total do atuador Y (m)
M	massa (Kg)
M_{carga}	massa da carga do robô (Kg)
M_{cY}	massa dos cilindro do eixo Y (Kg)
M_{cZ}	massa dos cilindro do eixo Z (Kg)
M_{tY}	massa do transdutor dos eixo Y (Kg)
M_{tZ}	massa dos transdutor do eixo Z (Kg)
$M_{x_{máx}}$	momento transversal (Nm)
$M_{y_{máx}}$	momento longitudinal (Nm)
$M_{z_{máx}}$	momento de torção (Nm)
n	ordem do sistema
p	pressão absoluta (Pa)

p_1	pressão na câmara 1 (Pa)
p_2	pressão na câmara 2 (Pa)
p_{atm}	pressão atmosférica (Pa)
$p_{crít}$	relação de pressões crítica
p_{sup}	pressão de suprimento (Pa)
p_u	pressão a montante (Pa)
q_m	vazão mássica (Kg/s)
q_{m1}	vazão mássica que sai da servoválvula para a câmara 1 (Kg/s)
q_{m2}	vazão mássica que sai da servoválvula para a câmara 2 (Kg/s)
R	constante do gás (KJ/K)
r	relação de calores específicos do ar
S	superfície de deslizamento
s	coeficiente de segurança
$sat()$	função sinal de saturação
$sgn()$	função sinal
T	temperatura (K)
t	tempo (s)
u	tensão aplicada à servoválvula (V)
u	sinal de controle (V)
V	tensão máxima aplicada à servoválvula (V)
V_{10}	volume morto na câmara 1 (m ³)
V_{20}	volume morto na câmara 2 (m ³)
$V_{máx}$	velocidade de deslocamento do embolo (m/s)
v_s	velocidade de limiar ou de Stribeck (m/s)
x	saída de interesse
X	vetor de estados
x_d	saída de referência
X_d	vetor dos estados de referência
\tilde{x}	erro de rastreamento de posição
$\dot{\tilde{x}}$	erro de rastreamento de aceleração
$\ddot{\tilde{x}}$	erro de rastreamento de velocidade
\tilde{X}	vetor de estado de erro de rastreamento
y	deslocamento do embolo (m)

\dot{y}	velocidade do êmbolo (m/s)
\ddot{y}	aceleração do êmbolo (m/s ²)
z	deformação no movimento de pré-deslizamento
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

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Zona ótima de utilização da robótica industrial, relacionada com custo por unidade x volume, fonte: Pires (2003).....	6
Figura 2.2	Estimativa da quantidade de robôs industriais instalados por ano, fonte: World Robotics (2006)	15
Figura 2.3	Relação entre os setores industriais (a nível mundial) e o aumento da quantidade de robôs industriais em operação nos anos de 2004 e 2005, fonte: World Robotics (2006)	16
Figura 2.4	Evolução do preço dos robôs industriais ao longo dos anos, fonte: World Robotics (2006).....	18
Figura 2.5	Porcentagem estatística de processos industriais realizados por robôs manipuladores nos Estados Unidos em 2006, fonte: Robotic Market (2006)	19
Figura 3.1	Plano de atividades e fases para o desenvolvimento do presente trabalho adaptado da metodologia de projeto de Pahl e Beitz (1996).....	26
Figura 3.2	Robôs cartesianos pneumáticos experimentais	33
Figura 3.3	Robôs cartesianos com motores elétricos	34
Figura 3.4	Estrutura de execução do projeto	36
Figura 4.1	Representação das forças e momentos em um cilindro atuador sem haste com guia (Festo Corporation, 2007)	38
Figura 4.2	Esquema do acoplamento do cilindro pneumático sem haste com o transdutor de posição linear (Festo Corporation, 2007).....	40
Figura 4.3	Simulação de esforço estático entre o eixo X e o eixo Y	43
Figura 4.4	Componentes de forças e momentos relacionadas ao atuador do eixo X	44
Figura 5.1	Interfaces de comunicação de um robô industrial, fonte: Pereira e Lages (2002).....	46
Figura 5.2	Diagrama de blocos de uma arquitetura de controle integrada flexível.....	48
Figura 5.3	Diagrama de blocos de uma arquitetura de controle integrada fechada.....	50
Figura 5.4	Diagrama de blocos de uma arquitetura de controle não-integrada flexível.....	51
Figura 5.5	Relação entre as unidades técnicas de estrutura do robô, de arquitetura de controle e de sistema de controle	53
Figura 6.1	Desenho esquemático do funcionamento do servoposicionador pneumático.....	55
Figura 6.2	Volume de controle com domínio variável, fonte: Perondi e Guenther (2003)....	55
Figura 6.3	Equilíbrio de forças no êmbolo do cilindro atuador, fonte: Perondi e Guenther (2003)	56
Figura 6.4	Estrangulamento da seção transversal de uma tubulação, fonte: Perondi e Guenther (2003)	57
Figura 6.5	Relação teórica entre vazão mássica e p_{crit} , fonte: Perondi e Guenther (2003).....	57

Figura 6.6	Comparação entre a resposta do sistema real com simulado da trajetória do êmbolo do cilindro, fonte: Perondi e Guenther (2003).....	59
Figura 6.7	Diagrama representativo do modelo matemático do servoposicionador com atrito	60
Figura 7.1	Resposta do servoposicionador por controle PVA, fonte: Perondi e Guenther (2000).....	62
Figura 7.2	Resposta do servoposicionador por controle SMC, fonte: Perondi e Guenther (2000).....	62
Figura 7.3	Erros de seguimento para uma trajetória polinomial, obtidos com os controladores P, PID, PVA e em cascata, fonte: Guenther e Perondi (2004)	63
Figura 7.4	Erros de seguimento para uma trajetória senoidal, obtidos com os controladores P, PID, PVA e em cascata, fonte: Guenther e Perondi (2004)	63
Figura 7.5	Erros de seguimento para a trajetória polinomial com Controle em Cascata e com Controle em Cascata com Compensação de Atrito, fonte: Guenther et al. (2006).....	64
Figura 7.6	Superfície de deslizamento, fonte: Šitum et al. (2003).....	65
Figura 7.7	Diagrama de blocos do controlador por SMC para um servoposicionador pneumático	68
Figura 7.8	Ambiente de simulação para um eixo do robô.....	69
Figura 7.9	Sinais de posição de saída e de referência para o eixo X, com carga de 8 Kg.....	70
Figura 7.10	Detalhe amplificado dos sinais de posição de saída e de referência para o eixo X, com carga de 8 Kg (maior sobrepasso do sinal de saída).....	70
Figura 7.11	Detalhe amplificado dos sinais de posição de saída e de referência para o eixo X, com carga de 8 Kg.....	71
Figura 7.12	Sinais de velocidade, controle e de erro para o eixo X com carga 8 Kg.....	71
Figura 7.13	Detalhe amplificado dos Sinais de velocidade, controle e de erro para o eixo X com carga 8 Kg	72
Figura 7.14	Sinais de controle com diferentes camadas limites e ganho de borda nulo (carga de 8 Kg).....	74
Figura 7.15	Sinais de erros de posição, com diferentes camadas limites e ganho de borda nulo (carga de 8 Kg).....	74
Figura 7.16	Detalhe amplificado dos sinais de erros de posição, com diferentes camadas limites e ganho de borda nulo (carga de 8 Kg)	75
Figura 7.17	Ambiente de simulação no Simulink do modelo do robô cartesiano pneumático (3GDL)	76
Figura 7.18	Sinais de referência para cada eixo do robô, produzidos pelo gerador de trajetória	77
Figura 7.19	Velocidades dos eixos para o processo simulado	77
Figura 7.20	Erros de posição para o processo simulado	78
Figura 7.21	Trajетória em três dimensões do processo simulado.....	78

Figura 7.22	Trajatória do processo simulado (vista de topo)	79
Figura 7.23	Gráfico em duas dimensões da trajetória do processo simulado (detalhes aproximados).....	79
Figura 8.1	Diagrama de fluxo de dados de todo o ambiente de programação off-line.....	82
Figura 8.2	Design da Trajetória do exemplo demonstrativo (unidades em milímetros)	83
Figura 8.3	Volume de Trabalho do exemplo ilustrativo (unidades em milímetros)	84
Figura 8.4	Design da Trajetória acoplado ao volume de trabalho do robô	84
Figura 8.5	Definição e orientação do ponto machine-zero no volume de trabalho.....	85
Figura 8.6	Plano de retração do sistema.....	86
Figura 8.7	Trajatória do processo “Letra_R” (CAM).....	86
Figura 8.8	Trajatória do processo “P_UFRGS” (CAM)	87
Figura 8.9	Exemplo de código ‘ISO’ do processo ‘LETRA_R’	87
Figura 8.10	Tela de interface com o programador do módulo gerador de trajetória.....	88
Figura 8.11	Sinais de referência para os eixos X, Y e Z do robô, produzidos pelo módulo gerador de trajetória	88
Figura 8.12	Processo ‘LETRA_R’, reproduzido na forma de gráfico 3D, dentro do Matlab	89
Figura 8.13	Diagrama esquemático funcional do módulo de monitoramento virtual.....	90
Figura 8.14	Ambiente de monitoramento virtual	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Quadro resumo comparativo entre os principais atuadores usados em robôs industriais	8
Tabela 2.2	Fabricantes de robôs com suas respectivas linguagens de programação, fonte: Henriques (2002)	11
Tabela 2.3	Relação entre: Aplicações, Capacidades e Benefícios, fonte: Horikawa et al. (1985, apud Meyer, 2002)	14
Tabela 2.4	Instalações e robôs industriais em operação em 2004 e 2005 e previsões para 2006 – 2009, fonte: World Robotics (2006)	17
Tabela 2.5	Especificações técnicas encontradas nos robôs industriais atuais, fonte: Pires (2003)	18
Tabela 2.6	Resumo das informações coletadas na pesquisa de campo, segundo uma análise qualitativa.....	22
Tabela 3.1	Modelos de metodologias de projeto provenientes da engenharia de produção, fonte: Buss e Cunha (2002).....	24
Tabela 3.2	Lista das necessidades para robôs industriais (identificada).....	27
Tabela 3.3	Diagrama de Mudge, inter-relacionando as necessidades do produto	28
Tabela 3.4	Resultado do diagrama de Mudge, itens dispostos em ordem decrescente de grau de importância.....	29
Tabela 3.5	Relação entre os requisitos de projetos com as unidades técnicas envolvidas no projeto	30
Tabela 4.1	Especificações técnicas dos atuadores (cilindros pneumáticos), fonte: Festo Corporation (2007).....	38
Tabela 4.2	Especificações técnicas da servoválvula (Festo Corporation, 2007)	39
Tabela 4.3	Especificações técnicas das réguas potenciométricas definidas para o projeto (Festo Corporation, 2007)	40
Tabela 4.4	Especificações técnicas do transdutor de pressão, fonte: Kunz (2006)	41
Tabela 4.5	Válvula reguladora de pressão (Festo Corporation, 2007).....	41
Tabela 4.6	Vaso de pressão (Kunz, 2006)	41
Tabela 5.1	Especificações técnicas da placa definida para o projeto (DSPACE).....	52
Tabela 6.1	Valores dos parâmetros estáticos e dinâmicos para o atrito, fonte: Perondi e Guenther (2003)	59
Tabela 6.2	Valores numéricos dos parâmetros do sistema, Perondi e Guenther (2003).....	60
Tabela 7.1	Dados resultantes das simulações, para determinação da camada limite refinada.....	73
Tabela 9.1	Avaliação global de desempenho do projeto	93

1 INTRODUÇÃO

A automação industrial consiste modernamente no desenvolvimento e aplicação de sistemas mecânicos, eletrônicos e computacionais para operação e controle da produção. Atualmente, a automação industrial está ligada principalmente aos atributos de aumento da produção, qualidade de produtos, produtividade e redução de custos.

Nas indústrias de manufatura, a automação dos processos fabris evolui de acordo com o progresso tecnológico da microeletrônica, redes digitais e componentes mecânicos. No estágio atual de evolução tecnológica, pode-se citar a utilização de robôs industriais como uma das estratégias que mais tem-se destacado, sendo objeto de um grande número de estudos e trabalhos científicos por se tratar de uma tecnologia recente e com muitas perspectivas de mercado e de aprimoramentos.

Com o aumento da demanda mundial por robôs industriais (World Robotics, 2006), a necessidade de utilização de tecnologias mais limpas, eficientes e de menores custos na arquitetura de robôs se torna iminente. Uma opção bastante vantajosa é a utilização de servoposicionadores pneumáticos como sistema de acionamento para robôs, pois são de baixo custo, leves, não poluentes e de fácil uso.

Os estudos para o desenvolvimento e implementação de robôs pneumáticos são temas de diversos trabalhos, tais como Bobrow e McDonell (1998), Richardson et al. (2003), Andrighetto et al. (2005) que projetaram e desenvolveram robôs pneumáticos com juntas rotacionais e Fayssal (1997), Yang Xia (2001), Romano e Ferreira (2002), Guoliang e Xuanyin (2003), Yang et al. (2005), Sanhoury et al. (2005), Bavaresco (2007), que projetaram e desenvolveram robôs pneumáticos com juntas prismáticas.

O presente trabalho segue esta linha de trabalho, integrando a Robótica Industrial e a Pneumática com o intuito de propor e viabilizar tecnologias que permitam a utilização de atuadores pneumáticos como fonte motriz em robôs, os quais devem preencher os requisitos e características de um robô industrial.

Os atuadores pneumáticos tradicionais apresentam características que não se enquadram na utilização como fonte motriz em robôs industriais, pois as propriedades dinâmicas não-lineares dos sistemas pneumáticos tornam os servoposicionadores pneumáticos difíceis de serem controlados (Liu e Bobrow, 1988). Contudo, graças ao desenvolvimento de novas técnicas de instrumentação e de componentes pneumáticos de precisão (tais como sensores digitais,

servoválvulas de alto desempenho, novos cilindros e tipos de vedações), vem aumentando significativamente a capacidade funcional dos produtos servopneumáticos de competir com os servoposicionadores elétricos e hidráulicos em custo e desempenho (Stoll, 2001). Estes fatores, aliados aos avanços da eletrônica e microinformática e ao surgimento de novas técnicas e estratégias de controle na área da pneumática, estão promovendo a viabilização do uso de atuadores pneumáticos no acionamento de robôs industriais.

1.1 Descrição do Problema

A grande maioria dos robôs industriais disponíveis no mercado é de alta precisão (de 0,1 mm até 0,003 mm). Este aspecto é um dos fatores que mais influencia no seu preço final. Altas precisões podem ser prescindíveis em diversos casos, pois muitos processos de manufatura não necessitam de tais níveis de precisão. Tendo isto em vista, pretende-se neste trabalho contribuir para o desenvolvimento de um robô industrial de menor precisão, porém de preço mais acessível, que atenda diretamente a este nicho de mercado. Esta é a idéia central do presente trabalho.

Para promover a diminuição global dos custos, adota-se a seguinte estratégia:

- redução de custos de construção e montagem, através da escolha e projeto de um sistema robótico simples, porém eficaz;
- relaxamento dos requisitos de precisão, de forma a reduzir o custo do sistema, porém, mantendo sua aplicabilidade a uma grande gama de processos industriais que exigem capacidades de manufatura flexível e menor precisão, como por exemplo: soldagem, oxicorte, lixamento, aplicação de cola ou resinas, pintura, polimento, etc.;
- redução de custos de componentes através da utilização de atuadores pneumáticos, mais vantajosos, principalmente, quanto ao custo;
- utilização de técnicas e algoritmos de controle com capacidade de superar as dificuldades de comportamento não linear dos sistemas servoposicionadores pneumáticos, com o objetivo de atender aos requisitos de projeto;
- desenvolvimento de um sistema de programação, para o robô, de menor custo que os ofertados pelo mercado.

1.2 Objetivo Geral

Projetar e desenvolver um modelo teórico de um robô cartesiano com três graus de liberdade acionado por atuadores lineares pneumáticos, com requisitos de precisão e robustez de

acordo com as necessidades de determinados processos industriais, contemplando as linhas de estudo apresentadas na seção 1.3, que segue.

1.3 Objetivos Específicos

- desenvolver uma metodologia de projeto modular para robôs industriais;
- definição da configuração do robô e componentes necessários ao sistema;
- implementar uma estratégia de controle adequada;
- desenvolver um gerador de trajetórias para o robô;
- desenvolver um ambiente ‘*off-line*’ de programação.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em 9 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 fabricantes, visitas técnicas, estudos de catálogos e levantamentos teóricos e científicos.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia de projeto utilizada e a proposta de projeto do robô cartesiano. Também são definidos os requisitos de projeto e o planejamento da execução do mesmo.

No Capítulo 4 são apresentados o estudo, a análise e a definição da estrutura física do robô cartesiano proposto.

No Capítulo 5 são apresentados o estudo, a análise e a definição da arquitetura de controle a ser utilizada no robô cartesiano proposto.

No Capítulo 6 são apresentados os modelos matemáticos necessários para o desenvolvimento do ambiente de simulação e controle do robô cartesiano.

No Capítulo 7 é apresentado o desenvolvimento teórico, o projeto e os resultados do esquema de controle utilizado no robô.

No Capítulo 8 é proposto, desenvolvido e testado por simulação um sistema de programação *off-line* para o robô.

No Capítulo 9 são apresentadas as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O texto que segue foi elaborado visando contextualizar o tema deste trabalho de dissertação na área do conhecimento associada à robótica industrial. Objetiva-se com isso caracterizar o sistema que se propõe desenvolver no âmbito da automação industrial e, mais especificamente, na robótica industrial, embasando os assuntos tratados nos próximos capítulos.

A robótica industrial é uma área tecnológica especializada no estudo de robôs industriais em toda sua abrangência técnica e operacional para o uso dos mesmos em indústrias de manufatura e processos, com objetivo principal de automatizar processos industriais.

A utilização de robôs como meio de automação industrial tem por principal atributo a flexibilidade de produção em relação a outros sistemas. A necessidade de características de flexibilidade de programação e adaptação aplicadas a sistemas integrados de manufatura consiste no principal motivo pelo qual as indústrias estão investindo maciçamente em robôs como forma de automação do processo produtivo (World Robotics, 2006). Neste aspecto, pode-se afirmar que a popularização da robótica industrial está associada diretamente à sua característica de flexibilidade na automação.

Conforme Pires (2003), o mercado caracteriza-se na atualidade por:

- elevada concorrência;
- produtos definidos em parte pelos clientes;
- produtos com tempos de vida curtos;
- constante exigência de mais qualidade e menores preços.

Dentro deste contexto, é de grande importância para as indústrias a não existência de estoques (a não ser estoques de segurança), ou seja, produzir por encomenda. Desta forma, a agilidade operacional da produção se torna o fator decisivo para o ganho de mercado.

Segundo a análise de Pires (2003), a utilização de robôs industriais está diretamente relacionada aos aspectos econômicos e estratégicos da empresa. O autor justifica esta relação mencionando alguns fatores característicos da robótica industrial. Esta análise pode ser ilustrada através de três aspectos: funcional, racional e flexibilidade operacional.

- **funcional** - robôs industriais podem executar tarefas de uma forma quase humana, de modo contínuo, com elevada e constante precisão. Estes aspectos qualificam o robô como sendo uma máquina robusta e adaptável;
- **racional** - se refere à otimização da produção de todos os equipamentos usados em automação industrial. Os robôs industriais se destacam por apresentar o melhor índice de custo por unidade de produto, em função do volume da produção. Este aspecto se enquadra na necessidade da grande maioria das pequenas e médias indústrias;
- **flexibilidade operacional** – os robôs industriais são máquinas programáveis poderosas, possuindo vários dispositivos de interface com outros equipamentos, qualificando-os como equipamentos flexíveis por excelência. Esta característica proporciona céleres alterações de tarefas e operações (*set-ups*), o que se torna fundamental para responder de forma ágil a alterações de mercado ou na introdução de novos produtos.

Conforme Romano e Dutra (1997, apud Bouteille et al., 2002), os principais objetivos do uso de robôs para automatizar o processo industrial, são:

- reduzir custos da produção através de: redução de pessoal envolvido na produção, aumento da produtividade, otimização do uso da matéria prima (redução de perdas), economia de energia, etc.;
- extinguir o emprego do ser humano em atividades perigosas ou insalubres melhorando as condições de trabalho;
- melhorar a qualidade do produto, através do controle e gerenciamento da produção;
- realizar atividades impossíveis de serem controladas manualmente ou intelectualmente como, por exemplo, a montagem de peças em miniatura, a coordenação de movimentos complexos e atividades muito rápidas.

2.1 Estratégias Básicas de Automação

O sucesso da implantação de um sistema automatizado de produção parte de uma premissa básica: a escolha da estratégia de automação que melhor se enquadra ao perfil da indústria, levando em consideração a relação do custo unitário do produto com o volume de produção. Existem três estratégias básicas de automação industrial: manual, flexível e rígida. A escolha da mais adequada, a cada processo no ambiente industrial, é o principal diferencial que

dará o retorno do investimento para a empresa. Portanto, nem sempre o uso de robôs é a solução mais adequada. A utilização de robôs (da automação flexível) é considerada mais eficaz para volumes médios de produção (Horikawa et al., 2002). A Fig. 2.1 mostra esta relação, correlacionando com as três estratégias básicas.

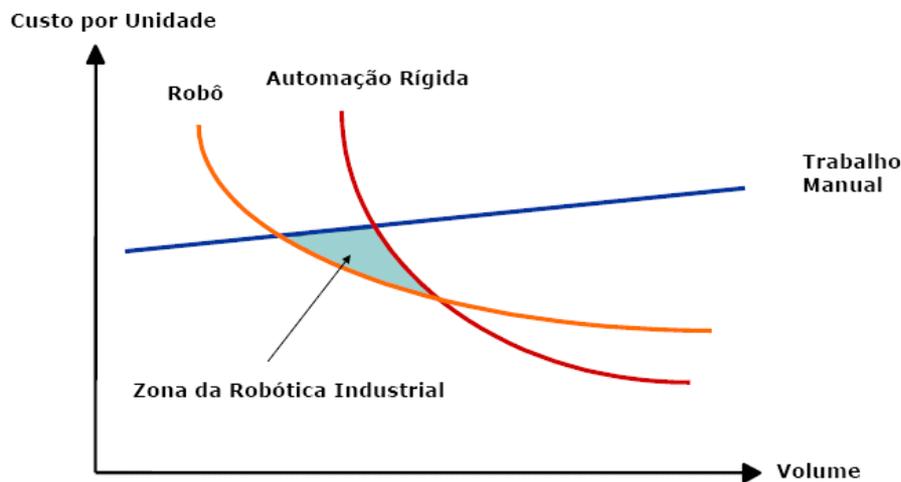


Figura 2.1 Zona ótima de utilização da robótica industrial, relacionada com custo por unidade x volume, fonte: Pires (2003)

2.2 Robô Industrial

Os robôs industriais podem ser divididos em dois grandes grupos, robôs manipuladores, que são a grande maioria dos robôs encontrados em chão-de-fábrica (utilizados em processos de manufatura e manipulação de peças) e robôs móveis, também chamados de veículos guiados automaticamente (AGV), que realizam operações de transporte automatizado de materiais em chão-de-fábrica.

São diversos os conceitos atribuídos ao termo “robô industrial”. Os conceitos que mais ajustam-se à linha de estudo deste trabalho são:

“Uma máquina manipuladora, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, e pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial” (Romano e Dutra, 2002).

“É um manipulador, multifuncional reprogramável, projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados para o desempenho de uma grande variedade de tarefas” (Robotic Industries Association, 2006).

2.2.1 Componentes

Nesta seção serão descritos os principais componentes dos robôs industriais manipuladores, bem como suas respectivas funções dentro do sistema robótico, destacando os componentes mais importantes para o desenvolvimento e compreensão deste trabalho.

2.2.1.1 Manipulador Mecânico

É a estrutura articulada de movimentação no espaço do robô. É formada por uma base, elos (*links*), juntas (*joints*) e o punho. O braço articulado tem como função definir os pontos no espaço (x, y, z) e o volume de trabalho.

- **Base** (origem) – é a base de sustentação do robô;
- **Elos** (*links*) – são os elementos rígidos que compõem o manipulador articulado. Possuem por função fornecer robustez e rigidez. São dispostos alternadamente com as juntas;
- **Juntas** (*joints*) – são dispositivos mecânicos que proporcionam movimentação ao manipulador articulado e flexibilidade. Também definem o número de graus de liberdade (GDLs) do braço mecânico. Cada junta corresponde a um grau de liberdade do robô. Existem três tipos de juntas:
 - **Junta de rotação ou de revolução [R]** - fornece rotação angular (em apenas um eixo);
 - **Junta prismática [P]** - proporcionam deslocamento linear e movimento de translação (em apenas um eixo);
 - **Junta esférica [S]** – fornece rotação angular nos três eixos. Corresponde a três juntas rotacionais centradas em um mesmo ponto.
- **Punho** - é o dispositivo onde é conectado o efetuator (*end-effect*). A adição do punho define os ângulos *yaw*, *pitch* e *roll* (ψ, θ, ϕ), de orientação do efetuator.

2.2.1.2 Atuadores

São os componentes que fornecem a força motriz ao manipulador mecânico. Podem ser de três tipos:

- **Atuadores Elétricos** - a grande maioria dos atuadores empregados em robôs industriais são elétricos (rotacionais e lineares). O principal diferencial no uso de

motores elétricos é a facilidade de implementar sistemas e estratégias de controle devido ao seu comportamento dinâmico ser aproximadamente linear. Basicamente, são usados três tipos de motores elétricos: motores de corrente contínua, de passo e de corrente alternada;

- **Atuadores Hidráulicos** - são utilizados em robôs com elevada capacidade de carga. Apresentam comportamento dinâmico aproximadamente linear devido a incompressibilidade do óleo, facilitando o controle;
- **Atuadores Pneumáticos** - são atuadores difíceis de controlar por apresentar comportamento não-linear, derivado principalmente da compressibilidade do ar nas câmaras do servoposicionador. Sua utilização é restrita a operações de movimentação simples, geralmente em deslocamentos a pontos discretos de parada nas extremidades do seu curso (Scheidl et al., 2000).

Para uma melhor visualização das propriedades básicas de cada atuador, apresenta-se na Tabela 2.1 uma compilação de dois quadros comparativos diferentes, estruturada a partir dos trabalhos de Santos (2007) e Bavaresco (2007).

Tabela 2.1 Quadro resumo comparativo entre os principais atuadores usados em robôs industriais

Propriedades e Características	Atuadores Elétricos Rotativos (C.C. e A.C.)	Atuadores Elétricos Lineares (A.C.)	Atuadores Óleo-Hidráulicos	Atuadores Pneumáticos
Controle	baixa dificuldade	baixa dificuldade	média dificuldade	alta dificuldade
Velocidades	alta	média	média	altíssima
Precisão (ponto-a-ponto)	alta	alta	alta	alta
Precisão (de trajetória)	alta	alta	média	não existe o uso em robôs industriais para o deslocamento de trajetórias
Funcionamento em situação estática	difícil, requer mecanismos limitadores de movimento	difícil, requer mecanismos limitadores de movimento	excelente	excelente
Questões ambientais	inserção de ruído e picos de corrente na rede	inserção de ruído e picos de corrente na rede	problemas com vazamentos de óleo	poluição sonora
Custos	relativamente baixos	altos	altos	relativamente baixos
Custos do sistemas de transmissão do torque às juntas	elevado	médio	médio	baixo
Fonte de energia	barata	barata	cara	muito barata
Manutenção	simples	simples	complexa	simples
Relação peso/potência	baixa	média	muito alta	alta
Inércia (relacionado com a inversão de sentido de movimento)	alta	baixa	média	baixa
Vantagens	flexibilidade	flexibilidade	rigidez a prova d'água não gera faíscas	fácil instalação fácil "debugging"
Desvantagens	geração de calor problemas com umidade faíscas	geração de calor problemas com umidade faíscas	risco de incêndio difícil instalação do suprimento de potência	suprimento de potência separado

2.2.1.3 Sistemas de Transmissão Mecânica

São os mecanismos de transmissão das forças e torques dos atuadores para as juntas do robô. Podem ser de dois tipos:

- **Transmissão por acionamento direto** – a transmissão da força/torque do atuador para as juntas ocorre sem a presença de mecanismos redutores mecânicos. Este tipo de acionamento geralmente é usado em atuadores hidráulicos e pneumáticos, porém atuadores elétricos do tipo motor-de-passo e motores elétricos lineares também usam acionamento direto. A utilização de acionamento direto se torna muito menos custosa do ponto de vista construtivo do robô;
- **Transmissão por acionamento indireto** – a transmissão da força/torque do atuador para as juntas ocorre através de mecanismos redutores mecânicos. Geralmente são utilizados com motores elétricos devido ao baixo torque dos mesmos a baixas velocidades. A grande maioria dos robôs disponíveis no mercado é de acionamento indireto. Este é um dos principais fatores responsáveis pelo alto preço dos mesmos. Os mecanismos mais comumente usados são o *Harmonic Drive* e a transmissão Cicloidal. Também são utilizados correias, correntes, diferenciais e engrenagens.

2.2.1.4 Sensores

Existem dois grupos de sensores com propósitos diferentes:

- **Sensores internos** – são acoplados às juntas do robô. Possuem por função transmitir os sinais de referência de posição e velocidade das juntas para a unidade de controle. Os sensores de posição mais utilizados são potenciômetros, *encoders* e *resolvers*, e de velocidade, que são os tacômetros;
- **Sensores externos** – são utilizados para a interatividade do robô com o ambiente de trabalho. Alguns exemplos são: sensores de visão, sensores de proximidade, ultra-sônicos, de força, etc.

2.2.1.5 Unidade de Controle

A unidade de controle é o sistema central micro-processado de monitoramento de todos os sinais transmitidos pelos sensores e também é responsável pelo envio de sinais de comando para os controladores de movimento (CLPs, placas controladoras, computadores industriais, etc.) que, por sua vez, acionam os atuadores para realizar as tarefas requeridas. Os sinais de controle

são determinados de acordo com a lógica e a estratégia de controle desenvolvida pelo fabricante e implementada dentro da unidade de controle.

2.2.1.6 Unidade de Potência

É o sistema responsável pela alimentação dos atuadores. A unidade de potência pode ser baseada em uma bomba hidráulica para o caso de atuadores hidráulicos, compressor de ar para atuadores pneumáticos e fontes elétricas (fontes C.C. e fontes A.C.) para atuadores elétricos.

2.2.1.7 Efetuador ou Órgão Terminal

São os dispositivos acoplados ao final do último elo ou ao punho. O efetuador tem a função de realizar uma tarefa em específico. Existem dois grandes grupos de efetadores, são eles:

- **Garras** - possuem por função pegar, soltar, segurar e manipular elementos (peças, objetos ou componentes). Podem ser dos mais variados tipos, configurações e tamanhos. Muitas vezes as garras são projetadas e construídas de acordo com a forma ou textura do objeto a ser manipulado. Alguns exemplos: garras mecânicas, magnéticas, de sucção, adesivas, de agulhas, de diafragmas, etc.;
- **Ferramentas especiais** – estes efetadores possuem por função realizar algum tipo de trabalho ou exercer funções em algum processo de manufatura executado sobre um determinado elemento. São alguns exemplos de ferramentas especiais usadas em robôs: pistola de aspersão (para pó, jateamento de superfícies, etc.), pistolas de pintura, pinças de solda a ponto, tocha de soldagem TIG e MIG/MAG, dispositivo para solda/corte a plasma, dispositivo para solda/corte a laser, maçarico para corte de oxiacetilênico, pistola de jato d'água para corte/limpeza, ferramentas rotativas (parafusadeira, politriz, lixadeira), etc.

2.2.2 Configurações Geométricas dos Robôs

A bibliografia contempla várias categorias de classificação de robôs industriais (quanto à estrutura mecânica, quanto à geração tecnológica, quanto à participação do operador, etc.).

Este texto restringe-se apenas à classificação quanto à estrutura mecânica dos mesmos, pois esta classificação é a que usualmente define a nomenclatura dos robôs.

- **Robô Cartesiano ou Retangular** - este robô é composto por três juntas prismáticas (PPP), dispostas de forma ortogonais entre si. Esta configuração resulta em um volume de trabalho na forma de um poliedro retangular;
- **Robôs Cilíndricos** - são compostos de uma junta rotacional e duas prismáticas, nesta ordem (RPP). O volume de trabalho resultante desta configuração é cilíndrico;
- **Robôs Esféricos** - são compostos por uma junta rotacional e duas prismáticas (RPP), e possui um volume de trabalho na forma de uma esfera;
- **Robôs SCARA** - são configurados com duas juntas rotacionais e uma prismática (RRP). O nome SCARA é a abreviação da expressão '*Selective Compliance Assembly Robot Arm*';
- **Robô Articulado ou Antropomorfo** - é a configuração mais utilizada na indústria, se destaca pela flexibilidade e habilidade de posicionamento, pois apresenta em sua configuração três juntas rotacionais (RRR).

2.2.3 Interface com o Usuário e Programação

A interface com o usuário é constituída por um *software* dedicado que tem a função de operar o robô em todo seu volume de trabalho e de usar os recursos de entrada e saída de sinais para acionamentos de periféricos, de acordo com a seqüência de tarefas para o qual foi programado pelo usuário. Este *software* possui uma linguagem própria de programação, de acordo com cada fabricante. Alguns exemplos de linguagens usadas pelos fabricantes podem ser visualizados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Fabricantes de robôs com suas respectivas linguagens de programação, fonte: Henriques (2002)

Fabricante	Linguagens de Programação
ABB	ARLA, RAPID
Fanuc	KAREL
Reis Robotics	IRL
Staubli	V+
Adept	V+
Comau	PDL2
Eshed	ACL
IBM	AML/2
Kawasaki	AS
Motoman	Inform-1, Inform-2
Nachi	SLIM
Panasonic	Parl-1, Parl-2
PSI	PSI
Samsung	FARL-II
Seiko	DARL-4
Toyota	TL-1
TQ	TQ

A programação feita pelo usuário (operador) das seqüências de movimentos e operações a serem executadas pelo robô, são classificadas em duas categorias: ‘*on-line*’ e ‘*off-line*’.

2.2.3.1 Programação ‘*on-line*’

É a programação desenvolvida pelo usuário (operador do robô), que consiste em usar o próprio robô para determinar a seqüência de movimentos e operações. Esta programação é realizada através do posicionamento do robô em uma seqüência de posições desejadas. A programação “*on-line*” pode ser realizada de três formas:

- **Programação por condução** – o programador conduz fisicamente o robô para as posições desejadas;
- **Programação via ‘*teach-pendant*’** – o programador movimenta o robô para as posições desejadas através de um unidade de comando portátil;
- **Programação textual** – o programador movimenta o robô através de comandos textuais na linguagem fornecida pelo fabricante, digitados em um terminal de computador interligado ao robô.

Verifica-se assim que a programação ‘*on-line*’ faz uso de métodos de condução física do manipulador robótico para estabelecer os movimentos de acordo com os requisitos do processo a ser automatizado. Portanto, o uso da programação ‘*on-line*’, por envolver muito tempo para sua programação, pode ser problemática do ponto de vista operacional, pois em ambientes industriais é necessário parar a linha de produção para desenvolver um novo programa, ou mesmo, ajustes de programação.

2.2.3.2 Programação ‘*off-line*’

Segundo Henriques (2002), a programação ‘*off-line*’ pode ser definida como o processo pelo qual a programação dos robôs é desenvolvida, parcial ou completamente, sem a necessidade do uso de robôs.

