

FLAVIUS PORTELLA RIBAS MARTINS
Engenheiro Naval, Escola Politécnica da USP, 1979

ASPECTOS FUNDAMENTAIS DO PROJETO MECANICO DE UM ROBO "6R."

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da USP para a obtenção
do Título de Mestre em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Gérson Machado

Professor Assistente Doutor do
Departamento de Engenharia Naval
da EPUSP

Biblioteca da Escola Politécnica
São Paulo

FD. 704

SÃO PAULO

1986

CONSULTA
FD-704

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gérson Machado, pela criteriosa e dedicada orientação ao longo de todo o desenvolvimento da dissertação.

Ao Prof. Dr. Geraldo Lino de Campos, pela possibilidade que me ofereceu de trabalhar no desenvolvimento do protótipo do robô industrial e pelas imensas facilidades concedidas durante a elaboração da dissertação.

Ao Prof. Demi Getschko, pelo excelente trabalho de supervisão e acompanhamento do projeto.

Aos colegas membros de equipe Alberto Camilli, Rosa Maria Vega Perez e Milton Kaoru Kashiwakura, pelo incentivo e dedicação.

Ao estagiário de Engenharia Roberto Polese, pelo excelente auxílio prestado durante o projeto e construção do protótipo.

A Srta. Selma Bezerra de Melo, pela cuidadosa elaboração dos desenhos que se encontram neste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho trata de certos aspectos importantes que necessitam ser abordados durante a fase de ante-projeto mecânico de um robô com 6 graus de liberdade rotacionais (6R).

São apresentados os problemas básicos ligados à definição topológica e geométrica, cálculo e análise estrutural e análise do comportamento dinâmico do sistema.

Mostra-se ainda que, através da análise desses problemas e o emprego de modelos matemáticos e critérios de projeto adequados, é possível a elaboração de um procedimento sistemático de ante-projeto mecânico de um robô 6R.

Para finalizar, apresenta-se o projeto mecânico de um protótipo de robô industrial construído na Universidade de São Paulo, pondo-se em destaque as suas características mecânicas mais importantes.

ABSTRACT

This work deals with certain important aspects which should be evaluated during the mechanical design of an articulated robot with 6 rotational degrees of freedom (6R).

The most important problems related to the topological and geometrical definition, as well as the structural analysis and the description of the dynamical behaviour of the system are introduced.

It is proposed to solve the problem of synthesizing a 6R robot using a procedure based on the analysis of the problems above mentioned.

Finally, it is presented the mechanical design of the 6R robot built in the University of São Paulo, whose development was the basis to the generation of this work.

INDICE

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Apresentação	01
1.2. Objetivos	01
1.3. Literatura Disponível	02
1.4. Breve Histórico	04
1.5. Definições Básicas e Descrição Geral dos Robôs ..	06
1.6. Organização do Texto	11
2. ASPECTOS GERAIS DO PROJETO DE UM ROBÔ INDUSTRIAL	13
2.1. Introdução	13
2.2. Parâmetros de Projeto	13
2.3. O Ante-Projeto	16
2.4. O Detalhamento do Projeto	20
3. PROBLEMAS GEOMÉTRICO-TOPOLÓGICOS	22
3.1. O Sistema Mecânico Articulado	22
3.1.1. Elementos	22
3.1.2. A estrutura de localização	23
3.1.3. O Pulso	30
3.1.4. O dispositivo terminal	31
3.2. Os Problemas Geométricos de um Robô 6R	32
3.2.1. Introdução	32
3.2.2. A Cadeia cinemática 3R	33
3.3. Otimização e Análise	34
3.3.1. Otimização da estrutura de localização ...	34
3.3.2. Otimização do pulso	39
3.3.3. Análise do robô 6R	42

3.4. Síntese Geométrica	46
3.4.1. Métodos de síntese	46
3.4.2. Síntese a partir do espaço de trabalho ...	47
3.4.3. Síntese a partir de configurações críticas	55
3.4.4. Utilização dos métodos de síntese apresen- tados	58
4. PROBLEMAS DE NATUREZA ESTRUTURAL	59
4.1. Elementos do Projeto Estrutural	59
4.1.1. Linhas de projeto estrutural	60
4.1.2. Estruturas rígidas e massivas	61
4.1.3. Estruturas fabricadas com materiais com- postos	62
4.1.4. Estruturas ressonantes	63
4.2. Projeto Estrutural de Robôs Massivos	63
4.2.1. Parâmetros de projeto	64
4.2.2.1. Sistemas de acionamento	64
4.2.2.2. Carga máxima transportada	70
4.2.2.3. Precisão de posicionamento	70
4.2.2.4. Fator de qualidade	72
4.2.2. Modelos matemáticos para o projeto estru- tural	74
4.2.3. O controle das deflexões	74
4.2.3.1. O modelo estrutural	74
4.2.3.2. O critério de projeto estrutural	79
4.2.4. O controle do fator de qualidade	81
4.2.5. O controle de efeitos dinâmicos indesejá- veis	83

5. A ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO	87
5.1. Introdução	87
5.2. Simulação de Operações	87
5.2.1. Operações-padrão	88
5.2.2. Modelos cinemático-dinâmicos	91
5.2.3. Um sistema de simulação de operações	94
5.3. O Sistema Atuador de um robô Hidráulico	96
5.3.1. Análise geométrica	97
5.3.1.1. Acionamento do pulso	97
5.3.1.2. Acionamento da base giratória ...	98
5.3.1.3. Acionamento dos braços	99
5.3.2. Análise estática	104
5.3.3. Análise Dinâmica	112
5.4. Avaliação Global do Sistema de Acionamento	115
6. METODOLOGIA PARA O ANTE-PROJETO MECÂNICO DE ROBÔS ...	117
6.1. Introdução	117
6.2. O Sistema de Auxílio ao Ante-Projeto	117
6.3. Organização das Rotinas de Projeto	119
6.4. Procedimento de Síntese de um Robô BR com Acio- namento Hidráulico	122
6.4.1. Síntese geométrico-topológica	122
6.4.2. Procedimentos de projeto e análise estru- tural	126
6.4.3. A especificação do sistema de acionamento	132
6.4.4. Realimentação do processo	145
7. O PROTÓTIPO DE ROBÔ INDUSTRIAL DA USP.....	148
7.1. Introdução	148

7.2. Descrição do Sub-Sistema Mecânico	149
7.3. O Sistema de Controle	155
7.4. O "Software" de Controle	156
7.5. Potencialidade do Protótipo	157
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	158
8.1. Conclusões	158
8.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	159
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
APÊNDICES:	
A. Algoritmos de Transformação de Coordenadas	I
B. A Envoltória do Espaço de Trabalho Principal ...	IX
C. Algoritmo de Síntese Geométrica	XII
D. Sistemas de Potência para robôs	XVI
E. Cálculo de Deflexões Estruturais	XXI
F. Cálculo das Frequências Naturais da Estrutura .	XXVIII
G. Análise Dinâmica a Partir do Tensor Generalizado de Inércia	XXXV
H. Modelo Cinemático-Dinâmico	XLVII
I. Curvas Características de Dispositivos Hidráulicos	LXVII
J. Funções de Transferência de Dispositivos Servo- Atuadores	LXXIII
K. Desenhos do Protótipo de Robô Industrial da USP	LXXX

SIMBOLOGIA

- R - Variável vetorial
- [R] - Variável vetorial ou matricial, de acordo com o contexto
- $[R] = \frac{d}{dt} [R]$ - derivada temporal do vetor ou matriz [R]
- $S = \frac{dS}{dt}$ - derivada temporal da variável escalar S
- [H] - vetor que define a posição de um ponto fixo a um objeto de forma qualquer manipulado por um robô
- $[U_h], [U_p]$ - vetores que definem a orientação no espaço de um objeto de forma qualquer manipulado por um robô
- $a_1, \dots, a_4,$
 s_1, \dots, s_4 - dimensões características de uma cadeia cinemática serial 6R
- α_1, α_2 - ângulos característicos de uma cadeia cinemática serial 3R
- $\theta_1, \dots, \theta_4$ - coordenadas angulares de um robô 6R
- $\theta_{1\text{min}}, \dots, \theta_{4\text{min}}$ - limites inferiores das coordenadas $[\theta]$
- $\theta_{1\text{max}}, \dots, \theta_{4\text{max}}$ - limites superiores das coordenadas $[\theta]$
- $\Delta\theta_k$ - varredura angular do eixo k
- Γ - ângulo formado entre a bissetriz de $\Delta\theta_k$ e o eixo \vec{a}_k

- A_{EN} - área compreendida pela envoltória do espaço de trabalho principal
- a_r - alcance radial máximo
- l_r - largura radial máxima
- ϵ - precisão de posicionamento
- $FQ(\theta_3)$ - fator de qualidade da estrutura dos braços na configuração θ_3
- $A(\theta_3)$ - alcance da estrutura dos braços na configuração θ_3
- (u, v, t) - sistema de eixos cartesianos locais utilizados para o cálculo dos esforços internos atuantes na estrutura dos braços
- t_2, t_3 - deformação linear segundo os eixos \vec{t}_2 e \vec{t}_3
- δl - máxima deflexão admitida na extremidade da estrutura dos braços
- $f_{1t}(\theta_3)$ - frequência fundamental de flexão da estrutura dos braços na configuração θ_3
- $f_{1\omega}(\theta_3)$ - frequência fundamental de flexo-torção da estrutura dos braços na configuração θ_3
- T_a, T_d - tempos de aceleração e desaceleração característicos do perfil de velocidades de 3 fases utilizado para a simulação de operações com a estrutura de localização
- V_{max} - velocidade máxima desse perfil de velocidades
- S_{max} - comprimento das trajetórias retas utilizadas na simulação de operações com a estrutura de localização

- $[\dot{\theta}]$ - vetor de velocidades angulares das n articulações do robô
- $[\ddot{\theta}]$ - vetor de acelerações angulares das n articulações do robô
- T_o - tempo total utilizado na simulação de uma operação de orientação com o pulso
- T_{oa}, T_{od} - tempos de aceleração e desaceleração característicos do perfil de velocidades utilizado para a simulação de operações com o pulso
- T_k - torque atuante na articulação k
- P_s - pressão da fonte
- P_r - pressão de retorno
- Q - vazão
- P - pressão
- QLN - vazão nominal através da servo-válvula

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.1. Diagrama funcional de um robô industrial de 2a. geração
- FIGURA 2.1. Projeto mecânico de um robô industrial ...
- FIGURA 2.2. Procedimento típico de ante-projeto
- FIGURA 3.1. Orientação de um corpo de forma qualquer no espaço
- FIGURA 3.2. Cadeia cinemática serial
- FIGURA 3.3. Movimentos segundo eixos ortogonais XYZ
- FIGURA 3.4. Simbologia para os movimentos ortogonais.....
- FIGURA 3.5. Topologias capazes de operar como estruturas de localização
- FIGURA 3.6. Modelos de robôs utilizadas industrialmente .
- FIGURA 3.7. Robô articulado - nomenclatura básica
- FIGURA 3.8. Cadeia cinemática serial 3R com 8 parâmetros característicos
- FIGURA 3.9. Topologia ABB
- FIGURA 3.10. Variação da forma da secção transversal YZ do espaço de trabalho com as relações a_1/L e a_3/a_2
- FIGURA 3.11. Variação da área da secção transversal YZ com as relações a_3/a_2 e a_1/L
- FIGURA 3.12. Variação da área da secção transversal YZ com s_2 e s_3 para $a_1=0$, $a_2=a_3$, $s_1=0$, $s_2=s_3$ e $a_2+a_3+s_2+s_3=L$
- FIGURA 3.13. Modelos de pulsos com máxima destreza

- FIGURA 3.14. Modelos 6R resultantes da otimização simultânea da estrutura de localização e do pulso ...
- FIGURA 3.15. Modelo B2 - indeterminação das coordenadas angulares
- FIGURA 3.16. Parâmetros característicos da envoltória do espaço de trabalho principal
- FIGURA 3.17. Envoltória definida por 4 arcos de circunferência
- FIGURA 3.18. Envoltória definida por 4 arcos de circunferência e dois arcos de epiciclóide
- FIGURA 3.19. Variação da forma da envoltória com o ângulo Γ
- FIGURA 3.20. Variação da área da envoltória com o ângulo Γ
- FIGURA 3.21. Alcance e largura radiais máximos
- FIGURA 3.22. Soldagem de caixas retangulares
- FIGURA 4.1. Acionamento elétrico serial
- FIGURA 4.2. Acionamento elétrico paralelo
- FIGURA 4.3. Acionamento do pulso por mecanismo de polias e correias dentadas
- FIGURA 4.4. Acionamento do pulso por mecanismo de engrenagens acopladas a eixos concêntricos
- FIGURA 4.5. Robô hidráulico típico
- FIGURA 4.6. Fator de qualidade X Atividade industrial
- FIGURA 4.7. Amplificação das deformações da estrutura suporte da base giratória
- FIGURA 4.8. Modelo estrutural dos braços
- FIGURA 4.9. Deflexões da estrutura dos braços
- FIGURA 4.10. Vibrações na estrutura dos braços

- FIGURA 4.11. Modelo para análise de vibrações
- FIGURA 4.12. A elipse generalizada de inércia de um robô na configuração (θ_2, θ_3)
- FIGURA 5.1. Trajetórias-teste para a estrutura de localização
- FIGURA 5.2. Perfil de velocidades de 3 fases
- FIGURA 5.3. Simulação de trajetórias-teste
- FIGURA 5.4. Curso θ_1 limitado pelo comprimento das mangueiras
- FIGURA 5.5. Sistema de distribuição de óleo
- FIGURA 5.6. Mecanismos de acionamento
- FIGURA 5.7. Parâmetros geométricos para a localização dos mecanismos de acionamento
- FIGURA 5.8. Circuito hidráulico do robô da USP
- FIGURA 5.9. Procedimento para a especificação de dispositivos hidráulicos
- FIGURA 5.10. Geração das correntes de controle de referência
- FIGURA 5.11. Resposta discretizada em z intervalos de tempo
- FIGURA 6.1. Organização das rotinas de auxílio ao projeto
- FIGURA 7.1. Características mecânicas principais do protótipo
- FIGURA 7.2. Princípio de funcionamento do redutor de engrenagens do protótipo
- FIGURA 7.3. Esquema dos movimentos do pulso
- FIGURA A.1. Cadeia cinemática 3R

FIGURA A.2.	Modelo C
FIGURA A.3.	Modelo A1
FIGURA A.4.	Modelo B1
FIGURA B.1.	A transformação $T:(\theta_2, \theta_3) \rightarrow (y, z)$
FIGURA C.1.	Algoritmo para a síntese geométrica de um robô 6R
FIGURA C.2.	Sistemas de referência utilizados pelo algoritmo de síntese geométrica
FIGURA E.1.	Esforços externos aplicados à estrutura dos braços
FIGURA E.2.	Esforços externos aplicados ao ponto C_4
FIGURA E.3.	Esforços atuantes em viga de secção variável engastada em uma extremidade
FIGURA E.4.	Estrutura dos braços construída com vigas de secção variável
FIGURA G.1.	Modelo de manipulador com juntas rotacionais ..
FIGURA G.2.	Variação de forma e orientação do elipsóide ..
FIGURA H.1.	Representação de um manipulador serial
FIGURA I.1.	Operação de um cilindro hidráulico
FIGURA I.2.	Dimensões características de um atuador rotativo
FIGURA I.3.	Curvas características de um motor de pistões radiais
FIGURA I.4.	Estágio hidráulico de uma servo-válvula
FIGURA I.5.	Curvas características da servo-válvula ZO-76 MOOG
FIGURA J.1.	Atuador hidráulico servo-comandado acionando

carga inercial
FIGURA J.2. Motor hidráulico servo-comandado accionando
carga inercial.....

LISTA DE TABELAS

- TABELA 3.I Comparação entre as 4 topologias básicas de robôs
- TABELA 3.II Recomendações para o dimensionamento básico de robôs 6R com um dos modelos A1, B1 ou C
- TABELA 5.I Máximas varreduras angulares de um pulso acionado por atuadores hidráulicos rotativos
- TABELA 7.I Características mecânicas principais do protótipo construído.....

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

Este trabalho tem sua origem no projeto "Um Robô Industrial para Aplicações Múltiplas", que vem sendo desenvolvido na Universidade de São Paulo a partir de meados de 1982, pelo Centro de Computação Eletrônica. Durante três anos uma equipe multi-disciplinar composta por engenheiros desse Centro desenvolveu o projeto de um robô com as características propostas: 5 graus de liberdade rotacionais, grande capacidade de carga (70 kg), acionamento hidráulico, microprocessador central baseado no M-68000. O primeiro protótipo, inteiramente construído com recursos da própria Universidade, foi apresentado na 5a. Feira Internacional de Informática, realizada em São Paulo em 1985, recebendo nessa ocasião o 2o. prêmio concedido pela ABICOMP (Associação Brasileira das Indústrias de Computadores e Periféricos) aos melhores trabalhos apresentados pelas instituições de pesquisa que participaram do evento.

1.2. Objetivos

O presente trabalho propõe-se a tratar dos problemas mais significativos que se apresentam na fase de anteprojetado mecânico de um robô industrial, enfatizando aqueles que são próprios de robôs com as características do protóti-

po construído. Nas diversas seções desse trabalho, procura-se:

- 1o. Discorrer sobre os aspectos mais importantes do subsistema mecânico de um robô industrial;
- 2o. Apresentar alguns critérios e modelos matemáticos úteis ao desenvolvimento do ante-projeto de robôs industriais;
- 3o. Descrever um procedimento de ante-projeto de robôs articulados baseado em um sistema de auxílio ao ante-projeto de robôs;
- 4o. Apresentar o projeto mecânico do protótipo construído no Centro de Computação da USP.

1.3. Literatura disponível

A Robótica, por ser uma área da Engenharia de desenvolvimento relativamente recente, encontra-se ainda em fase de sedimentação de conceitos, de modo que a grande maioria dos seus problemas característicos têm sido abordados por metodologias bastante variadas.

Diversos problemas básicos relativos ao projeto de manipuladores já podem ser considerados resolvidos. As questões ligadas à síntese do tipo de cadeia cinemática e ao número de graus de liberdade são bem compreendidas: a quase totalidade dos manipuladores existentes emprega uma cadeia serial em que o número de articulações (rotacionais ou translacionais) é igual ao número de graus de liberdade con-

ferido ao movimento do dispositivo terminal. Os problemas mais complexos de projeto, contudo, dizem menos respeito à topologia e mais à escolha de dimensões e componentes: aí intervêm de modo não trivial requisitos geométricos, cinemáticos, dinâmicos e industriais, em geral conflitantes.

A síntese de sistemas a partir de características desejáveis é, indiscutivelmente, a abordagem em Engenharia que apresenta as maiores dificuldades. No campo da Robótica essa afirmação é especialmente verdadeira: trabalhos dedicados à análise de certas características de desempenho de robôs já projetados (ou pelo menos definidos) existem em grande quantidade e variedade; em compensação, estudos ligados à síntese de robôs são muito difíceis de serem encontrados [38]. Tal se deve não só à complexidade inerente a esse tipo de abordagem mas, também, à necessidade de as indústrias, que naturalmente detêm metodologias próprias de síntese e projeto, manterem um certo segredo em torno do assunto.

A bibliografia consultada para a elaboração deste trabalho consiste, principalmente, de estudos que abordam os problemas de projeto de manipuladores do ponto de vista analítico. Não foi possível localizar material de pesquisa com maior afinidade ao tema proposto.

1.4. Breve histórico

O grande desenvolvimento industrial das últimas décadas tem-se caracterizado pela utilização de processos cada vez mais automatizados, em que a presença do homem como mão-de-obra operadora final vai-se restringindo, gradativamente, a um papel secundário. Muito embora a idéia de se automatizar completamente as linhas de produção não seja nova, ela só se tornou tecnicamente exequível em meados da década de 70. Na realidade, o estudo de controle automático e sistemas de automação é anterior à Segunda Grande Guerra, mas foi o rápido crescimento da indústria de computadores e da ciência da informática que possibilitou a aplicação de algoritmos e técnicas de controle à automação de processos.

A evolução dos sistemas de automação em sistemas robóticos tem-se processado rapidamente, sendo possível hoje identificar-se 3 de seus estágios ou gerações:

1a. Geração: Corresponde aos manipuladores manuais e aos robôs de sequência. Os primeiros são dispositivos controlados remotamente por um operador que busca preservar-se de um ambiente hostil (caso das operações com produtos radio-ativos) ou, então, amplificar os seus esforços (movimentação de cargas pesadas). Tais dispositivos são, via de regra, acionados hidráulicamente, não possuindo funções sensoriais e de controle, as quais são exercidas pelo operador. Os robôs de sequência classificam-se em "robôs de sequência fixa" e "robôs

de sequência variável". Os primeiros são dispositivos dedicados, ou seja, destinam-se à automação de uma tarefa bastante específica, não dispendo de flexibilidade para se adaptarem a quaisquer mudanças na mesma. Os de sequência variável, muitas vezes denominados "pick and place", são manipuladores simples, em geral com acionamento pneumático, que executam movimentos controlados por interruptores de fim de curso e se destinam à movimentação de pequenas cargas.

2a. Geração: Está associada aos robôs repetidores ("playback robots") e aos robôs programáveis. Os primeiros possuem 2 estados operacionais típicos. No modo de aprendizado ("teaching mode"), uma dada tarefa é ensinada ao robô mediante a gravação, na memória do computador que controla o sistema, de informações capazes de descrevê-la adequadamente - a tarefa em questão é realizado por um operador humano experiente e a gravação é efetuada por um sistema de aquisição de dados. No modo de execução, o robô repete as instruções armazenadas na memória reproduzindo, assim, a tarefa que lhe foi "ensinada". Já os robôs programáveis desempenham suas funções através de comandos numéricos fornecidos por programas normalmente escritos em linguagem de alto nível.

3a. Geração: Os robôs de 3a. geração começaram a ser desenvolvidos a partir do início da década de 80. Eles são muitas vezes denominados "robôs inteligentes", apresentando como principal característica a capacidade de determinar suas

próprias ações, capacidade essa conferida pelo uso de inteligência artificial e pelo adequado sensoreamento do ambiente e do próprio robô.

Os robôs de 2a. e 3a. gerações têm por característica comum a flexibilidade, ou seja, podem desempenhar tarefas distintas mediante reprogramação. É no desenvolvimento e aperfeiçoamento desses sistemas que a indústria da Robótica tem, atualmente, concentrado seus maiores esforços.

1.5. Definições Básicas e Descrição Geral dos Robôs

Muito embora o termo robô seja amplamente utilizado como sinônimo de máquina antropomórfica capaz de realizar múltiplas funções de modo automático, não existe no meio industrial uma clara definição para esse termo. As principais entidades de fabricantes desses sistemas em todo o mundo possuem definições conflitantes. A associação japonesa (JIRA - Japan Industrial Robots Association) considera como robô todos aqueles dispositivos de 1a, 2a e 3a gerações mencionados no item anterior. Já a associação americana (RIA - Robotics Industries Association) exclui de sua definição os dispositivos de 1a. geração.

De acordo com a International Standards Organization (ISO), entidade que busca a normalização, a nível mundial, de padrões e medidas, "um robô industrial é um manipulador multi-funcional, reprogramável com controle automático

de posição, possuindo vários eixos e sendo capaz de manipular materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados através de operações variáveis programadas para o desempenho de uma série de tarefas" [41].

Os robôs industriais de 2a. geração compõem-se de diversos sub-sistemas, cada um dos quais realizando funções bem características, conforme se discrimina a seguir [10]:

1o. Sistema Mecânico Articulado: é responsável pela criação do arranjo espacial que permite o relacionamento entre a ferramenta de trabalho (ou peça manipulada) e os equipamentos de produção. Compõe-se de estruturas mecânicas articuladas segundo certos padrões topológicos, dotadas de vários graus de liberdade e que executam movimentos de rotação e/ou translação relativamente aos seus eixos próprios.

2o. Sistema de Atuação: Consiste em um conjunto de atuadores servo-controlados, cada um dos quais dedicado ao fornecimento de potência a um dos graus de liberdade do sistema mecânico articulado. De acordo com a natureza da potência fornecida o sistema de atuação pode ser pneumático, elétrico ou hidráulico.