A programação ‘*off-line*’ necessita de um modelo do robô e do ambiente (peças a serem manipuladas ou processadas, elementos espacialmente restritivos, disposição das máquinas e equipamentos envolvidos no processo, etc.). O objetivo é programar virtualmente os movimentos e acionamentos do robô e simular a tarefa em um ambiente computacional. Algumas das vantagens do uso da programação ‘*off-line*’ são listadas a seguir:

- pode ser programado sem paradas longas da linha de produção, proporcionando a redução de tempo ocioso do robô;
- redução de permanência do programador/operador junto ao ambiente de produção, diminuindo assim os riscos de um possível acidente;
- integração com banco de dados de sistemas CAD/CAM;
- por ser integrado virtualmente ao ambiente de produção, em alguns casos, pode-se detectar possíveis colisões, reduzindo as chances de causar danos aos equipamentos.

2.3 Eficiência no Uso de Robôs

Segundo Horikawa (2002), a utilização do robô em chão-de-fábrica não se limita apenas à troca de pessoas por robôs a fim de o mesmo reproduzir a operação automaticamente. O autor evidencia que, além disso, o projeto de robotização deve proporcionar os benefícios de:

- flexibilidade;
- maior produtividade;
- menores custos de operação;
- maior qualidade;
- eliminação de problemas que afetam saúde e a segurança.

O autor ainda cita que as máquinas automáticas (robôs industriais) são de elevado custo e devem ser introduzidas em um contexto em que há segurança acerca do retorno do investimento. O grande risco da introdução de máquinas automáticas (robôs industriais) está na sua sub-utilização.

Pode-se relacionar a sub-utilização dos robôs industriais a duas das principais características dos mesmos:

- **Integração** – O ambiente industrial deve ser suprido de sistemas de informação em tempo real, visto que, os robôs industriais disponíveis no mercado são projetados para o envio e recebimento de informações relacionadas ao processo em desenvolvimento. Desta forma, se o ambiente industrial não estiver estruturado para uma troca eficiente de informações em tempo real, o robô é sub-utilizado, comprometendo a flexibilidade da produção e o gerenciamento do processo;

- **Desempenho** – O processo a ser automatizado deve ser coerente com as características de desempenho do robô. Um exemplo é o uso de robôs industriais com alto nível de precisão em processos que solicitam níveis de precisão baixos. Este aspecto acaba onerando os custos das operações.

2.4 Aplicações e Benefícios

Nesta seção apresenta-se um quadro resumo (Tabela 2.3) com os principais processos industriais automatizados através do emprego de robôs. Estes processos estão também relacionados com as capacidades que justificam seu uso e os benefícios proporcionados pelos mesmos.

Tabela 2.3 Relação entre: Aplicações, Capacidades e Benefícios, fonte: Horikawa et al. (1985, apud Meyer, 2002)

Aplicação	Exemplos	Capacidades			Principais Benefícios		
		Transporte	Manipulação	Sensoriamento	Melhoria na qualidade do produto	Aumento de produtividade	Redução de custos
Manipulação de materiais	Armazenamento						
	Manipulação de peças	X				X	X
	Movimentação						
Carga e descarga de máquinas	Fundição em molde						
	Prensas automáticas	X	X		X	X	X
	Máquinas ferramenta						
Trabalho com spray	Pintura		X		X	X	X
	Aplicação de cola/resina						
Solda	Solda a ponto		X		X	X	X
	Solda a arco						
Ferramentas de acabamento	Furadeira						
	Triturador						
	Lixador		X	X	X	X	X
	Polidor						
	Cortador						
Montagem	Encaixe de partes		X	X		X	
	Fixação						
Inspeção	Controle			X	X		
	Tolerância						

2.5 Mercado e Tendências

A automação através do emprego da robótica industrial é um fenômeno crescente e irreversível. Cada vez mais as indústrias estão migrando para a estratégia da automação flexível.

Esta seção tem por objetivo apresentar um breve apanhado sobre o estado da arte que se encontra a robótica industrial em níveis mundiais. Com isso espera-se contextualizar o presente trabalho no âmbito desta área de estudo e pesquisa. Também servirá de base para comparação dos resultados alcançados durante o desenvolvimento do trabalho.

2.5.1 Mercado Mundial de Robôs Industriais

De acordo com o relatório anual fornecido pela Federação Internacional de Robótica (*International Federation of Robotics - IFR*) entidade vinculada à ONU - Organização das Nações Unidas, o mercado mundial de robôs está em plena expansão (World Robotics, 2006). Este documento apresenta de forma detalhada uma série de dados sobre o mercado mundial de robôs, destacando-se os seguintes:

- um aumento mundial nas vendas de robôs industriais de 30% em 2005 com relação a 2004. Foram vendidos em 2005, 126.700 robôs (veja Fig. 2.2);
- um aumento mundial de 9% dos estoques de robôs em operação nas indústrias em 2005 com relação a 2004, somando um total de 926 mil unidades. A Fig. 2.2 apresenta a estimativa da quantidade instalada por ano;

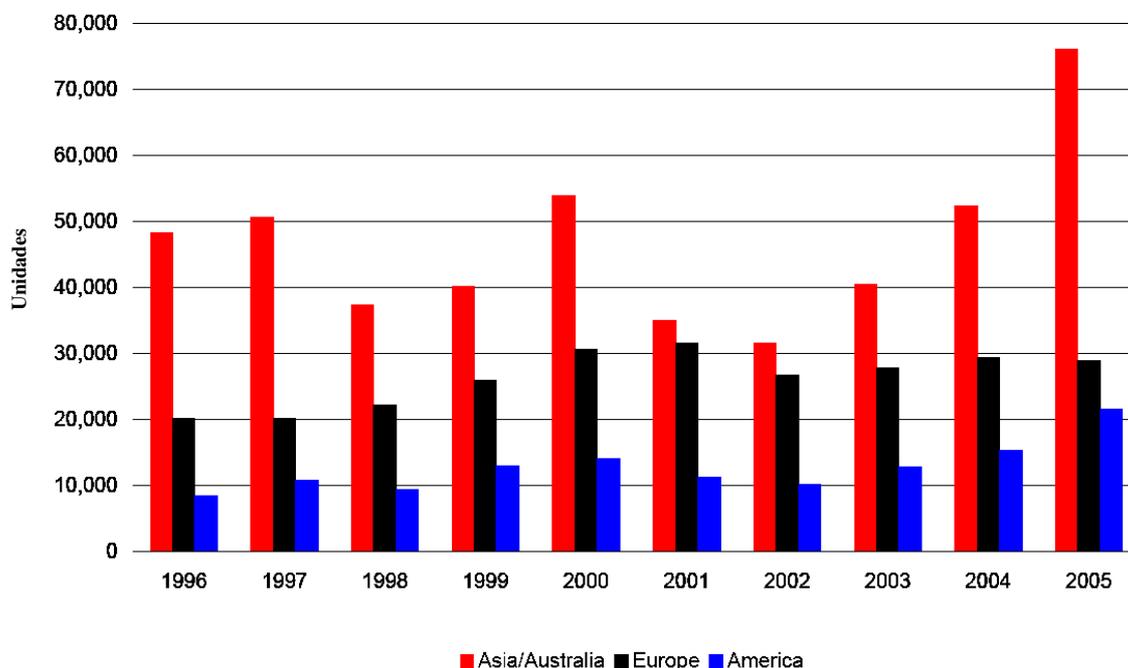


Figura 2.2 Estimativa da quantidade de robôs industriais instalados por ano, fonte: World Robotics (2006)

- um aumento de utilização de robôs em todos os setores industriais em 2005 com relação a 2004, destacando o setor da industria elétrico/eletrônica, conforme a Fig. 2.3;

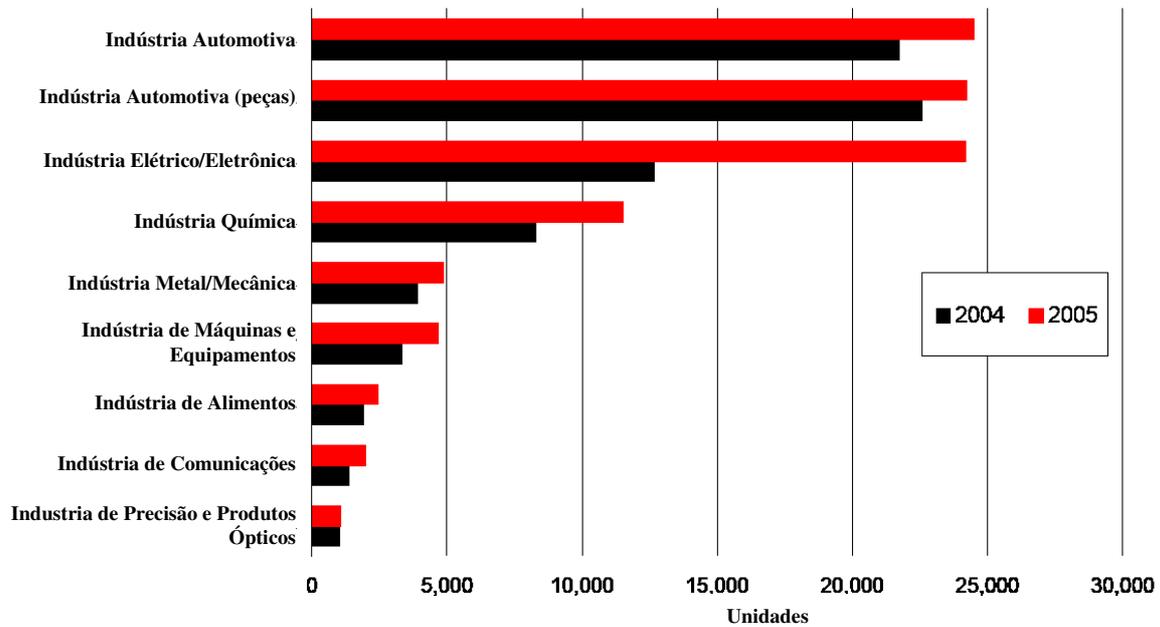


Figura 2.3 Relação entre os setores industriais (a nível mundial) e o aumento da quantidade de robôs industriais em operação nos anos de 2004 e 2005, fonte: World Robotics (2006)

- a previsão de vendas para o final de 2006 (Tabela 2.4) é de 110,6 mil robôs industriais, 12,7% a menos que em 2005. Esta redução se sucedeu pelo grande investimento feito em 2005 pelo setor automobilístico na América do Norte, Japão e Coreia. A previsão é de um aumento de 5,6% ao ano, a partir de 2007. Para 2009 as vendas devem chegar ao patamar de 130 mil robôs industriais, em todo o mundo;
- a previsão para 2009 é de 1.112.500 de robôs industriais em operação (veja Tabela 2.4).

Na Tabela 2.4 estão apresentados diversos dados sobre o mercado mundial de robôs industriais, inclusive sobre o mercado Brasileiro. O relatório mundial da IFR, afirma que ao final de 2005, no Brasil, existiam em torno de 2.672 robôs e em 2004; 2.352 robôs, apresentando um aumento de 13,6% nas vendas (instalações) ao ano.

Tabela 2.4 Instalações e robôs industriais em operação em 2004 e 2005 e previsões para 2006 – 2009, fonte: World Robotics (2006)

Country	Yearly installations				Operational stock at year-end			
	2004	2005	2006	2009	2004	2005	2006	2009
America	15,400	21,555	17,200	20,100	126,961	143,203	153,500	182,500
Brazil	208	320			2,352	2,672		
North America (Canada, Mexico, USA)	15,170	21,136	16,500	19,100	123,663	139,553	149,400	176,000
Other America a/	22	99			946	978		
Asia/Australia	52,311	76,047	65,000	76,000	443,193	481,664	502,000	583,000
China	3,493	4,461			7,096	11,557		
India	369	450			619	1,069		
Indonesia	74	193			121	314		
Japan (see note below)	37,086	50,501	40,000	46,000	356,483	373,481	372,000	388,500
Malaysia	250	243			1,452	1,695		
Philippines	65	80			93	173		
Republic of Korea (all types of industria	5,457	13,005			51,302	61,576		
Singapore a/	244	424			5,443	5,463		
Taiwan, Province of China a/	3,680	4,096			11,881	15,464		
Thailand	757	1,458			1,014	2,472		
Vietnam	14	99			14	113		
Other Asia a/	170	124			3,505	3,349		
Australia/New Zealand a/	652	913			4,170	4,938		
Europe	29,409	28,863	28,200	33,800	279,019	297,374	307,700	345,400
Austria a/	545	485			3,907	4,148		
Benelux a/	536	1,097			8,749	9,362		
Denmark	296	354			2,342	2,661		
Finland	401	556			3,712	4,159		
France	3,009	3,275	3,000	3,700	28,133	30,434	32,200	37,900
Germany	13,401	10,506	10,700	13,000	120,544	126,725	132,300	142,700
Italy	5,679	5,425	5,100	6,200	53,244	56,198	58,900	66,400
Norway	61	115			724	811		
Portugal	211	144			1,488	1,542		
Spain	2,826	2,649			21,893	24,081		
Sweden	833	939			7,341	8,028		
Switzerland a/	310	442			3,539	3,732		
Turkey	24	207			196	403		
United Kingdom	785	1,363	800	1,200	14,176	14,948	14,700	14,300
Central/Eastern European countries a/	419	1,149			8,372	9,337		
other Europe a/	73	157			659	805		
Africa	87	204	220	250	430	634	900	1,600
Total	97,207	126,669	110,620	130,150	849,603	922,875	964,100	1,112,500

2.5.2 Preços dos Robôs

Os preços dos robôs industriais vêm decaindo ao longo dos anos. A evolução dos preços apresenta a forma de uma exponencial decrescente, como pode ser verificado através da Fig. 2.4. Esta constatação é muito importante dentro do contexto deste trabalho, pois permite concluir que o preço dos robôs industriais está se estabilizando gradativamente. Esta condição pode ser resultante de um limite atingido em relação às tecnologias empregadas nos robôs atuais, abrindo possibilidade para o investimento em novas tecnologias para propiciar a continuidade de redução dos preços.

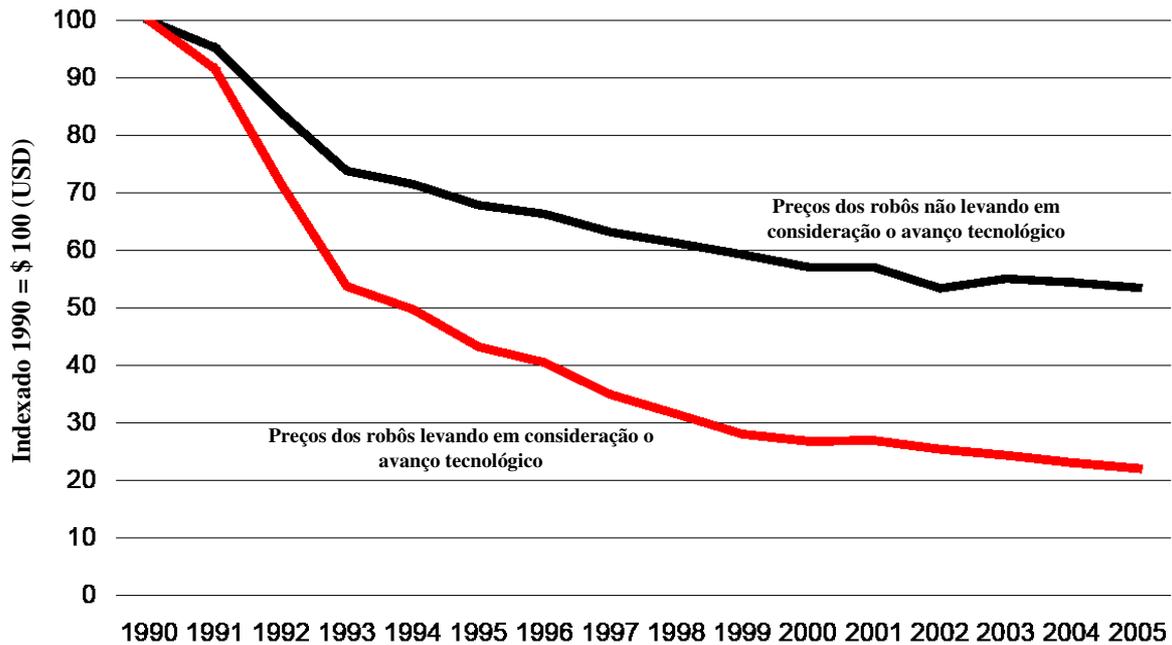


Figura 2.4 Evolução do preço dos robôs industriais ao longo dos anos, fonte: World Robotics (2006)

O gráfico apresentado na Fig. 2.4 mostra duas curvas representantes do decrescimento dos preços dos robôs ao longo dos anos. A curva que leva em consideração o avanço tecnológico decresce de forma mais acentuada, pois vincula aos preços os atributos tecnológicos agregados aos robôs atuais (maior capacidade de troca de informações, maior precisão, maior velocidade, etc.), em comparação aos mais antigos.

2.5.3 Parâmetros de Desempenho

Apresenta-se na Tabela 2.5, as principais especificações técnicas de desempenho que os atuais robôs atendem.

Tabela 2.5 Especificações técnicas encontradas nos robôs industriais atuais, fonte: Pires (2003)

Repetibilidade	até 0,003mm, usualmente 0,1mm
Velocidade (m/s)	até 7
Aceleração (m/s^2)	até 25
Capacidade de carga (kg)	2 - 550
Relação Peso/Capacidade de carga	30 - 40
Eixos	de 2 a 6 usualmente
Potência requerida á rede elétrica (kVA)	2,4 – 8,4
Comunicação	<i>Profibus</i> , <i>Ethernet</i> , canais seriais
Capacidade E/S	Similares a um PLC para sinais analógicos e digitais

2.5.4 Aplicações em Processos Industriais

A associação Norte Americana, ‘*Robotics Industries Associations (RIA)*’, em seu relatório de 2006 (Robotic Market, 2006) apresenta uma relação dos principais processos industriais onde se empregam robôs manipuladores nos Estados Unidos, conforme apresentado na Fig. 2.5.

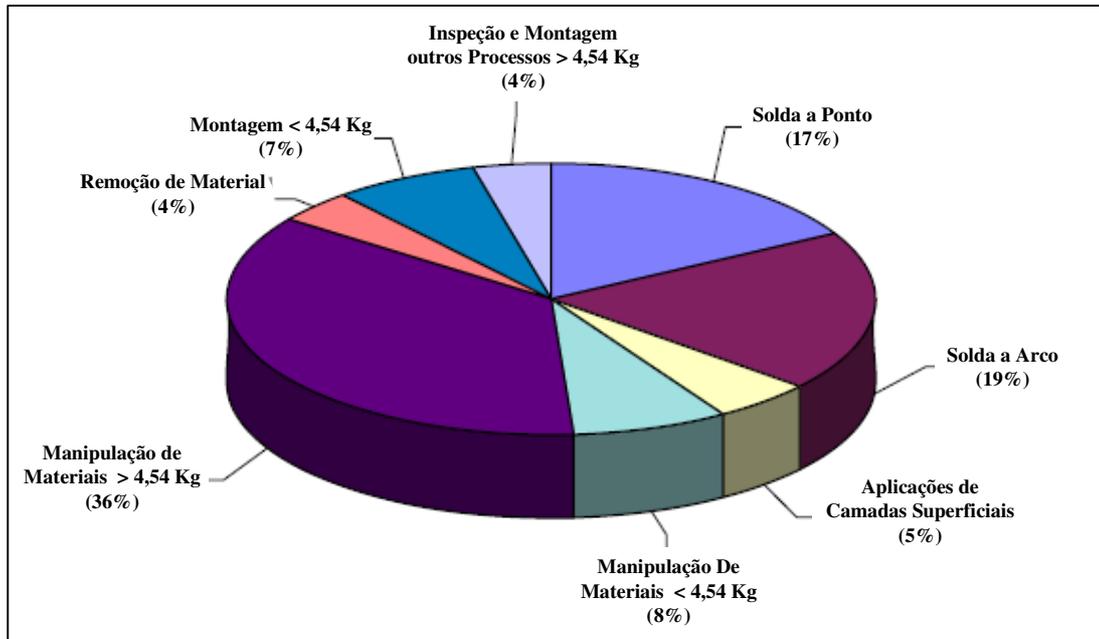


Figura 2.5 Porcentagem estatística de processos industriais realizados por robôs manipuladores nos Estados Unidos em 2006, fonte: Robotic Market (2006)

Através deste gráfico pode-se destacar as seguintes informações:

- 7% do total são aplicações em processos de montagem que envolve cargas manipuladas de até 4,54 Kg;
- 8% do total são aplicações em processos de manipulação de materiais que envolvem cargas de até 4,54 Kg;
- 4% do total são aplicações em processos de remoção de materiais (oxicorte, corte por jato d'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.

Conclusões referentes às cargas envolvidas:

Considerando que as cargas envolvidas em processos de remoção de material, aplicações em superfícies, solda a ponto e solda a arco, não excedam uma carga de 10 Kg, conclui-se que:

- cerca de 15% dos processos envolvem cargas menores de 4,54 Kg;
- cerca de 60% dos processos envolvem cargas menores de 10 Kg, de acordo com as considerações feitas;
- cerca de 40% dos processos envolvem cargas maiores de 4,54 Kg.

Conclusões referentes ao desempenho necessário:

Considerando que em processos de aplicações de materiais em superfícies e de manipulação de materiais (acima de 4,54 Kg) não necessitem altos níveis de precisão, conclui-se que cerca de 41% dos processos não necessitam altos níveis de precisão.

Conclusões referentes ao movimento necessário ao processo:

Considerando que os processos de solda a arco, remoção de material e aplicações em superfícies, necessitam de movimentação do braço robótico na forma de trajetória espacial no tempo (com necessidades de controle de posição, velocidade e aceleração no tempo), conclui-se que cerca de 28% dos processos utilizam movimentos do braço robótico na forma de trajetórias no tempo. Os demais processos se limitam à movimentação ponto a ponto.

Reforçando estas conclusões, Latino e Sandoval (1996) apresentam estudos em indústrias de manufatura concluindo que aproximadamente 70% das aplicações de manipulação de peças são realizadas sobre massas que variam de 1 a 10 Kg, com precisões de posicionamento que variam de 0,2 mm a 1 mm.

2.5.5 Dificuldades, Melhorias e Perspectivas

Segundo dados de entrevistas realizadas em 2006 pela World Robotics (2006), com 1121 profissionais ligados à área da robótica industrial, as três maiores dificuldades encontradas pelos profissionais em relação aos sistemas robóticos atuais são:

- baixo potencial de coleta e agregação de dados e alto número de variáveis envolvidas (complexidades dos sistemas);
- problemas associados ao desenvolvimento do sensoriamento dos sistemas;
- alto custo de instalação e operações iniciais;

Em Pires (2003), foram identificadas outras dificuldades:

- falta de ferramentas para auxiliar na programação por operadores com pouca experiência;
- existência de muitas linguagens distintas de programação;
- sistemas herméticos (com arquitetura fechada), difíceis de serem acessados, mesmo por operadores avançados;
- linguagens de programação deficientes.

A mesma pesquisa identifica ainda duas áreas principais para serem focos de pesquisa e desenvolvimento:

- melhoria do sistema de programação *on-line* e o aumento da programabilidade *off-line* dos robôs;
- melhoria da segurança em ambientes de interação entre homens e sistemas robóticos.

De acordo com Pires (2003), as perspectivas para o futuro próximo são:

- diminuição de preços;
- aumento de desempenho;
- sistemas mais sofisticados de controle e sensores;
- melhoria de sistemas de monitoramento em tempo real;
- melhoria dos sistemas de programação *off-line*;
- introdução de sistemas de baixo consumo de energia;
- controle da força, como uma característica regular.

2.6 Estudo de Casos

Em 2006 foi elaborada uma pesquisa de âmbito acadêmico na área de robótica industrial, onde foram agendadas algumas visitas a empresas do estado do Rio Grande do Sul que empregam robôs industriais em suas linhas de produção. A pesquisa teve como objetivo fazer um levantamento populacional de robôs industriais e em que processos industriais são utilizados. Alguns aspectos importantes foram constatados pela equipe de pesquisadores. Os dados coletados são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 Resumo das informações coletadas na pesquisa de campo, segundo uma análise qualitativa

Processo	Indústria Calçadista	Indústria metal/mecânica						
	Aplicação de cola/resina em superfície	Aplicação de spray em superfície	Manipulação / Polimento	Manipulação	Remoção de material de molde por injeção plástica	Remoção de material de molde por injeção plástica	Manipulação / Lixamento	
Características do sistema robotizado implementado	Tipo de robô / porte	Antropomorfo / grande	Antropomorfo / pequeno	Antropomorfo / grande	Antropomorfo / grande	Antropomorfo / pequeno	Antropomorfo / médio	Antropomorfo / grande
	Quantidade de robôs	1	7	4	2	30	3	2
	Trajectoria ou ponto-a-ponto	trajetória	trajetória	trajetória	ponto-a-ponto	ponto-a-ponto	ponto-a-ponto	trajetória
	Carga	-	-	inferior a 10kg	inferior a 10kg	-	-	inferior a 10kg
	Nível de complexidade do processo	baixo	baixo	alto	médio	baixo	baixo	médio
	Nível tecnológico do robô	alto	alto	alto	alto	alto	alto	alto
	Nível de interação com o ambiente	baixo	alto	alto	alto	baixo	baixo	médio
	Sensores externos	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	Conceito da automação utilizada	Subutilização de integração e desempenho	subutilização de desempenho	bem utilizada	bem utilizada	Subutilização de desempenho	Subutilização de desempenho	bem utilizada
	Particularidade	-	Sistema alimentado por esteira;	Processo de manufatura fixo, o robô atua como um ser humano manipulando o material;	Processo de manufatura fixo, o robô atua como um ser humano manipulando o material; Robôs trabalham com interação entre si;	Processo repetitivo, sem mudanças de configurações	-	-

Os resultados apresentados na Tabela 2.6 mostram um número elevado de robôs subutilizados, principalmente em relação a seu desempenho. Na maioria dos casos, foi constatado que os robôs são empregados em processos que solicitam um baixo nível de precisão e com movimentação simples. Entretanto, foi observado durante as visitas, que a maioria dos robôs são

empregados para ações de deslocamento com elevada velocidade a determinados pontos fixos (movimentação ponto-a-ponto). Conclui-se que a baixa manutenção, flexibilidade de operação e a capacidade de integração com sensores externos são os principais atributos considerados para aquisição e emprego de robôs na maioria dos processos observados.

3 METODOLOGIA DE PROJETO

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho. Na metodologia proposta estão presentes todos os atributos de projeto necessários para o desenvolvimento de um protótipo de um robô cartesiano pneumático.

A bibliografia apresenta diversas propostas de metodologias de projeto. O quadro da Tabela 3.1 mostra as metodologias mais utilizadas em processos de desenvolvimento de produtos (PDP) na engenharia de produção. Este estudo foi feito por Buss e Cunha (2002).

Tabela 3.1 Modelos de metodologias de projeto provenientes da engenharia de produção, fonte: Buss e Cunha (2002)

Rozenbeurg e Eeckles (1995)	Pahl e Beitz (1996)	Kaminski (2000)	Nam Suh (1990)
Análise do Problema	Especificação do Projeto	Especificação Técnicas da Necessidade	Necessidade Social
Síntese das Soluções	Projeto Conceitual	Estudo de Viabilidade	Requerimentos Funcionais
Simulação das Soluções	Projeto Preliminar	Projeto básico	Atributos de Produto
Avaliação do Projeto	Projeto Detalhado	Projeto executivo	Protótipo
		Planejamento da Produção	Produto
		Execução	

Por possuir similaridades no cronograma de atividades e etapas de projeto, utilizou-se o modelo proposto por Pahl e Beitz (1996) como base de metodologia de projeto para este trabalho. De forma genérica, as fases compreendidas no processo de desenvolvimento do produto e seus respectivos atributos em cada fase, segundo Pahl e Beitz (1996), são:

- **Especificações de Projeto** – esta fase pode ser chamada de ‘Planejamento e *Clarificação* das Tarefas’, ou também de ‘Projeto Informacional’. É a fase inicial do projeto, que possui por objetivo coletar todas as necessidades e informações pertinentes ao produto a ser desenvolvido, tais como: função, requerimentos necessários, mercado, importância, etc. O resultado da compilação e análise destas informações constituem os Requisitos de Projeto, que são as metas funcionais e técnicas a serem atingidas ao final do processo de desenvolvimento do produto. O objetivo desta fase é identificar as necessidades dos vários clientes do produto e transformá-las em um conjunto de

objetivos ou metas que o produto deve atender;

- **Projeto Conceitual** – esta fase consiste nas atividades na consolidação dos conceitos tecnológicos funcionais e morfológicos do produto. Este atributo envolve a seleção de materiais preliminares, o desenvolvimento aproximado do layout dimensional e as considerações de possíveis tecnologias empregadas. Na fase de projeto conceitual, as atividades relacionam-se com a **busca, criação, representação e seleção de soluções** para o problema de projeto. A concepção do produto final referente às tecnologias empregadas, princípios de funcionamento e formas, é o resultado desta fase;
- **Projeto Preliminar** – Nesta fase são determinadas todas as informações **técnicas** ligadas ao produto final, análises e avaliações referentes a custos e funções. Ao final desta fase estabelece-se o '*layout definitivo*';
- **Projeto Detalhado** – Esta é a ultima fase da metodologia. Como resultado apresenta-se a documentação para a produção industrial. Esta fase geralmente compreende a avaliação do protótipo, do seu aprimoramento e da produção de todas as informações pertinentes ao produto para a sua possível produção em série.

A metodologia se faz necessária como base cronológica das atividades envolvidas no desenvolvimento de novos produtos, portanto cada projeto deve adaptar as atividades de acordo com as necessidades e possibilidades específicas de cada projeto.

As atividades e fases referenciais da metodologia de projeto, propostas por Pahl e Beitz (1996), são apresentadas no Anexo I. A adaptação ao presente caso, pode ser visualizada através da Fig. 3.1. A adaptação está limitada até a fase de projeto preliminar, pois o desenvolvimento da ultima fase (produção do protótipo, avaliação de resultados experimentais e aprimoramentos necessários) não está no escopo do presente trabalho.

A abordagem estabelecida tem por característica principal tornar dinâmica e objetiva a execução do projeto.

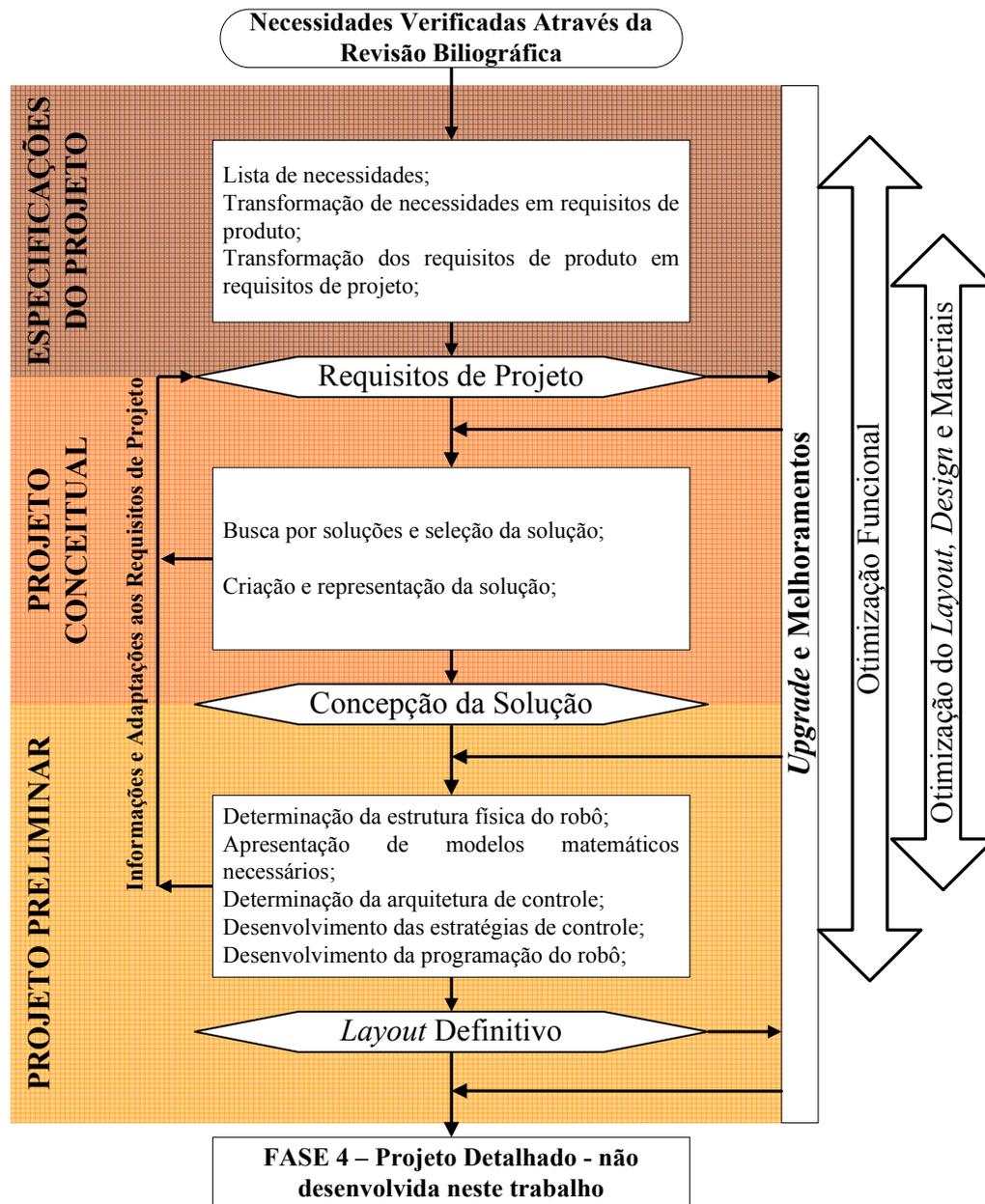


Figura 3.1 Plano de atividades e fases para o desenvolvimento do presente trabalho adaptado da metodologia de projeto de Pahl e Beitz (1996)

Seguem as observações referentes a cada fase adaptada.