3o. Sistema de Transmissão: é constituído por um conjunto de mecanismos responsáveis pela conversão das variáveis de saída dos atuadores (força ou torque, velocidade linear ou an-

gular) nas variáveis de entrada dos respectivos graus de liberdade por eles comandados.

4o. Sistema de Controle: é responsável pelo controle dos movimentos do robô bem como pelo armazenamento das tarefas que ele deverá executar. Os robôs mais simples normalmente utilizam um controlador lógico adaptado enquanto que os mais elaborados empregam um micro-computador de certo porte (16 bits). Este pode realizar todas as funções de controle ou, então, operar como o elemento principal de uma rede de microcomputadores de menor porte dedicados ao controle de cada um dos servo-atuadores do sistema.

5o. Sistema de Programação: Consiste de unidades de entrada e saída e de uma linguagem de alto nível (ou sistema de aquisição de dados). No caso dos robôs programáveis, as tarefas são descritas através de um programa escrito em uma linguagem de alto nível. Para os robôs repetidores existe um sistema de aquisição de dados que grava na memória de tarefa, em código, no "modo de aprendizado", as informações significativas de uma dada operação.

6o. Sistema de Realimentação: é constituído por um conjunto de sensores de posição (eletro-magnéticos ou ópticos) e de velocidade, associados a cada um dos graus de liberdade do sistema mecânico articulado. Destinam-se à geração de sinais indicadores da posição e velocidade reais de cada um dos ei-

xos de movimento. Esses sinais são enviados ao sistema de controle para que se efetuem as necessárias correções nos movimentos do robô.

7o. Sistema de Sincronização: Consiste de um conjunto de dispositivos e funções que possibilitam a coordenação das ações do robô com máquinas e/ou eventos externos.

Os robôs de 3a. geração possuem ainda um sistema sensorial composto por sensores que informam o controle sobre mudanças "observadas" nas condições do ambiente de trabalho do robô. Esses sensores variam desde simples dispositivos de detecção de objetos até elaborados sistemas de visão tri-dimensional.

O diagrama da figura 1.1 representa funcionalmente um robô industrial típico de 2a. geração. Nele se observa a interligação dos diversos sistemas anteriormente apresentados, através de fluxos de energia e informação.

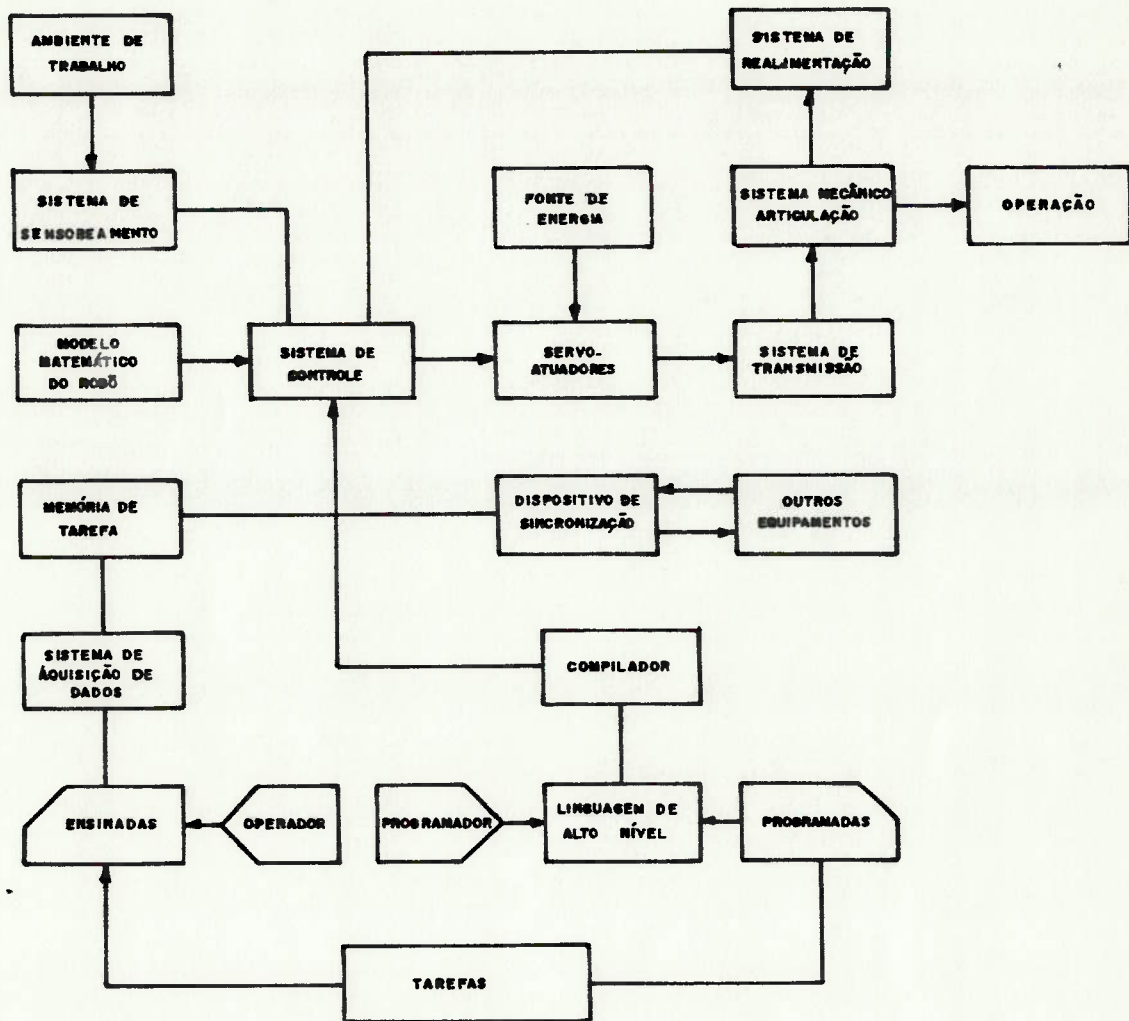


FIGURA 1.1. Diagrama funcional de um robô industrial de 2ª. geração

1.6. Organização do Texto

A partir do próximo capítulo serão abordados os aspectos de maior relevância do projeto mecânico de robôs articulados.

No capítulo 2, apresenta-se de forma genérica os principais elementos do projeto mecânico de robôs, procurando-se mostrar, grosso modo, a maneira como eles interagem e os principais problemas que necessitam ser examinados a fim de que se realize a síntese desejada.

No capítulo 3 são abordados os problemas topológico-geométricos de robôs industriais. Inicialmente, apresentam-se topologias variadas e suas características mais importantes e, a seguir, restringe-se a análise ao estudo de robôs articulados.

No capítulo 4 apresentam-se alguns critérios e ferramentas de análise úteis ao cálculo e projeto estrutural de robôs articulados.

No capítulo 5 discute-se toda a problemática ligada à especificação de um sistema de acionamento para robôs articulados, com ênfase para o acionamento hidráulico.

No capítulo 6 propõe-se uma metodologia de anteprojecto de robôs articulados utilizando um hipotético sistema de auxílio ao projeto de robôs que se vale de rotinas baseadas nos modelos matemáticos sobre os quais se discorreu nos capítulos 3, 4 e 5.

No capítulo 7 apresenta-se o projeto mecânico do protótipo de robô industrial do Centro de Computação da USP, o qual se constitui na fonte motivadora deste trabalho.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões do trabalho e propostos temas para serem tratados em trabalhos futuros.

2. ASPECTOS GERAIS DO PROJETO DE UM ROBÔ INDUSTRIAL

2.1. Introdução

O projeto mecânico de um robô industrial é uma tarefa complexa e de natureza multi-disciplinar. Durante as suas diversas fases deve-se estudar o comportamento de um número considerável de variáveis que interagem mutuamente de uma forma não trivial procurando-se, com isso, gerar soluções que atendam não apenas às especificações de projeto mas que também sejam industrialmente exequíveis.

O diagrama da figura 2.1 apresenta um esboço do processo de projeto de um robô industrial. Os principais elementos que aí comparecem - parâmetros de projeto, rotinas de auxílio ao projeto, restrições, etc - são característicos de todo projeto de sistemas complexos de Engenharia, e serão discutidos nos próximos itens.

2.2. Parâmetros de Projeto

O estabelecimento de parâmetros de projeto adequados é fundamental para a geração de bons projetos de Engenharia. Com relação à Robótica tem-se buscado chegar a um consenso quanto à escolha e definição desses parâmetros, de modo a que se possa fixar uma linguagem comum entre o fabricante de robôs e os seus usuários. De um modo geral, pode-se

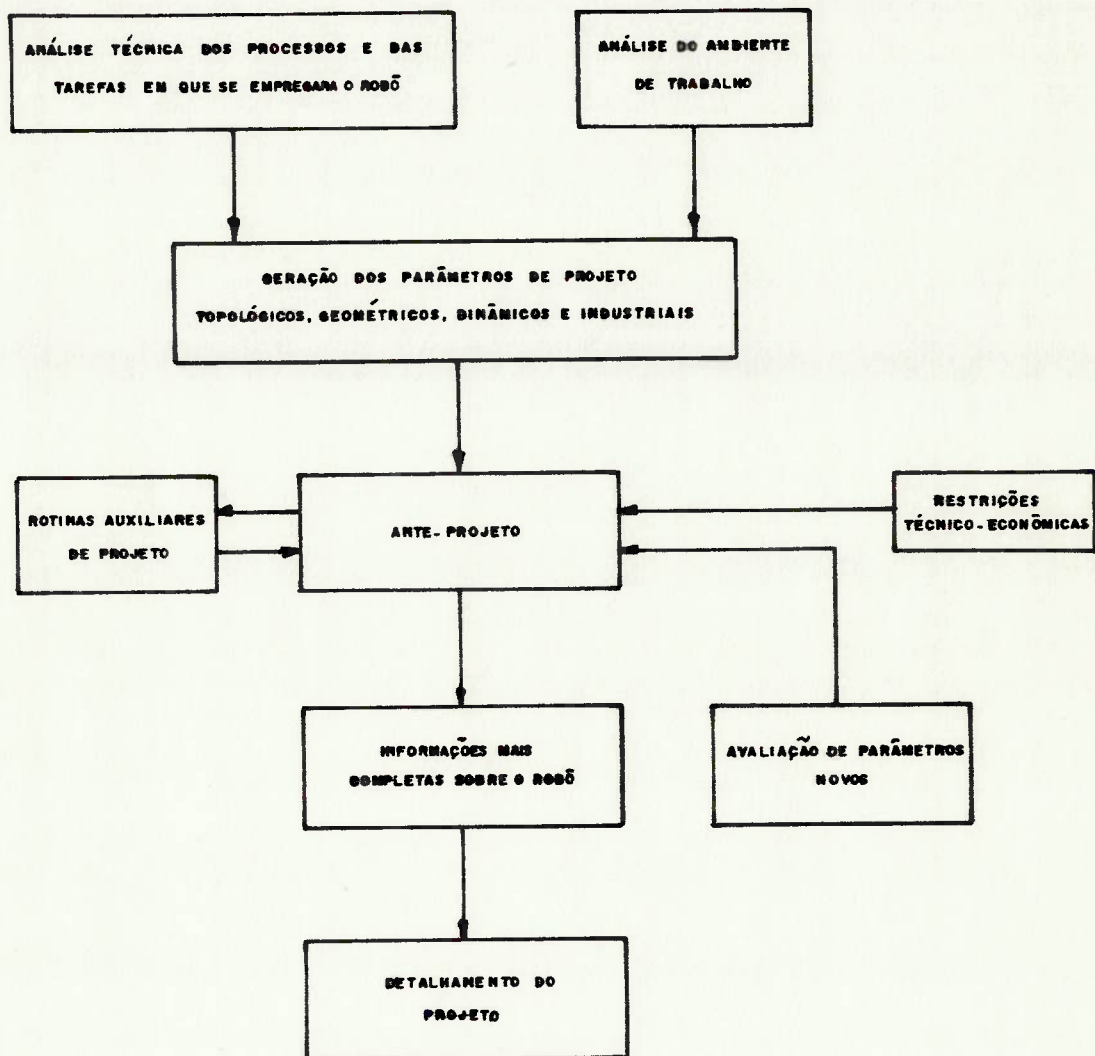


FIGURA 2.1. O projeto mecânico de um robô industrial

afirmar que é a partir da análise técnica dos processos e tarefas em que se irá empregar o robô, bem como do seu ambiente de trabalho, que se pode determinar com segurança os seus parâmetros de projeto.

Sob o ponto de vista exclusivamente mecânico, os parâmetros necessários para que se possa dar início ao ante-projeto de um robô industrial, podem ser divididos em 3 principais grupos:

1o. Geométrico-Topológicos: Número de graus de liberdade, tipo de cadeia cinemática, volume do espaço de trabalho, erro de posicionamento estático, configurações críticas, etc.

2o. Cinemático-Dinâmicos: Velocidade máxima do dispositivo terminal, tempos máximos de aceleração e desaceleração, trajetórias críticas, cargas a transportar, frequências de vibração estrutural admissíveis, frequências naturais dos dispositivos de acionamento, etc.

3o. Industriais: Material da estrutura, tipo de potência para o acionamento, tipo do sistema de acionamento, nível de poluição ambiental, etc.

Os parâmetros apontados acima, que serão objeto de discussão nos próximos capítulos, em geral bastam para que se inicie o ante-projeto de um robô industrial. Nunca é demais ressaltar, contudo, que fatores não técnicos - econô-

nicos, por exemplo - muitas vezes definem as diretrizes do projeto.

2.3. O Ante-Projeto

Nessa etapa do processo gera-se informações mais completas acerca do dispositivo (robô, no caso) que se pretende construir, informações essas fundamentais para o detalhamento do projeto (conforme se indica na fig. 2.1).

Os principais elementos ligados a esse processo consistem em:

1o. Condições de Contorno: São definidas pelos parâmetros de projeto ou por restrições outras de natureza não-técnica.

2o. Sistema de Auxílio ao Projeto: Compõe-se de programas computacionais interativos que colocam o projetista em contacto com um conjunto de rotinas associadas a modelos matemáticos descritivos do comportamento do robô. Dentre essas rotinas, podem-se citar algumas destinadas à síntese geométrica a partir de parâmetros do espaço de trabalho, avaliação das frequências naturais da estrutura, cálculo estrutural, cálculo dos esforços e velocidades nas articulações, mapeamento da capacidade de carga, seleção de dispositivos atuadores, etc. Essas rotinas, via de regra, são implementadas em computador com recursos gráficos.

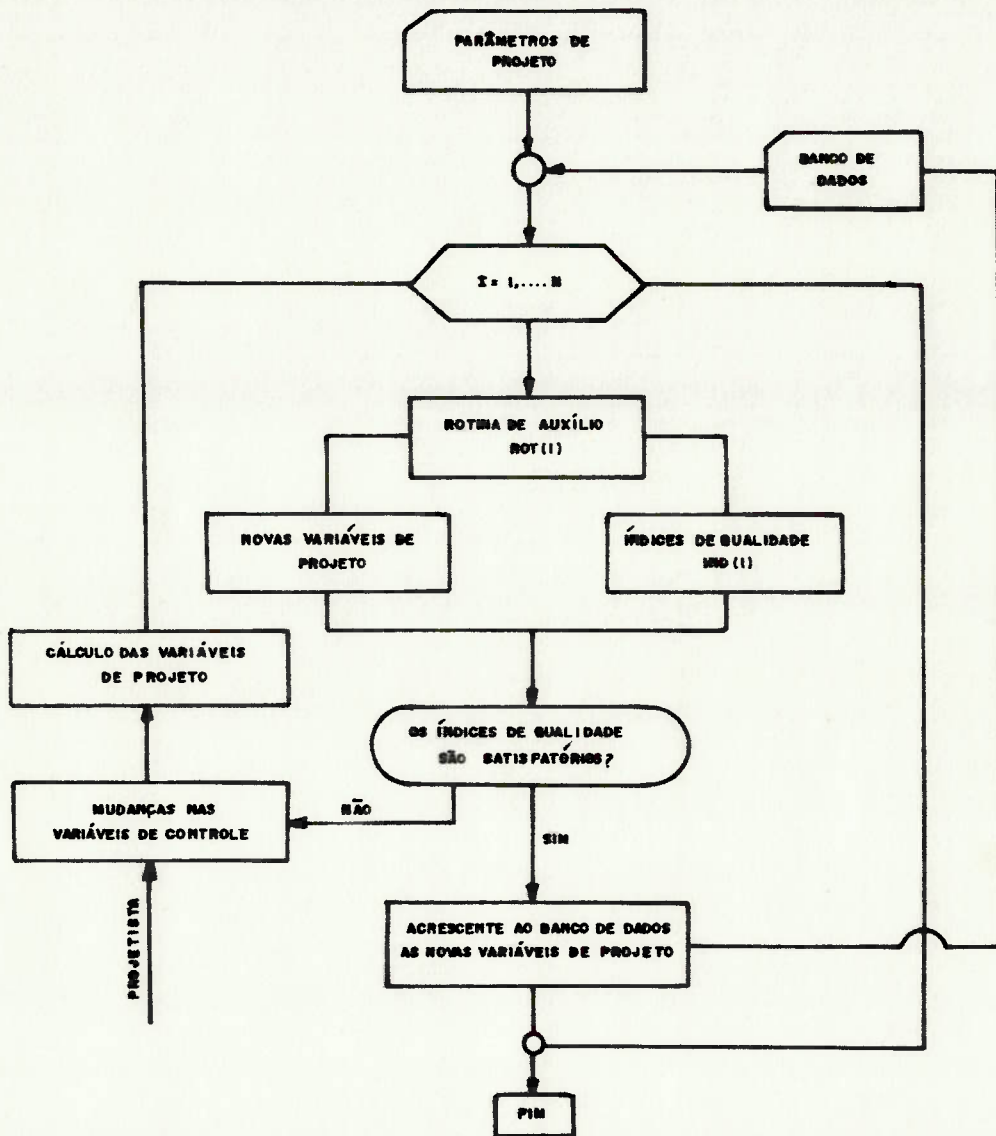


FIGURA 2.2.

Procedimento típico de ante-projeto

(N é o número de rotinas auxiliares de projeto)

3o. Variáveis de Projeto: São as variáveis manipuladas pelas rotinas de auxílio ao projeto como, por exemplo: matrizes de massa e inércia, pesos e centros de gravidade, matrizes de rigidez, curvas características dos servo-atuadores, etc.

4o. Variáveis de Controle: São as variáveis diretamente controladas pelo projetista - dimensões, formas das secções estruturais, modelos dos servo-atuadores, etc - a partir das quais derivarão as variáveis de projeto mencionadas acima.

5o. Parâmetros Estimados: Os modelos matemáticos utilizados necessitam de parâmetros que muitas vezes não são disponíveis, devendo então ser avaliados pelo projetista.

6o. Índices de Qualidade: Da aplicação dos modelos matemáticos às variáveis de projeto resultam índices - números ou gráficos - que permitem ao projetista avaliar a qualidade das alternativas por ele propostas.

A figura 2.2 representa esquematicamente um procedimento típico de ante-projeto que utiliza os elementos apresentados acima.

O projetista propõe uma alternativa de projeto (mediante a escolha das variáveis de controle) e submete-a sucessivamente às diferentes rotinas de auxílio ao projeto compatíveis com os dados de que dispõe. Dessa ação do projetista resultam novas informações que irão se incorporar à

massa de dados do ante-projeto e índices de qualidade que lhe permitirão avaliar a conveniência ou não da alternativa proposta. Enquanto existirem índices inadequados haverá necessidade de modificações nas variáveis de controle.

O procedimento anterior é apropriado à geração do ante-projeto de um robô industrial desde que se estabeleça uma hierarquia para a utilização das rotinas de auxílio ao projeto de modo a que os dados gerados pelas $i-1$ primeiras rotinas sejam suficientes para suprir com as informações necessárias a i -ésima rotina. O processo mais razoável para a definição do ante-projeto básico de um robô consiste em se empregar a seguinte ordem na abordagem do problema:

1o. Síntese Topológica-Geométrica: Definição dos parâmetros topológicos e geométricos fundamentais do robô em projeto. Essa primeira etapa requer um trabalho de análise e síntese de mecanismos.

2o. Análise Estrutural: Definição das características estruturais básicas do robô a partir dos parâmetros de projeto, das informações geométricas geradas durante o processo de síntese geométrica e de rotinas de análise estrutural convenientes.

3o. Síntese do Sistema de Acionamento: Especificação das características fundamentais do sistema de acionamento a partir dos critérios de projeto, de informações geradas pelas

rotinas de síntese geométrica e de análise estrutural e da aplicação de rotinas voltadas ao estudo do comportamento dos diversos dispositivos de atuação.

4o. Reciclagem do Procedimento: Execução dos passos 1 a 3 com os novos dados gerados no primeiro ciclo. O término do processo se dá apenas quando não fôr mais possível acrescentar novas informações à massa de dados.

Nas 3 etapas acima mencionadas deve estar presente um certo grau de dinamismo, ou seja, a cada nova iteração do processo, é desejável que determinadas rotinas possam vir a ser substituídas por outras que, embora tratem do mesmo problema, o façam de uma forma mais específica ou mesmo mais refinada.

2.4. O Detalhamento do Projeto

Os dados gerados durante a elaboração do ante-projeto do robô industrial constituem-se em um conjunto de restrições que devem ser respeitadas na etapa de detalhamento do projeto.

Desde que o ante-projeto tenha sido executado de forma satisfatória (isto é, com índices de qualidade adequados e soluções industrialmente executáveis), não é de se esperar dificuldades substanciais durante o detalhamento.

Nessa nova etapa, as preocupações fundamentais do projetista estão relacionadas com a escolha de componentes industriais, processos de fabricação, normalização de dimensões, montagem, etc. A utilização de um sistema de auxílio ao projeto durante essa fase é extremamente útil. Esse sistema, contudo, não deve prescindir de recursos gráficos, fundamentais para a elaboração dos desenhos e cálculo de propriedades dos diversos componentes do sistema mecânico.

3. PROBLEMAS GEOMÉTRICO-TOPOLÓGICOS

3.1. O Sistema Mecânico Articulado

3.1.1. Elementos

Mecanicamente, robôs industriais são dispositivos constituídos por estruturas rígidas articuladas capazes de realizar movimentos relativos translacionais e/ou rotacionais segundo eixos bem determinados. O número de movimentos relativos independentes - graus de liberdade - e o particular arranjo topológico das estruturas articuladas são duas de suas características fundamentais.

A essas características estão associadas transformações matemáticas que convertem o movimento de um dispositivo terminal ("end effector") no espaço cartesiano $XYZ\phi\psi\zeta$ (conforme figura 3.1) em um conjunto de n movimentos relativos das estruturas articuladas (onde n = número de graus de liberdade).

Considere-se inicialmente o dispositivo terminal a ser manipulado como um corpo rígido (B) de forma qualquer (apresentado na figura 3.1). São necessárias 6 coordenadas para defini-lo no espaço $XYZ\phi\psi\zeta$, sendo 3 para determinar a posição (x, y, z) de um ponto P fixo a (B) e 3 para orientar um diedro característico associado a (B) segundo os vetores ortogonais \vec{U}_n e \vec{U}_p .

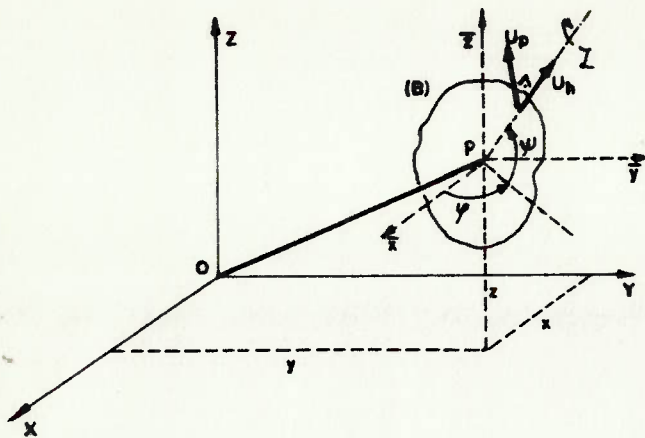


FIGURA 3.1. Posicionamento de um corpo de forma qualquer

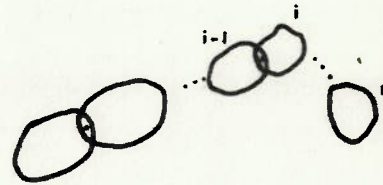


FIGURA 3.2. Cadeia cinemática serial

Portanto, a manipulação de (B) por um robô exige que este possua a dupla capacidade de localizar e orientar. Para atender a essa necessidade os robôs são constituídos funcionalmente por 2 sub-sistemas de estruturas articuladas: a estrutura de localização e a estrutura de orientação (pulso), cada uma das quais responsável exclusivamente por uma das tarefas de localizar e orientar.