3.1 Especificações de Projeto

Diante das informações reunidas e apresentadas no Capítulo 2, identificaram-se as necessidades referentes aos robôs industriais. A listagem das necessidades está apresentada na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 Lista das necessidades para robôs industriais (identificada)

Índice	Lista de Necessidades
1	Redução de preço do robô
2	Redução de preço de instalação
3	Aumento da capacidade de coleta e armazenamento de dados
4	Redução do número de variáveis
5	Simplificar os sistemas de programação
6	Acessibilidade aos sistemas envolvidos (problema de sistemas fechados)
7	Tornar a programação mais eficaz
8	Unificação de linguagem de programação
9	Melhoria da programação on-line
10	Melhoria da programação off-line
11	Aumento de performance
12	Sofisticação de sistemas de controle
13	Sofisticação de sistemas de sensores
14	Melhoria de sistemas on-line de monitoramento
15	Controle de força como uma característica padrão
16	Introdução de sistemas de baixo consumo de energia
17	Aumento da integração
18	Aumento de relação peso/potência
19	Boa precisão ponto-a-ponto
20	Boa precisão de trajetória
21	Manipular cargas de até 10 kg
22	Fácil instalação
23	Estrutura simplificada
24	Baixa manutenção
25	Boa flexibilidade de movimentação

3.1.1 Requisitos de Produto

Para ponderar as necessidades de modo a proporcionar uma melhor possibilidade de avaliação destas informações, implementou-se um diagrama de Mudge (Reis et al., 2002) que está apresentado na Tabela 3.3, utilizando os dados apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.3 Diagrama de Mudge, inter-relacionando as necessidades do produto

		Necessidades dispostas aleatoriamente																									Soma dos valores por item	Porcentagem	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
Necessidades dispostas aleatoriamente	1	3	5	3	3	3	3	3	5	3	5	5	5	5	5	5	3	5	3	1	1	1	3	3	3	1	80	8,18%	
	2		5	3	1				5	3	5	3	3	3	3	5		1									37	3,78%	
	3								3		3		1	1														8	0,82%
	4			3					3	3		3	3	3	3	3					1	1			1			27	2,76%
	5			5	3		1	1		3	3	3	3	3	3	1	3		3						1	1	3	37	3,78%
	6		1	5	3			1		5	3	5	3	3	3	3	5		3		1	1		3	3	3		51	5,21%
	7		3	5	1					3	1	3	1	3	3	3	3		3		1	1				3		34	3,48%
	8		3	5		3	5	5		5	3	5	3	5	3	5	3	5	1	5		5	1	1	1	3	3	70	7,16%
	9											3		3	3	3												12	1,23%
	10			5	3					5		5	3	5	3	5		5			1	1				3		44	4,50%
	11												1	3	3	3												10	1,02%
	12			3						5					3	3	1		3							1		19	1,94%
	13															1	1											2	0,20%
	14																3		3						3	3		12	1,23%
	15			3															3									6	0,61%
	16		5	5	5	3	3	5		5	3	5	3	5	3	5	3	5		5	3	3	3	3	1	3	3	79	8,08%
	17			3	3					5		3		3											3	3		23	2,35%
	18		5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	3	5		5		1	1	3	5	3	3	1	72	7,36%
	19		1	3		3				3		5	1	3	3	3	3		3			3	1	5	3	3	3	46	4,70%
	20		1	3		3				3		5	1	3	3	3	3		3				1	5	3	3	3	43	4,40%
	21		3	5	3	5	3	3		5	3	5	3	5	5	5	5		5						5	5	5	78	7,98%
	22		3	5	3			3		5	3	5	3	5	3	5	3	5		3					3	3		52	5,32%
	23		3	5				3		5	3	3	3	5		3												33	3,37%
	24		3	5	3					3		3		3		3									3			26	2,66%
	25		3	5	3	3	3	3	5	5	3	5	3	5	5	5	5	3	5					5	3	5		77	7,87%
		Somatório																									978	100,00%	

Valores de Importância

Pouco mais importante - 1

Mediamente mais importante - 3

Muito mais importante - 5

O resultado do diagrama de Mudge pode ser visto na Tabela 3.4, na qual os itens apresentam-se dispostos de forma gradual, iniciando do nível de maior importância para o de menor importância.

Tabela 3.4 Resultado do diagrama de Mudge, itens dispostos em ordem decrescente de grau de importância

Índice	Lista de Necessidades	Porcentagem
1	Redução de preço do robô	8,18%
16	Introdução de sistemas de baixo consumo de energia	8,08%
21	Manipular cargas de até 10 kg	7,98%
25	Boa flexibilidade de movimentação	7,87%
18	Aumento de relação peso/potência	7,36%
8	Unificação de linguagem de programação	7,16%
22	Fácil instalação	5,32%
6	Acessibilidade aos sistemas envolvidos (problema de sistemas fechados)	5,21%
19	Boa precisão ponto-a-ponto	4,70%
10	Melhoria da programação off-line	4,50%
20	Boa precisão de trajetória	4,40%
2	Redução de preço de instalação	3,78%
5	Simplificar os sistemas de programação	3,78%
7	Tornar a programação mais eficaz	3,48%
23	Estrutura simplificada	3,37%
4	Redução do número de variáveis	2,76%
24	Baixa manutenção	2,66%
17	Aumento da integração	2,35%
12	Sofisticação de sistemas de controle	1,94%
9	Melhoria da programação on-line	1,23%
14	Melhoria de sistemas on-line de monitoramento	1,23%
11	Aumento de performance	1,02%
3	Aumento da capacidade de coleta e armazenamento de dados	0,82%
15	Controle de força como uma característica padrão	0,61%
13	Sofisticação de sistemas de sensores	0,20%

Algumas das necessidades verificadas desviam-se do escopo do trabalho, portanto serão descartados. Estes itens estão destacados (em azul) na Tabela 3.4.

3.1.2 Requisitos de Projeto

Os requisitos de projeto consistem nas metas que devem ser atingidas ao fim do projeto, portanto, os requisitos de projeto devem apresentar parâmetros físicos, técnicos e de desempenho de acordo com os requisitos de produto já identificados. Esta transformação de informações pode ser visualizada no Anexo II, e o resultado é apresentado na Tabela 3.5.

Em projetos de produto, é importante relacionar as especificações de projeto com as áreas responsáveis pelo seu desenvolvimento. As áreas envolvidas neste projeto abrangem cinco campos básicos de conhecimentos em engenharia, as quais são denominadas de **unidades técnicas de conhecimento**. As cinco unidades técnicas são:

- **Estrutura do robô;**
- **Arquitetura de controle;**
- **Sistemas de controle;**
- **Modelagem matemática;**
- **Programação *off-line*.**

Denominadas as unidades, implementou-se a relação das mesmas com os requisitos de projeto (Tabela 3.5):

Tabela 3.5 Relação entre os requisitos de projetos com as unidades técnicas envolvidas no projeto

Requisitos de projeto	Grau de importância	Unidades técnicas envolvidas no projeto				
		de Estrutura do Robô	de Arquitetura de Controle	de Sistemas de Controle	de Modelagem Matemática	de Programação <i>off-line</i>
Custo inferior a 50.000 reais	8,18%	X	X			X
Sistema deve ter baixo consumo de energia	8,08%	X				
Carga de trabalho de 10 Kg ou mais	7,98%	X				
Configuração dimensional de acordo com os concorrentes de mercado	7,87%	X				
Relação peso/potência entre 3 e 4	7,36%	X				
Através de algum software de engenharia usual, gerar a programação de operação do robô	7,16%					X
O robô deve ter no máximo 40 kg	5,32%	X				
Os componentes do robô devem ser de fácil substituição e a arquitetura de controle deve ser de fácil acesso.	5,21%	X	X			
Precisão mínima de 1 mm (ponto-a-ponto)	4,70%		X	X	X	
O software de programação deve ser capacitado a desenvolver ambientes industriais virtuais interativos	4,50%					X
Precisão mínima de 3 mm (trajetória)	4,40%		X	X	X	
O sistema robótico deve ser de fácil entendimento, de forma a não precisar investimentos altos em cursos para sua instalação e operação	3,78%	X				X
O software de programação deve possuir recursos visuais de programação	3,78%					X
O acionamento deve ser de forma direta	3,37%	X				
	2,76%	X				
A manutenção deve ser de acordo com os concorrentes de mercado	2,66%	X				
Uso de um controlador adequado	1,94%		X	X	X	
O software de programação deve ser apto a monitorar o sistema on-line	1,23%		X			X

Analisando a Tabela 3.5 pode-se observar uma maior concentração de relações com a unidade técnica de estrutura do robô. Nota-se também a necessidade de interatividade de trabalho entre as unidades para a obtenção dos resultados.

3.2 Projeto Conceitual

O objetivo desta fase 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 na seção 2.2.1, referente aos principais componentes de um robô industrial.

Manipulador mecânico

Os robôs comerciais apresentam basicamente três tipos de configurações em relação ao uso de juntas: com juntas prismáticas, com juntas rotacionais e com ambas. O grande diferencial entre o uso das juntas em robôs é respectivo ao seu acionamento. Para a utilização de juntas rotacionais se faz necessário o acionamento indireto, o que agrega ao robô complexidade construtiva, acréscimo de massa e de custos. Em contrapartida, o uso de juntas prismáticas em robôs restringe a flexibilidade de movimentação do manipulador. Para o presente caso, optou-se pela escolha do uso de juntas prismáticas. Esta decisão foi tomada porque, apesar de apresentar menor flexibilidade de movimentação, este tipo de juntas apresenta-se com configuração geométrica já adaptada ao movimento translacional típico dos atuadores pneumáticos lineares mais comuns (pistões pneumáticos). Além disso, como ficará mais claro nas seções que seguem, os robôs compostos apenas de juntas prismáticas tornam-se mais fáceis de controlar, devido ao deslocamento dos graus de liberdade do mecanismo. Como resultado, tem-se uma primeira definição: Robô Cartesiano.

Atuadores

Os atuadores utilizados em robôs cartesianos industriais encontrados no mercado são de três tipos: motores elétricos lineares, atuadores lineares pneumáticos e atuadores lineares hidráulicos. Ressaltando que os atuadores lineares pneumáticos apenas são encontrados no mercado em robôs de movimentação ponto a ponto, limitando o espectro de processos para o qual o robô pode ser utilizado. Isto é proveniente da grande dificuldade de controlar atuadores pneumáticos, por apresentarem comportamento altamente não linear.

Os atuadores hidráulicos são geralmente usados em robôs que requerem cargas elevadas.

Além de utilizarem o óleo como elemento de transmissão de força, o qual pode acarretar em elemento de contaminação do ambiente, são de difícil controle (porém, em grau menor que os atuadores pneumáticos).

Os motores elétricos lineares são os mais apropriados para o uso em robôs cartesianos industriais. São muitos os seus atributos: fácil controle, robustos, de baixa manutenção, ótima precisão (atingindo uma precisão de até 10 μm). Entretanto, os motores elétricos lineares, para uma mesma potência, apresentam custos muito superiores aos dos atuadores lineares pneumáticos.

Os requisitos de projeto (Tabela 3.5) não demandam altos níveis de precisão, priorizam o baixo custo e alta potência, por consequência adota-se para o projeto atuadores pneumáticos, por estarem mais de acordo com os requisitos de projeto de uma forma geral. Como resultado, obtém-se uma segunda definição: Robô Cartesiano com Acionamento Pneumático.

Sistemas de transmissão mecânica

Uma vez definido o uso de juntas prismáticas com atuadores lineares pneumáticos, o acionamento ocorrerá de forma direta, não necessitando, portanto, de sistemas de transmissão mecânica.

Sensores

A definição dos sensores se dará na unidade técnica de estrutura do robô (Capítulo 4) mediante um estudo mais aprimorado.

Arquitetura de controle

A definição deste item se dará na unidade técnica de arquitetura de controle (Capítulo 5) por meio de um estudo mais aprofundado.

Sistema de Potência

Compressores de ar são as fontes de alimentação dos atuadores pneumáticos. Possuem como vantagem o preço reduzido e serem usualmente utilizados em plantas industriais. Outro atributo, é a economia de elementos no sistema de potência, pois com apenas um compressor pode-se alimentar mais de um robô.

Efetuator ou Órgão Terminal

Este componente não será abordado neste projeto, entretanto o robô deverá ser apto ao acoplamento de ferramentas ou mesmo garras, de acordo ao processo para o qual será designado.

Configuração do Volume de Trabalho

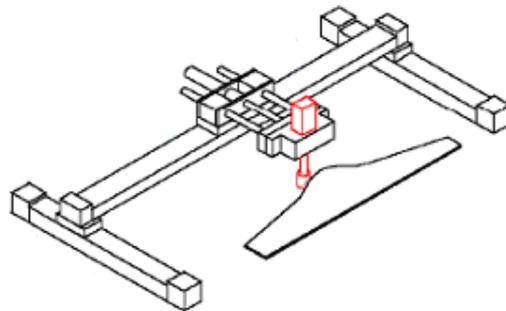
A disposição e dimensionamento dos atuadores determina: a rigidez estrutural do robô cartesiano, volume de trabalho e limitações de movimento.

A bibliografia apresenta dois conjuntos típicos de robôs cartesianos: robôs cartesianos acionados eletricamente (disponíveis no mercado), e robôs cartesianos pneumáticos experimentais. Para a visualização dos sistemas encontrados, apresentam-se nas Fig. 3.2 e 3.3 as principais configurações utilizadas.

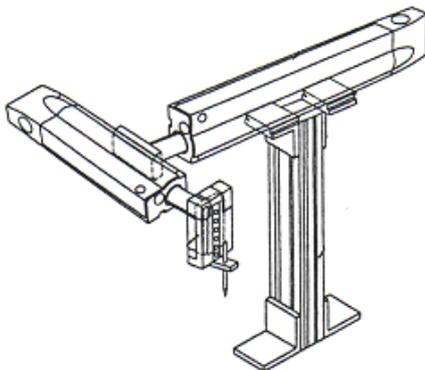
a) Fonte: Yang et al. (2005)



b) Fonte: Sanhoury et al. (2005)



c) Fonte: Guoliang e Xuanyin (2003)



d) Fonte: Romano e Ferreira (2002)

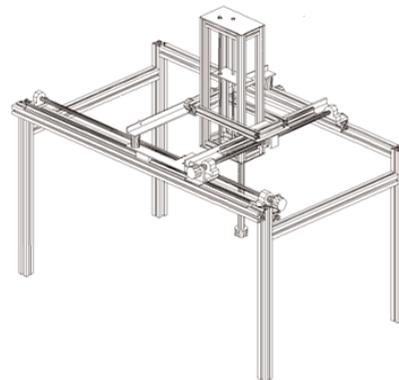


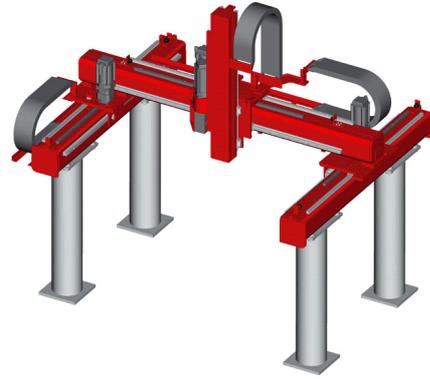
Figura 3.2 Robôs cartesianos pneumáticos experimentais

A configuração mais difundida (tanto para os robôs elétricos como para os pneumáticos) é o modelo denominado “Pórtico” (*Gantry*) com três graus de liberdade. Isto se deve a característica de maior rigidez e simplicidade estrutural desta configuração. Nas figuras 3.2(d) e Fig.3.3(a, b, c, e, f, g) são apresentados modelos pórticos, que é a configuração adotado para o presente trabalho.

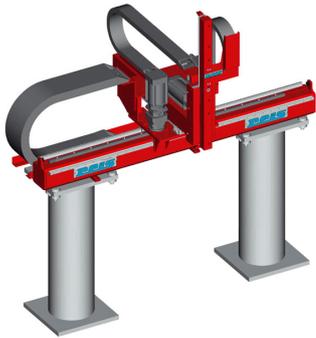
a) Fonte: Parker Hannifin Corporation (2006)



b) Fonte: Reis Robotics (2006)



c) Fonte: Reis Robotics (2006)



d) Fonte: Campetella Group (2006)



e) Fonte: Hirata Robotics (2006)



f) Fonte: Tecnomac Robots (2006)



g) Fonte: Adept Technology (2006)

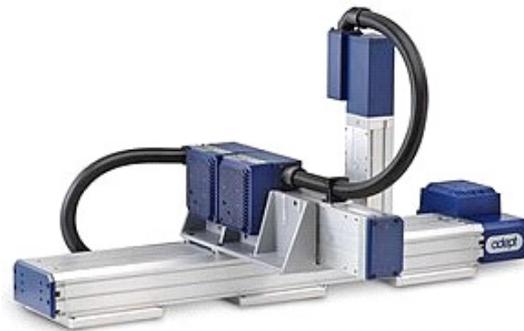


Figura 3.3 Robôs cartesianos com motores elétricos

Interface com o Usuário

A operação pelo usuário do robô se dará através da programação *off-line*, visto que, além de estar entre as especificações de projeto, este é um método de programação muito superior à programação *on-line*, como já foi descrito.

O sistema de programação *off-line* desenvolvido é baseado em *softwares* do tipo CAD/CAM. Esta característica supre em alguns aspectos os requisitos de projeto relacionado à unificação de linguagem, pois *softwares* do tipo CAD/CAM são encontrados em larga escala em ambientes industriais. No presente trabalho será utilizado o PRO/Engineer Wildfire (Parametric Technology Corporation, 2006). O ambiente de monitoramento visual do sistema se dará através da interação entre os *softwares* Matlab/Simulink (MathWorks, 2006) e Visual Nastran 4D (MSC.Software, 2002). Ambos são encontrados em ambientes industriais.

O desenvolvimento do sistema de programação *off-line* será executado na unidade técnica de programação *off-line* (Capítulo 8), mediante um estudo mais aprofundado.

3.2.2 Criação e Representação da Solução

A criação da concepção da solução deste projeto foi obtida através da análise dos sistemas envolvidos e suas inter-relações. O resultado é o sistema robótico completo a ser desenvolvido, apresentado de forma resumida. A representação da solução pode ser visualizada na Fig. 3.4.

Para desenvolver e conduzir a execução do projeto de forma organizada e dinâmica se faz necessário organizar os sistemas envolvidos e relacioná-los com as unidades técnicas de conhecimento abrangentes. Isto pode ser denominado de “estrutura de execução de projeto”, que é apresentada pelo diagrama de blocos na Fig. 3.4.

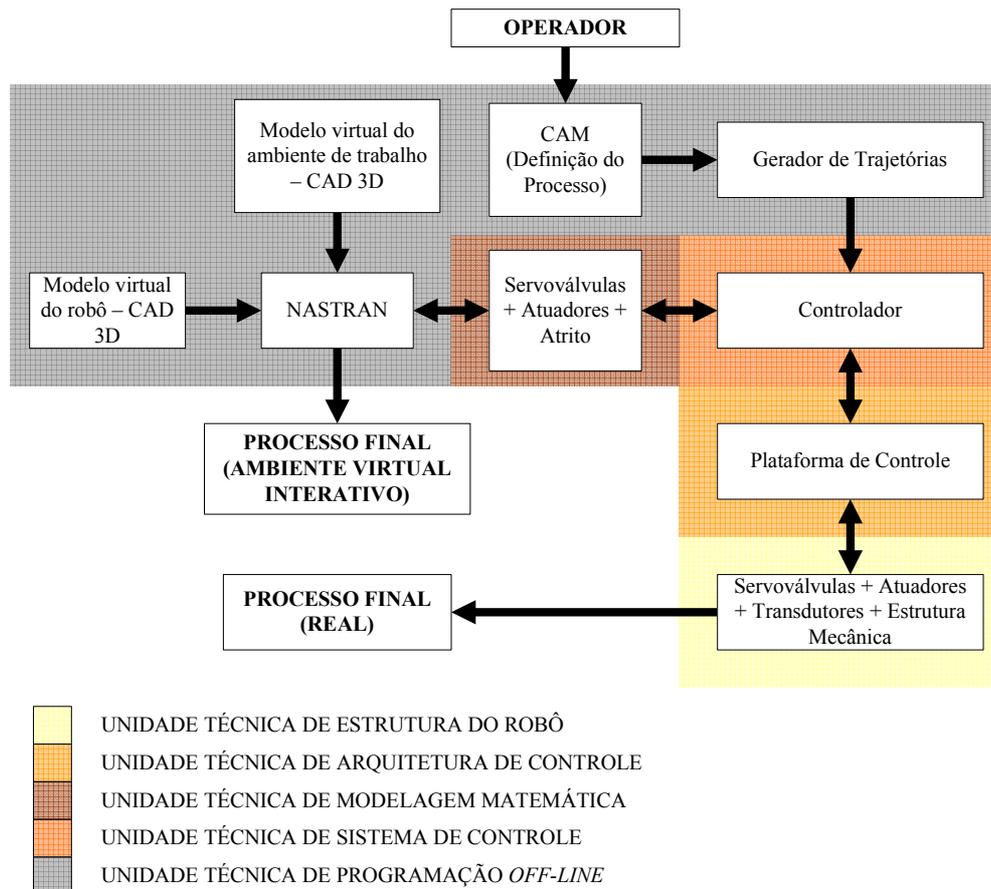


Figura 3.4 Estrutura de execução do projeto

3.3 Projeto Preliminar

Definida a concepção da solução e a estrutura de execução do projeto, dá-se início ao desenvolvimento dos sistemas envolvidos no robô, de acordo com a estrutura de execução do projeto (Fig. 3.4).

O projeto preliminar será conduzido através do desenvolvimento das unidades técnicas do conhecimento. Para tanto, cada unidade é abordada em um capítulo próprio. Esta organização atribuirá a propriedade de modularidade ao projeto, pois cada capítulo trata individualmente de um assunto específico relacionado ao objetivo geral deste trabalho. Portanto, o resultado do projeto final consiste no agrupamento de todos os resultados atingidos em cada unidade.

4 UNIDADE TÉCNICA DE ESTRUTURA DO ROBÔ

Esta seção apresenta o estudo e a definição da estrutura física e dos componentes mecânicos do robô pneumático de acordo com os requisitos de projeto (Tabela 3.5).

Para garantir o atendimento a estes requisitos de projeto, realizou-se uma série de estudos e pesquisas, tais como: determinação do volume de trabalho, estudo e escolha de componentes, análise de esforços estruturais e elaboração de orçamentos.

4.1 Volume de Trabalho

O volume de trabalho do robô cartesiano pneumático é determinado pelo comprimento do curso dos atuadores lineares pneumáticos nos seus respectivos eixos. Visando a determinação de um robô com volume de trabalho compatível com as opções ofertadas no mercado, foram estabelecidas as seguintes dimensões de curso: eixo X de 1000 mm, eixo Y de 500 mm e no eixo Z de 250 mm. Vale ressaltar que esse volume de trabalho pode ser facilmente alterado, pois os fabricantes de atuadores pneumáticos oferecem cursos de até 3000 mm de deslocamento.

Assim, o robô deve ser capaz de realizar qualquer manipulação dentro de um cubo de dimensões 1000 x 500 x 250 mm (volume de trabalho).

4.2 Estudo e Escolha de Componentes

A definição dos componentes necessários ao projeto, foi elaborada com base em diversos trabalhos, tais como: Perondi e Guenter (1999a, 1999b), Guenter e Perondi (2004), Andrigheto et al. (2004), Perondi (2002), Kunz (2006), Bavaresco (2007), Šitum et al. (2001, 2003) os quais apresentam estudos de sistemas de controle de servoposicionadores lineares pneumáticos implementados em bancadas experimentais.

4.2.1 Atuadores Lineares Pneumáticos

Os atuadores lineares foram selecionados a partir dos artigos estudados, de acordo com o volume de trabalho estipulado e com as cargas requisitadas. Foram definidos três atuadores lineares pneumáticos, cada um representando o eixo em questão. O fabricante disponibiliza dois tipos de sistemas de guias. Cada guia atribui diferentes resistências aos esforços externos mecânicos nos atuadores. No item 4.4 é apresentado o cálculo comparativo determinando a melhor opção para o projeto. As especificações técnicas de cada atuador, com seu respectivo sistema de guia, são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Especificações técnicas dos atuadores (cilindros pneumáticos), fonte: Festo Corporation (2007)

	com guia GF ¹	com guia KF ²	com guia GF ¹	com guia KF ²	com guia GF ¹	com guia KF ²
Modelo/Fabricante	DGLP - 25 / FESTO		DGLP - 25 / FESTO		DGLP - 25 / FESTO	
Eixo do Robô	Eixo X		Eixo Y		Eixo Z	
Curso	1000 mm		500 mm		250 mm	
Haste	Sem haste		Sem haste		sem haste	
Diâmetro do êmbolo	25 mm		25 mm		25 mm	
Pressão de trabalho	2 - 8 Bar		2 - 8 Bar		2 - 8 Bar	
Força de atuação - F_{AT}	295 N		295 N		295 N	
Forças devidas ao peso - $F_{y_{máx}}$	430 N	3080 N	430 N	3080 N	430 N	3080 N
Forças devidas ao peso - $F_{z_{máx}}$	430 N	3080 N	430 N	3080 N	430 N	3080 N
Momento transversal - $M_{x_{máx}}$	5,4 Nm	45 Nm	5,4 Nm	45 Nm	5,4 Nm	45 Nm
Momento longitudinal - $M_{y_{máx}}$	14 Nm	85 Nm	14 Nm	85 Nm	14 Nm	85 Nm
Momento de torção - $M_{z_{máx}}$	14 Nm	85 Nm	14 Nm	85 Nm	14 Nm	85 Nm
Velocidade - $V_{máx}$	1 m/s	3 m/s	1 m/s	3 m/s	1 m/s	3 m/s
Massa do atuador + guia	5,94 Kg	7,25 Kg	3,9 Kg	4,6 Kg	2,8 Kg	3,3 Kg

É importante ressaltar que os momentos, forças e velocidades apresentados na primeira coluna da Tabela 4.1 são os valores máximos admissíveis e que as direções convencionadas estão apresentadas na Fig. 4.1.

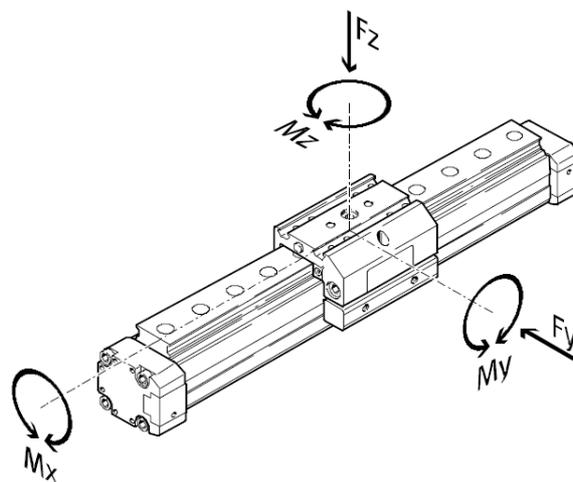


Figura 4.1 Representação das forças e momentos em um cilindro atuador sem haste com guia (Festo Corporation, 2007)

¹ Guia GF – guia com buchas de fricção

² Guia KF – guia com esferas recirculantes

4.2.2 Servoválvulas Direcionais

A servoválvula definida para aplicação no projeto é a servoválvula direcional proporcional da Festo modelo MPYE-5-1/8. Este modelo é utilizado por Perondi (2002), Kunz (2006), Bavaresco (2007) e Šitum et alli (2001), os quais implementaram, experimentalmente, controladores para atuadores lineares pneumáticos e obtiveram excelentes resultados.

Cada servoválvula opera um atuador linear pneumático. As principais especificações técnicas destes componentes são apresentadas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 Especificações técnicas da servoválvula (Festo Corporation, 2007)

Modelo/Fabricante	MPYE-5-1/8 /FESTO
Tipo	5/3 vias
Pressão de trabalho	0 - 10 bar
Vazão nominal teórica	700 l/min
Vazão nominal medida (Vieira, 1998)	410 l/min
Temperatura do fluido de trabalho	+5 a +40 °C
Temperatura ambiente	0 a +50 °C
Tensão teórica de trabalho	0 a 10 Vdc
Tempo de resposta na faixa (2 a 8Vdc)	5 ms ; 200 Hz
Tensão de serviço DC	17 - 30 Vdc
Meio operacional Grau de filtragem	5 µm
Peso	330 g

Para reduzir o ruído sonoro transmitido ao ambiente pelo ar exaurido para a atmosfera pelas servoválvulas serão utilizados silenciadores. Para a alimentação da servoválvula serão utilizadas fontes chaveadas de 24 V e 1,1 A, necessárias para cada servoválvula (ver anexo III).

4.2.3 Transdutores

Muitas técnicas de controle podem ser implementadas apenas com sensores de posição, outras, porém, como a estratégia em cascata (Perondi, 2002), necessitam também de sensores nas câmaras dos cilindros.

4.2.3.1 Transdutores de Posição

Para a obtenção da posição do êmbolo móvel do cilindro atuador se faz necessário o uso de um transdutor de posição. Os trabalhos realizados por Perondi e Guenter (1999a,1999b), Guenter e Perondi (2004), Perondi (2002), Bavaresco (2007), Šitum et al. (2001, 2003), dentre outros, utilizaram réguas potenciométricas como transdutores de posição em servoposicionadores, e, em todos estes casos, o sistema implementado mostrou um ótimo desempenho, além de gerar um sinal menos susceptível a ruídos. Além disso, estes sensores são de fácil instalação, devido ao seu design ser próprio para o acoplamento em atuadores lineares

(Fig. 4.2). Portanto, optou-se pelo uso de réguas potenciométricas como transdutores de posição para os sistemas servoposicionadores do robô.

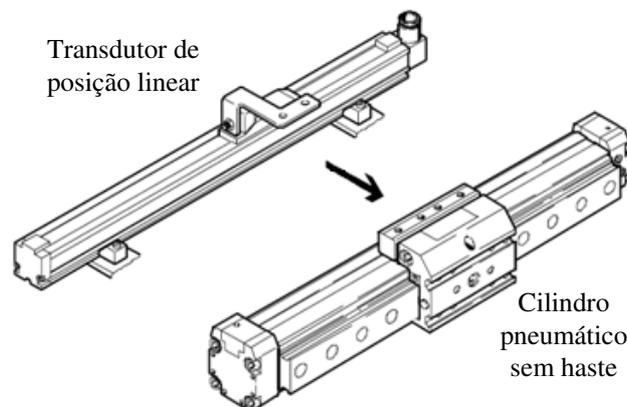


Figura 4.2 Esquema do acoplamento do cilindro pneumático sem haste com o transdutor de posição linear (Festo Corporation, 2007)

As especificações técnicas das réguas potenciométricas utilizadas no projeto podem ser visualizadas na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 Especificações técnicas das réguas potenciométricas definidas para o projeto (Festo Corporation, 2007)

Modelo/Fabricante	MLO-POT-1250-TLF	MLO-POT-600-TLF	MLO-POT-300-TLF
Eixo do Robô	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Curso	1250 mm	600 mm	300 mm
Resolução	0,02 mm	0,02 mm	0,02 mm
Sinal de saída	0 a +10V	0 a +10V	0 a +10V
Peso	3,41 Kg	2,06 Kg	1,38 Kg
Alimentação	10 V DC – máx 42 V DC	10 V DC – máx 42 V DC	10 V DC – máx 42 V DC

4.2.3.2 Transdutores de Pressão

Para a aquisição das pressões absolutas em cada câmara dos cilindros, se faz necessário o uso de transdutores de pressão. O monitoramento das pressões pode ser útil para a identificação e caracterização do sistema e, também, para o controle, pois alguns controladores necessitam da informação das pressões nas câmaras para o cálculo do sinal de controle. Esse recurso foi utilizado nos trabalhos de Perondi (2002), Kunz (2006), Bavaresco (2007) e Šitum et alli (2001). Em alguns trabalhos como o de Perondi (2002) e Šitum et alli (2001), ainda foi introduzido um terceiro transdutor de pressão, inserido do início do circuito pneumático com função de monitorar a pressão da rede. Os dados do transdutor de pressão são apresentados na Tabela 4.4:

Segundo Kunz (2006), para melhor desempenho, os transdutores de pressão devem ser dispostos o mais próximo possível das câmaras dos atuadores pneumáticos.

Tabela 4.4 Especificações técnicas do transdutor de pressão, fonte: Kunz (2006)

Modelo	Huba Control - 510
Escala	2 a 8 bar
Calibração	Calibrado de fábrica
Sinal de saída	4 – 20 mA
Alimentação	11 – 33 VDC
Tipo de conexão	¼ - 18 NPT

4.2.4 Componentes para Manutenção da Rede Pneumática

O sistema de controle de passagem de ar das servoválvulas é muito susceptível ao acúmulo de impurezas nas superfícies de seu mecanismo, o que resulta em uma diminuição de desempenho e redução da sua vida útil. Desta forma, se faz necessário a introdução de uma unidade de filtragem para garantir ao circuito pneumático ar purificado e livre de umidade. Outro fator importante consiste na necessidade de assegurar a estabilidade da pressão de trabalho na linha de suprimento. Para tanto, é necessária a inclusão de uma válvula reguladora de pressão, caso ocorra sobrepressão na linha de pressão. É necessário também um vaso de pressão para reduzir as flutuações da pressão de trabalho decorrentes das variações de demanda de consumo da linha (Kunz, 2006). As especificações da válvula reguladora e filtro são apresentados na Tabela 4.5 e os dados do vaso de pressão na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 Válvula reguladora de pressão (Festo Corporation, 2007)

Código	LFR-1/4-D-MINI
Escala grau de filtragem	40 µm
Faixa de regulação de pressão	0,5 - 12 bar
Pressão de entrada	1 - 16 bar
Vazão nominal padrão	1.400 l/min

Tabela 4.6 Vaso de pressão (kunz, 2006)

Norma	NBR 8460
Pressão de serviço	17 bar
Massa	45 Kg
Volume	108 l

4.2.5 Componentes para a Montagem do Sistema Pneumático

Nesta seção são listados todos os elementos conectivos e dispositivos necessários para a montagem do sistema pneumático. São eles: luvas, conectores, mangueiras, silenciadores, etc. Estes componentes e as quantidades necessárias estão dispostos na forma de orçamento no Anexo III.

4.3 Análises Estruturais

Os elementos do robô que contribuem para os atributos estruturais são as próprias

estruturas dos atuadores lineares pneumáticos e dos elementos de conexão entre eles (guias, placas metálicas, parafusos e base). A influência mútua do design e da resistência de cada componente no conjunto resulta nos atributos estruturais do robô cartesiano pneumático.

Uma das variáveis críticas do robô cartesiano pneumático é a posição e intensidade da carga em relação aos eixos (dentro do volume de trabalho), pois um mau dimensionamento pode acarretar uma deformação elástica significativa na estrutura, alterando assim a precisão de posicionamento do efetuator terminal. Para analisar o comportamento desta variável, implementou-se um modelo simplificado do sistema e realizou-se uma análise por elementos finitos através do ANSYS (ANSYS, 2006).

Algumas observações devem ser enfatizadas a respeito da simulação por elementos finitos no ANSYS, tais como:

- A carga utilizada na simulação é de 15 Kg. Esta carga representa de forma aproximada a massa da carga do robô (10 Kg de acordo com os requisitos de projeto) mais a massa do atuador e transdutor do eixo Z do robô (4,7 Kg);
- A carga foi aplicada de forma concentrada, nas posições de máximas solicitações de esforços fletores da estrutura ($X = 500$ mm e $Y = 500$ mm).
- Os desenhos fornecidos pelos fabricantes dos cilindros atuadores foram simplificados para facilitar a geração da malha pelo *software* ANSYS;
- O resultado apresentou uma deflexão máxima de 0,244 mm na extremidade de final de curso do eixo Z (Fig. 4.3).

Devido à dificuldade intrínseca de modelar componentes, tais como buchas e guias, a análise dinâmica da estrutura sem a possibilidade de dispor de um protótipo é inviável. Assim, os problemas de natureza dinâmica somente poderão ser analisados após a construção de um protótipo.