3.1.2. A estrutura de localização

Compõe-se de um conjunto de 3 ou mais corpos articulados, segundo eixos bem definidos, em uma cadeia cinemática serial aberta, ou seja, tal que a posição do corpo i possa ser descrita exclusivamente em função da posição do corpo $i-1$ [17] conforme se indica na figura 3.2.

Muito embora existam operações (em geral aquelas que se realizam em ambientes com muitos obstáculos [3]) que

requeiram estruturas de localização com mais do que 3 graus de liberdade - estruturas ditas redundantes - a quase totalidade dos robôs industriais existentes utiliza estruturas de localização com apenas 3 corpos articulados .

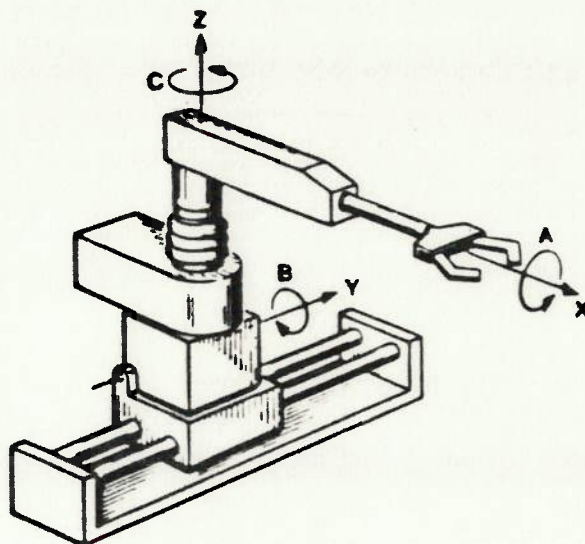


FIGURA 3.3. Movimentos segundo eixos ortogonais XYZ

A determinação dos modelos topológicos de cadeias cinemáticas seriais de 3 corpos que se movimentam segundo eixos ortogonais (3 de translação e 3 de rotação, conforme se indica na figura 3.3) capazes de operar como estruturas de localização, gerando um espaço de trabalho tri-dimensional, é um problema já resolvido. De acordo com a referência [47] existem 37 modelos com tal capacidade.

Nas figuras 3.5 a-z, a'-k' esses modelos são apresentados com a simbologia das figuras 3.4.a-f e a notação da figura 3.3.

Na prática industrial têm prevalecido como estruturas de localização 4 topologias básicas:

- a. XYZ - robô de coordenadas cartesianas;
- b. AXY - robô de coordenadas cilíndricas;
- c. ACY - robô de coordenadas polares;
- d. ABB - robô articulado ou de coordenadas de revolução.

As figuras 3.6 a-d representam esquematicamente robôs com tais topologias, estando suas principais vantagens e desvantagens listadas na tabela 3.1.

Na figura 3.7 apresenta-se um típico robô industrial articulado com as suas partes constitutivas e os seus movimentos característicos designados pela notação internacional (baseada na anatomia humana) e pela notação que será adotada neste trabalho.

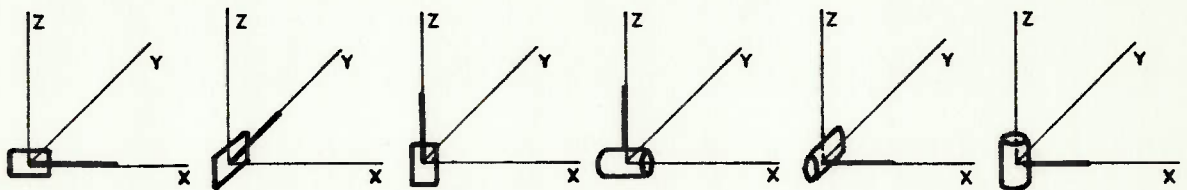


FIGURA 3.4. a-c: Simbologia para os movimentos de translação
d-f: Simbologia para os movimentos de rotação

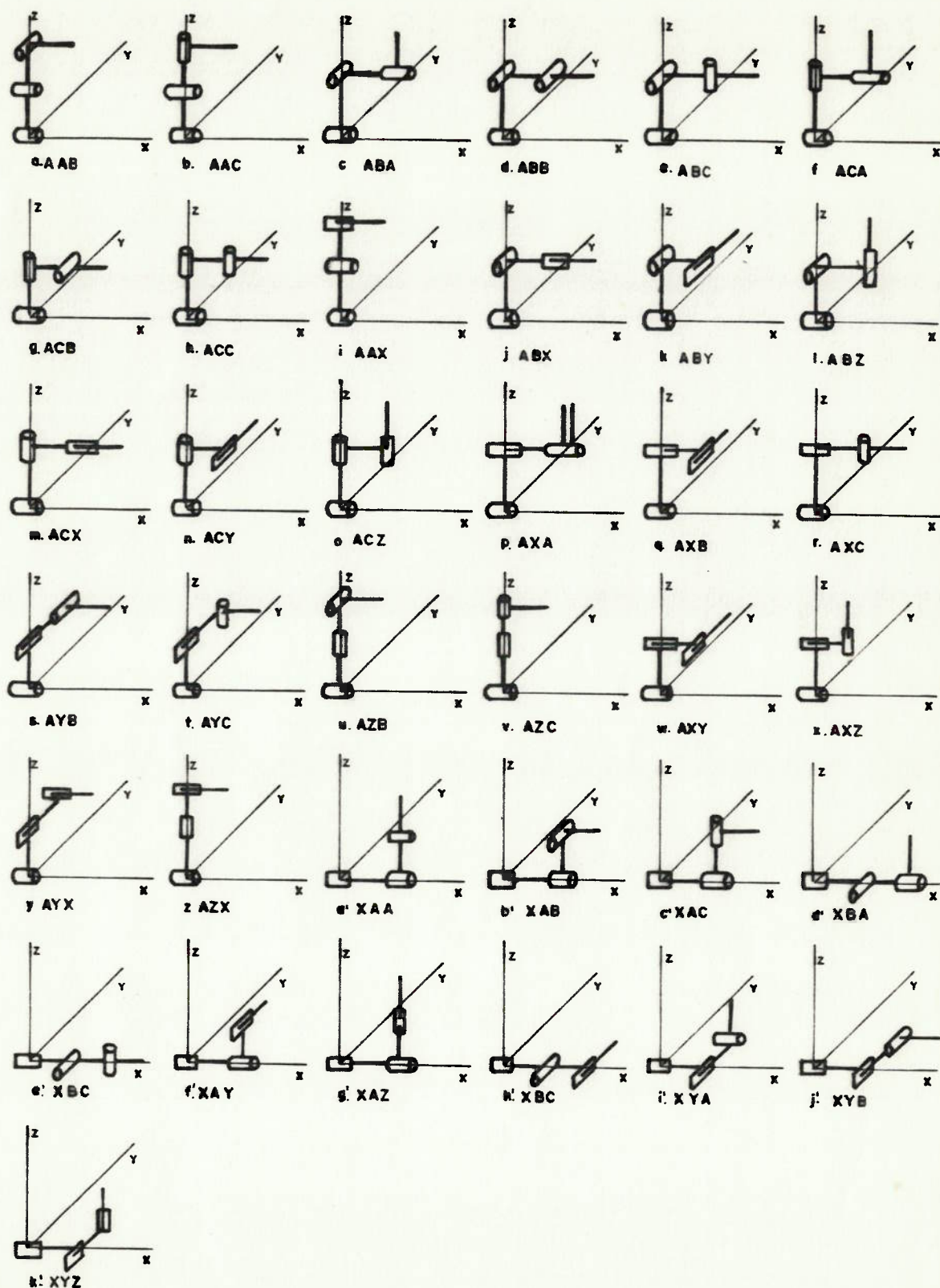


FIGURA 3.5. Topologias capazes de operar como estruturas de localização

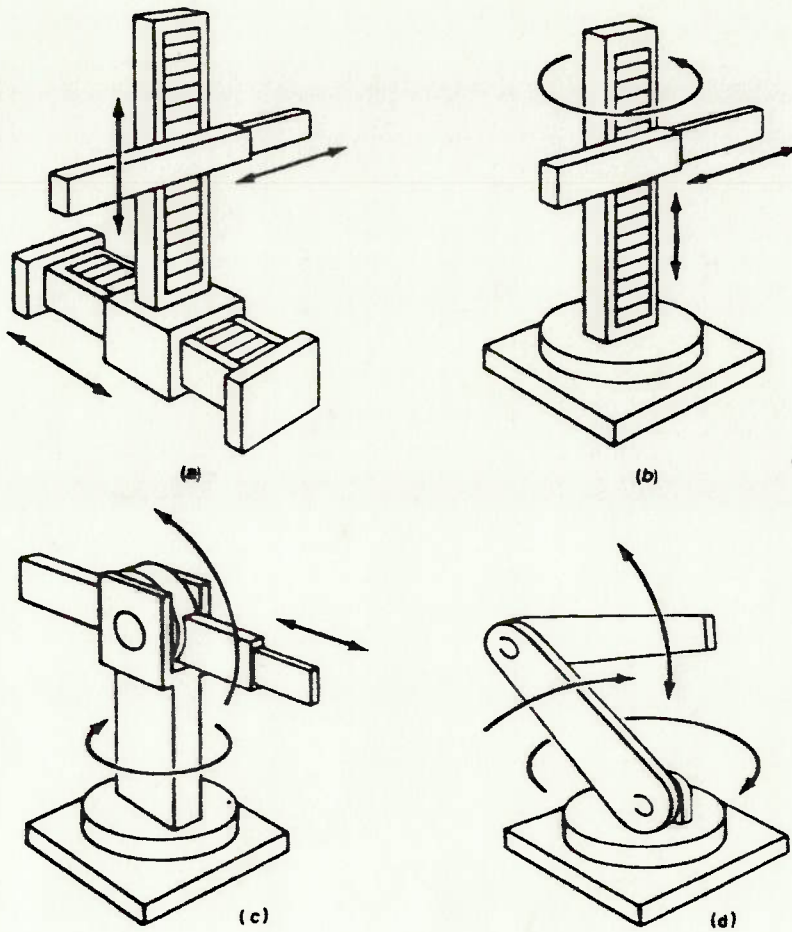


FIGURA 3.6. Modelos de robôs utilizados industrialmente:

- a. Coordenadas cartesianas
- b. Coordenadas cilíndricas
- c. Coordenadas polares
- d. Articulado

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
C A R T E S I A N O	<p>1. Move-se em 3 direções lineares, o que facilita o trabalho de geração de trajetórias.</p> <p>2. As equações de controle são as mais simples</p> <p>3. É o modelo de maior rigidez, para um dado espaço de trabalho.</p>	<p>1. Requer um grande volume de operação, comparativamente ao espaço de trabalho gerado.</p> <p>2. As superfícies de guia ficam expostas à ação de poeira ambiental ou atmosfera corrosiva.</p> <p>3. É o modelo que requer maior área superficial.</p>
C I L I N D R I C O	<p>1. Tem facilidade de acesso a cavidades e aberturas de máquinas em geral.</p> <p>2. A determinação das trajetórias, bem como das equações de controle é simples.</p>	<p>1. Não consegue atingir regiões próximas ao suporte vertical de rotação.</p> <p>2. Apresenta problemas de selagem associados aos movimentos lineares.</p>
P O L A R	<p>1. É ideal para tarefas que requerem ampla varredura horizontal e pequena varredura vertical.</p>	<p>1. O sistema de coordenadas dá origem a equações de controle complexas.</p> <p>2. Apresenta problemas de selagem associados ao movimento linear.</p>
A R T I C U L A D O	<p>1. O espaço de trabalho resultante pode incluir regiões próximas ao solo e à base.</p> <p>2. Todas as articulações podem ser seladas, o que é de grande utilidade em atmosfera suja ou corrosiva.</p>	<p>1. As equações das trajetórias e as equações de controle são muito complexas.</p>

Tab. 3.I - Comparação entre as 4 topologias básicas de robôs

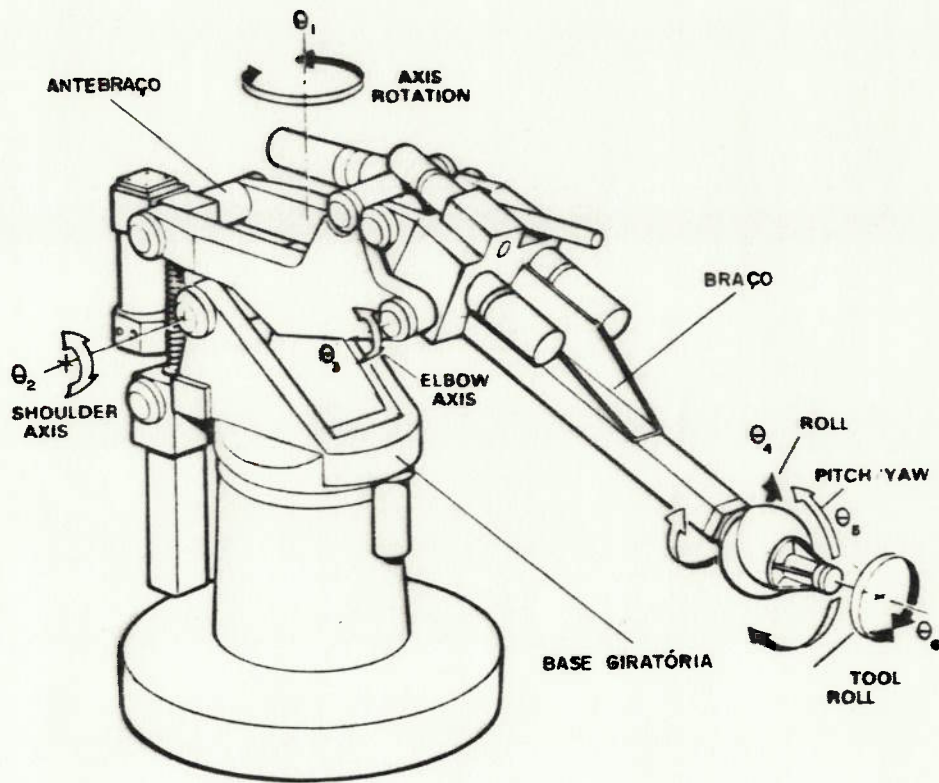


FIGURA 3.7. Robô articulado: nomenclatura básica

3.1.3. O pulso

A estrutura de orientação ou pulso consiste, em geral, de elementos mecânicos serialmente articulados, com capacidade para orientar um dispositivo terminal segundo uma direção genérica do espaço.

A manipulação de dispositivos terminais sem qualquer simetria ou, ainda, a execução de tarefas complexas, requer pulsos com 3 graus de liberdade dotados dos seguintes movimentos característicos (conforme se indica na figura 3.7):

1o. "Roll" ou "Swivel": Consiste no movimento de rotação do pulso em torno do eixo do braço do robô ou, então, no movimento de rotação do dispositivo terminal em torno de seu eixo próprio.

2o. "Pitch" ou "Bend": Consiste no movimento angular do pulso "para cima" e "para baixo" relativamente ao braço do robô.

3o. "Swing" ou "Yaw": Consiste no movimento angular do pulso "para a esquerda" e "para a direita" relativamente ao braço do robô.

Um grande número de robôs industriais hoje em operação utilizam pulsos que possuem apenas os movimentos de

"pitch" e "yaw" ou, então, somente o de "swivel". O número de graus de liberdade que um pulso deve possuir é função do grau de complexidade das operações que serão executadas pelo robô. Se ele, por exemplo, opera auxiliado por um equipamento periférico que movimenta a peça a ser trabalhada de modo a que ela se mantenha sempre em uma posição favorável, um pulso com 2 graus de liberdade pode ser plenamente satisfatório. Em operações mais complexas, como soldagem a arco por exemplo, é fundamental que o pulso tenha 3 graus de liberdade, de vez que a tocha deve oscilar à medida que segue o cordão [19].

3.1.4. Dispositivo terminal

Além das estruturas de localização e orientação, um robô industrial possui um sub-sistema mecânico responsável pela função de "agarrar". Esse sub-sistema, que na literatura especializada é designado por "end-effector", será denominado, neste trabalho, dispositivo terminal.

Existe uma variedade muito grande de dispositivos terminais - desde simples eletro-magnetos até "mãos" com 3 ou mais "dedos" baseadas na anatomia humana. Tais sistemas, contudo, devem ser considerados, durante o projeto, como simples ferramentas de trabalho passíveis de serem substituídas, e não como um componente intrínseco do robô.

A grande maioria dos robôs industriais existentes possuem uma placa de montagem universal que serve de inter-

face entre o pulso e os diferentes dispositivos terminais os quais, por sua vez, são construídos em conformidade com as especificações geométricas dessa placa.

3.2. Os Problemas Geométricos de um Robô 6R

3.2.1. Introdução

A determinação de dimensões e relações geométricas adequadas ao robô industrial é um dos principais problemas a serem solucionados na fase de ante-projeto. Graças à independência funcional das estruturas de localização e orientação esse problema pode ser resolvido em 4 etapas:

- 1a. Otimização geométrica da estrutura de localização.
- 2a. Otimização geométrica do pulso.
- 3a. Análise cinemática do conjunto.
- 4a. Síntese do mecanismo global.

O procedimento acima será aplicado à especificação geométrica básica de um robô com 6 graus de liberdade rotacionais (6R).

As questões referentes à otimização geométrica têm sido tratadas por diversos autores; nesse trabalho serão apresentados e discutidos os resultados da referência [45]. Com relação à síntese do mecanismo global, duas metodologias serão objeto de discussão- uma delas extraída da referência

[46] e outra que é fruto do projeto que gerou este trabalho.

3.2.2. A Cadeia cinemática 3R

A otimização geométrica das estruturas de localização e orientação usualmente é feita tomando-se por referência um modelo genérico de cadeia cinemática 3R (3 graus de liberdade rotacionais) com 8 parâmetros geométricos a determinar - $a_1, a_2, a_3, s_1, s_2, s_3, \alpha_1, \alpha_2$ -, conforme se apresenta na figura 3.8.

Esse modelo de cadeia cinemática servirá de base para as próximas discussões. É importante observar que as coordenadas angulares $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, indicadas na mesma figura, são as variáveis sobre as quais se atua durante o processo de localização (ou orientação).

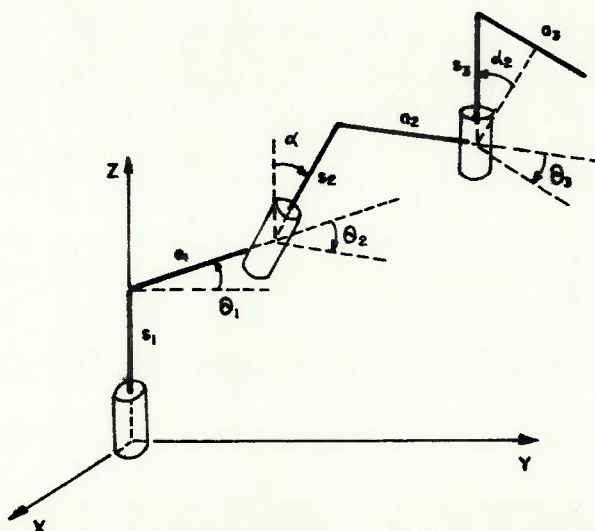


FIGURA 3.8. Cadeia cinemática 3R com 8 parâmetros característicos

3.3. Otimização e Análise

3.3.1. Otimização da estrutura de localização

Todo problema de otimização envolve pelo menos 3 elementos básicos: um conjunto de restrições, um conjunto de variáveis de controle e uma função objetivo. No caso da estrutura de localização de um robô, é bastante razoável que se considere a classe de estruturas para a qual o comprimento total dos elos de ligação (L) é constante,

$$L = a_1 + a_2 + a_3 + s_1 + s_2 + s_3 = \text{const.} \quad (3.1)$$

e que não possui restrições aos movimentos $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, (todos iguais a 360°), determinando-se os ângulos α_1 e α_2 e as relações geométricas entre os parâmetros $a_1, a_2, a_3, s_1, s_2, s_3$ (variáveis de controle) que maximizam o volume do espaço de trabalho (função objetivo).

A resolução analítica desse problema não é conhecida. A aplicação de um processo de busca exaustiva sobre o conjunto de 8 parâmetros de controle, fazendo-os percorrerem suas faixas de variação conduz a um volume de dados excessivamente grande e difícil de analisar. Suponha-se, por exemplo, que os 8 parâmetros possam, cada um deles, assumir 3 valores ($3L/4$, $L/2$ e $L/4$); dessa hipótese nasceriam 3^8 (6561) gráficos para serem submetidos a análise.

Na referência [45] aplica-se um processo restrito de busca, em que apenas determinados casos particulares (aqueles que realmente importam do ponto de vista industrial) são tomados em consideração. Os resultados mais significativos desse trabalho serão discutidos a seguir.

i. Influência dos parâmetros $\alpha_1, \alpha_2, a_1, a_2, a_3, s_1, s_2, s_3$ sobre o volume e a forma do espaço de trabalho

O volume do espaço de trabalho é máximo para $\alpha_1 = 90^\circ$ e $\alpha_2 = 0^\circ$, (conforme figura 3.9) o que corresponde ao modelo ABB - robô articulado - já apresentado.

O fato de os eixos \vec{s}_2 e \vec{s}_3 serem paralelos faz com que a área varrida pela extremidade de a_3 seja máxima. O espaço de trabalho tri-dimensional é gerado pela rotação dessa área em torno de um eixo - \vec{s}_1 - não paralelo a \vec{s}_2 e \vec{s}_3 . O volume desse espaço é máximo quando \vec{s}_1 é ortogonal aos eixos \vec{s}_2 e \vec{s}_3 .

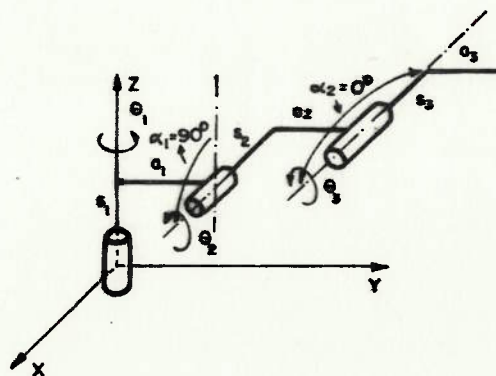


FIGURA 3.9. Topologia ABB: $\alpha_1 = 90^\circ$ e $\alpha_2 = 0^\circ$

Em um robô com $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = 0^\circ$ e $s_1 = s_2 = s_3 = 0$, a condição necessária para que o seu espaço de trabalho não tenha vazios é que a_2 e a_3 sejam iguais. Isso estabelecido, o volume do espaço de trabalho será máximo para $a_1 = 0$.

As figuras 3.10.a-o mostram a influência desses parâmetros sobre a área e a forma da secção transversal YZ do espaço de trabalho. No gráfico da figura 3.11 descreve-se a variação da área da secção transversal YZ em função das relações a_3/a_2 e a_1/L para $a_1 + a_2 + a_3 = L = 1$ e $s_1 = s_2 = s_3 = 0$.

Para um robô com $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = 0^\circ$, $a_1 = 0$ e $a_2 = a_3$, o espaço de trabalho é máximo quando $s_1 = s_2 = s_3 = 0$ (conforme se indica nas figuras 3.12.a-c).