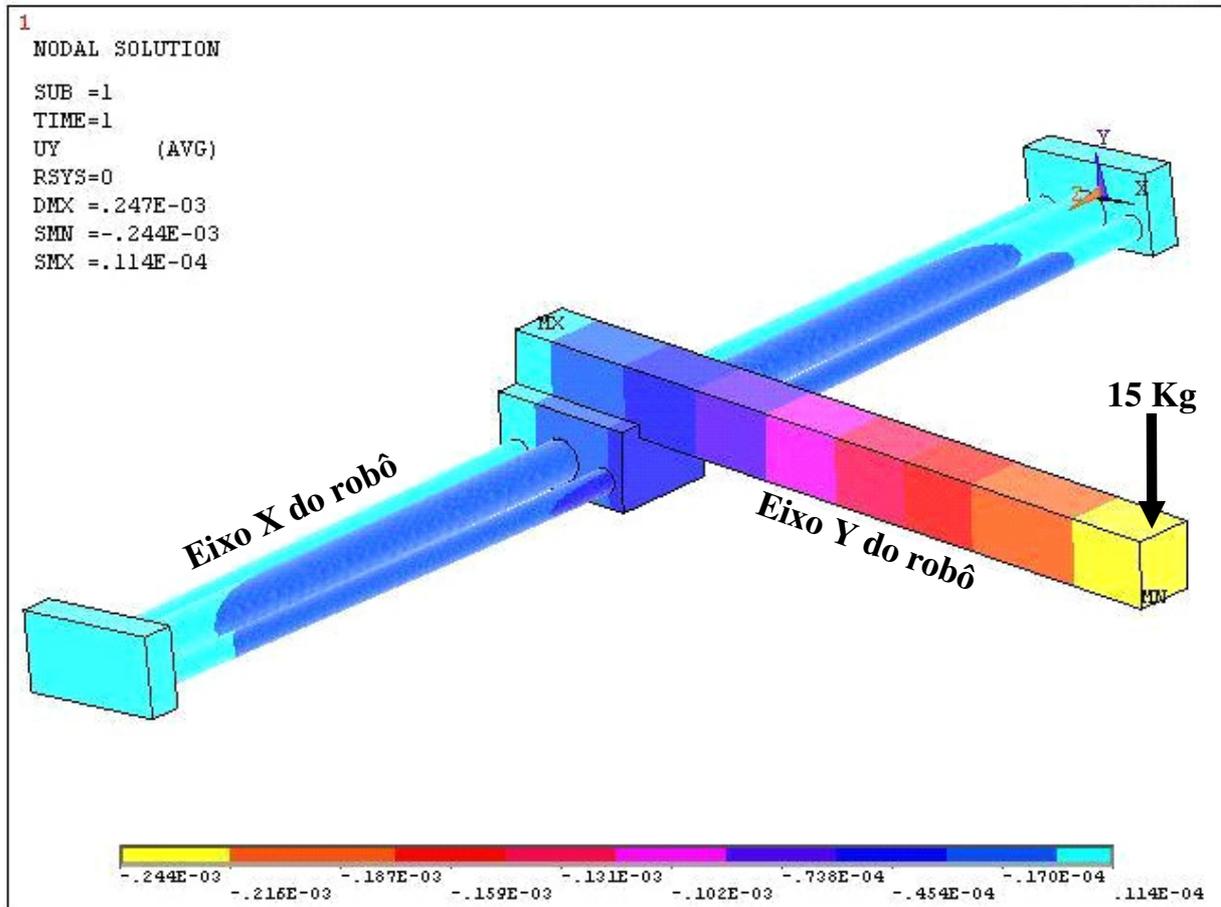


Figura 4.3 Simulação de esforço estático entre o eixo X e o eixo Y

4.4 Carga Estática Máxima

A análise que segue refere-se ao dimensionamento do sistema considerando a sua capacidade de carga estática.

Para a determinação da carga máxima admitida pelo robô é necessário levar em consideração os limites dos momentos transversais e a força de atuação do cilindro pneumático (Tabela 4.1). Como os atuadores possuem as mesmas características estruturais e o atuador do eixo X é responsável pela movimentação da massa total do sistema (massa dos atuadores do eixo Y e Z, massa dos transdutores do eixo Y e Z mais a massa da carga), assume-se que a carga máxima admitida é a calculada através das forças e momentos no eixo X.

Para o cálculo, definem-se as variáveis a seguir:

F1 - força gravitacional resultante da massa do atuador e transdutor Y;

F2 - força gravitacional resultante da massa do atuador e transdutor Z e da massa da carga admissível;

M_{cY} , M_{cZ} - massa dos cilindros dos eixos Y e Z;

M_{tY} , M_{tZ} - massa dos transdutores dos eixos Y e Z;

M_{carga} - massa da carga do robô;

F_{AT} - força máxima do cilindro. É a mesma para todos os eixos;

L_{atY} - comprimento total do atuador Y (0,5 m);

g - aceleração da gravidade;

4.4.1 Definição do Tipo de Guia

A Fig. 4.4 apresenta as forças relevantes relacionadas ao máximo momento transversal admitido pelo atuador (Tabela 4.1). O momento transversal máximo ocorre no eixo X (M_X), em função da massa da carga (M_{carga}) que os atuadores podem deslocar.

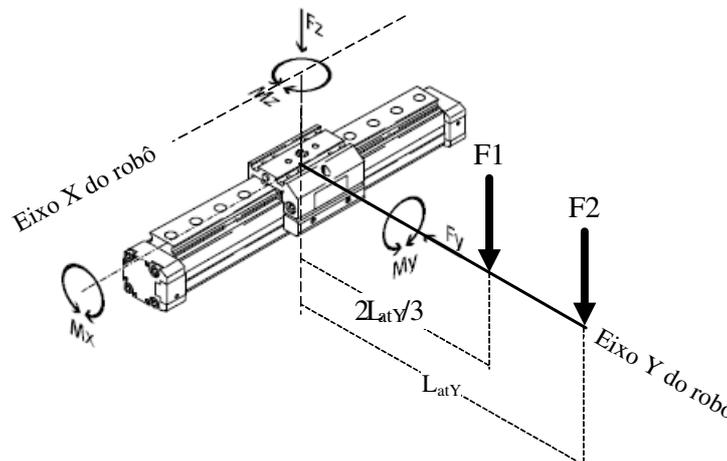


Figura 4.4 Componentes de forças e momentos relacionadas ao atuador do eixo X

Foram calculadas as cargas máximas admissíveis para os dois tipos de guia em função de M_X . Para o uso dos três atuadores com guias do tipo GF, a carga máxima admitida pelo eixo X é de 2,6 Kg, e para o uso dos três atuadores com guias do tipo KF a carga máxima admitida pelo eixo X é de 80,8 Kg.

De posse dessas informações descarta-se o uso de guias do tipo GF, pois a carga máxima suportada pelo eixo X é de apenas 2,6 Kg (em função do momento fletor M_X), muito abaixo dos requisitos de projeto (Tabela 3.5).

4.4.2 Cálculo da Carga Máxima

Definido o uso de atuadores com guias KF, calcula-se a carga máxima admissível pelo atuador do eixo X (M_{carga}). Neste cálculo, considera-se a força do atuador com guias KF e as massas envolvidas na estrutura suportada pelo eixo X. Assim tem-se que:

$$M_{carga} + M_{cY} + M_{tY} + M_{cZ} + M_{tZ} < F_{AT}/g \quad (1)$$

Resultando em uma carga máxima admissível (M_{carga}) de 18,16 Kg.

Segundo Dall'Amico (2005), em cilindros pneumáticos, quando é necessário uma regulação precisa da velocidade e/ou as condições de carga variam consideravelmente, o valor da carga real deve ficar entre 60 a 70% do valor da carga máxima admissível. Portanto para este projeto admite-se 65% do valor da carga máxima admissível, o que resulta aproximadamente em uma capacidade de carga do robô de 11,8 Kg e, conseqüentemente, um coeficiente de segurança de 1,54 ($s = 1,54$). Este resultado deixa uma margem para incertezas relacionadas com as massas dos componentes que venham a ser acoplados à estrutura (margem de 1,8 Kg). Com essas informações pode-se calcular a relação peso/potência do robô. O valor aproximado do peso é de 21,73 Kg enquanto que a máxima carga admissível é de 11,8 Kg, o que resulta em uma relação aproximada de 1,84.

4.5 Orçamento de Componentes

Para suprir os requisitos de projeto em relação ao custo final do robô pneumático, se faz necessário a elaboração de orçamentos para a possível viabilização do mesmo. Portanto, os componentes envolvidos em todas as unidades técnicas (Capítulo 4 ao Capítulo 8) estão especificados e listados na forma de orçamento no Anexo III. É importante salientar que, evidentemente, os valores orçados constituem uma medida de custo em certo período, podendo flutuar devido aos diversos fatores econômicos que definem os custos e preços finais de componentes industriais.

5 UNIDADE TÉCNICA DE ARQUITETURA DE CONTROLE

Segundo Pereira e Lages (2002), os robôs industriais apresentam diferentes interfaces de comunicação, relacionadas com:

- homem-máquina: tem por objetivo permitir a programação dos robôs industriais pelos operadores e apresentar informações sobre o estado atual do robô;
- sensores e atuadores: serve para permitir que os robôs recebam informações para que possam atuar sobre o processo industrial automatizado;
- periféricos: possibilita a interação dos robôs com outros dispositivos de controle (esteiras, motores, etc);
- redes de comunicação industrial: permite que os robôs sejam interligados em rede usando protocolos de comunicação.

Neste trabalho, somente são abordadas a interface com sensores e atuadores e a interface com o operador (Capítulos 7 e 8). As demais consistem de objeto de possíveis trabalhos futuros. O diagrama de blocos da Fig. 5.1 apresenta a relação das interfaces com o módulo de processamento;

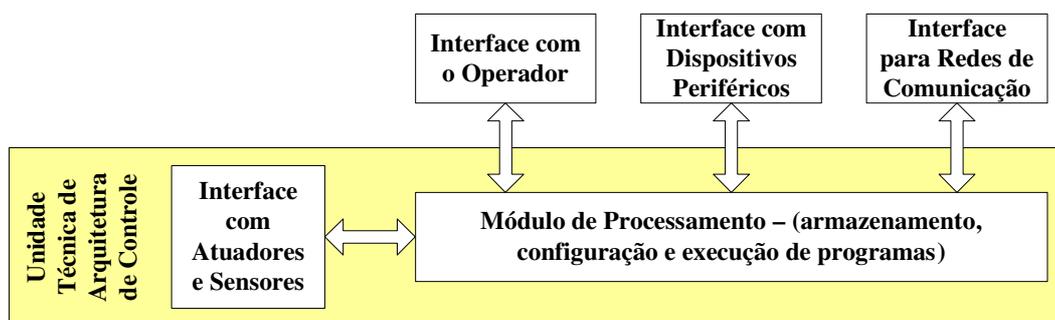


Figura 5.1 Interfaces de comunicação de um robô industrial, fonte: Pereira e Lages (2002)

Esta unidade técnica abrange o estudo e definição da arquitetura de controle do robô cartesiano pneumático e a descrição dos componentes necessários para a sua implementação, de forma a suprir os requisitos de projeto (Tabela 3.5).

No presente projeto, a arquitetura de controle é responsável pelas seguintes ações:

- aquisição de dados provenientes dos atuadores (transdutores de posição e pressão);

- envio dos sinais de controle para os servomotores do robô de acordo os algoritmos de controle (apresentados na **Unidade Técnica de Sistemas de Controle**, Capítulo 8);
- armazenamento e execução dos algoritmos de controle;
- interfaceamento para programação de algoritmos de controle e gerenciamento das variáveis *on-line* (interface para o programador).

De forma geral, a bibliografia pesquisada apresenta muitas formas distintas para denominar esta unidade, variando em muito os conceitos, nomenclaturas e elementos envolvidos, o que pode tornar confuso o entendimento da interface homem - controle - servomecanismo. Para facilitar o emprego da metodologia desenvolvida em outros projetos, é necessário organizar e definir os limites entre as unidades envolvidas no sistema robótico, visando padronizar a metodologia de projeto para robôs industriais.

Existem diferentes configurações de arquitetura de controle para servomecanismos disponíveis no mercado. Destacam-se as seguintes configurações analisadas:

5.1 Arquitetura Integrada Flexível

São as arquiteturas mais difundidas para pesquisa e implementação de protótipos. Também são utilizadas em sistemas de controle que necessitam de grande velocidade de processamento e controle de muitas variáveis simultâneas. São aplicadas geralmente em equipamentos de alta tecnologia (robôs, aeronáutica, aeroespacial, indústria bélica, etc). Possuem como principais características o alto desempenho, robustez, confiabilidade, flexibilidade, facilidade de implementação e preço elevado. Apresentam o módulo de processamento, sistema de aquisição de dados e módulos de saída integrados em uma única placa. São acompanhadas por um *software* para interface com o usuário (programador do algoritmo de controle) que permite o gerenciamento e implementação da estratégia do sistema de controle para o servomecanismo via linguagens de programação de alto nível ou por diagrama de blocos. Os algoritmos de controle implementados no sistema são armazenados e processados pelo módulo de processamento. Dispõem de uma ampla quantidade de portas de entrada e saída de sinais tais como: canais de entrada e saída analógicos, canais de entrada e saída digitais, canais seriais para comunicação e interface para protocolo CAN³, dentre outros. Na maioria das vezes, é necessária a inserção de

³ Protocolo CAN – (*Control Área Network*) barramento de comunicação serial dedicado a dispositivos inteligentes ligados em redes

circuitos condicionadores de sinais de entrada (sinais advindos dos transdutores) e de saída para os servatuadores (sinal para acionamento proporcional da servoválvula) com os objetivos de proteção do sistema e filtragem ou amplificação dos sinais. Este tipo de plataforma está esquematizado na Fig. 5.2, na forma de diagrama de blocos.

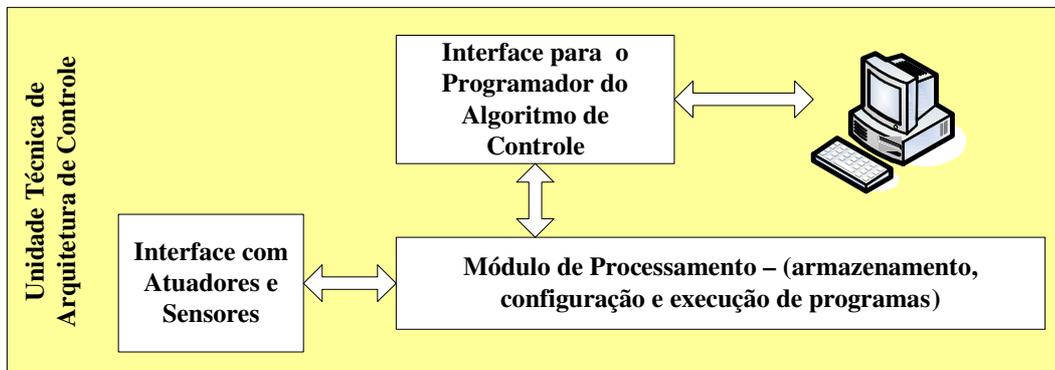


Figura 5.2 Diagrama de blocos de uma arquitetura de controle integrada flexível

A bibliografia apresenta diversas placas empregadas no controle de sistemas servoposicionadores pneumáticos e robóticos. Pode-se citar, a placa DSpace da série DS1100 (DSPACE GmbH, 2007) e a PCL-812PG (Advantech, 2007), como sendo, as mais utilizadas nos trabalhos referenciados.

A seguir, estão relacionados alguns autores que utilizam a placa DSPACE como arquitetura integrada flexível:

- Vieira (1998), Ilchmann et al. (2005), Šitum et al. (2001) desenvolveram sistemas de controle para servoposicionadores lineares pneumáticos e implementaram experimentalmente;
- Samhuri (2005) e Bavaresco (2007) desenvolveram sistemas de controle para robôs cartesianos pneumáticos e implementaram experimentalmente;
- Perondi (2002), Perondi e Guenther (2002) realizaram a identificação experimental de parâmetros de um servoposicionador linear;
- Perondi e Guenther (1999a, 1999b, 2000) e Guenther e Perondi (2004) implementaram estratégias distintas de sistemas de controle em um servoposicionador linear pneumático;
- Andrighetto et al. (2005) desenvolveram e implementaram um robô com juntas rotacionais acionado por atuadores lineares pneumáticos;

- Valdiero (2005) desenvolveu e implementou um robô articulado acionado por atuadores lineares hidráulicos;
- Ramirez et al. (2003) desenvolveram e implementaram um robô do tipo SCARA acionado por motores elétricos;
- Andrighetto et al. (2006) realizaram um estudo comparativo do comportamento do atrito em diversos modelos de atuadores lineares pneumáticos comerciais.

Autores que utilizam a placa PCL-812PG como arquitetura integrada flexível:

- Šitum et al. (2001) desenvolveram e implementaram experimentalmente um servoposicionador linear pneumático realizando a identificação de parâmetros e controle do sistema;
- Šitum et al. (2003, 2005) implementaram estratégias distintas de sistemas de controle em um servoposicionador linear pneumático.

5.2 Arquitetura Integrada Fechada

São as arquiteturas de controle utilizadas em ambientes industriais para controle de servoposicionadores pneumáticos, hidráulicos, motores elétricos, etc. São funcionalmente similares aos CLP's, porém com recursos mais avançados. Os algoritmos de controle, modelagens matemáticas e parâmetros dos servomecanismos já estão pré-determinados e estabelecidos nos módulos de processamento. Desta forma, não podem ser alterados (não possuem interface para o programador dos algoritmos de controle). O módulo de processamento e o sistema de aquisição de dados são separados e independentes para cada servomecanismo. A unidade de processamento possui entradas analógicas, entradas e saídas digitais e, como opcionais modulares, canais de comunicação para redes industriais (Profibus, DeviceNet, Interbus). Estes sistemas são acompanhados de *softwares* próprios para gerenciamento das variáveis e controle, com interface para usuário via PC ou painel digital. Geralmente, estes sistemas permitem apenas o posicionamento ponto-a-ponto dos servomecanismos. As precisões de posicionamento são da ordem de 0,01 mm até 0,8 mm, dependendo das dimensões do atuador pneumático. A representação desta configuração pode ser vista na Fig. 5.3, na forma de diagrama de blocos.

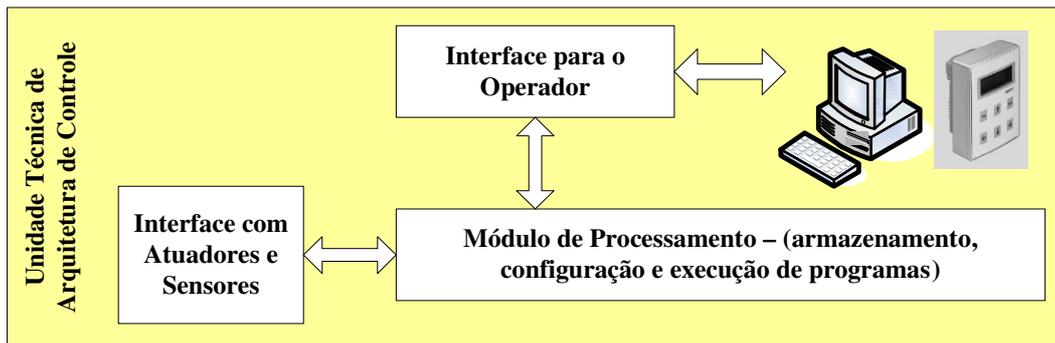


Figura 5.3 Diagrama de blocos de uma arquitetura de controle integrada fechada

Esta arquitetura de controle foi observada nos seguintes trabalhos:

- Yang et al. (2005) utilizaram uma arquitetura integrada fechada da Festo para implementar um robô cartesiano pneumático operado remotamente em tempo real através da Internet utilizando uma câmera CCD (*Charger Coupled Device*).
- Andrighetto et al. (2004) elaboraram um estudo comparativo entre o desempenho e funcionalidade de um controlador implementado através de uma arquitetura integrada fechada (da marca Festo), com relação a controladores P (proporcional), PI (proporcional – integral) e PID (proporcional – integral – derivativo) implementados por meio de uma arquitetura integrada flexível de controle.

5.3 Arquitetura Não-Integrada Flexível

São plataformas que utilizam o sistema computacional de um PC como Módulo de Processamento (armazenamento, configuração e execução de programas). A interface com os atuadores e sensores (sistema de aquisição de dados e módulo de saída) transmite os dados em tempo real para um barramento de comunicação que, por sua vez, comunica-se e envia os dados para o módulo de processamento do PC. De acordo com os algoritmos de controle programados, este módulo processa e retorna os sinais de controle para o sistema de barramento que os transmite para a interface com os atuadores, que acionam o servomecanismo. A interface com o programador geralmente é implementada através de linguagem “C”. O diagrama representativo de uma plataforma não-integrada é apresentado na Fig. 5.4.

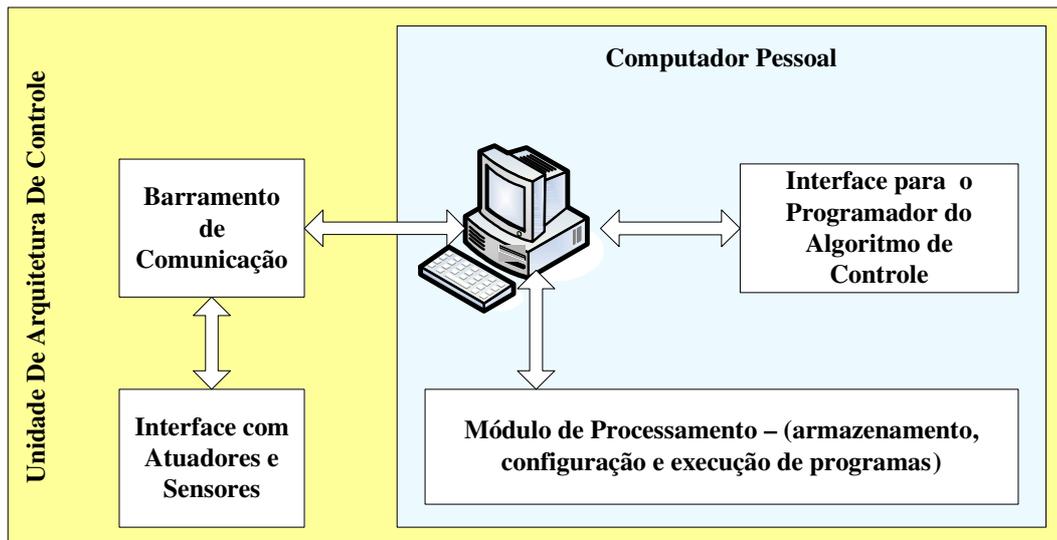


Figura 5.4 Diagrama de blocos de uma arquitetura de controle não-integrada flexível

Este tipo de plataforma foi encontrado nos seguintes trabalhos:

- Lages et al. (2003) apresentam uma avaliação do desempenho de um controlador em tempo-real para um robô articulado implementado através de uma rede IP;
- Kunz (2006) implementou uma arquitetura de controle com plataforma não-integrada em tempo real para um servoposicionador pneumático linear, por meio do sistema operacional UNIX.

Cabe ressaltar que Kunz (2006), em sua proposta de arquitetura de controle não-integrada, valeu-se unicamente de *softwares* de código aberto e de livre utilização e hardwares de baixo custo, visando uma solução economicamente atraente. A arquitetura de controle apresentou desempenho adequado para as necessidades dos servoposicionadores pneumáticos lineares, utilizando inclusive uma linguagem de programação do sistema de controle na forma de diagramas de blocos (SCILAB/Scicos), o que facilita o trabalho do programador. O sistema encontra-se em fase de aperfeiçoamento, visando deixar a interface com o programador de algoritmo de controle mais amigável.

5.4 Arquitetura de Controle para o Robô Cartesiano Pneumático

Define-se o emprego da placa DSpace (série DS1100) para o projeto, visto que, a maioria dos trabalhos estudados utiliza esta, como elemento principal da arquitetura de controle, cujo seu desempenho foi avaliado e comprovado, obtendo resultados adequados como solução para o controle de servoposicionadores pneumáticos. Os dados técnicos da placa são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Especificações técnicas da placa definida para o projeto (DSpace)

Fabricante	DSpace – (Digital Signal Processing and Control Engineering)
Modelo	DS1103
Processador	PPC 750GX – 1 GHz
ADC	16 canais – 16 bit – tensão de entrada $\pm 10V$ – tempo de conversão $1\mu s$ a $800ns$
DAC	8 canais – 16 bit – tensão de saída $\pm 10V$ – tempo de estabilização $5\mu s$
I/O digitais	32 canais
Encoder incremental digital	6 canais – frequência máxima de entrada 1,65 MHz
Encoder incremental analógico	1 canal
CAN interface	1 canal
Serial interface	1 canal – compatível RS232/RS422
Suporte para <i>host</i>	<i>Plug and Play</i>

Uma grande vantagem do uso desta solução é a total integração com o sistema Matlab/Simulink, liberando o programador do algoritmo de controle do desenvolvimento de rotinas para aquisição e processamento de dados (Vieira, 1998).

É importante ressaltar alguns aspectos desta solução:

- o período de amostragem utilizado na maioria dos trabalhos foi entre 0,5 ms a 1 ms;
- os recursos tecnológicos desta placa são de elevado desempenho. Desta forma, deve ser avaliada a possibilidade de utilização de uma placa para o controle de mais de um robô, o que amortizaria o custo final de cada robô;
- é o componente de maior custo no atual projeto. A implementação futura da arquitetura de controle desenvolvida por Kunz (2006), uma vez resolvidos os problemas de interface, poderia reduzir significativamente os custos do projeto;
- para reduzir ruídos provenientes da instrumentação é necessária a inclusão de circuitos de condicionadores de sinais dos transdutores do sistema. Em Perondi (2002), por exemplo, para uma taxa de amostragem de 0,5 ms foi utilizado um filtro analógico (passa-baixa) com frequência de corte em 400 Hz para cada transdutor (posição e pressão).

Para a contextualização desta unidade no projeto global, a arquitetura de controle adotada e os elementos relacionados podem ser vistos na forma de diagrama de blocos na Fig. 5.5;

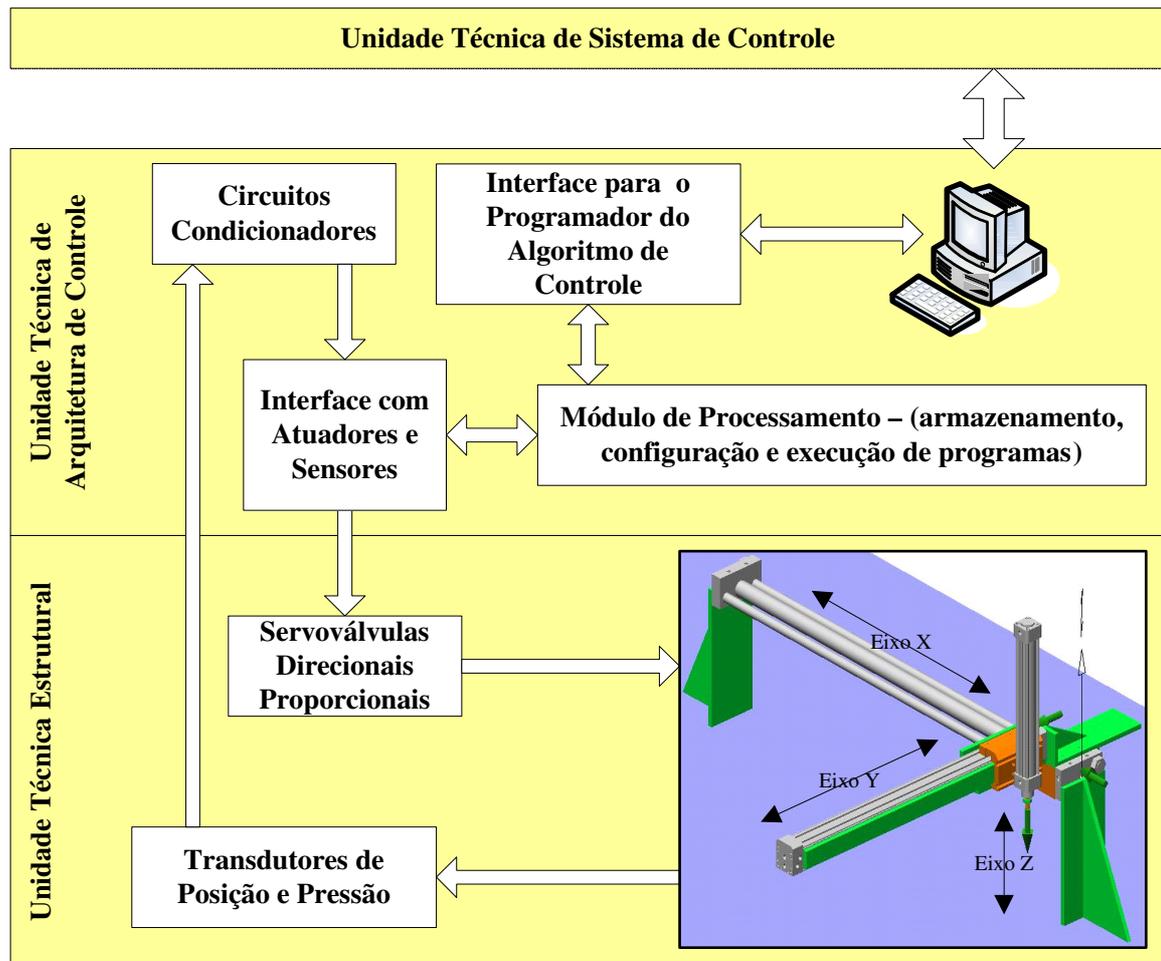


Figura 5.5 Relação entre as unidades técnicas de estrutura do robô, de arquitetura de controle e de sistema de controle

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 a possibilidade de testar estratégias de controle através de simulações numéricas para a visualização do comportamento dinâmico do servomecanismo, extraindo informações pertinentes para a definição dos requisitos dos componentes mecânicos, tais como velocidades, acelerações, torques e forças. Esta unidade contempla a definição e descrição do modelo matemático dos servoposicionadores do robô cartesiano pneumático proposto.

A modelagem adotada neste projeto é baseada em Perondi (2002), no qual, o autor desenvolve o equacionamento de um servoposicionador pneumático visando a sua aplicação em controle preciso com compensação de atrito baseado em modelo.

O sistema servoposicionador para cada eixo do robô é composto de uma servoválvula direcional (seção 4.2.2), um atuador pneumático (seção 4.2.1) e um transdutor de posição (seção 4.2.3.1).

O funcionamento do sistema se dá através do acionamento da servoválvula por uma tensão de controle u , que por sua vez aciona um solenóide deslocando o carretel deslizante proporcionalmente com a tensão de controle. Por exemplo, o deslocamento do carretel deslizante ($x_v(u)$) direciona o ar sob pressão de suprimento (p_s) para a câmara 1 do cilindro pneumático. A pressão da câmara 1 (p_1) é menor do que a pressão de suprimento (p_s), isto gera uma vazão mássica de ar para dentro da câmara 1 (q_{m1}). Simultaneamente, o carretel conecta a câmara 2 a atmosfera, como a pressão na câmara 2 (p_2) é maior do que a pressão atmosférica (p_{atm}) surge uma vazão mássica de ar da câmara 2 para a atmosfera (q_{m2}). Com isso, a pressão na câmara 1 aumenta e a pressão na câmara 2 diminui. A diferença de pressões gera a força que provoca o deslocamento do embolo. O desenho esquemático do funcionamento do sistema é apresentado na Fig. 6.1.

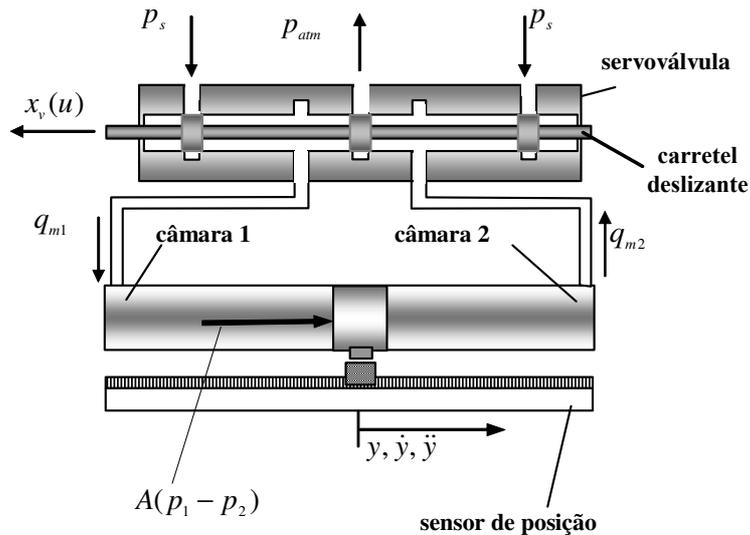


Figura 6.1 Desenho esquemático do funcionamento do servoposicionador pneumático

O modelo adotado envolve o estudo de três sistemas co-relacionados, cada um com seu conjunto de equações. Estes sistemas representam a dinâmica do pistão pneumático, as vazões e pressões na servoválvula e a dinâmica do atrito.

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.

6.1.1 Dinâmica das Pressões nas Câmaras do Cilindro

Uma alternativa para a descrição da vazão mássica de ar no sistema é através do uso do princípio da conservação da energia. Para a visualização das variáveis relacionadas, apresenta-se na Fig. 6.2 um desenho esquemático em corte do atuador pneumático.

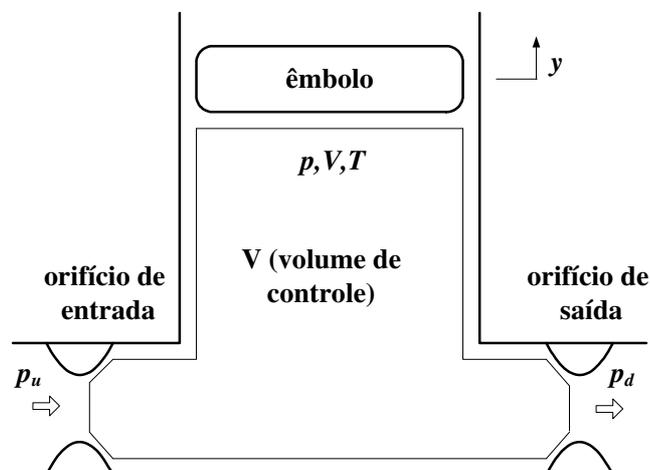


Figura 6.2 Volume de controle com domínio variável, fonte: Perondi e Guenther (2003)

As equações (2) e (3) representam a dinâmica das pressões nas câmaras do cilindro em função do movimento do êmbolo do pistão e das vazões na servoválvula (Perondi, 2002):

$$\dot{p}_1 = -\frac{Ar\dot{y}}{Ay + V_{10}} p_1 + \frac{RrT}{Ay + V_{10}} q_{m1}(p_1, u) \quad (2)$$

$$\dot{p}_2 = -\frac{Ar\dot{y}}{A(L - y) + V_{20}} p_2 + \frac{RrT}{A(L - y) + V_{20}} q_{m2}(p_2, u) \quad (3)$$

Nestas equações, p_1 e p_2 são as pressões nas câmaras 1 e 2, A é a área do embolo, R é a constante do gás, T é a temperatura do ar de suprimento, L é o comprimento útil do cilindro atuador, y é o deslocamento do embolo, \dot{y} é a velocidade do êmbolo, V_{10} e V_{20} são os *volumes mortos* nas câmaras 1 e 2 (incluindo as tubulações); r é a relação entre o calor específico do ar a pressão constante C_p e o calor específico do ar a volume constante C_v ($r = C_p/C_v$).

Assume-se que as vazões mássicas são funções das pressões no cilindro e da tensão u aplicada à servoválvula, ou seja, $q_{m1} = q_{m1}(p_1, u)$ e $q_{m2} = q_{m2}(p_2, u)$.

6.1.2 Equilíbrio das Forças no Cilindro

O equilíbrio de forças no pistão do cilindro é estabelecido através da Segunda Lei de Newton. Para a visualização das variáveis relacionadas a este item, apresenta-se na Fig. 6.3 um desenho esquemático do sub-sistema mecânico.