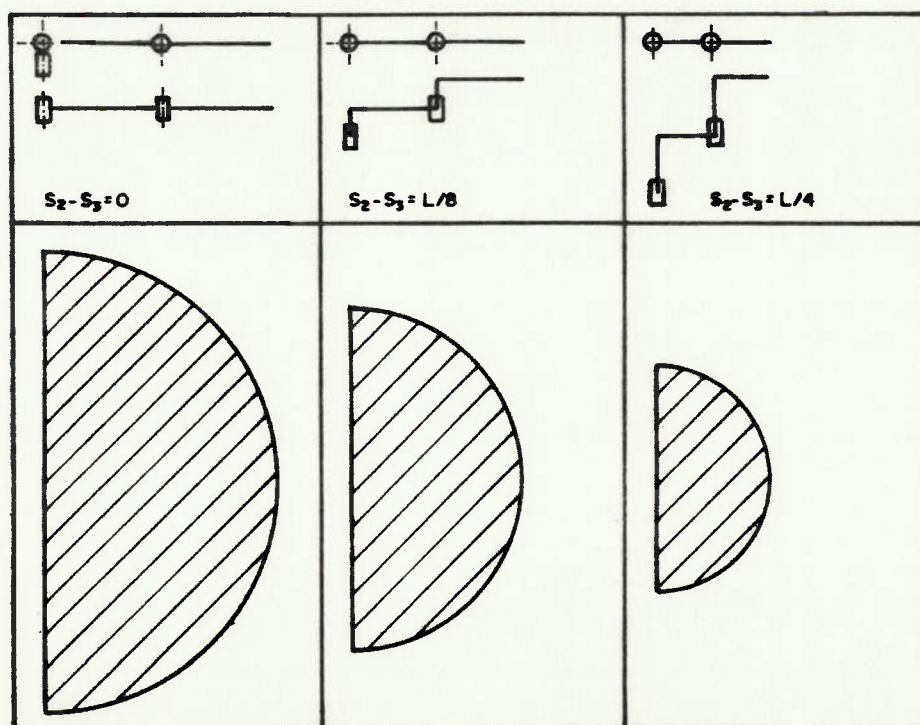


FIGURA 3.12. Variação da área da secção transversal YZ com s_2 e s_3 , para: $a_1 = 0$, $a_2 = a_3$, $s_1 = 0$, $s_2 = s_3$ e $a_2 + a_3 + s_2 + s_3 = L$

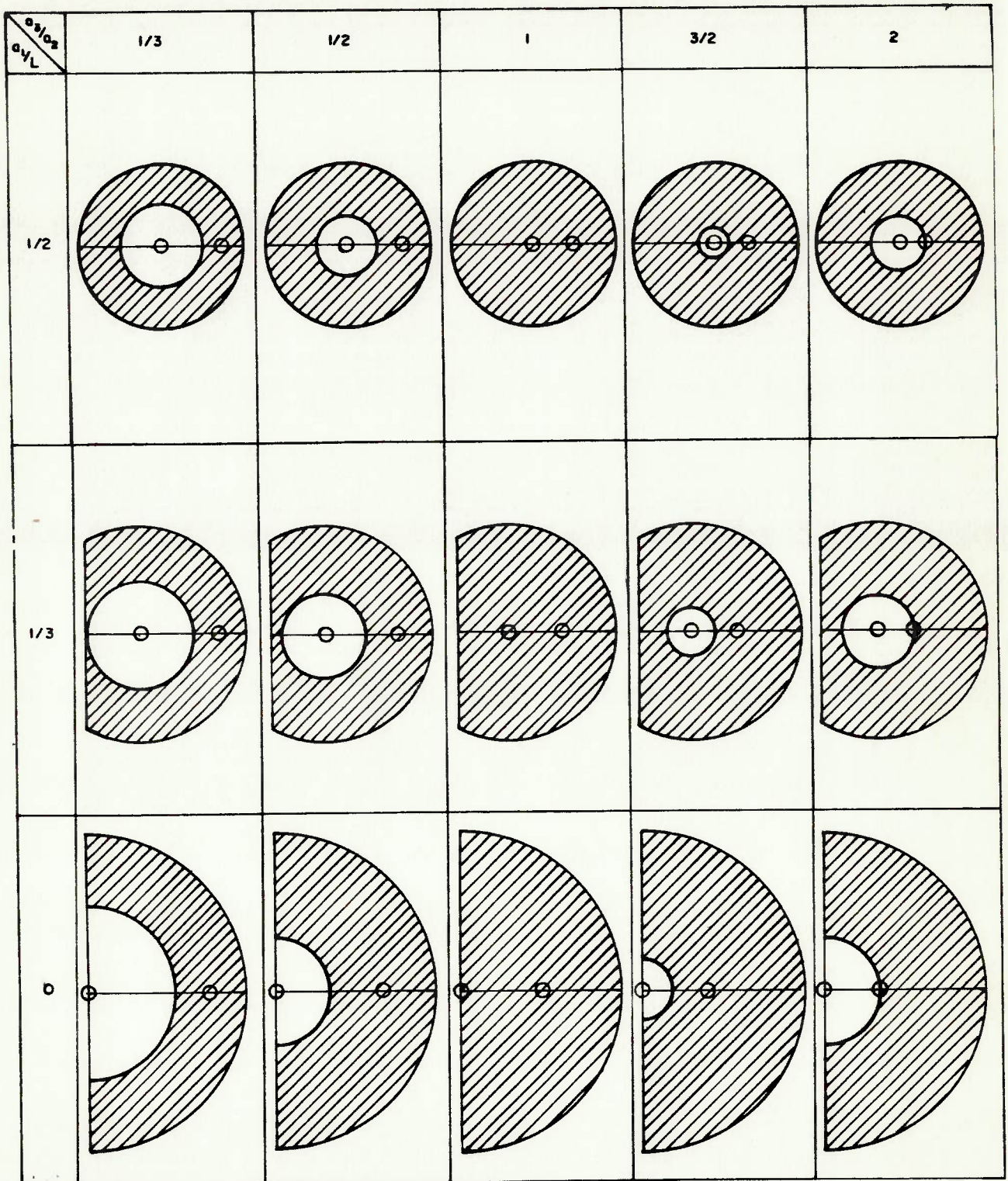


FIGURA 3.10. Variação da forma da secção transversal YZ do espaço de trabalho com as relações a_3/a_2 e a_1/L para $a_1 + a_2 + a_3 = L = 1.0$

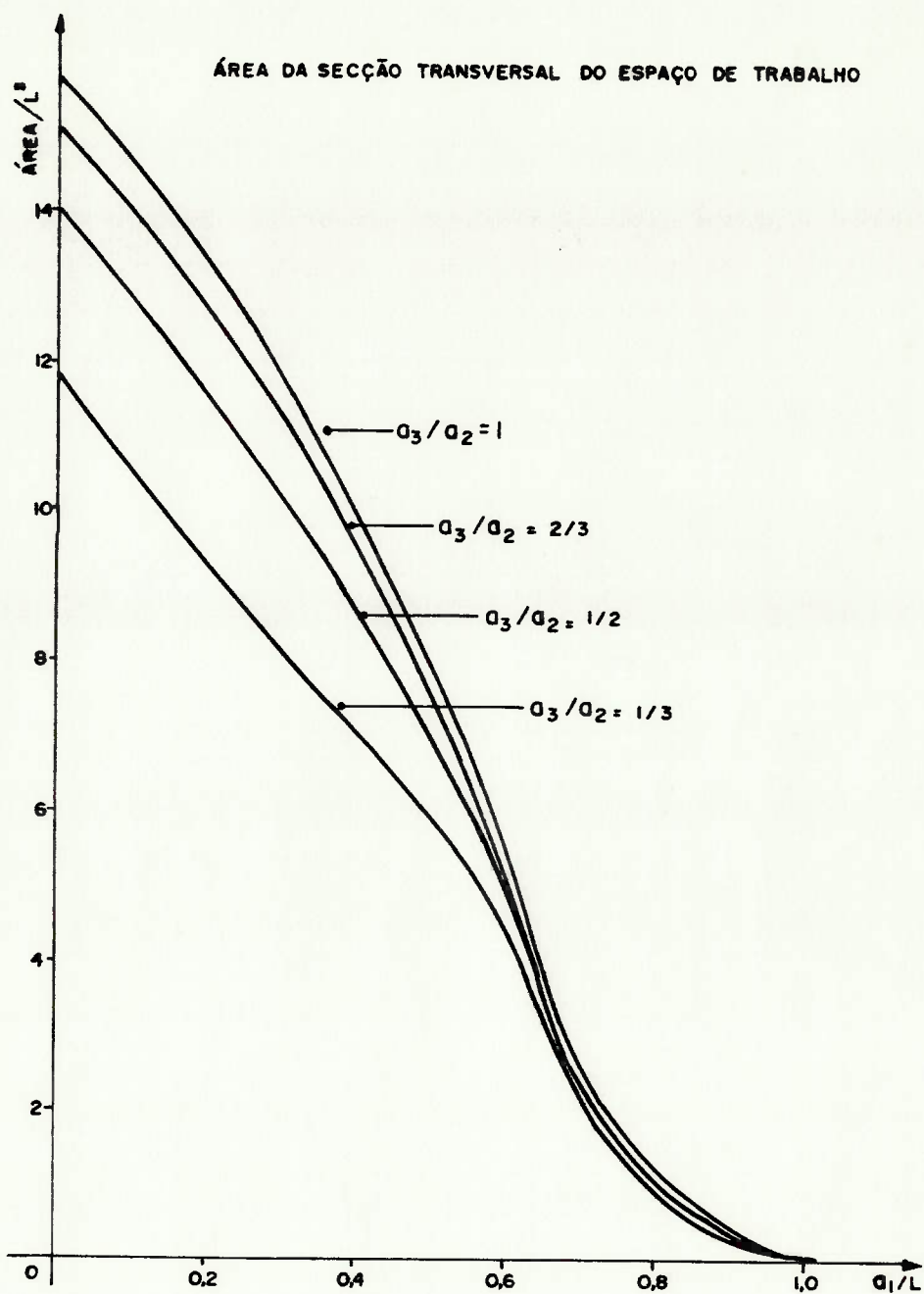


FIGURA 3.11. Variação da área da secção transversal YZ do espaço de trabalho com as relações a_3/a_2 e a_1/L para $a_1 + a_2 + a_3 = L = 1.0$

ii. As relações geométricas ótimas

Para que o volume do espaço de trabalho gerado pela cadeia cinemática da figura 3.8 seja máximo e não tenha vazios, devem ser respeitadas as seguintes condições:

1a. $\alpha_1 = 90^\circ$ e $\alpha_2 = 0^\circ$.

2a. $a_1 = 0$ e $a_2 = a_3$.

3a. $s_1 = s_2 = s_3 = 0$.

A primeira delas nada mais é do que uma confirmação da conveniência da topologia ABB no que diz respeito à geração do espaço de trabalho. A segunda condição pode ser imposta sem que daí derivem dificuldades maiores de projeto. A última condição, no entanto, nem sempre pode ser respeitada. Uma distância mínima entre os centros das articulações 1 e 2 é mecanicamente necessária. Além disso, existe uma classe de robôs articulados que possuem os braços desalinha-dos (ou seja, s_2 e s_3 diferentes de zero), os quais são muito menos susceptíveis ao problema de interferências mecânicas e, portanto, dependendo da aplicação, muito mais convenientes.

3.3.2. Otimização do pulso

Do ponto de vista geométrico, a eficiência de um pulso se avalia a partir de sua destreza, ou seja, de sua capacidade de orientar um diedro (definido pelos vetores \vec{U}_n e \vec{U}_p) segundo uma direção genérica do espaço.

A destreza de um pulso é medida pelo ângulo sólido máximo varrido pelos vetores ortogonais a_3 e s_3 , não dependendo portanto das dimensões $a_1, a_2, a_3, s_1, s_2, s_3$, mas apenas dos ângulos α_1 e α_2 .

Através de um procedimento semelhante ao utilizado para a determinação das relações geométricas que maximizam o volume do espaço de trabalho de uma estrutura de localização 3R, a referência [45] analisa a variação da destreza de um pulso 3R com os parâmetros α_1 e α_2 . As conclusões mais importantes desse trabalho são apresentadas a seguir.

i. Variação da destreza com α_1 e α_2

1a. A destreza de \vec{s}_3 é máxima somente quando $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$.

2a. A destreza de \vec{a}_3 é máxima quando $\alpha_1 = 90^\circ$, qualquer que seja o valor de α_2 .

3a. Sempre que a soma de $|\alpha_1|$ e $|\alpha_2|$ for maior que 90° , a destreza de \vec{a}_3 é máxima.

4a. Para um dado valor de α_1 , a destreza de \vec{a}_3 é sempre melhor ou igual à de \vec{s}_3 .