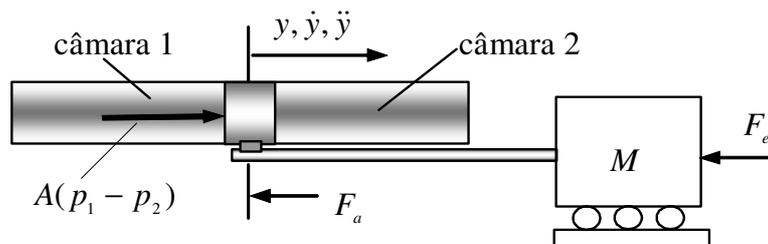


Figura 6.3 Equilíbrio de forças no êmbolo do cilindro atuador, fonte: Perondi e Guenther (2003)

A equação (4) representa o equilíbrio das forças no pistão:

$$M\ddot{y} + F_a + F_e = A(p_1 - p_2) \quad (4)$$

As equações (2), (3) e (4) constituem um modelo dinâmico de quarta ordem do sistema pneumático de posicionamento, cujas variáveis de estado podem ser $x = [y \quad \dot{y} \quad p_1 \quad p_2]^T$. Este modelo inclui as não linearidades caracterizadas pelo produto e quociente de variáveis de estado presentes nas relações (2) e (3), pela parcela de atrito estático incluída em F_a e pelas relações

não lineares $q_{m1} = q_{m1}(p_1, u)$ e $q_{m2} = q_{m2}(p_2, u)$ que descrevem as vazões mássicas (ver Perondi e Guenther, 2003).

6.2 Modelo Matemático da Servoválvula

As vazões mássicas na servoválvula são estudadas de acordo com a teoria da mecânica de fluidos que trata sobre o escoamento de fluidos compressíveis através de orifícios. A Fig. 6.3 mostra um desenho esquemático representativo desta situação de escoamento.

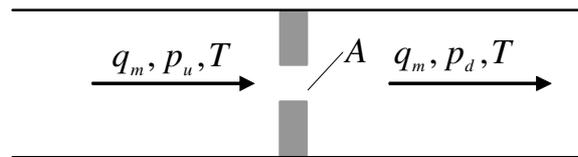


Figura 6.4 Estrangulamento da seção transversal de uma tubulação, fonte: Perondi e Guenther (2003)

A modelagem depende da relação p_d / p_u entre as pressões a jusante (p_d) e montante (p_u) que é resultante da abertura da área (A_0) do orifício de área variável. A vazão mássica assume comportamento subsônico para $p_d / p_u > p_{crít}$, onde $p_{crít}$ é definida como a relação de pressões crítica que caracteriza a transição do regime de escoamento saturado para o subsônico ($p_{crít} = 0,52$). A Fig. 6.5 apresenta o gráfico da vazão mássica em relação a $p_{crít}$.

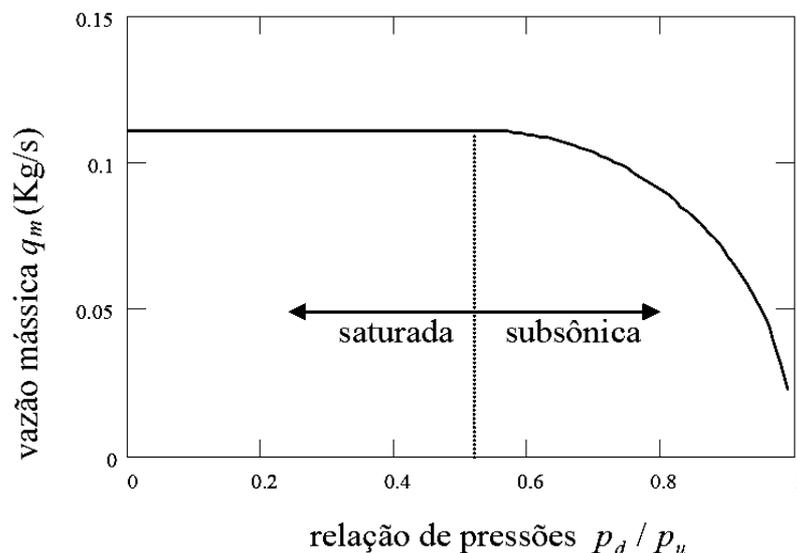


Figura 6.5 Relação teórica entre vazão mássica e $p_{crít}$, fonte: Perondi e Guenther (2003)

Assim, para $p_d / p_u \leq p_{crít}$ o escoamento é saturado e a equação da servoválvula é representada por um valor fixo expresso por:

$$q_m = A_0 p_u \sqrt{\frac{r}{RT} \left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{r+1}{r-1}}} \quad (5)$$

Onde A_0 é a área geométrica de passagem de ar na servoválvula. Para $p_d / p_u > p_{crít}$ (escoamento subsônico) tem-se a seguinte relação entre vazão mássica e a relação de pressões p_d / p_u :

$$q_m = A_0 p_u \sqrt{\frac{2r}{(r-1)RT} \left[\left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{2/r} - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{r+1/r} \right]} \quad (6)$$

6.3 Modelo Matemático do Atrito

Seguindo a modelagem matemática do servoposicionador apresentada por Perondi (2002), adota-se para o atrito o modelo denominado Luge. Este modelo foi proposto por Canudas et al. (1995) e fundamenta-se no entendimento do mecanismo microscópico do fenômeno de atrito, levando em consideração o contato entre as superfícies, que a nível microscópico, são muito irregulares. As equações que representam o modelo do atrito Luge são:

$$\frac{dz}{dt} = \dot{y} - \frac{|\dot{y}| \sigma_0}{g(\dot{y})} z \quad (7)$$

$$g(\dot{y}) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(\dot{y}/v_s)^2} \quad (8)$$

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{y} \quad (9)$$

A Eq. (7) representa a deformação média dos elementos elásticos em contato, onde z é deformação no movimento de pré-deslizamento, \dot{y} é a velocidade relativa entre as duas superfícies e σ_0 é o coeficiente de rigidez elástica.

A Eq. (8) é uma função que depende de fatores como as propriedades dos materiais, lubrificação e a temperatura. Nesta seção, F_c é a força de atrito seco (ou de Coulomb), F_s é a força de atrito estático e v_s é a velocidade de Stribeck.

A Eq. (9) representa a força de atrito gerada pela reação ao movimento dos elementos elásticos em contato, onde σ_0 é o coeficiente de rigidez elástica, σ_1 é um coeficiente de amortecimento e σ_2 é o coeficiente de amortecimento viscoso.

Os quatro parâmetros estáticos σ_2 , F_c , F_s e v_s (Tabela 6.1) foram estimados com a construção de um mapa estático realizado através de medições de movimentos com velocidade constante, ver Perondi e Guenther (2003).

Os parâmetros dinâmicos σ_0 e σ_1 (Tabela 6.1) foram estimados a partir de comparações de simulações com resultados experimentais (ver Perondi, 2002).

Tabela 6.1 Valores dos parâmetros estáticos e dinâmicos para o atrito, fonte: Perondi e Guenther (2003)

Direção	σ_0 (N/m ²)	σ_1 (Ns/m)	σ_2 (Ns/m)	v_s (m/s)	F_c (N)	F_s (N)
$\dot{y} > 0$	6,3.106	8460	90,4	0,02	35,3	42
$\dot{y} < 0$	6,3.106	8460	89,3	0,02	30,4	35

6.4 Modelo Final

O desempenho do modelo apresentado pode ser visualizado na Fig. 6.6, onde mostra a similaridade entre a resposta experimental e a resposta simulada com a utilização do modelo implementado no Simulink, com um controlador do tipo proporcional. As discordâncias entre um sinal e outro são observadas onde ocorrem as inversões de sentido do servoposicionador. Isto provém das incertezas e aleatoriedades que ocorrem na dinâmica do atrito.

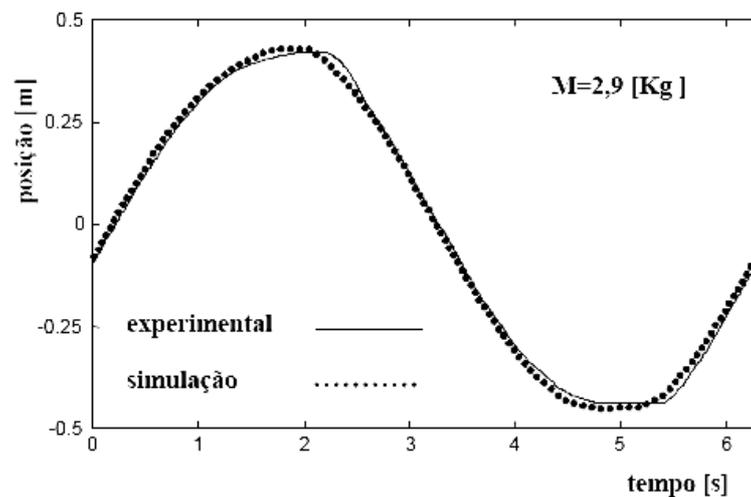


Figura 6.6 Comparação entre a resposta do sistema real com simulado da trajetória do êmbolo do cilindro, fonte: Perondi e Guenther (2003)

Na Fig. 6.7 é apresentado o diagrama esquemático do modelo matemático adotado, para um eixo do robô pneumático.

Os parâmetros do sistema pneumático do modelo matemático utilizado são descritos na Tabela 6.2.

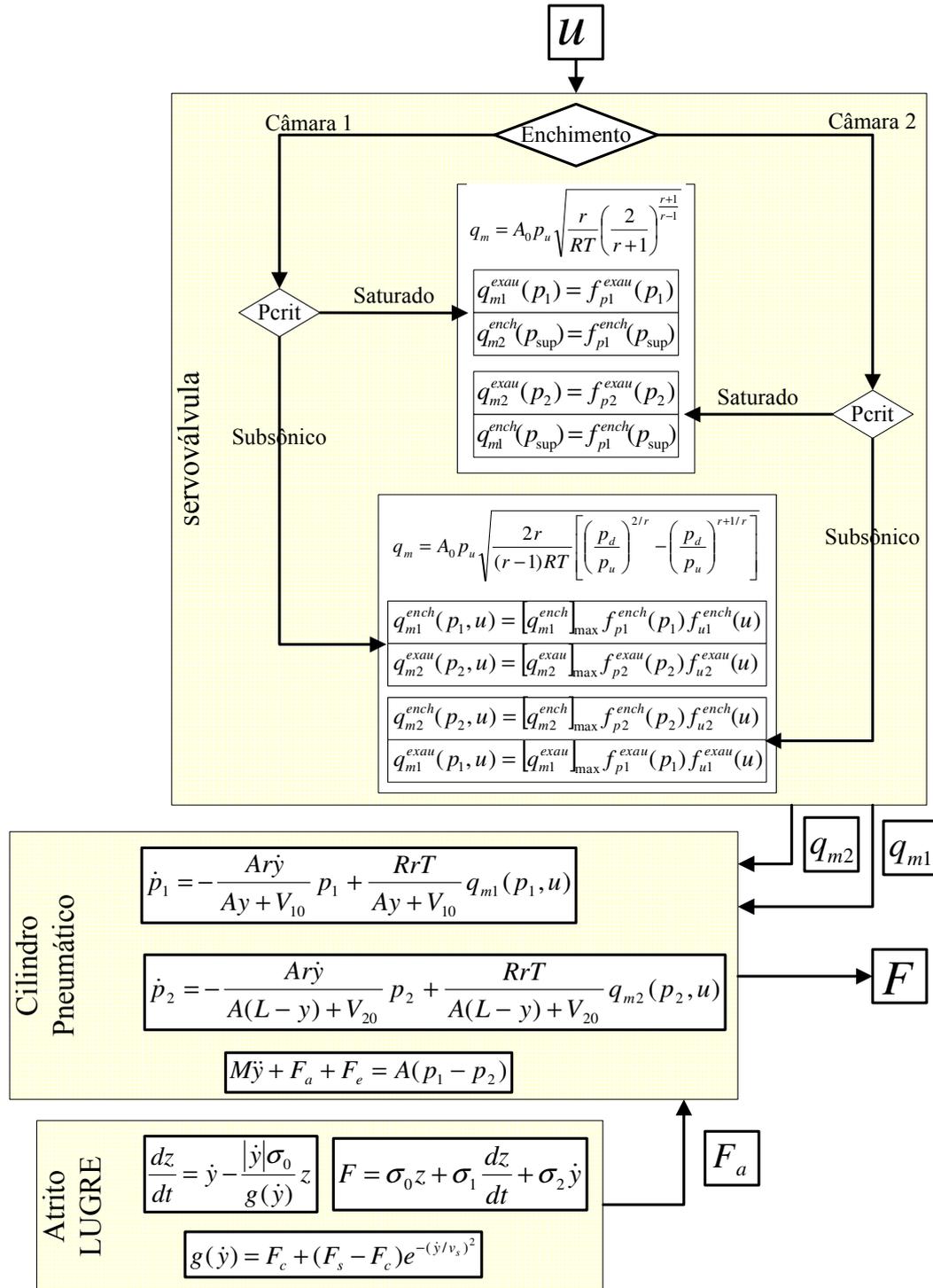


Figura 6.7 Diagrama representativo do modelo matemático do servoposicionador com atrito

Tabela 6.2 Valores numéricos dos parâmetros do sistema, Perondi e Guenther (2003)

Parâmetro	A	r	R	V ₁₀	V ₂₀	T	M	p _{sup}	p _{atm}
Valor	4,91.10 ⁻⁴	1,4	286,9	1,96.10 ⁻⁶	4,9.10 ⁻⁶	293	2,9	6.10 ⁵	10 ⁵
Unidade	m ²	adimensional	JKg/K	m ³	m ³	K	Kg	N/m ²	N/m ²

7 UNIDADE TÉCNICA DE SISTEMA DE CONTROLE

Esta unidade é responsável pela definição, projeto e análise do controlador proposto para o robô. O principal objetivo é atingir os requisitos de projeto que são apresentados na Tabela 3.5.

As principais técnicas de controle utilizadas em servoposicionadores lineares encontradas na bibliografia são;

- controle linear (PID e realimentação de estados) - são limitados por basearem-se em modelos lineares e apresentam bons resultados apenas nas vizinhanças do ponto de linearização, como na posição central do atuador pneumático;
- controle por estrutura variável (*Sliding Mode Control*) - apresentam bons resultados com comportamento robusto quanto a variações dos parâmetros do sistema (carga e pressão de suprimento);
- controle baseado na interpretação de divisão em dois subsistemas - apresentam bons resultados, porém necessitam de um modelo matemático acurado do sistema onde serão aplicados, isto implica em um grande trabalho experimental de identificação do sistema.

Considerando-se que existem diversas técnicas de controle utilizadas em servoposicionadores, cabe ao projetista do robô avaliar e implementar a técnica que melhor enquadra-se à tarefa de controle pretendida. Mais detalhes sobre as diversas técnicas de controle em Ogata (1998), Perondi (2002) e Kunz (2006).

7.1 Definição do Sistema de Controle

Nesta seção são apresentados os resultados dos trabalhos tomados como referência na determinação do sistema de controle do robô. O trabalho realizado por Perondi e Guenther (2000) trata do projeto e implementação de um sistema de controle por Modos Deslizantes (*Sliding Mode Control* – SMC) para um servoposicionador linear pneumático, que além de apresentar resultados experimentais, fornece uma comparação de desempenho com relação a um sistema de controle por realimentação de estados (PVA). Alguns resultados são apresentados a seguir.

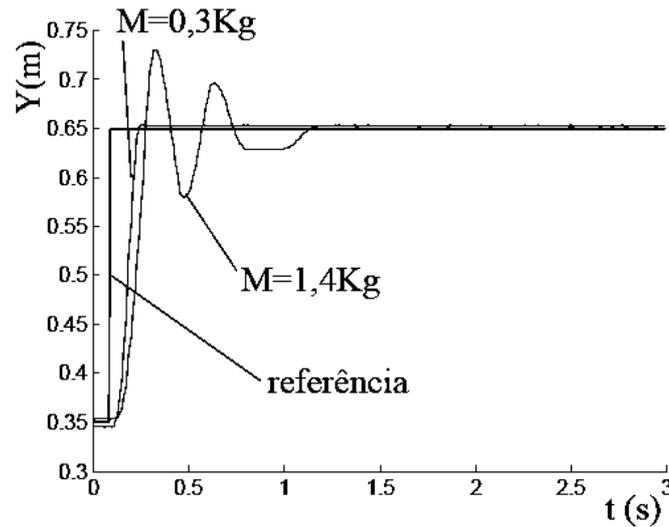


Figura 7.1 Resposta do servoposicionador por controle PVA, fonte: Perondi e Guenther (2000)

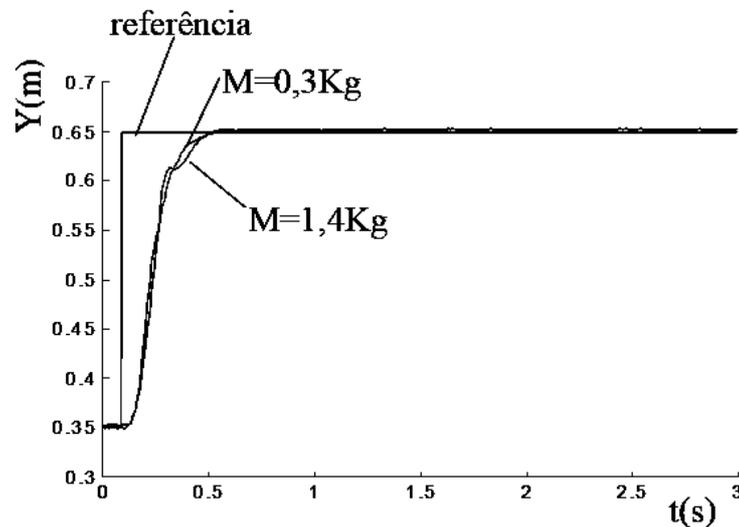


Figura 7.2 Resposta do servoposicionador por controle SMC, fonte: Perondi e Guenther (2000)

As curvas apresentadas nas figuras 7.1 e 7.2 mostram que para uma massa de 0,3 Kg, ambos os controladores obtiveram bons resultados, com erros de regime menores que $\pm 0,2$ mm. Para o caso de uma massa de 1,4 Kg, percebe-se que o controlador SMC mantém o comportamento da resposta relativamente próximo ao do caso com massa de 0,3 Kg. Por outro lado, a resposta do controlador PVA é excessivamente oscilatória e com tempo de assentamento muito maior, além de apresentar um grande sobrepasso.

O atributo de robustez evidenciado pelo sistema de controle SMC (menor oscilação no sinal de resposta em relação à variação da carga submetida), é determinante para o desempenho do robô proposto por este projeto, pois o sistema de controle tem que garantir um comportamento preciso mesmo na presença de variação da carga de trabalho do robô (veja os requisitos de projeto, apresentados na Tabela 3.5).

Em Guenther e Perondi (2004) é apresentada uma proposta de controle para um servoposicionador pneumático baseada na técnica de Controle em Cascata (controle baseado na interpretação de divisão em dois subsistemas). Neste trabalho, além de ser apresentado o desenvolvimento do controlador em cascata, é apresentado também um estudo comparativo com os controladores P, PID e PVA. As curvas resultantes podem ser observadas nos gráficos 7.3 e 7.4.

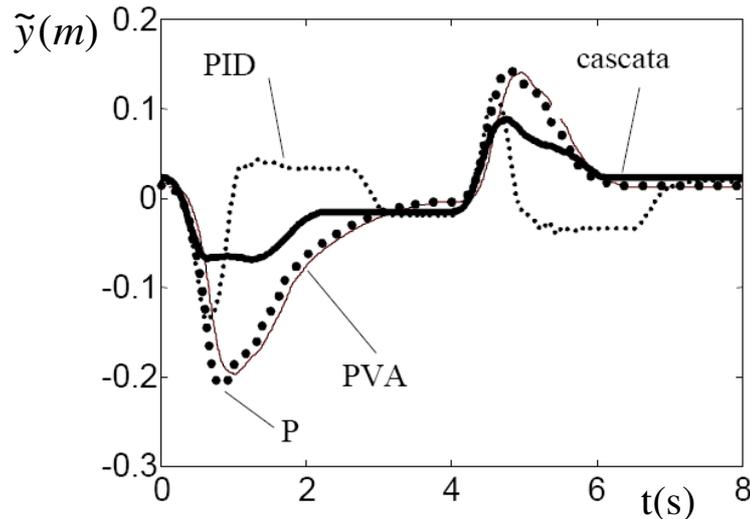


Figura 7.3 Erros de seguimento para uma trajetória polinomial, obtidos com os controladores P, PID, PVA e em cascata, fonte: Guenther e Perondi (2004)

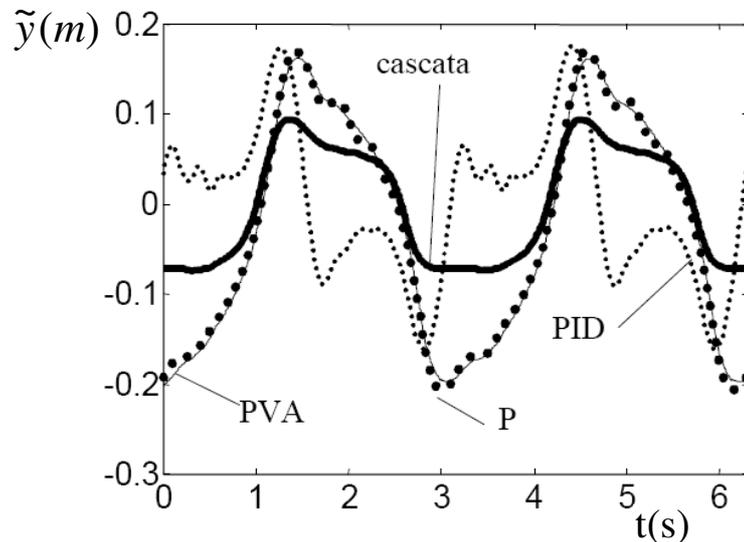


Figura 7.4 Erros de seguimento para uma trajetória senoidal, obtidos com os controladores P, PID, PVA e em cascata, fonte: Guenther e Perondi (2004)

Analisando as figuras 7.3 e 7.4, observam-se menores erros de posicionamento do controlador em cascata em comparação com os demais controladores (P, PID e PVA).

No trabalho proposto por Guenther e Perondi (2004), o controle em cascata é implementado sem a adição da modelagem do atrito ao modelo do servoposicionador. Os autores

atribuem a esse motivo o fato dos resultados apresentarem erros de seguimento de posição da ordem $\pm 0,1m$. Apesar dos erros serem significativos, estes resultados servem para avaliar o desempenho geral dos controladores.

Os trabalhos desenvolvidos por Perondi (2002) e Guenther et al. (2006) introduzem um esquema de compensação do atrito ao controlador em cascata (resultando no Controle em Cascata com Compensação de Atrito). Os resultados desta estratégia estão apresentados na Fig 7.5.

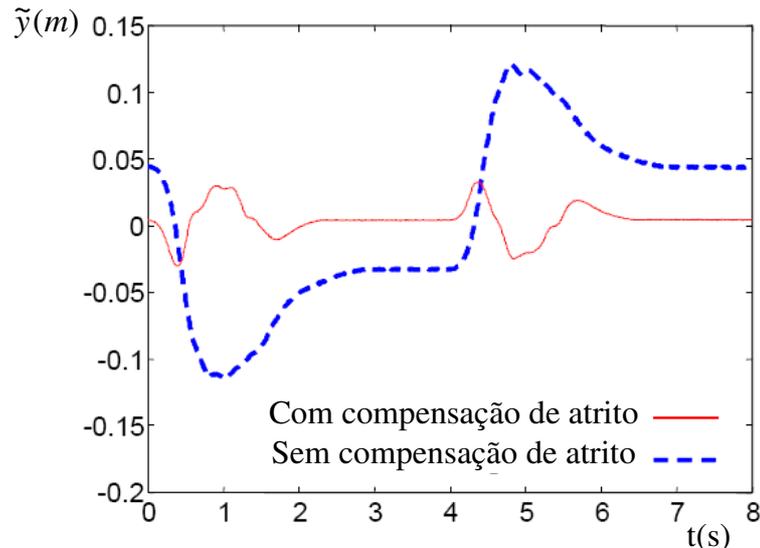


Figura 7.5 Erros de seguimento para a trajetória polinomial com Controle em Cascata e com Controle em Cascata com Compensação de Atrito, fonte: Guenther et al. (2006)

Observa-se na Fig. 7.5 que o controlador em cascata com compensação de atrito apresenta melhor desempenho do que a versão sem a compensação. Com base nos resultados apresentados constata-se que o controle:

- por SMC apresenta maior robustez e desempenho em relação ao controlador PVA;
- em cascata é superior em desempenho e precisão com relação aos controladores P, PID e PVA;
- cascata com compensação de atrito é superior em desempenho e precisão do que o controlador em cascata sem compensação.

Com base nos trabalhos estudados define-se a utilização do sistema de controle por SMC para o robô. O controle por modos deslizantes mostrou algumas características significativas para a definição do seu uso neste trabalho: facilidade de projeto, não necessidade de um modelo acurado, aplicabilidade a sistemas não-lineares e robustez a variações paramétricas. Além de apresentar resultados experimentais de desempenho e precisão de acordo com os requisitos de projeto (Tabela 3.5).

Outro fator determinante foi o estudo do trabalho realizado por Ning e Bone (2005), o qual apresenta resultados experimentais de um servoposicionador pneumático controlado por SMC. O trabalho relata que, para uma carga de 10,8 Kg e 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.

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. 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 (Fig. 7.6). 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).

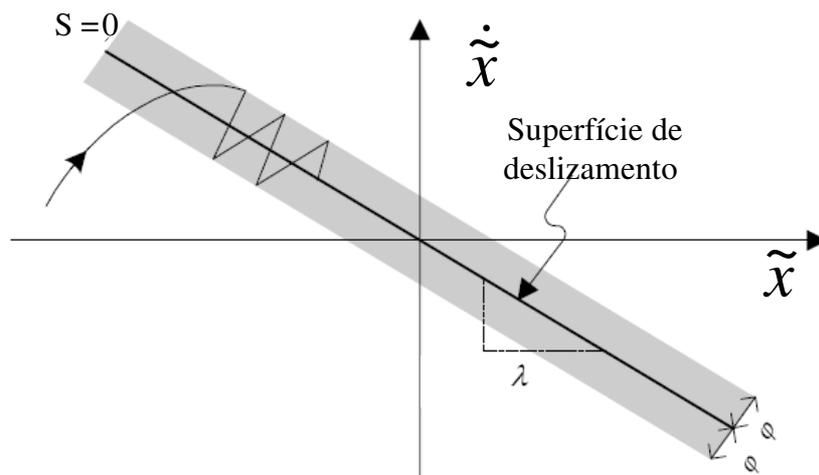


Figura 7.6 Superfície de deslizamento, fonte: Šitum et al. (2003)

7.2.1 Projeto do Controlador SMC

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

distintas. A primeira consiste em definir uma superfície de deslizamento apropriada e a segunda no projeto dos sinais de controle que deverão ser chaveados de forma a dirigir o estado da planta para a superfície de deslizamento e, após atingir a superfície, mantê-lo em regime de deslizamento (Perondi e Guenther, 2000).

7.2.1.1 Fase 1 – Definição da Superfície de Deslizamento

Segundo Šitum et al. (2003), a equação no espaço de estados generalizada para sistemas do tipo SISO (com apenas uma entrada e uma saída – *Single Input Single Output*) é definida por:

$$\dot{x}^n = f(X,t) + b(X,t)u(t) \quad (10)$$

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

Parte-se da premissa que o modelo representado pela Eq. (10) apresente incertezas com relação às funções $f(X,t)$ e $b(X,t)$ assumidas contínuas (por exemplo; por imperfeições de modelagem matemática). Esta relação de incertezas é denominada como erro de rastreamento, o qual relaciona o vetor de estados (X) a um estado adicional denominado estado de referência ($X_d = [x_d \ \dot{x}_d \ \dots \ x_d^{(n-1)}]$) o qual deve ser alcançado pelo vetor de estados X . O vetor de erro de rastreamento é expresso através da Eq. (11).

$$\tilde{X} = X - X_d = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \dot{\tilde{x}} \\ \vdots \\ \tilde{x}^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

O erro de rastreamento representa a diferença entre a saída de interesse (x) e a referência (x_d). A definição do erro de rastreamento nulo ($\tilde{X} = 0$), determina que a saída de interesse é igual a referência. Com esse objetivo, a lei de controle deve garantir que \tilde{X} tenda a zero a medida que o tempo avança. É importante ressaltar que o rastreamento deve ser obtido a despeito das incertezas no modelo. A superfície de deslizamento é definida por:

$$s(X,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \quad (12)$$

A Eq. (12) 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 ($n=3$), obtém-se a seguinte superfície de deslizamento:

$$s(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 \tilde{x} = \ddot{\tilde{x}} + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} \quad (13)$$

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

$$S = c_1(x_d - x) + c_2(\dot{x}_d - \dot{x}) + (\ddot{x}_d - \ddot{x}) \quad (14)$$

A Eq. (14) define a superfície de deslizamento para o problema de seguimento de uma trajetória de 3ª ordem. Onde $x_d - x$ é o erro de posição (e), $\dot{x}_d - \dot{x}$ é o erro de velocidade (\dot{e}) e $\ddot{x}_d - \ddot{x}$ é o erro de aceleração (\ddot{e}).

7.2.1.2 Fase 2 – Definição da Lei de Controle

Surgenor et al. (1995) propõem um controlador com sinal de controle dado por:

$$u = -V_{\max} \operatorname{sgn}(S) \quad (15)$$

Onde V_{\max} é o valor da tensão de controle máxima aplicada a servoválvula e $\operatorname{sgn}(S)$ é função sinal em relação com relação superfície de deslizamento S .

O chaveamento em altas frequências da tensão V_{\max} pode acarretar no aparecimento do *chattering*⁴ no sinal de saída do sistema. O procedimento para amenizar tal fenômeno, consiste na introdução da chamada camada limite (*boundary layer*) no sinal de controle, desta forma a lei de controle fica:

$$u = -V_{\max} \operatorname{sat}(S) \quad (16)$$

Onde $\operatorname{sat}(S)$ é definida como $\operatorname{sgn}(S/\varphi)$ quando $|S| > \varphi$ e como S/φ quando $|S| \leq \varphi$, sendo “sgn” a função sinal. Na condição $|S| \leq \varphi$ (no interior da camada limite), o controlador se comporta como um controlador por realimentação de estados, com vetor de ganhos $(V_{\max}/\varphi)[c_1 \ c_2 \ 1]$ e vetor de estados $\tilde{X} = [\tilde{x} \ \dot{\tilde{x}} \ \ddot{\tilde{x}}]$.

⁴ *Chattering* – oscilação na vizinhança da superfície de deslizamento

Assim define-se a lei de controle por:

$$\begin{cases} se & S = 0 \rightarrow u = 0 \\ se & S \neq 0 \rightarrow u = u_s \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} se & |S| > |\varphi| \rightarrow u_s = V_{\max} \operatorname{sgn}(S) \\ se & |S| \leq |\varphi| \rightarrow u_s = V_{\max} \frac{1}{\varphi}(S) \end{cases} \quad (18)$$

Definida a lei de controle, implementou-se o controlador na forma de diagrama de blocos no Simulink (Fig. 7.7).

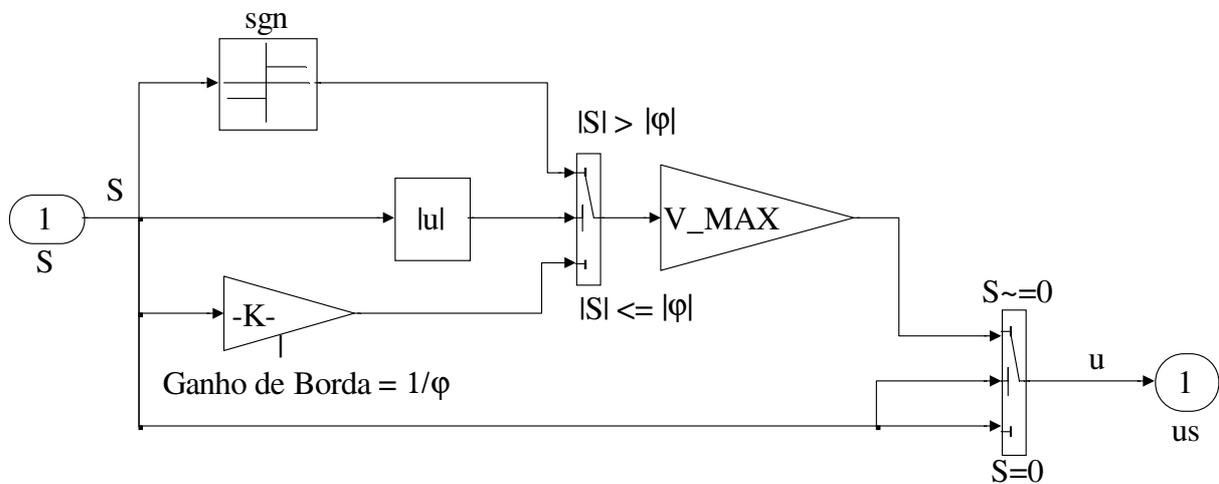


Figura 7.7 Diagrama de blocos do controlador por SMC para um servoposicionador pneumático

7.3 Simulações do Comportamento Dinâmico do Servoposicionador Pneumático com Controlador SMC

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento de um ambiente para simulações do comportamento dinâmico do servoposicionador pneumático controlado por SMC.

Para a definição do comportamento dinâmico do sistema no modo de deslizamento é necessário o cálculo dos parâmetros c_1 e c_2 , considerando as características de desempenho (no caso, definidos como o tempo de assentamento e sobrepasso máximo) necessárias ao sistema para atingir os requisitos de projeto (ver Tabela 3.5).

Neste contexto, definiu-se inicialmente um comportamento dinâmico de alto desempenho, atribuindo um tempo máximo de assentamento de 0,05 s e um sobrepasso máximo de 1%. Utilizou-se como sinal de referência curvas produzidas pelo sistema gerador de trajetória (desenvolvido e apresentado em detalhes no Capítulo 8).

A definição da camada limite (φ) foi implementada como um ajuste fino no sistema, de acordo com uma relação proposta por este trabalho entre a qualidade do sinal de controle gerado e o erro médio de saída da planta (descrito na seção 7.3.1). A tensão máxima de atuação na servoválvula foi definida em 0,8 (V_{\max}) para um máximo possível de 1 V (que corresponde à abertura máxima da válvula).

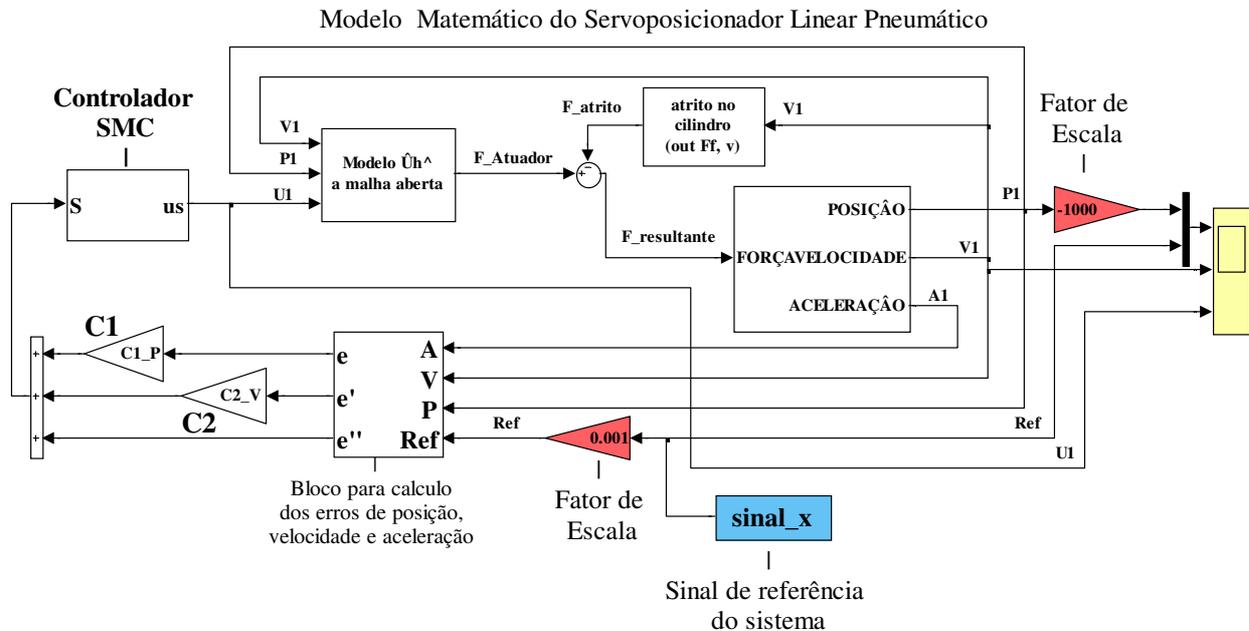


Figura 7.8 Ambiente de simulação para um eixo do robô

Para uma visualização global do comportamento do sistema, apresenta-se nas figuras 7.9 a 7.12 as respostas de posição, erro de posição, velocidade e sinal de controle resultantes da simulação do sistema.

Como sinal de referência, foi utilizado o sinal de “referência para o eixo X”, produzido pelo módulo gerador de trajetória (Capítulo 8) que representa o deslocamento do eixo X no tempo, durante um processo real para o qual o robô foi programado. Foram definidas as velocidades de 0,5 m/s para $0 < t \leq 0,3$ s, 0,3 m/s para $0,3 < t \leq 0,58$ s e 0,5 m/s para $0,58 < t \leq 20,26$ s, durante a programação.



Figura 7.9 Sinais de posição de saída e de referência para o eixo X, com carga de 8 Kg

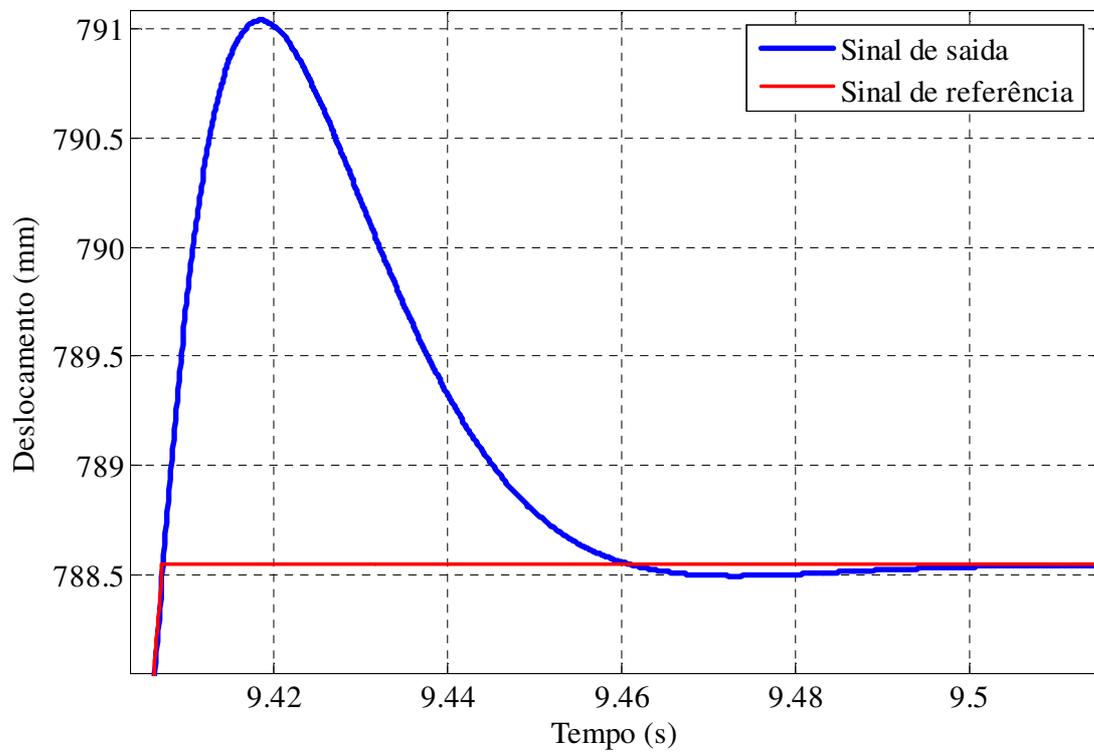


Figura 7.10 Detalhe amplificado dos sinais de posição de saída e de referência para o eixo X, com carga de 8 Kg (maior sobressinal do sinal de saída)

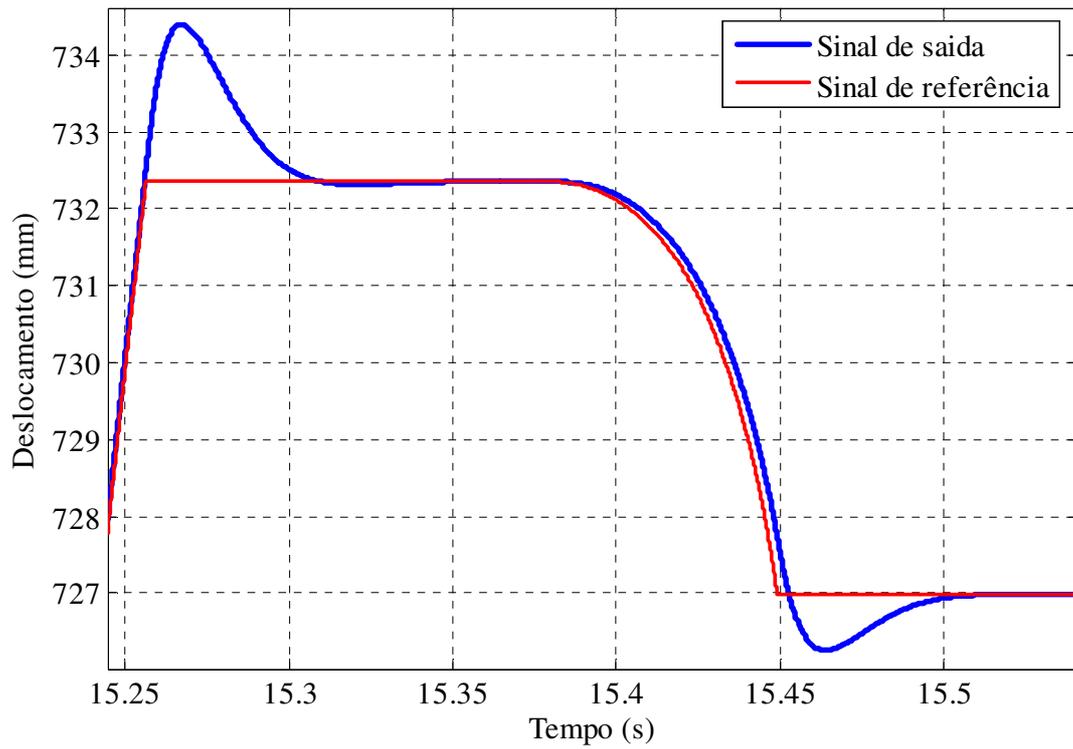


Figura 7.11 Detalhe amplificado dos sinais de posição de saída e de referência para o eixo X, com carga de 8 Kg

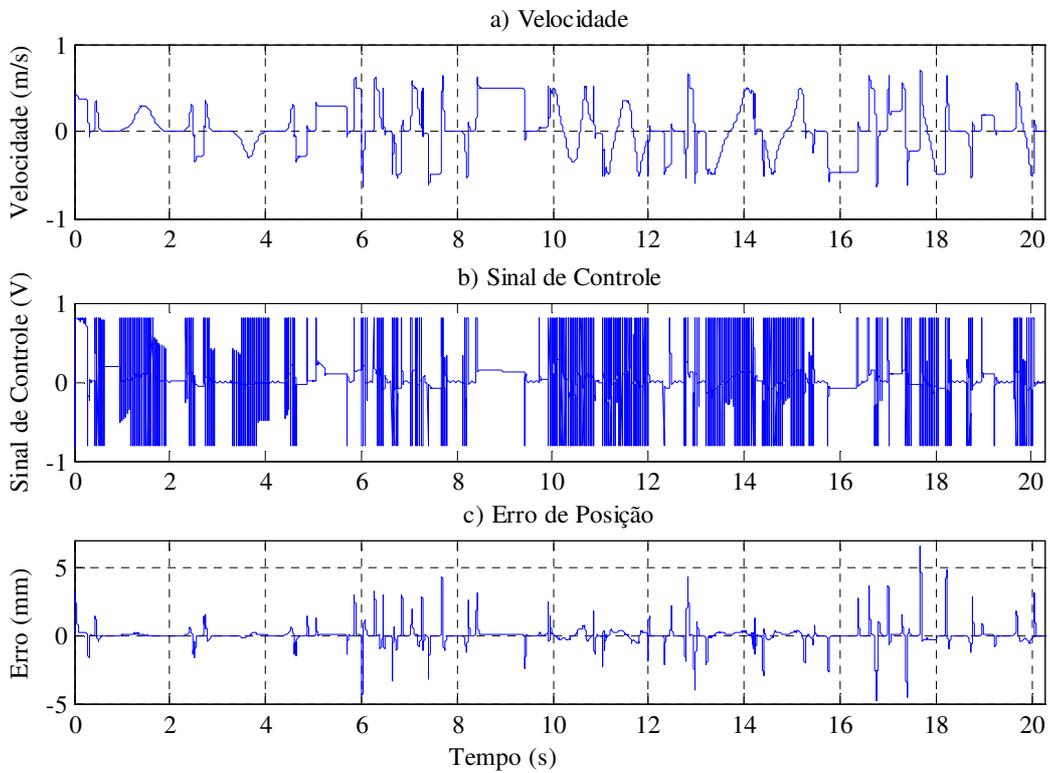


Figura 7.12 Sinais de velocidade, controle e de erro para o eixo X com carga 8 Kg

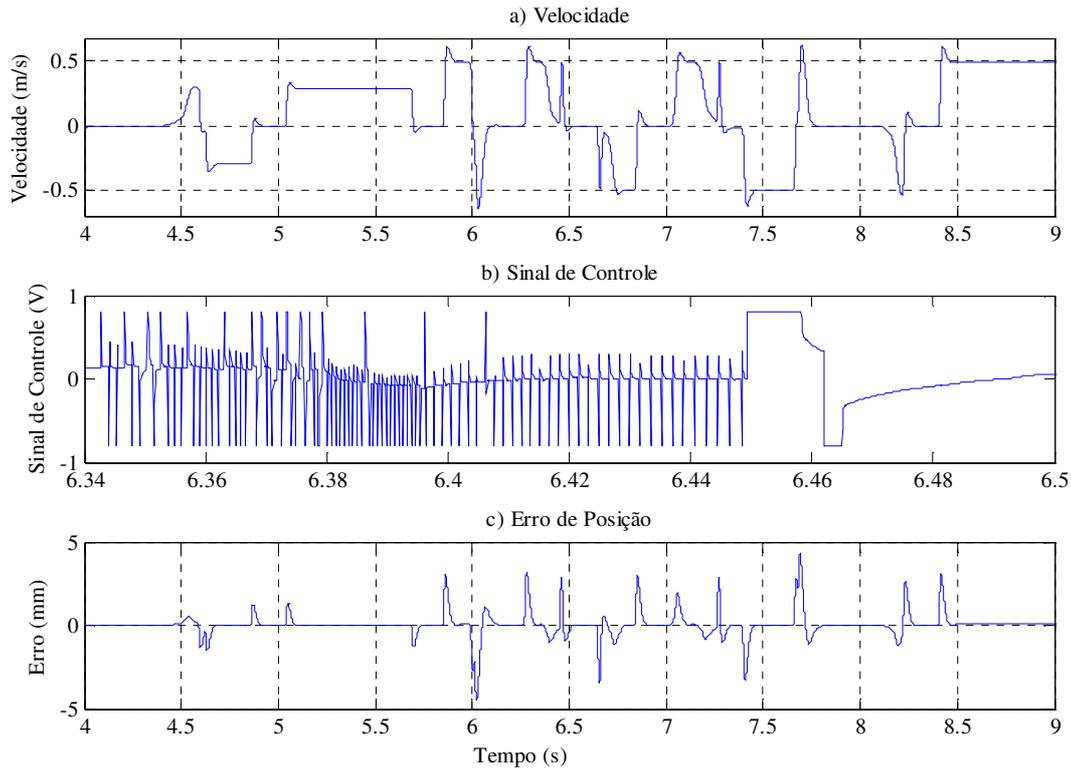


Figura 7.13 Detalhe amplificado dos Sinais de velocidade, controle e de erro para o eixo X com carga 8 Kg

Cabe salientar alguns aspectos importantes sobre os resultados das simulações:

- as figuras 7.9, 7.10 e 7.11 apresentam o comportamento dinâmico da saída de posição em relação a sinal de referência. Verifica-se que o comportamento está de acordo com as características de tempo de assentamento e sobrepasso definidos para o projeto.
- nos gráficos das velocidades (figuras 7.12a e 7.13a) o sistema apresenta um valor máximo em alguns instantes acima de 0,5 m/s, isto é decorrente das características dinâmicas do sistema;
- nos gráficos de erro de posição (figuras 7.12c e 7.13c) nota-se um erro máximo de 6,5 mm para a velocidade de 0,5 m/s e um erro máximo de 2,5 mm para a velocidade de 0,3m/s;
- a respeito dos gráficos de sinal de controle (figuras 7.12b e 7.13b) os sinais estão de acordo com esperado, apresentando regiões de saturação alternadas com regiões contínuas (proporcionais).

7.3.1 Ajuste da Camada Limite

Para o ajuste da camada limite, foi desenvolvido um estudo empírico, devido à bibliografia consultada não apresentar métodos científicos para a definição do φ .

O estudo sucedeu-se através de simulações com a variação dos valores de φ e das cargas, relacionando φ com o sinal de atuação na servoválvula. De acordo com as simulações, à medida que reduz-se o valor de φ , a oscilação do sinal de controle aumenta (maior atuação da servoválvula), resultando em um menor erro do sinal de saída do sistema (posição). Entretanto, a partir de um valor mínimo de φ , o erro tende a diminuir de forma não significativa, estabilizando em um limite, enquanto que a oscilação do sinal de controle aumenta continuamente. Isto resulta em um trabalho excessivo da servoválvula, sem aferir ao sinal de saída (posição) maior precisão (menor erro).

O sinal de controle representa o quanto a servoválvula atua para executar o controle. Desta forma, quanto menor a oscilação do sinal de controle, maior será a vida útil da servoválvula.

Neste contexto, avaliou-se de forma quantitativa os sinais de controle, definindo um valor de φ que forneça 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. Os resultados são apresentados na Tabela 7.1;

Tabela 7.1 Dados resultantes das simulações, para determinação da camada limite refinada

Carga (Kg)	Camada limite refinada (φ)
1	2,007
4	1,064
8	2,983
12	5,3
16	5,535
20	6,187
24	6,669

Relativamente ao sinal de controle, uma modificação pode ser introduzida no controlador para gerar sinais de controle discretos. Esta modificação consiste em definir o ganho de borda do controlador ($1/\varphi$) igual a zero. Assim, quando a superfície de deslizamento (S) encontrar-se dentro da camada limite, o sinal de controle assume o valor zero. Desta forma, os sinais de controle serão sinais discretos com valores de $-V_{\max}$, 0 e $+V_{\max}$, o que permite a utilização de servoválvulas tipo *on/off* que apresentam preços bastante acessíveis. Um breve

estudo comparativo pode ser verificado através das figuras 7.14, 7.15 e 7.16.

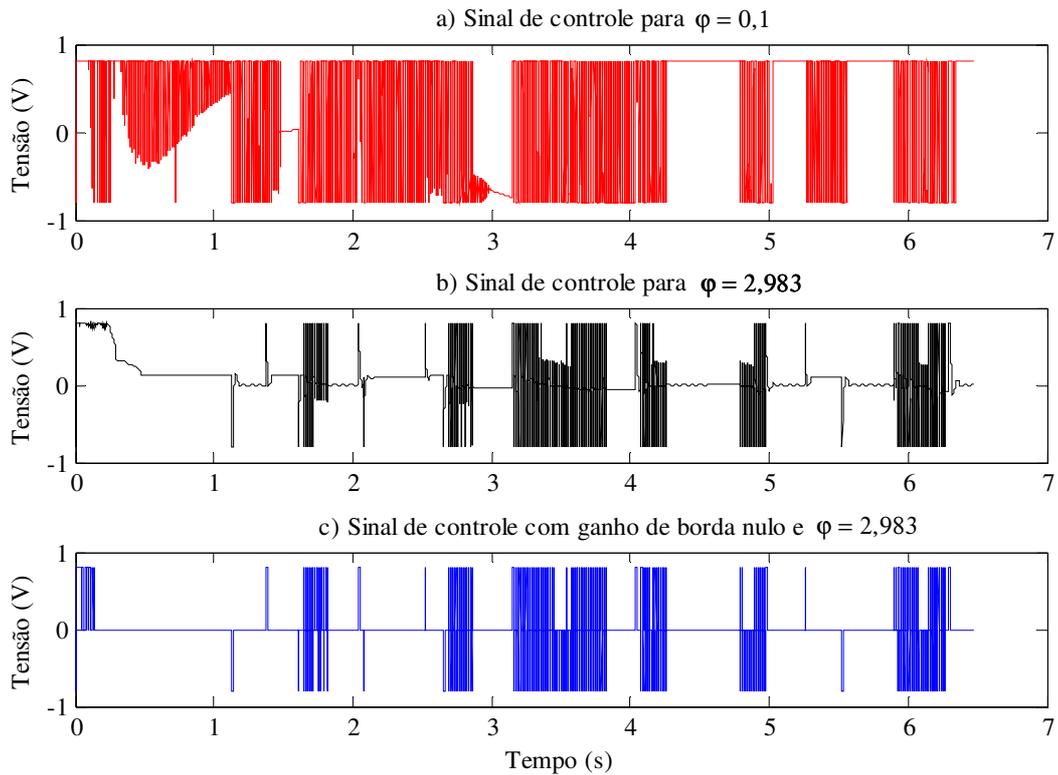


Figura 7.14 Sinais de controle com diferentes camadas limites e ganho de borda nulo (carga de 8 Kg)

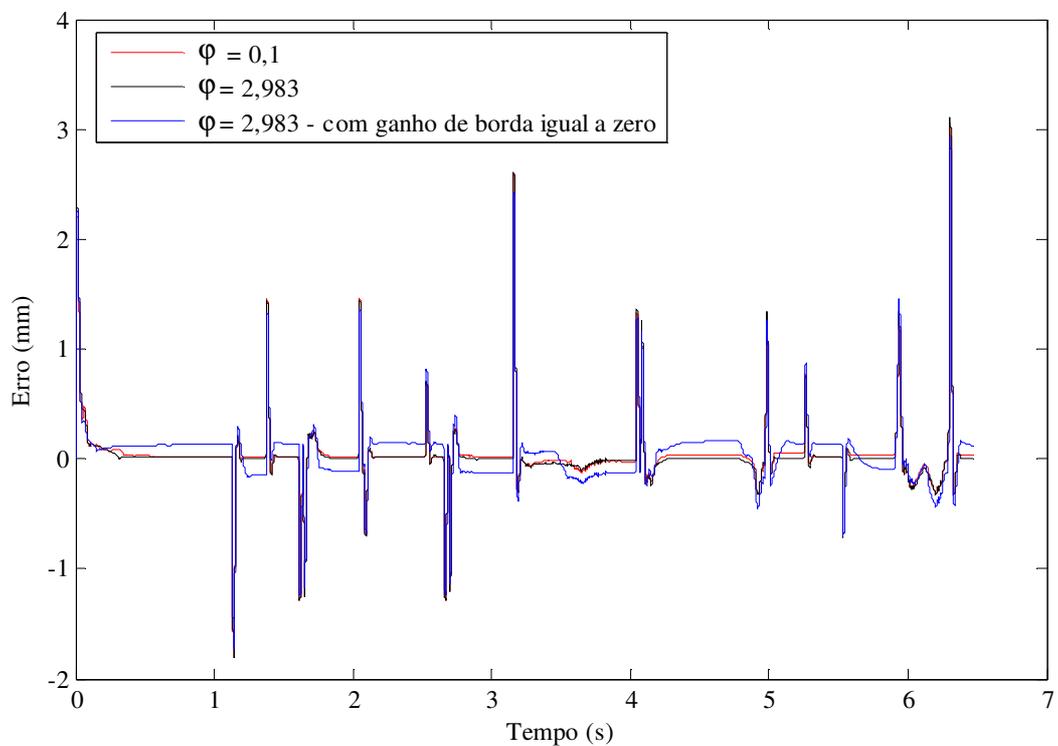


Figura 7.15 Sinais de erros de posição, com diferentes camadas limites e ganho de borda nulo (carga de 8 Kg)

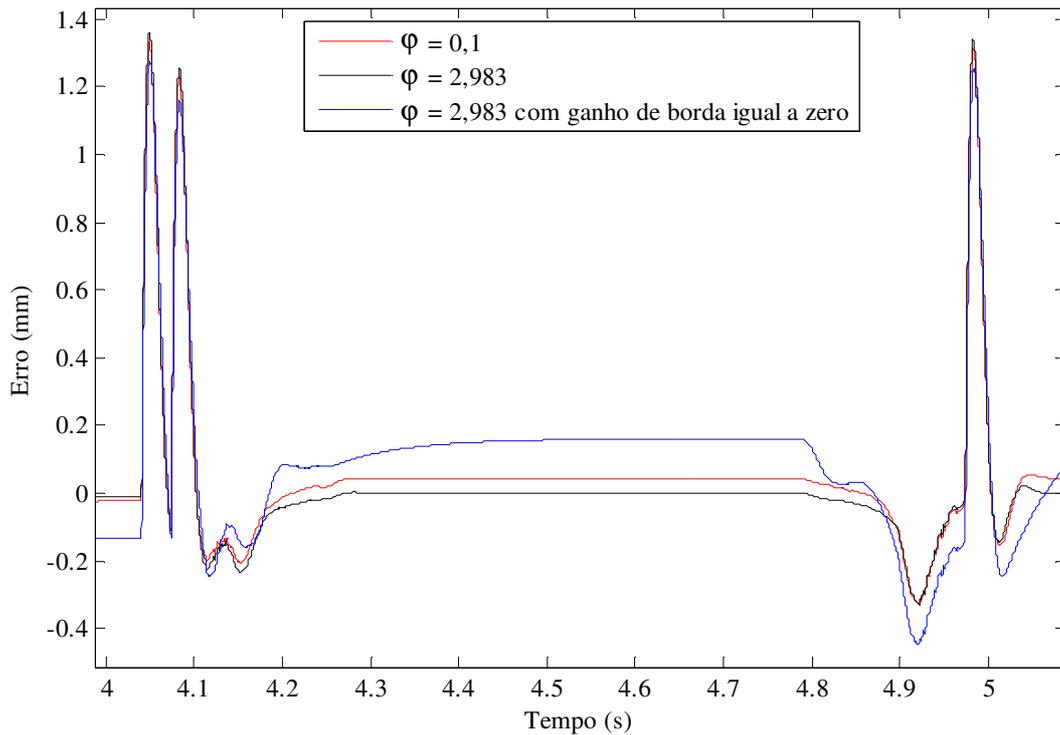


Figura 7.16 Detalhe amplificado dos sinais de erros de posição, com diferentes camadas limites e ganho de borda nulo (carga de 8 Kg)

A Fig. 7.14 apresenta os sinais de controle aplicados à planta. No gráfico onde $\varphi = 0,1$ a curva do sinal de controle apresenta um maior número de oscilações do que os demais sinais que utilizam o φ refinado ($\varphi = 2,983$). Conclui-se que, com a utilização do φ refinado, os resultados relativos aos erros de posição são muito similares aos atingidos com o sinal de controle saturado (veja Fig. 7.16). Entretanto, no caso do sinal de controle com φ refinado, a servoválvula atua com menor intensidade, propiciando o aumento da sua vida útil.

A Fig. 7.14c ainda mostra que, com o ganho de borda nulo, o sinal apresenta uma variação discreta nas três posições possíveis $-V_{\max}$, 0 e $+V_{\max}$.

A Fig. 7.15 apresenta os erros de posição da planta, de acordo com as alterações da camada limite e da introdução do ganho de borda zero. Pode-se verificar pouca diferença entre os três sistemas testados. Para uma melhor visualização, a Fig. 7.16 apresenta um detalhe da Fig. 7.15.

Estes aspectos, indicam a possibilidade de utilização de servoválvulas do tipo *on/off* para o controle do robô pneumático, com o objetivo de redução de custos do produto final.

7.4 Simulações do Desempenho do Robô Cartesiano Pneumático

Uma vez desenvolvido, avaliado e ajustado o controlador por modos deslizantes (seção

7.2), é apresentada nessa seção, a implementação do controle para os eixos X, Y e Z com o objetivo de simular e avaliar o comportamento do robô em um processo gerado pelo ambiente de programação *off-line*. O esquema do sistema usado para simulação do robô completo é apresentado na Fig. 7.17;

Robô Cartesiano Pneumático com 3 Graus de Liberdade

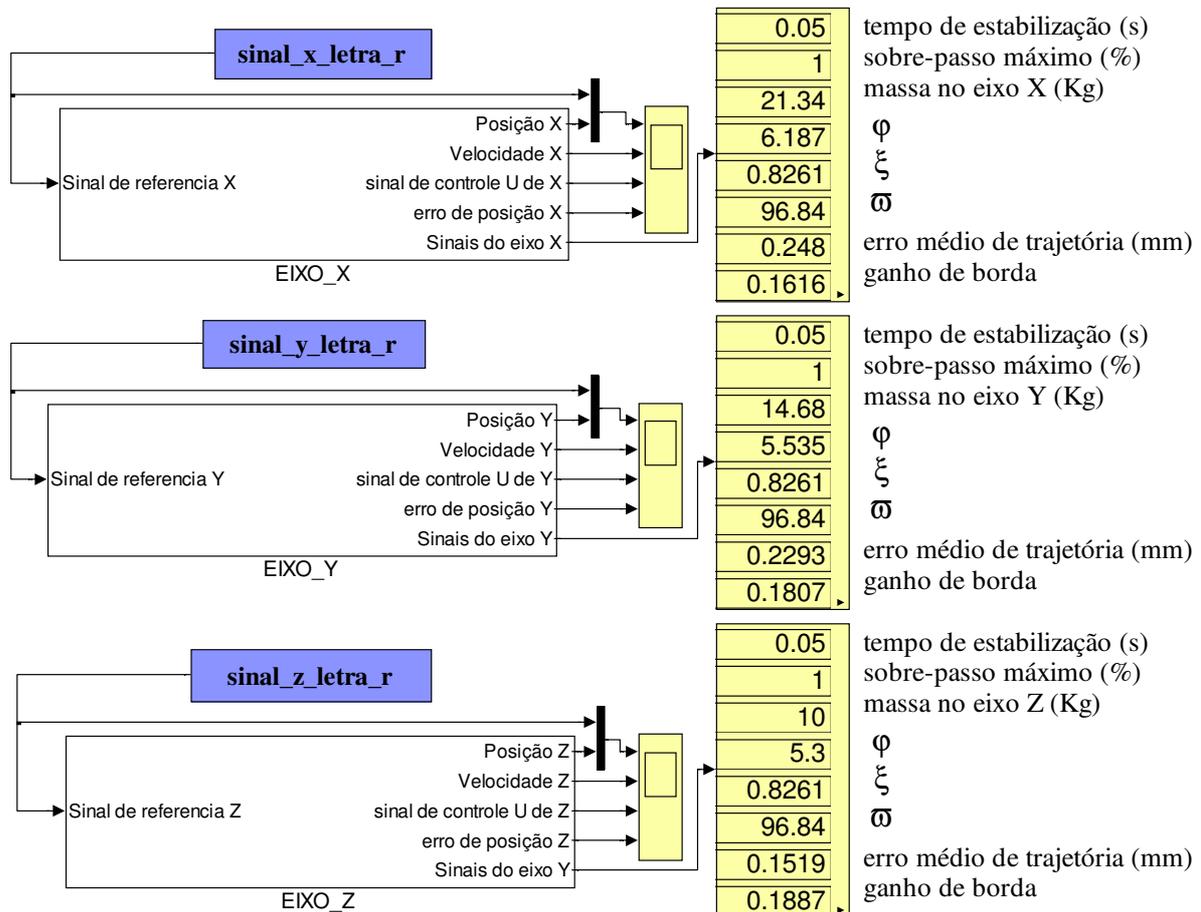


Figura 7.17 Ambiente de simulação no Simulink do modelo do robô cartesiano pneumático (3GDL)

Os sinais de referência utilizados para as simulações representam um processo industrial real, denominado: processo “LETRA_R”. Esses sinais foram gerados pelo ambiente de programação *off-line* desenvolvido e apresentado no Capítulo 8. Esse processo servirá como um exemplo para o trabalho.

As camadas limite são determinadas automaticamente por um programa no Matlab, onde a entrada é a carga do robô e a saída é o φ para cada eixo. Esta rotina computacional foi desenvolvida levando em consideração o estudo realizado na seção 7.3.1.

As simulações foram realizadas com a carga máxima de trabalho admitida pelo projeto (10 Kg). Os resultados são apresentados nas figuras 7.18 a 7.22.

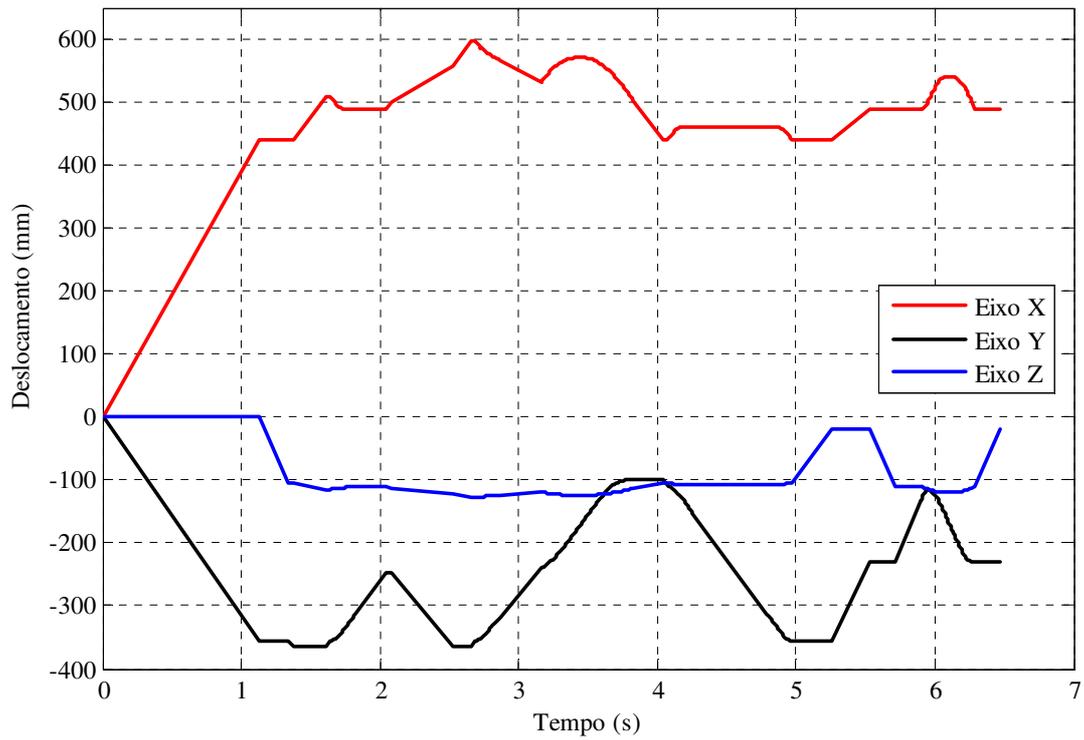


Figura 7.18 Sinais de referência para cada eixo do robô, produzidos pelo gerador de trajetória

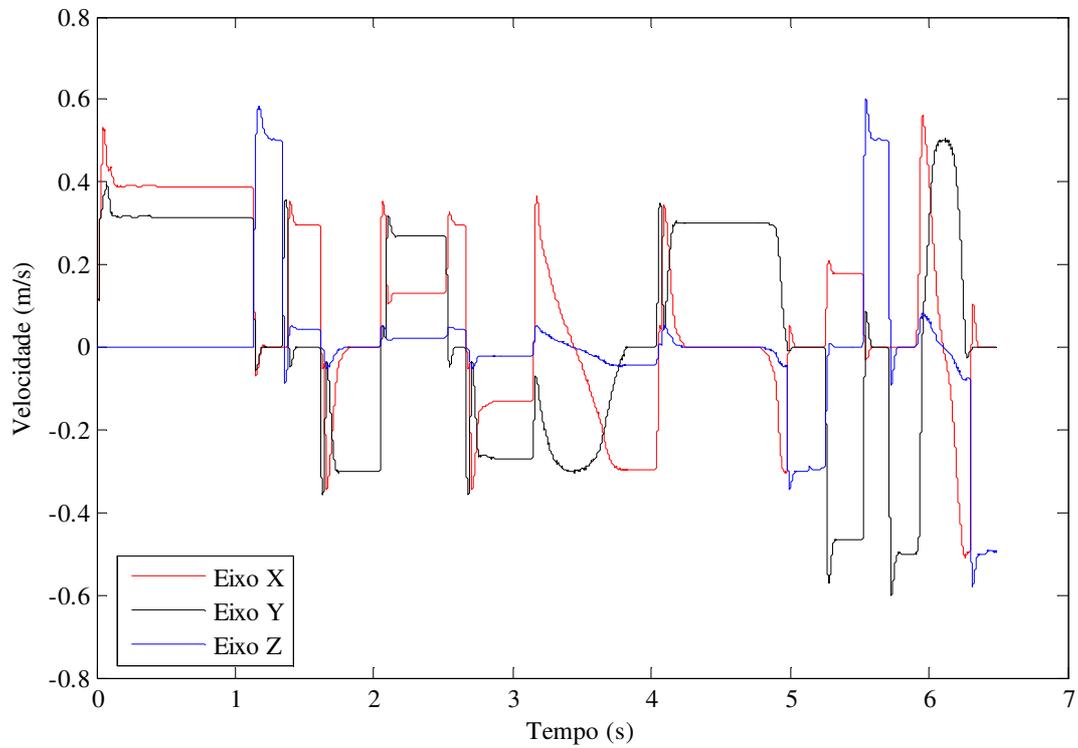


Figura 7.19 Velocidades dos eixos para o processo simulado

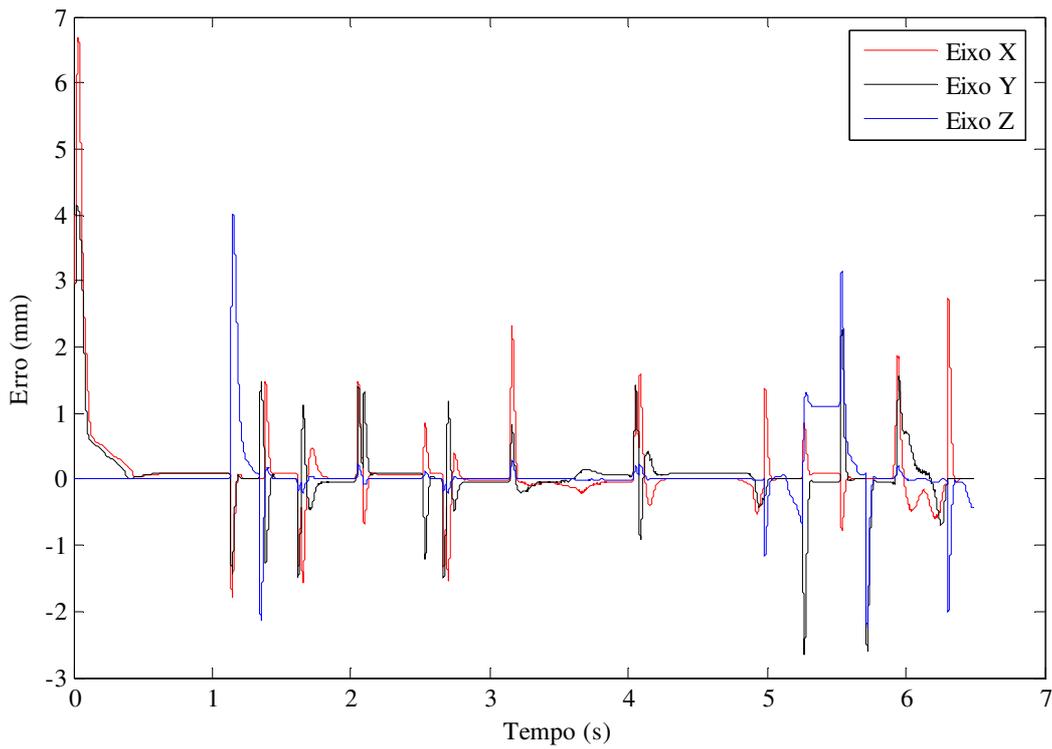


Figura 7.20 Erros de posição para o processo simulado

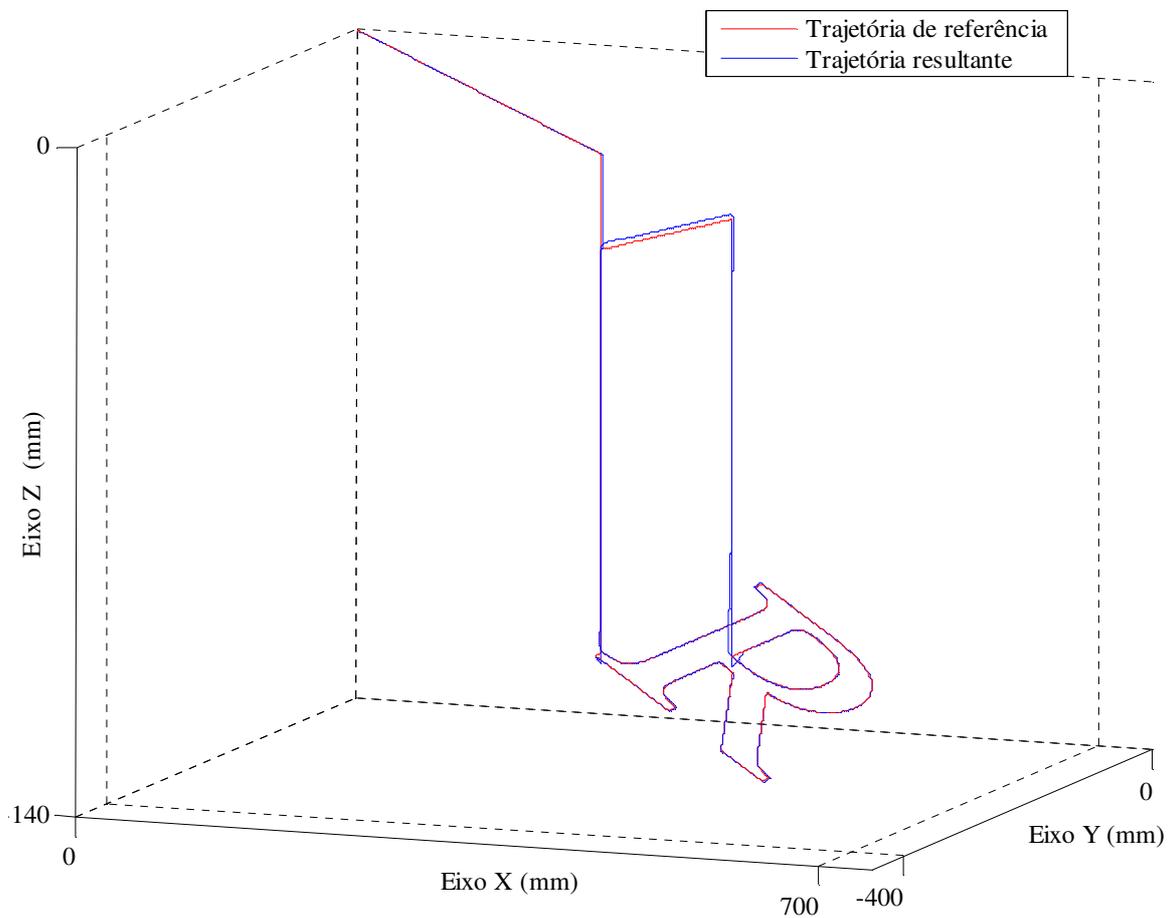


Figura 7.21 Trajetória em três dimensões do processo simulado

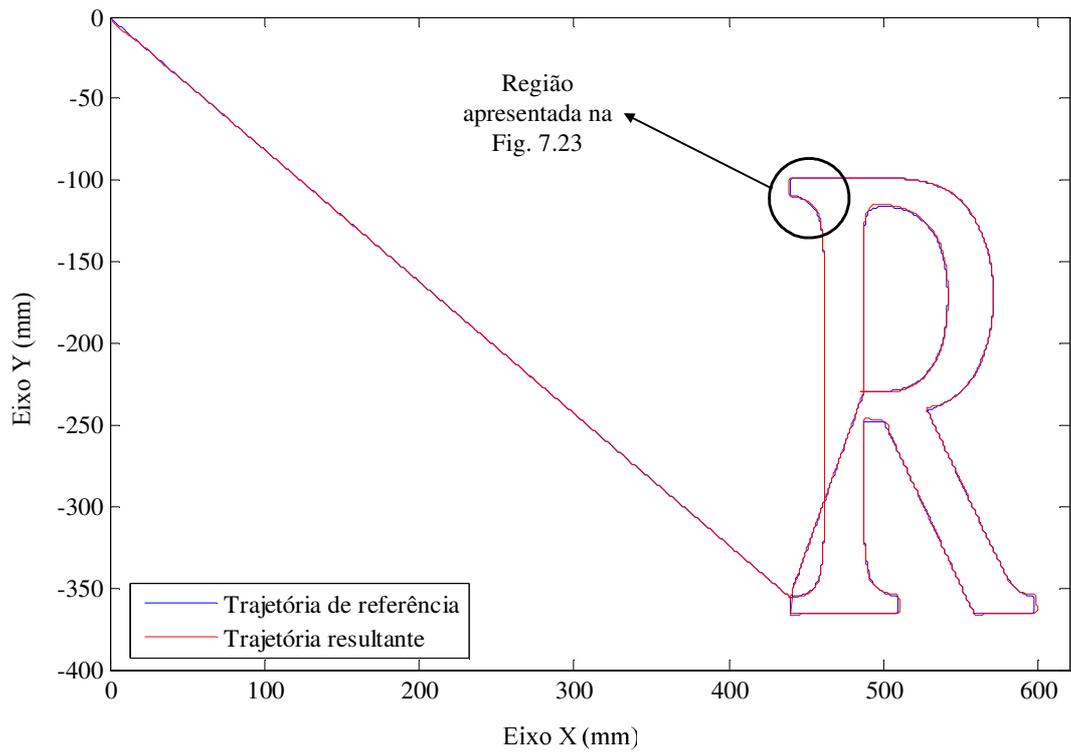


Figura 7.22 Trajetória do processo simulado (vista de topo)

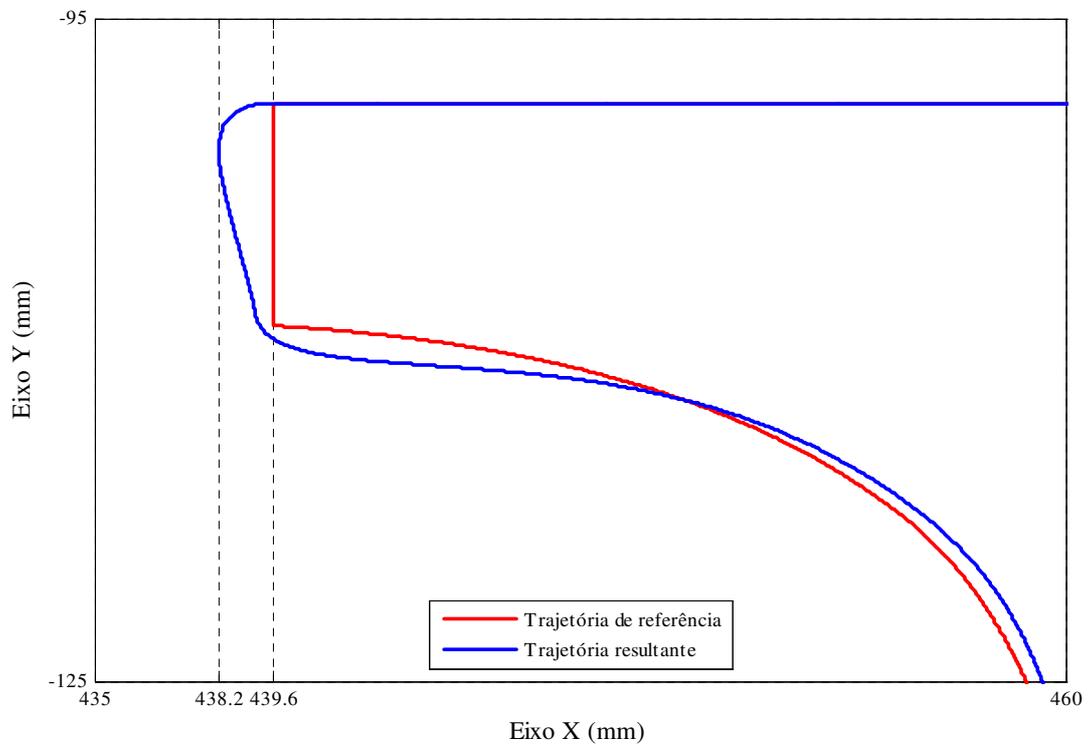


Figura 7.23 Gráfico em duas dimensões da trajetória do processo simulado (detalhes aproximados)

A simulação dos três eixos integrados possibilita a análise de forma visual em três dimensões do desempenho do sistema. Este atributo possibilita a realização de aprimoramentos no processo real antes de executá-lo, através do ambiente de programação *off-line*. Por exemplo, verifica-se na Fig. 7.23 a existência de um erro de trajetória máximo de 1,4 mm. Caso este erro não esteja de acordo com as tolerâncias do processo, o mesmo pode ser refeito no ambiente de programação *off-line* com uma velocidade de trajetória menor, contribuindo assim para a redução do erro de trajetória do processo final.

Uma característica do modelo desenvolvido a se destacar, é a flexibilidade de manipulação dos sinais de referência, que possibilita alterações no processo final, como por exemplo: aplicações de fatores de escala e deslocamentos no espaço de trabalho associado ao processo real. Estes atributos podem ser de grande valia para ajustes finos da posição inicial do robô com relação à posição da peça de trabalho que será processada.

8 UNIDADE TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO *OFF-LINE*

Com o objetivo de suprir os requisitos de projeto apresentados na Tabela 3.5, propõe-se nesta unidade técnica o desenvolvimento de um ambiente de programação *off-line* para o robô.

Segundo Silva (1996), os sistemas de programação *off-line* disponíveis comercialmente podem ser classificados em duas categorias;

- **Programação *off-line* usando editor e compilador de programas para o robô** – também conhecido por programação textual, consiste na implementação das seqüências de operações da trajetória de trabalho por instruções textuais através de um PC. Este método, entretanto, apresenta a dificuldade de especificação dos pontos no espaço de trabalho sem a utilização do robô;
- **Programação *off-line* usando sistemas de simulação** – são sistemas gráficos interativos que permitem desenvolver os programas no ambiente simulado e verificar visualmente como o robô executa cada instrução. Também permitem a definição de trajetórias para o robô.

A idéia principal para o desenvolvimento do ambiente de programação *off-line* deste projeto é a de, a partir de um processo real implementado em um sistema computacional do tipo CAD/CAM, processar as informações geradas pelo CAM (código 'ISO') e deixá-las em condições para a utilização como sinais de referência para o robô modelado matematicamente como para os robôs que venham a ser construídos e controlados.

O sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing* ou Manufatura Auxiliada por Computador) é definido como o uso efetivo da tecnologia computacional no planejamento, gerenciamento e controle das funções de manufatura (Groover, 1984, apud Meneghello, 2003). Apesar da abrangência do significado do termo CAM, o mesmo está principalmente associado à programação CN⁵ devido à ampla difusão de sistemas CAD/CAM disponíveis no mercado. Nos ambientes gráficos interativos CAD/CAM, a elaboração de programas CN se dá de forma automática, através da interpretação da geometria de peças geradas em arquivos gráficos (CAD), com relação a processos e definições de parâmetros (unidades, ferramentas, velocidades de corte

⁵ Programação CN – conjunto de todos os dados para a produção de uma peça em uma determinada máquina com comando numérico

e de aproximação, etc) determinados no sistema CAM. Usualmente, o resultado final do processamento destes dados é a geração de um arquivo contendo os dados da trajetória da ferramenta associada aos parâmetros de operação da máquina. Este arquivo é denominado de ‘código ISO’, que consiste de seqüências de instruções para a fabricação da peça por uma determinada máquina de comando numérico.

O diagrama operacional de todo o sistema de programação *off-line* desenvolvido é apresentado na Fig. 8.1:

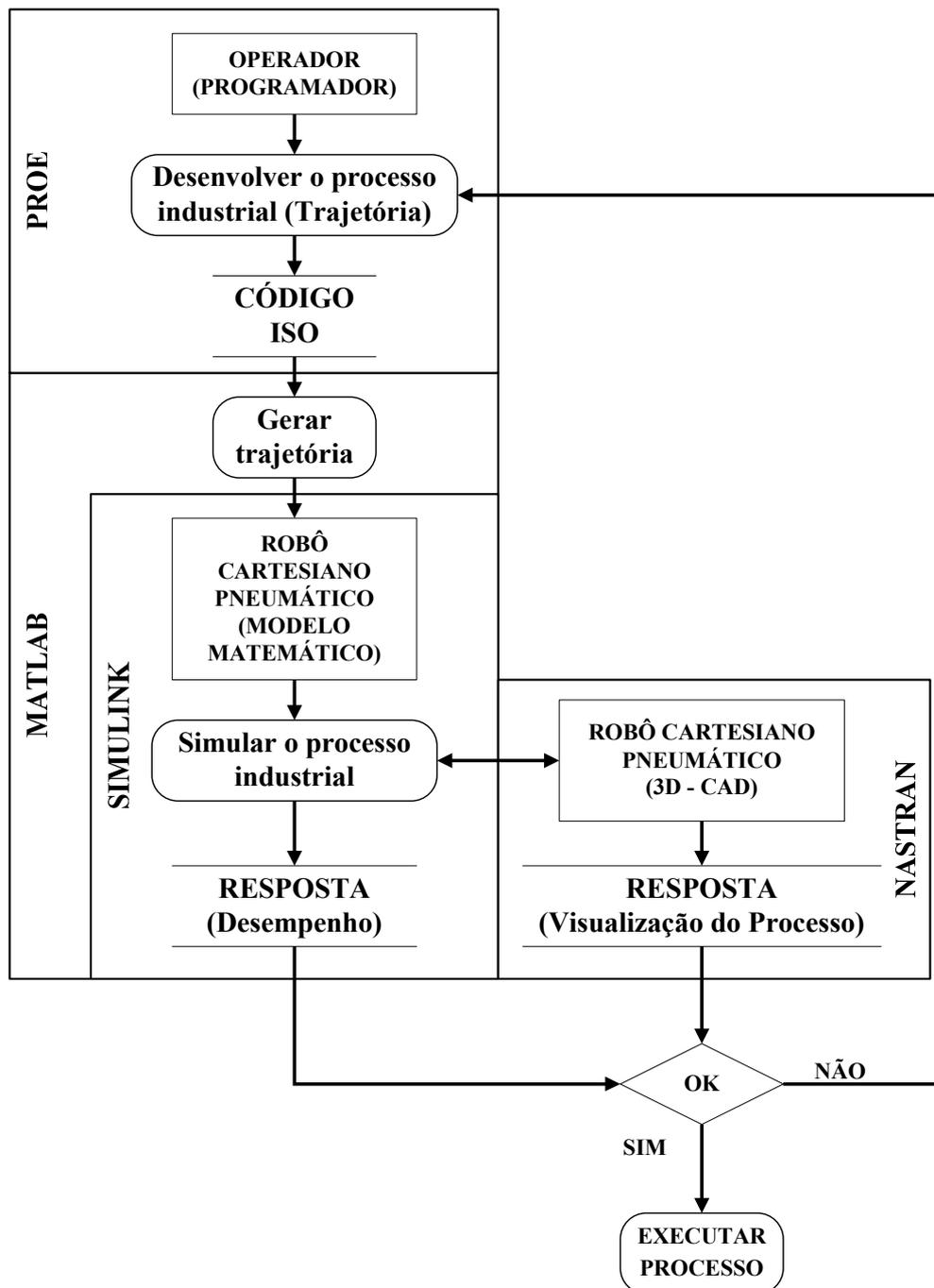


Figura 8.1 Diagrama de fluxo de dados de todo o ambiente de programação *off-line*

O ambiente de programação *off-line* desenvolvido pode ser dividido em dois módulos:

- **Módulo gerador de trajetória;**
- **Módulo de monitoramento virtual.**

8.1 Módulo Gerador de Trajetória

Este módulo é a base do ambiente de programação *off-line*. É responsável por gerar os sinais de referência para o robô. A entrada deste módulo é um processo industrial definido por uma seqüência de trajetórias no espaço de trabalho e a saída são os sinais de referência para o robô. As etapas do processo são definidas e descritas a seguir.

8.1.1 Desenvolvimento do Processo Industrial

Nesta etapa são definidos os procedimentos no sistema CAM necessários para a execução do processo industrial desejado. No presente trabalho foi utilizado o software PRO/Engineer para seu desenvolvimento, entretanto pode ser utilizado qualquer outro software CAD/CAM. Os procedimentos são descritos nas seções 8.1.1.1 a 8.1.1.5.

8.1.1.1 Design da Trajetória

É o desenho em três dimensões que contém as trajetórias correspondentes ao processo industrial a ser executado, também poder ser chamado de *Design Model*. Para fins demonstrativos, apresenta-se um exemplo prático na Fig. 8.2.

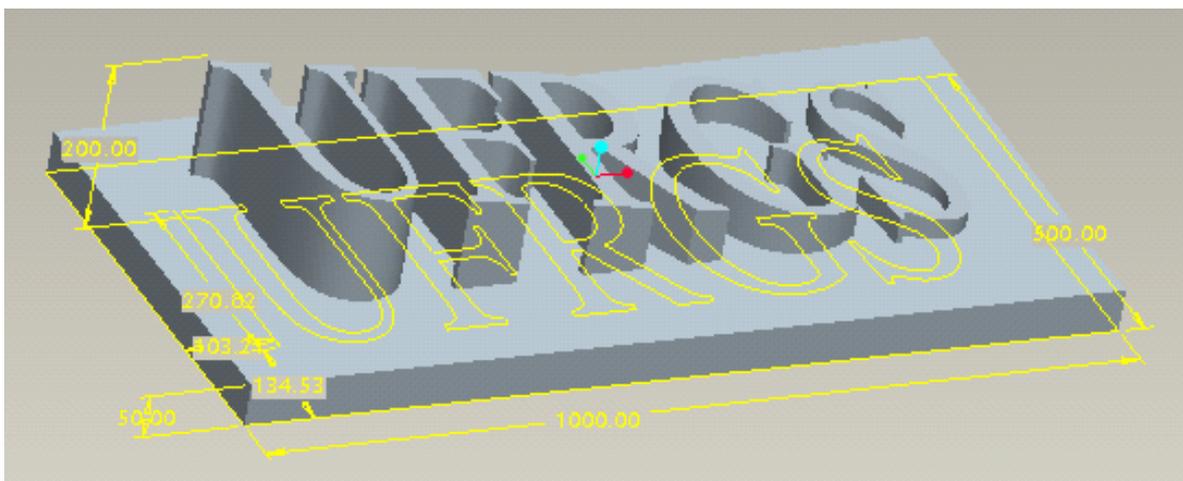


Figura 8.2 Design da Trajetória do exemplo demonstrativo (unidades em milímetros)

Neste exemplo, o processo industrial almejado é o de contornar as bordas da letra ‘R’ da palavra ‘UFRGS’. Como mencionado anteriormente, denominou-se este processo de ‘LETRA_R’. Este processo, por exemplo, pode ser um desbaste superficial, polimento, pintura, solda, corte, etc. O efetuador final acoplado ao robô cartesiano deverá, evidentemente, ser capaz

de efetuar as ações necessárias ao processo.

8.1.1.2 Desenho do Volume de Trabalho

No ambiente de programação *off-line*, a peça de trabalho (ou *workpiece*) corresponde ao volume de trabalho do robô e tem também por função definir o ponto inicial de posicionamento do robô (Fig.8.3).

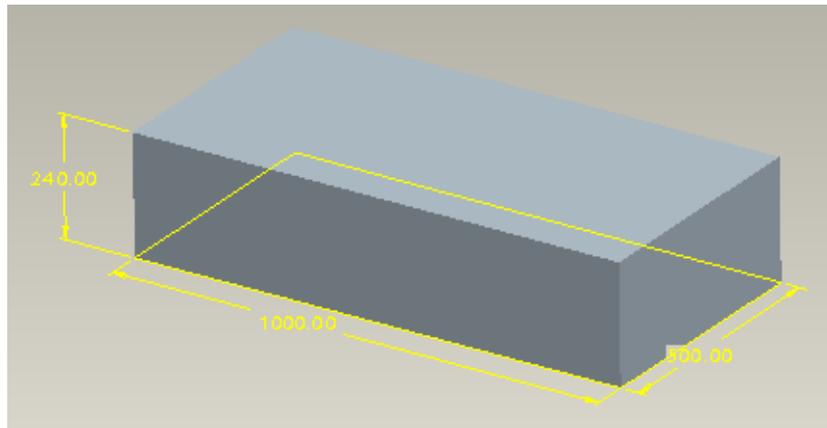


Figura 8.3 Volume de Trabalho do exemplo ilustrativo (unidades em milímetros)

8.1.1.3 Montagem do Sistema

Para o ajuste do Design da Trajetória ao Volume de Trabalho é criado um arquivo do tipo *Manufacturing Model*, que serve para definição dos procedimentos de CAM do processo. Este arquivo contém o banco de dados resultante da integração entre o Volume de Trabalho e o Design da Trajetória (Fig. 8.4).

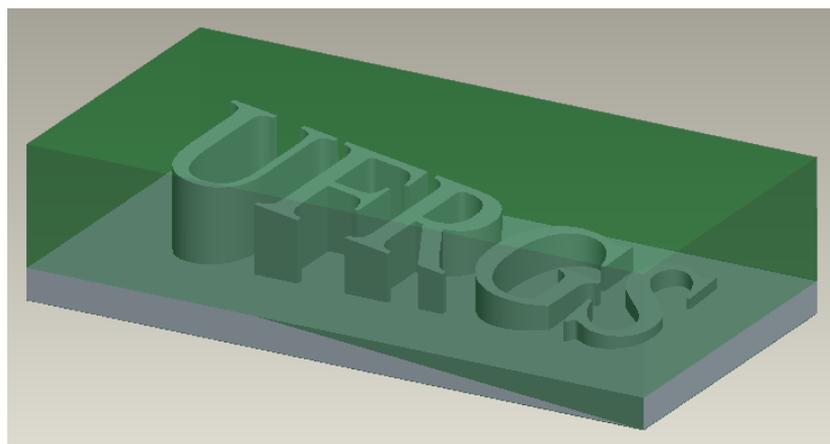


Figura 8.4 Design da Trajetória acoplado ao volume de trabalho do robô

8.1.1.4 Ajustes de Operação

Consiste na definição de alguns parâmetros de operação necessários para a programação *off-line*. Estes parâmetros são configurados no menu *Operation Setup*. São eles:

- *NC_Machine* – neste menu define-se a fresa de 3 eixos como máquina da operação. No sub-menu *Cutting Tools*, configura-se as dimensões e a geometria da ferramenta de corte. No sistema proposto, a ferramenta definida será utilizada de forma pontual. Considera-se, portanto, apenas o diâmetro da ferramenta (1 mm neste exemplo). No sub-menu *Speeds – Feeds* especifica-se o sistema métrico e a velocidade (em mm/min), que é a velocidade de aproximação inicial do sistema, definida neste exemplo em $30.000 \text{ mm/min} = 0,5 \text{ m/s}$;
- *Reference* – é a definição do ponto chamado *machine-zero*. Este ponto é a referência inicial para o sistema de coordenadas do robô e do processo a ser executado. Portanto, este ponto deve ser obrigatoriamente definido no vértice **CS0**, que é alocado no volume de trabalho e orientado como mostra a Fig. 8.5. Caso não o seja, deve-se fazer alterações nos fatores de escala do robô;

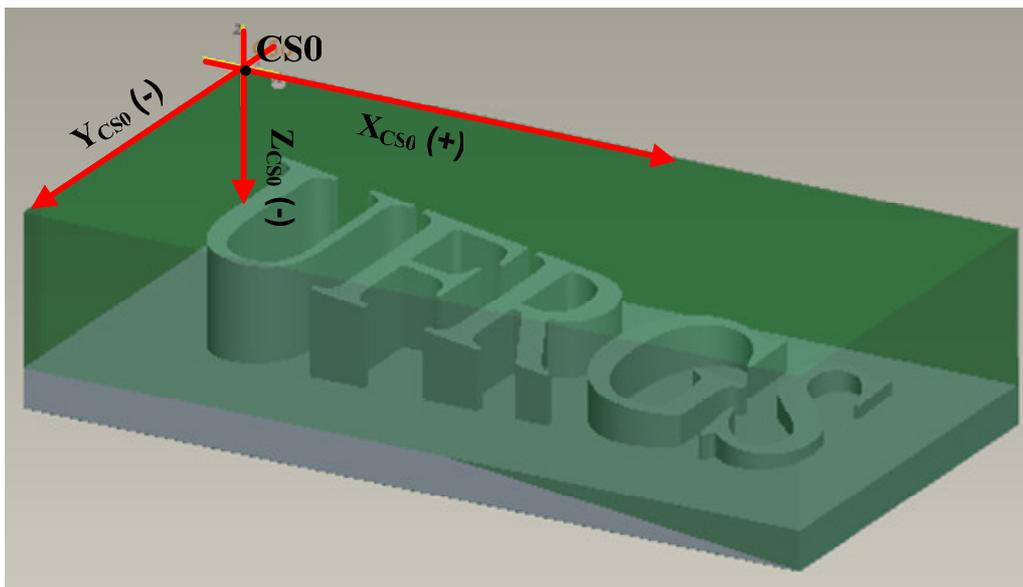


Figura 8.5 Definição e orientação do ponto *machine-zero* no volume de trabalho

- *Retract* – é a determinação do plano de retração do processo. Para o sistema proposto é obrigatoriamente necessário adicionar um plano de retração paralelo ao plano (X,Y). Entretanto devido ao algoritmo do programa gerador de trajetórias, o plano dever ser posicionado com um deslocamento negativo em relação ao plano (X_{CS0}, Y_{CS0}) (definido no *machine zero*). A Fig. 8.6 mostra o plano de retração do sistema denominado ADTM1;

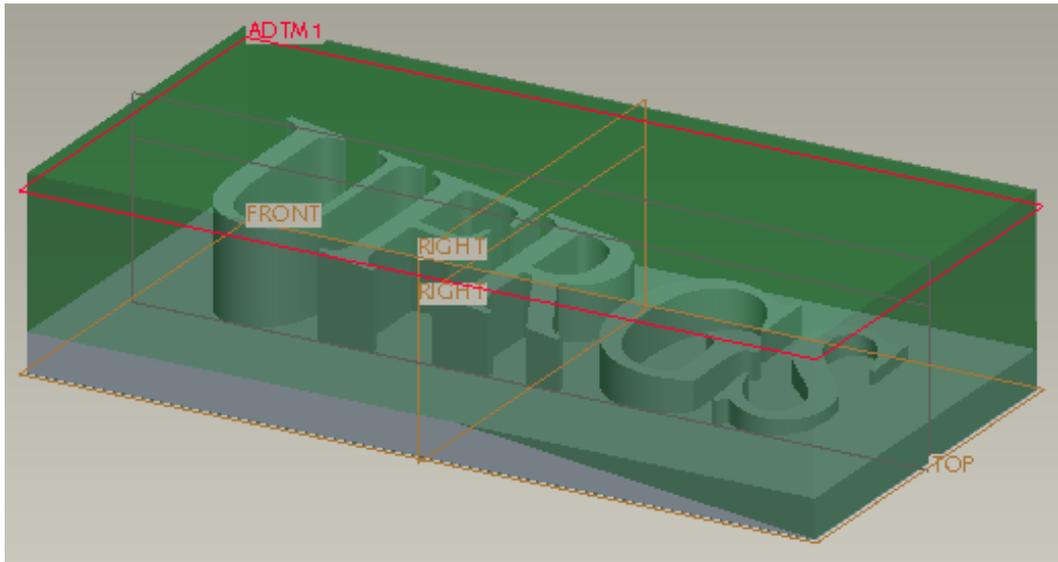


Figura 8.6 Plano de retração do sistema

8.1.1.5 Definição da Trajetória

A trajetória é implementada através da seqüência de comandos numéricos denominada ‘*Trajectory*’ (*Machinig/NC_sequence/Trajectory*) que, de acordo com as bordas selecionadas e orientações especificadas durante o seu implemento, define a trajetória do processo. Neste item também é definida a velocidade da trajetória do processo. Neste exemplo foram adotadas duas velocidades 0,3 m/s e 0,5 m/s, além da velocidade aproximação (já definida em 30000 mm/min). Desenvolvido o processo, gera-se o código ‘ISO’ através do pós-processador (neste caso foi utilizado o ‘UNCX01.P11’). O processo final pode ser verificado na Fig. 8.7. Na Fig. 8.8 é apresentado outro processo (“P_UFRGS”), no qual a ferramenta contorna todas as letras armazenadas no Design da Trajetória.

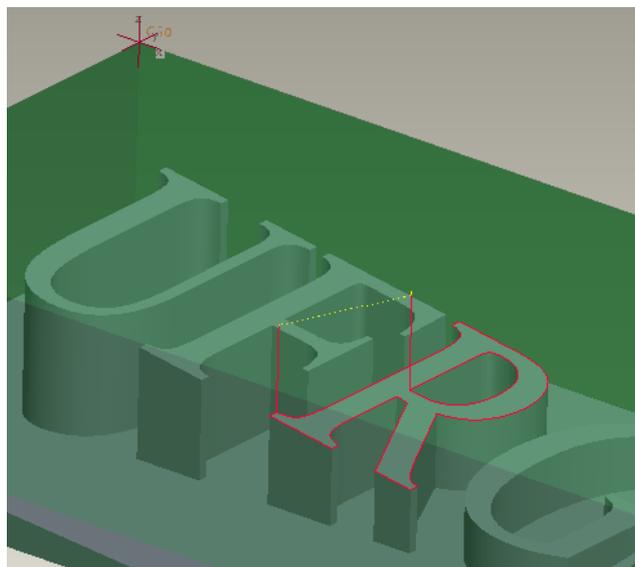


Figura 8.7 Trajetória do processo “Letra_R” (CAM)

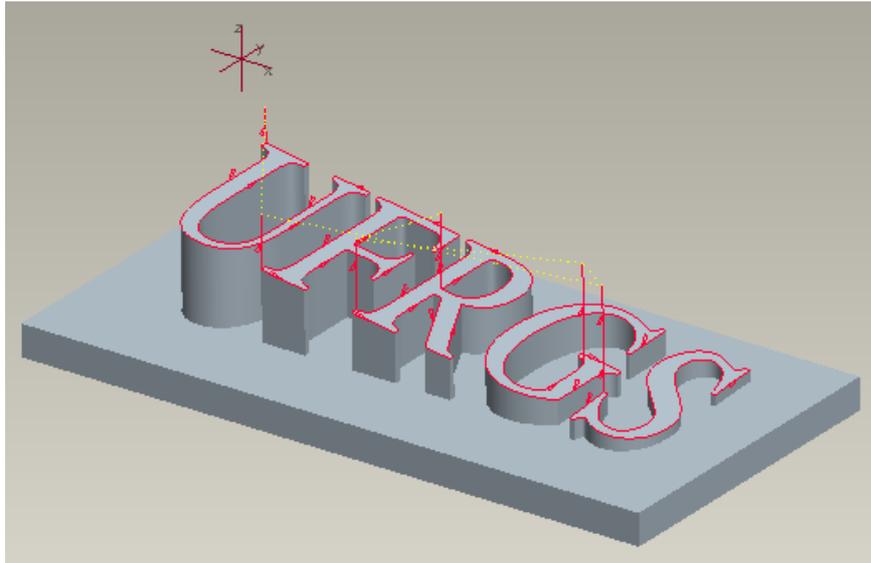


Figura 8.8 Trajetória do processo “P_UFRGS” (CAM)

8.1.2 Programa Gerador de Trajetória

O programa gerador de trajetória foi desenvolvido no ambiente de programação do Matlab (arquivo ‘.m’). A entrada do programa é um arquivo em ‘código ISO’ (arquivo ‘.tap’) e a saída são os sinais da trajetória no tempo, na forma de vetores.

Ao ser executado, o programa gerador de trajetórias carrega o arquivo ‘.tap’ (‘código ISO’), identifica todas as funções inclusas no código e de acordo com a velocidade e os pontos definidos no espaço pelo CAM, incrementa o vetor tempo em um valor ajustado em 0,001s, desta forma tornando aproximadamente contínuos os vetores de saída. Parte inicial do código ‘ISO’ do exemplo de processo ‘LETRA_R’ é apresentado na Fig. 8.9.

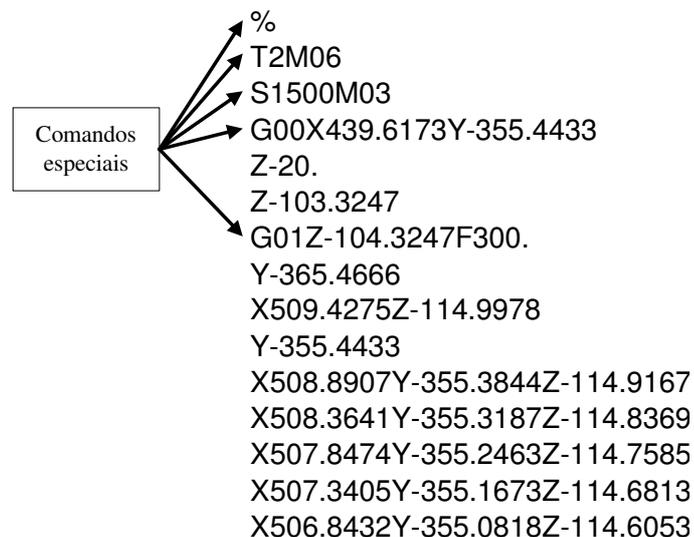


Figura 8.9 Exemplo de código ‘ISO’ do processo ‘LETRA_R’

A interface com usuário (programador) é apresentada através de um menu com botões conforme mostra a Fig. 8.10, onde:

- “Carregar Código ISO” - lê e salva o código “ISO” no ambiente do Matlab;
- “Gerar Trajetória” - executa o algoritmo gerador de trajetória e salva dentro do Matlab os vetores resultantes;
- “SAIR” - fecha o programa, entretanto os vetores resultantes do programa ficam armazenados dentro do Matlab para utilização posterior.



Figura 8.10 Tela de interface com o programador do módulo gerador de trajetória

O resultado do processo ‘LETRA_R’ em 3D reproduzido dentro do Matlab pode ser visualizado na Fig. 8.12. Os vetores dos sinais de referência (X, Y e Z) são apresentados na Fig. 8.11.

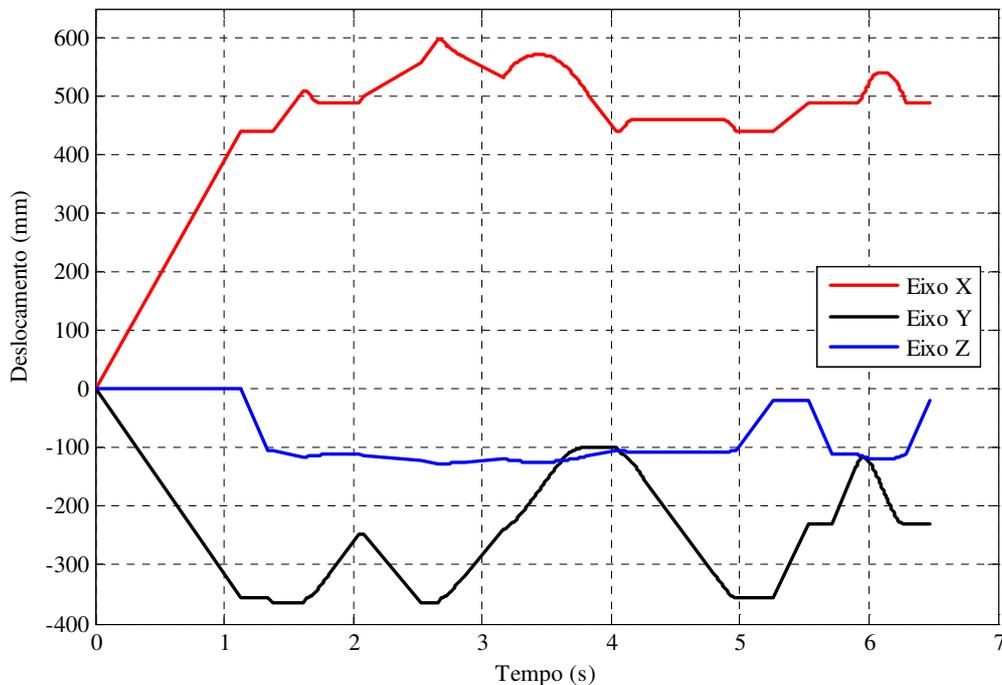


Figura 8.11 Sinais de referência para os eixos X, Y e Z do robô, produzidos pelo módulo gerador de trajetória

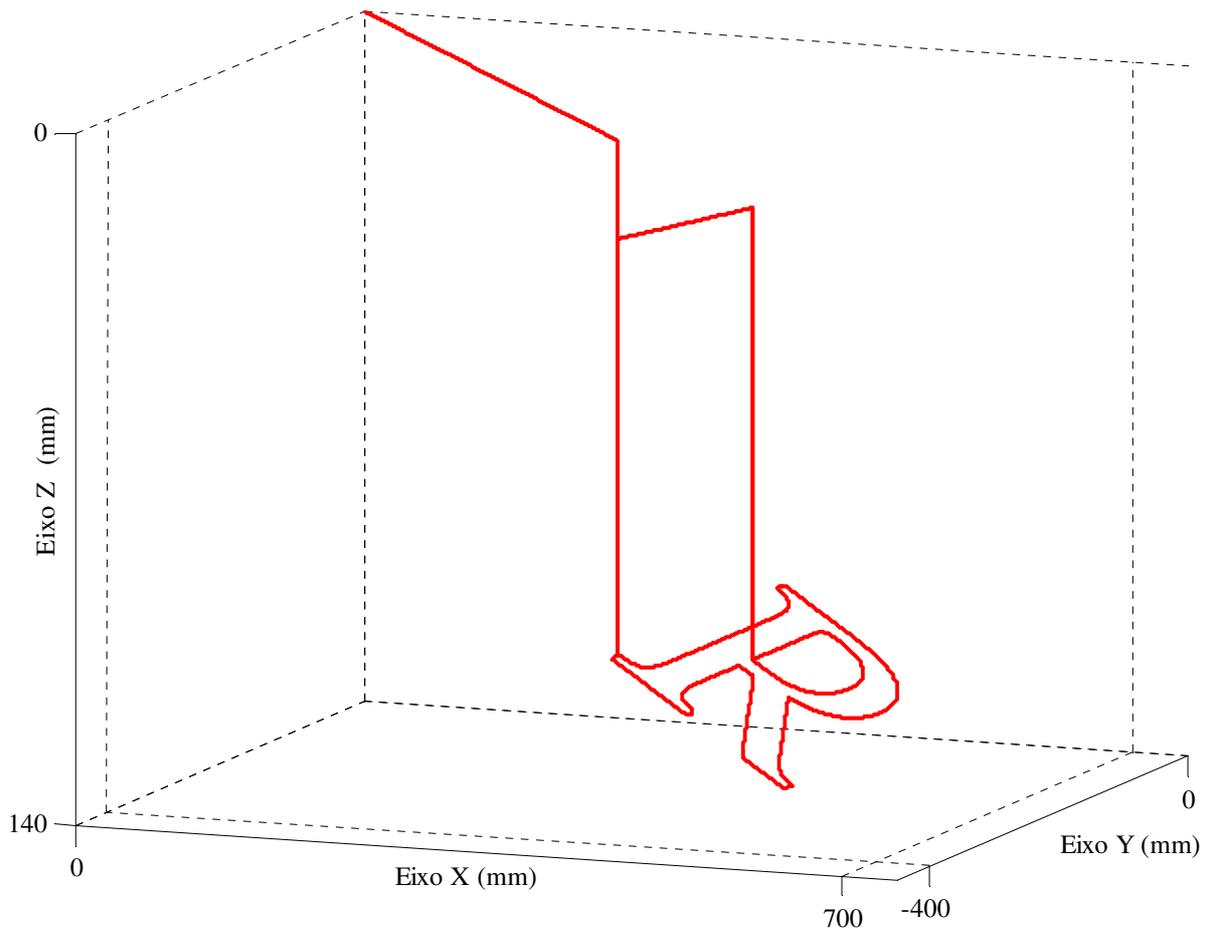


Figura 8.12 Processo 'LETRA_R', reproduzido na forma de gráfico 3D, dentro do Matlab

8.2 Módulo de Monitoramento Virtual

Neste módulo foi elaborado um modelo virtual do robô em três dimensões, com o objetivo de simular visualmente o processo estabelecido pelo módulo gerador de trajetória. O ambiente de simulação foi desenvolvido através da integração dos *softwares* Visual Nastran 4D e Simulink.

O Visual Nastran 4D é um *software* de simulações de esforços dinâmicos e estáticos por elementos finitos. Este *software* apresenta um pacote de simulação de movimentos que permite analisar o comportamento dinâmico de um corpo em movimento (deslocamento, velocidade, aceleração, etc.).

O *software* apresenta uma interface gráfica em três dimensões onde os componentes dos mecanismos são montados e são definidos os parâmetros do sistema. Os principais parâmetros atribuídos são: a massa dos elementos, a aceleração da gravidade, definição dos graus de liberdade, restrições de movimento, dentre outros. Outro recurso do Visual Nastran 4D consiste

de um pacote de comunicação com o Simulink, que propicia a troca de informações em tempo de processamento com o mesmo. Estas ferramentas possibilitaram o desenvolvimento do módulo de monitoramento virtual para o sistema de programação *off-line*. O diagrama esquemático do funcionamento deste módulo é apresentado na Fig. 8.13.

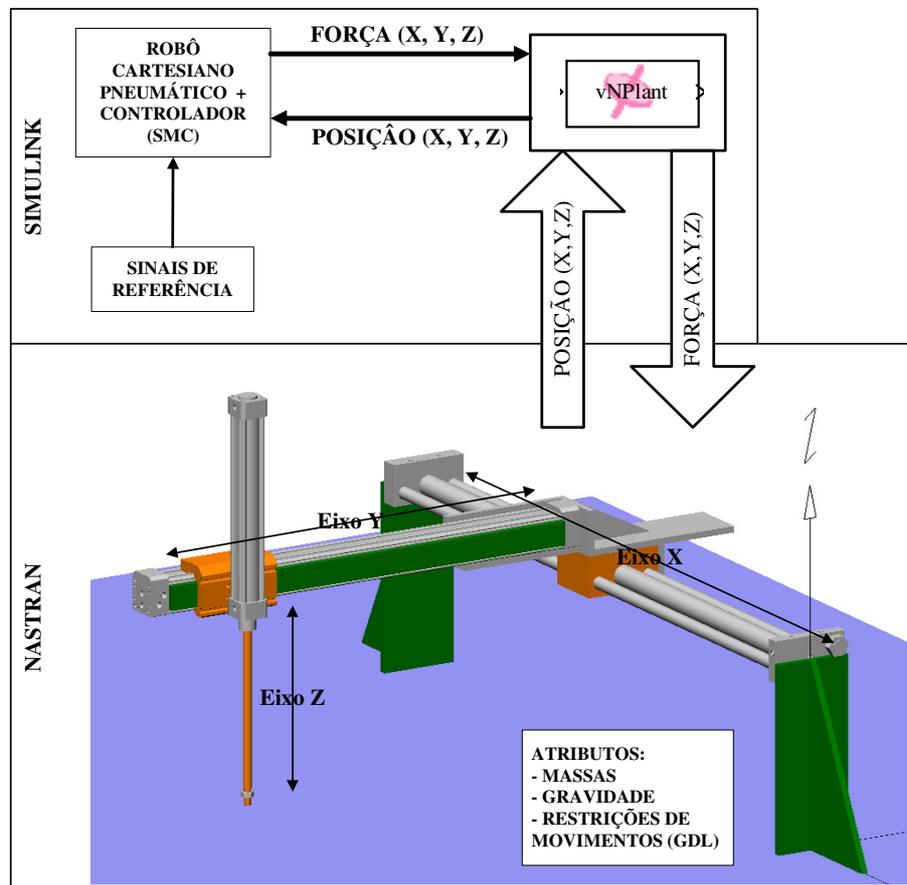


Figura 8.13 Diagrama esquemático funcional do módulo de monitoramento virtual

O módulo de monitoramento virtual possui como entrada os sinais de força resultantes da simulação do comportamento dinâmico do robô no Simulink. Esses sinais são processados pelo bloco "vNPlant" (bloco responsável pela comunicação entre o Nastran e o Simulink) e direcionados para o acionamento das juntas lineares do robô virtual (Nastran). Isto resulta na translação das juntas e dos elementos interligados. Os sinais de posição de cada junta são enviados de volta ao Simulink que os utiliza no cálculo do controle do robô.

Destacam-se os principais recursos proporcionados pelo módulo de monitoramento virtual:

- **Análise Visual do Processo** – o ambiente desenvolvido possibilita visualizar em três dimensões os movimentos realizados pelo robô de acordo com o processo industrial para o qual foi programado;

- **Análise de Colisões** - este recurso pode ser utilizado para avaliar possíveis colisões entre o robô e os elementos que integram a célula de manufatura, pois a mesma pode ser modelada através de um *software* CAD e adicionada ao ambiente de simulação;
- **Análise das Variáveis** – é possível monitorar através de gráficos, todas as variáveis relacionadas aos movimentos das juntas (posição, velocidade, aceleração, força, etc.);

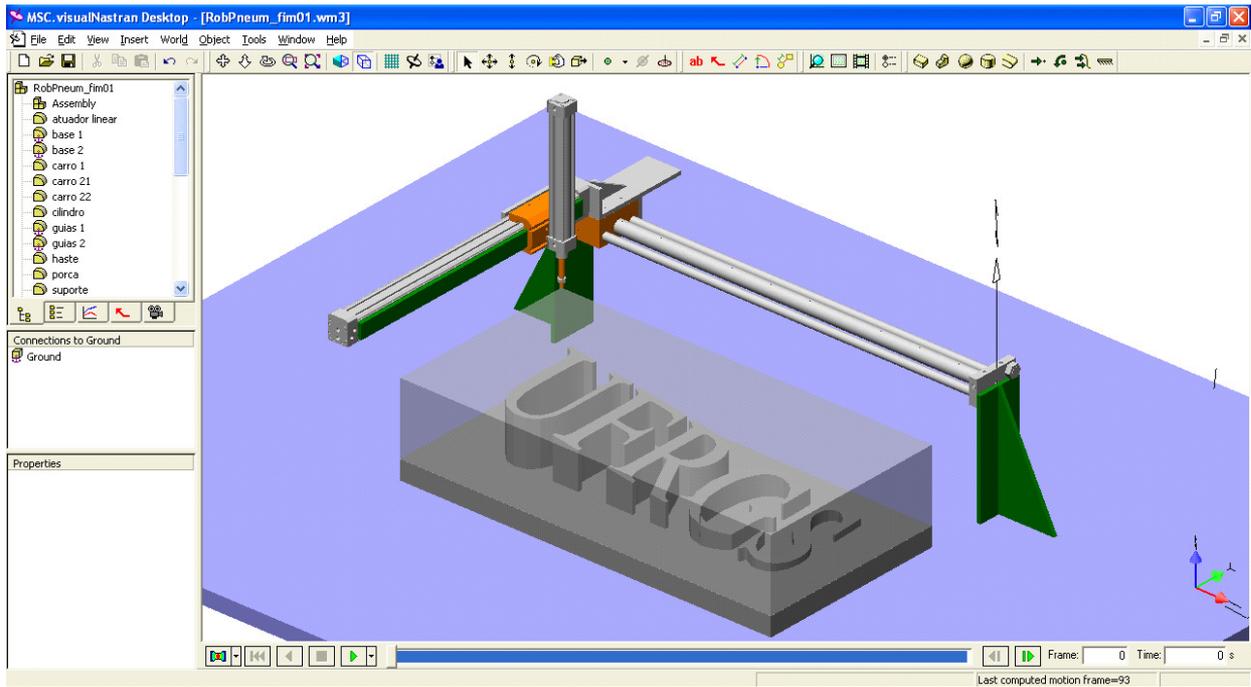


Figura 8.14 Ambiente de monitoramento virtual

A Fig. 8.14 mostra o robô pronto para iniciar a simulação do processo. O ponto inicial do processo deve ser necessariamente o mesmo ponto definido no módulo de geração de trajetória (*machine-zero*). Para tanto se faz necessário sobrepor o Design da Trajetória ao Volume de Trabalho para o correto alinhamento dos planos e eixos.

9 CONCLUSÕES

O presente trabalho propõe uma metodologia de projeto de natureza modular para robôs industriais, contemplando especificamente, o projeto de um robô cartesiano de três graus de liberdade acionado pneumaticamente e controlado por um algoritmo de controle por estrutura variável (SMC) e programação através de um sistema *off-line* com interface visual para o operador.

As ferramentas de valoração de conceitos (tabelas comparativas e o diagrama de Mudge), utilizadas durante as fases iniciais do projeto, foram de grande valia para a definição dos requisitos de projeto (Tabela 3.5), os quais tiveram papel fundamental para manter a execução do projeto focalizada nos objetivos.

A metodologia de projeto desenvolvida tem como principal atributo a modularidade das unidades técnicas, o que proporciona ao projetista a opção de utilização e modificação de cada unidade de acordo com as características de cada robô projetado.

O controlador por modos deslizantes (SMC), implementado em simulação, apresentou desempenho esperado, comprovando a sua robustez e eficácia na utilização para controle de sistemas dinâmicos com comportamento não-linear.

Relativamente à precisão de seguimento de trajetória obtida através das simulações, conclui-se que: com o uso do controlador SMC a variação da massa não influencia de forma significativa na precisão final do robô. Por outro lado, a velocidade da trajetória de referência definida no módulo gerador de trajetórias mostrou-se um fator decisivo na precisão obtida.

Apesar de os resultados obtidos por simulação necessitarem de uma validação experimental, evidencia-se que o ambiente de simulação e programação proposto será de grande valia na definição das trajetórias adequadas aos processos a serem desenvolvidos pelo sistema real.

O sistema de programação *off-line* desenvolvido apresentou os resultados esperados, pois o sistema proporciona ao usuário recursos visuais de monitoramento e de ajustes do processo, além de um ambiente visual amigável de programação.

Para uma avaliação do desempenho global do trabalho, em relação aos requisitos de projeto, é apresentado na Tabela 9.1 um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 9.1 Avaliação global de desempenho do projeto

Requisitos de Projeto	Grau de Importância	Desempenho do Projeto
Custo inferior a 50.000 reais (por robô)	8,18%	Atingido (componentes)
Sistema deve ter baixo consumo de energia	8,08%	Atingido
Carga de trabalho de 10 Kg ou mais	7,98%	Atingido
Configuração dimensional de acordo com os concorrentes de mercado	7,87%	Atingido
Relação peso/potência entre 3 e 4	7,36%	Atingido
Através de algum <i>software</i> de engenharia usual, gerar a programação de operação do robô	7,16%	Atingido
O robô deve ter no máximo 40 kg	5,32%	Atingido
Os componentes do robô devem ser de fácil substituição e a arquitetura de controle deve ser de fácil acesso	5,21%	Atingido
Precisão mínima de 1 mm (ponto-a-ponto)	4,70%	Atingido (dependendo da velocidade)
O <i>software</i> de programação deve ser capacitado a desenvolver ambientes industriais virtuais interativos	4,50%	Atingido
Precisão mínima de 3 mm (trajetória)	4,40%	Atingido (dependendo da velocidade)
O sistema robótico deve ser de fácil entendimento, de forma a não precisar investimentos altos em cursos para sua instalação e operação	3,78%	Atingido
O <i>software</i> de programação deve possuir recursos visuais de programação	3,78%	Atingido
O acionamento deve ser de forma direta	3,37%	Atingido
	2,76%	
A manutenção deve ser de acordo com os concorrentes de mercado	2,66%	Avaliado de forma superficial
Uso de um controlador adequado	1,94%	Atingido
O <i>software</i> de programação deve ser apto a monitorar o sistema <i>on-line</i>	1,23%	Avaliado de forma superficial

9.1 Trabalhos Futuros

- Construir um protótipo do robô proposto pelo presente trabalho, seguindo a metodologia de projeto apresentada (Projeto Detalhado);

- A partir do sistema real, identificar os parâmetros para avaliar o desempenho do modelo na reprodução do sistema;
- Implementar o controlador por estrutura variável e realizar testes comparativos com os resultados das simulações;
- Implementar o controlador não-linear em cascata com compensação de atrito, desenvolvido por Perondi (2002);
- Acrescentar recursos de programação “*on-line*”;
- Acrescentar efetadores (garras e ferramentas) e testar o sistema na execução de processos;
- Utilizar a mesma metodologia de projeto proposta para desenvolvimento de robôs com outros tipos de configuração, por exemplo, um robô articulado (antropomorfo) com atuadores pneumáticos rotacionais;

REFERÊNCIAS

- Adept Technology. Catálogo. 2006. Disponível em: <<http://www.adept.com>>. Acesso em: set 2006.
- Advantech, Catálogo. 2007. Disponível em: <<http://www.advantech.com/products>>. Acesso em: abr 2007.
- 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.
- ANDRIGHETTO, P. L.; VALDIERO, A. C.; CARLOTTO, L.; HARTER, I. I., 2005. **Desenvolvimento de um Manipulador Robótico Acionado Pneumaticamente**. IX Seminário de Automação de Processos da ABM, pp. 247-256.
- ANDRIGHETTO, P. L.; VALDIERO, A. C.; VINCENSI, C. N., 2004. **Experimental Comparison of the Control Solutions for Pneumatic Servo Actuators**. ABCM Symposium Series in Mechatronics, vol. 1, pp. 399-408.
- ANSYS INC. ANSYS. 2006. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em: set 2006.
- 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.
- BUSS, C. O.; CUNHA, G. D., 2002. **Modelo Referencial para o Processo de Desenvolvimento de Novos Produtos**. XXII Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica.
- Campetella Group. Catálogo. 2007. Disponível em: <<http://www.campetella.it>>. Acesso em: mar 2007.
- CANUDAS DE WIT, C.; OLSSON, H.; ASTROM, K.J.; LISCHINSKY, P., 1995. **A New Model for Control Systems with Friction**. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 40, no 3, pp. 419-425.
- DALL'AMICO, R. Fundamentos da Pneumática III. 2006. Disponível em: <

automacao.com.br>. Acesso em: jun 2007.

dSPACE GmbH. Catálogo. 2007. Disponível em: <<http://www.dspace.com>>. Acesso em: mar 2007.

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: ago 2007.

GUENTHER, R.; PERONDI, E. A., 2004. **O controle em cascata de sistemas pneumáticos de posicionamento**. Sba Controle & Automação, vol. 15, n. 2, pp. 149-161.

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.

HENRIQUES, R. V. B., 2002. **Programação e Simulação de Robôs**. In: Vitor Romano. (Org.). Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, pp. 109-125.

Hirata Robotics. Catálogo. 2006. Disponível em: <<http://www.hirata.de>>. Acesso em: ago 2006.

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.

ILCHMANN, A.; SAWODNY, O.; TRENN, S., 2006. **Pneumatic Cylinders: Modelling and Feedback Force-Control**. International Journal of Control, vol. 79; n. 6, pp. 650-661.

KUNZ, G. O., 2006. **Desenvolvimento de uma Arquitetura Programável de Controle em Tempo Real para um Servoposicionador Pneumático**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LAGES, W. F.; ALT, G. H.; HENRIQUES, R. V. B., 2003. **Controle em Tempo Real de Robôs**

Através de Rede Baseada no Protocolo IP. Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle, São José dos Campos.

LATINO, F.; SANDOVAL, D., 1996. **Quit Overspending for Servomotion Systems.** Machine Design, pp. 93–96.

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.

MathWorks. Matlab. 2006. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: jul 2007.

MENEGHELLO, G. P., 2003. **Aplicação de um Sistema Robótico utilizando Recursos de Sistemas CAD/CAM para o Processo de Fresamento.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MSC.Software. Visual Nastran 4D. 2006. Disponível em: <<http://www.vndesktop.com>>. Acesso em: set 2006.

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.

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

Parametric Technology Corporation. PRO/Engineer Wildfire. 2007. Disponível em: <<http://www.ptc.com>>. Acesso em: fev 2007.

Parker Hannifin Corporation. Catálogo. 2006. Disponível em: <<http://www.daedalpositioning.com>>. Acesso em: jun 2006.

PEREIRA, C. E.; LAGES, W. F., 2002. **Integração de Sinais e Dados.** In: Vitor Romano. (Org.). Robótica Industrial - Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, pp. 47-70.

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., 1999b. **Controle em malha fechada de um servoposicionador pneumático**. Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.

PERONDI, E. A.; GUENTHER, R., 2003. **Modelagem de um Servoposicionador Pneumático com Atrito**. Ciência & Engenharia, Uberlândia, vol. 12, n. 1, pp. 43-52.

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

PIRES, N. J., 2003. **Robótica Industrial - Software de Monitorização e Controlo**. IV Jornada de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico da Guarda, Instituto Politécnico da Guarda.

RAMIREZ, A. R. G.; DE PIERI, E. R.; GUENTHER, R., 2003. **Controle de um Manipulador Robótico com um Elo e uma Transmissão Flexível**. Sba Controle & Automação, vol.14, n. 4.

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.

Reis Robotics. Catálogo. 2006. Disponível em: <<http://www.resisrobotics.de>>. Acesso em: ago 2006.

REIS, A. V.; ANDRADE, L. F. S.; FORCELLINI, F. A., 2002. **Sistematização da Tarefa de Valorização dos Requisitos dos Clientes para o Uso do QFD**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

RICHARDSON, R.; BROWN, M.D; BHAKTA, B; LEVESLEY, M., 2005. **Impedance Control for a Pneumatic Robot Based Around Pole-placement, Joint Space Controllers**. Control Engineering Practice, vol. 13, n. 3, pp. 291-303.

Robotic Market. Robotic Industries Association. 2006. Disponível em:

<<http://www.roboticsonline.com>>. Acesso em: dez 2006.

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

ROMANO, V. F.; FERREIRA, C. V., 2002. **A Design Methodology for the Compensation of Positioning Deviation in Gantry Manipulators**. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, vol. XXIV, n. 2, pp. 83-92.

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.

SANTOS V. M. F. Robótica Industrial. 2007. Disponível em: <<http://www2.mec.ua.pt/activities/disciplinas/RoboticaIndustrial>>. Acesso em: mar 2007.

SCHEIDL, R.; GARSTENAUER, M.; MANHARTSGRUBER, B.; RIHA, G., 2000. **Present State and Future Development in Mechatronics and its Effect on Fluid Power System**. Developments in Fluid Power Control of Machinery and Manipulators, Garbacik, A. and Stecki, J. S. editors, pp.155-180, published by Fluid Power Net Publications, Cracóvia, Polônia.

SILVA, A. S.; SILVEIRA H. Introdução ao Controle Não-Linear. 2007. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~aguinald/>>. Acesso em: jul 2007.

SILVA, M. F. S., 1996. **Simulação e Programação Off-line de Robôs de Montagem**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

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.

SLOTINE, J. J. E.; LI, W., 1991. **Applied Nonlinear Control.** Prentice-Hall International Inc.

STOLL, K., 2001. **New Developments in Pneumatics.** Proceedings of The Fifth International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 34-40, Hangzhou, China.

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.

Tecnomac Robots. Catálogo. 2006. Disponível em: <<http://www.tecnomatrobots.it>>. Acesso em: ago 2006.

VALDIERO, A. C., 2005. **Controle de Robôs Hidráulicos com Compensação de Atrito.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

VIEIRA, D.V., 1998. **Análise Teórico Experimental de Servoposicionadores Lineares Pneumáticos.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

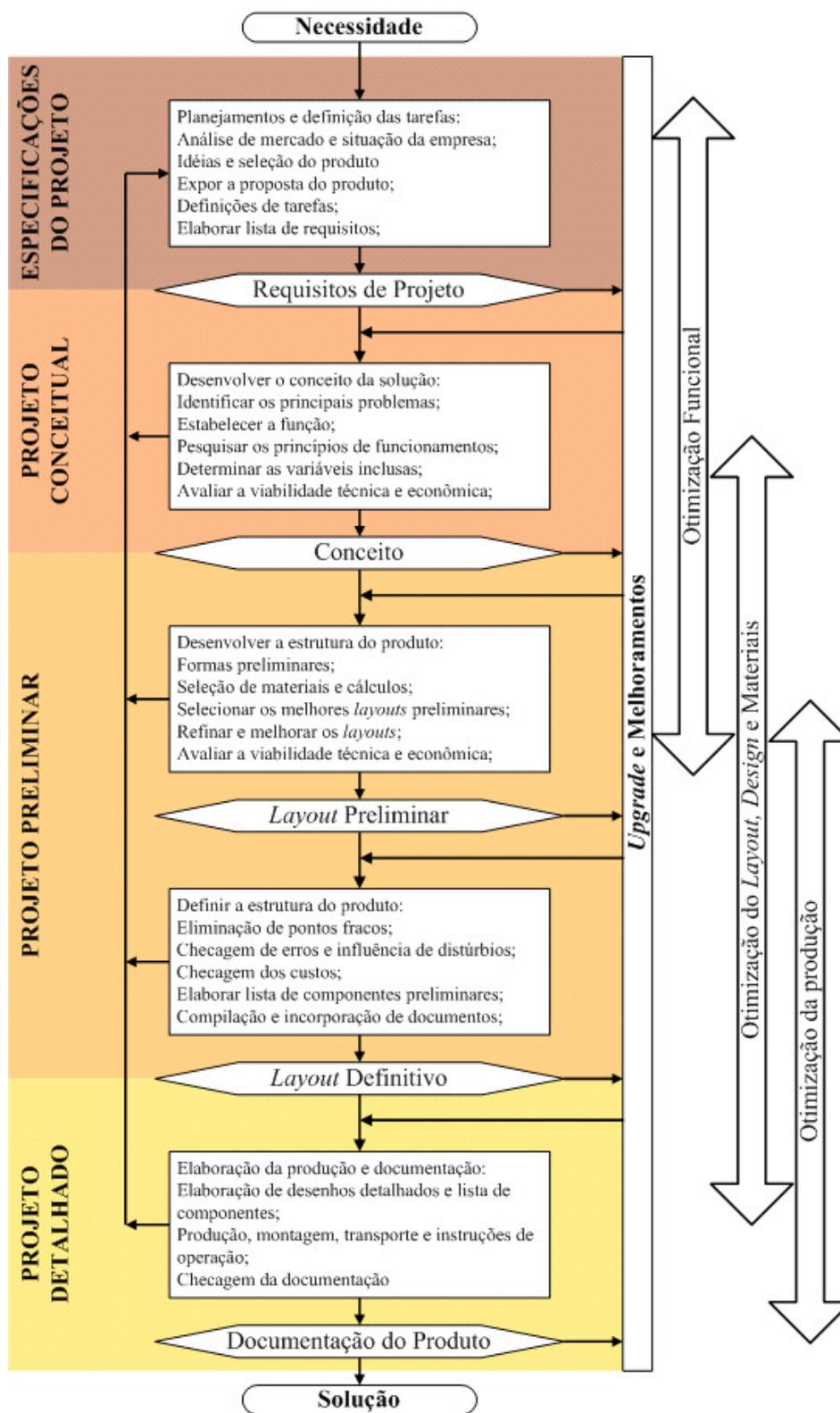
World Robotics. Relatório para a Comissão Econômica Européia das Nações Unidas. 2006. <<http://www.unece.org/stats/robotics/>>. Acesso em: out 2006.

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

YANG, YUAN-ZHAO; WU, CHUAN-YU; HU, XU-DONG, 2005. **Study of Web-based Integration of Pneumatic Manipulator and its Vision Positioning.** Journal of Zhejiang University, Science A, vol. 6, n. 6, pp. 543-548.

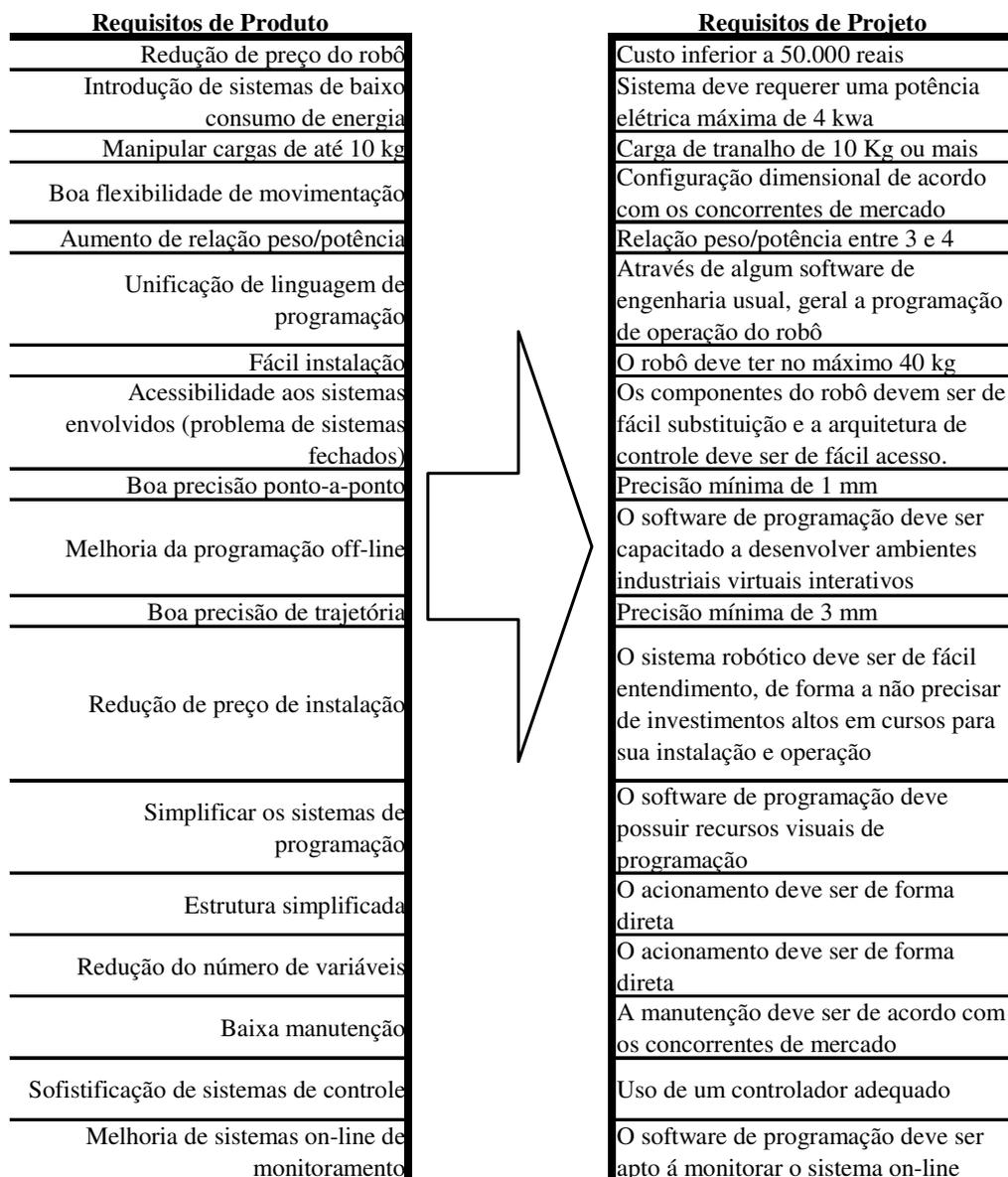
ANEXO I

Plano de atividades e fases que compõem a metodologia de projeto proposta original por Pahl e Beitz (1996).



ANEXO II

Esquema de transformação de requisitos de produto em requisitos de projeto.



ANEXO III

Orçamento de todos os componentes necessários para a montagem do protótipo
(somente componentes, não abrange os valores dos *softwares* envolvidos).

Quantidade	Componente
1	Cilindro pneumático 1000mm
1	Cilindro pneumático 500mm
1	Cilindro pneumático 250mm
3	Valvula proporcional
1	Filtro Regulador 1/4
1	Regua Potenciometrica 1250mm
1	Regua Potenciometrica 600mm
1	Regua Potenciometrica 300mm
30(m)	Mangueiras
6	Silenciadores
6	Luvas 1/4
15	Conexão 1/8 x 8mm
2	Conexão 1/4 x 8mm
9	Tee União 8mm
3	Conexão 3/8 x 8mm
6	Transdutor de pressão
1	Vaso de pressão
1	Microcomputador
1	DS1103 PowerPC
3	Fonte Chaveada
Valor Total de R\$ 42.142,66	