5a. A destreza global do pulso é máxima apenas para $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$.

ii. As topologias ótimas de pulso

Tomando-se por base os resultados anteriormente apresentados, resultam, para um pulso com 3 graus de liberda-

de, 4 modelos capazes de lhe conferir máxima destreza. Esses modelos, que serão designados por A, B, C e D, encontram-se esquematizados nas figuras 3.13.a-d.

É importante destacar, contudo, que o critério de máxima destreza segundo duas direções ortogonais não deve ser considerado como uma condição necessária de projeto, mas sim como um requisito desejável. Existem importantes projetos de pulsos que não respeitam a essa condição. No projeto da Cincinatti Milacron, por exemplo, os ângulos α_1 e α_2 são de 60° , de modo que a destreza é máxima apenas segundo o eixo \vec{a}_3 .

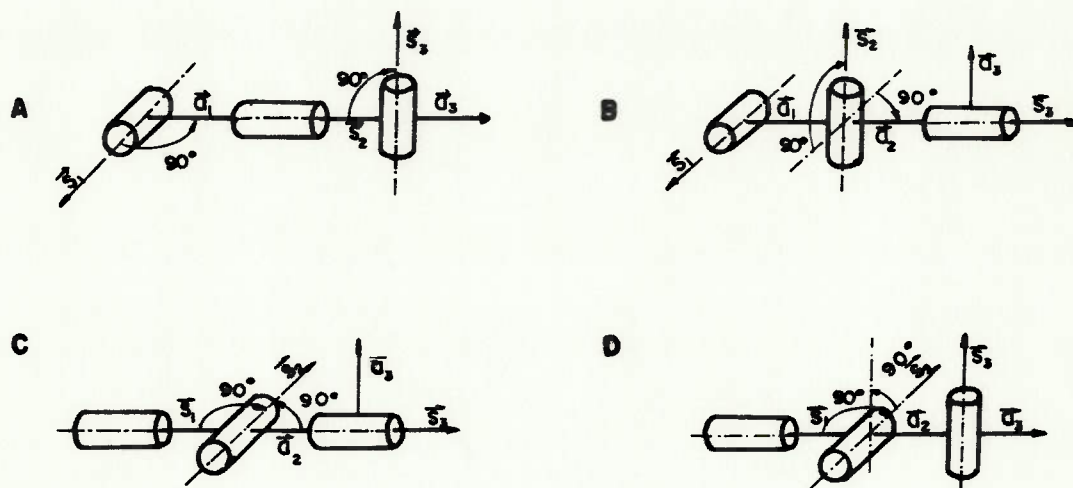


FIGURA 3.13. Modelos de pulso com máxima destreza

3.3.3. Análise do robô 6R

A otimização simultânea das estruturas de localização e de orientação conduz a 6 modelos ótimos de robôs 6R (sob o ponto de vista dos critérios individualmente considerados para cada uma das estruturas). Esses modelos, designados por A1, A2, B1, B2, C e D, conforme se indica na figura 3.14, apresentam estruturas de localização ABB com $a_1=0$, $a_2=a_3$ e $s_1=s_2=s_3=0$ onde se acoplam pulsos com uma das topologias ótimas A, B, C ou D.

A avaliação dos 6 modelos resultantes requer uma análise do desempenho cinemático global de cada um deles. Para tanto é conveniente que se estude o grau de complexidade dos algoritmos de transformação de coordenadas necessários para se descrever a posição $(\vec{H}, \vec{U}_n, \vec{U}_p)$ de um dispositivo terminal em função das coordenadas naturais $[\theta]$ de cada uma das cadeias cinemáticas.

A referência [46] classifica os modelos A1, A2, B1, B2, C e D, de acordo com o grau de complexidade dos algoritmos de transformação de coordenadas, em 3 grupos:

1o. Modelo C: Caracteriza-se por apresentar um pulso em que os 3 eixos de rotação interceptam-se em um ponto, o que lhe confere as propriedades de uma rótula esférica. Graças a esse fato, o procedimento para a obtenção de $[\theta]$ a partir de $(\vec{H}, \vec{U}_n, \vec{U}_p)$ é bastante simples.

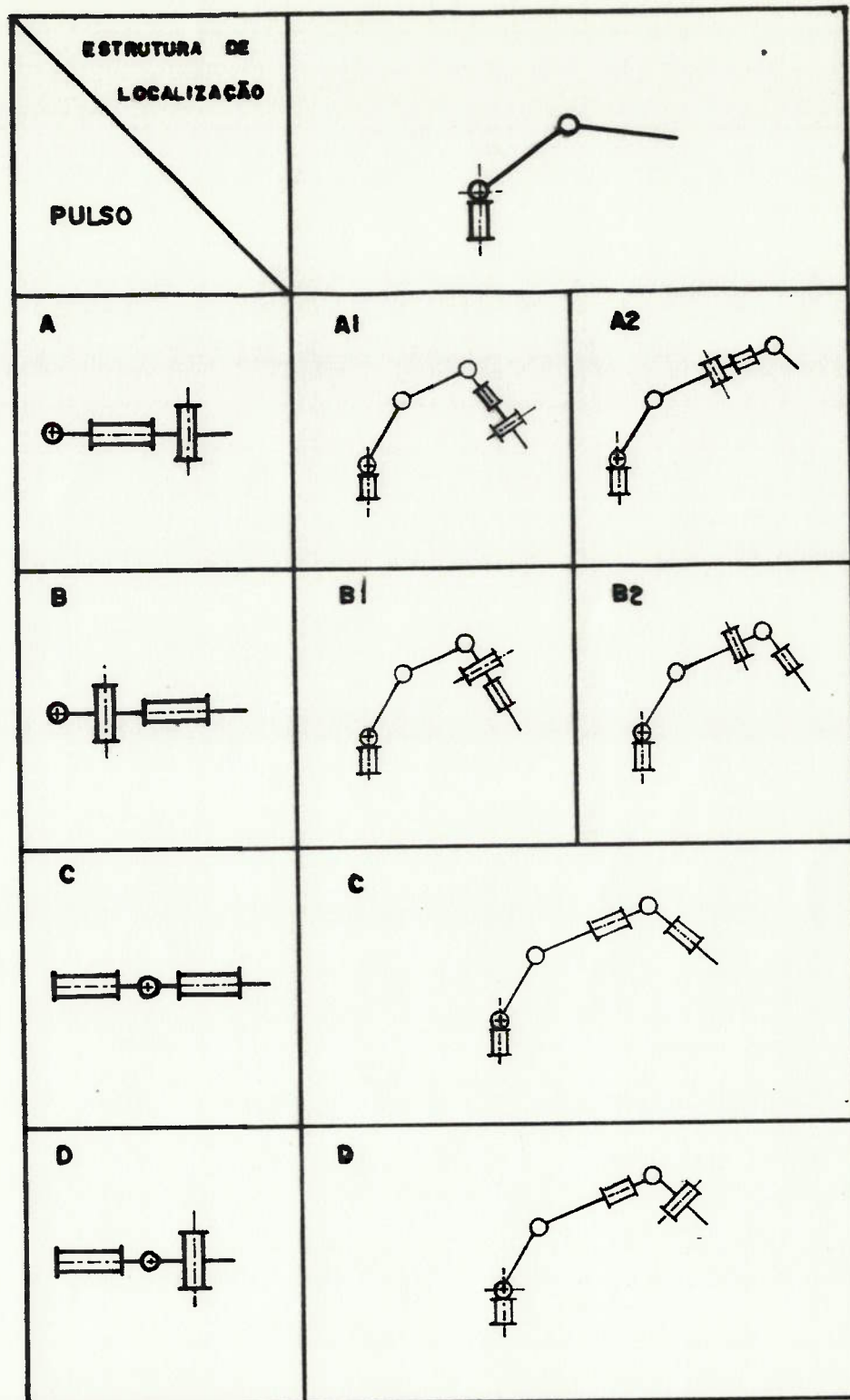


FIGURA 3.14. Modelos 6R resultantes da otimização simultânea da estrutura de localização e do pulso

2o. Modelos A1 e B1: Apresentam pulsos sem um centro único de rotação, como em C. Todavia, graças à coplanaridade dos eixos \vec{a}_2 , \vec{a}_3 e \vec{a}_4 , existem algoritmos (mais complexos que o de C) capazes de realizar a transformação de coordenadas requerida.

3o. Modelos A2, B2 e D: Caracterizam-se por não apresentarem um conjunto único de ângulos $[\theta]$ capazes de posicionar um dispositivo terminal segundo as coordenadas $(\vec{H}, \vec{U}_n, \vec{U}_p)$ fornecidas. A posição do ponto C_4 , junção entre a estrutura de localização e o pulso, não pode ser determinada (muito embora se conheça o seu lugar geométrico - conforme se mostra na figura 3.15) a partir das informações disponíveis. Essa indeterminação pode ser eliminada, desde que se forneçam dados não geométricos adicionais como, por exemplo, um critério de minimização de energia potencial do sistema.

No apêndice A apresentam-se os algoritmos de transformação de coordenadas para os modelos A1, B1 e C.

Por estarem associadas a algoritmos de transformação de coordenadas relativamente simples, os modelos C, A1 e B1 são os mais recomendáveis para robôs GR. Já o mesmo não ocorre com A2, B2 e D que requerem algoritmos de transformação de coordenadas bastante complexos, sendo por essa razão raramente empregados.

Na tabela 3.II encontra-se um conjunto de recomendações acerca do dimensionamento dos modelos A1, B1 e C,

as quais devem ser respeitadas durante o processo de síntese de um robô 6R.

A1	B1	C	Recomendações
s_1	s_1	s_1	a menor possível
a_1, s_2, s_3	a_1, s_2, s_3	a_1, s_2, s_3	nulas
a_2, a_3	a_2, a_3	$a_2, (a_3 + s_4)$	iguais
a_4, s_5, a_6	a_4, a_5, s_4	a_5, s_6	as menores possíveis
s_4, a_5, s_6	s_4, s_5, a_6	a_4, s_5, a_6	nulas

Tabela 3.II: Recomendações para o dimensionamento básico de robôs 6R com um dos modelos A1, B1 ou C

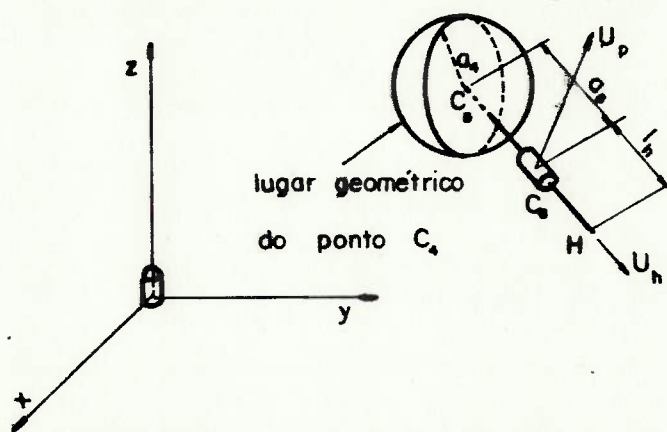


FIGURA 3.15. Modelo B2: Indeterminação geométrica de C₄

3.4. Síntese Geométrica de um Robô 6R

3.4.1. Métodos de síntese

A determinação das dimensões principais e das varreduras angulares de um robô 6R geometricamente otimizado pode ser realizada através de duas metodologias distintas:

- 1a. Partindo-se das especificações das características geométricas básicas do espaço de trabalho desejado para o robô;
- 2a. Partindo-se da descrição de configurações críticas a serem atingidas pelo dispositivo terminal;

A primeira delas reflete, essencialmente, o ponto de vista do fabricante, menos preocupado com as particulares trajetórias que o dispositivo terminal irá executar, porém importando-se com certas características que garantam ao sistema adaptabilidade a diferentes funções. A segunda abordagem expressa o ponto de vista do usuário, que conhece perfeitamente as tarefas (e, por conseguinte, as configurações críticas) que deverão ser executadas por um robô a ser projetado ou escolhido dentre os disponíveis comercialmente.

Ambas as metodologias serão apresentadas a seguir.

3.4.2. Síntese a partir do espaço de trabalho

Os robôs articulados possuem um espaço de trabalho principal - gerado pela estrutura de localização - resultante da rotação de uma envoltória EN em torno do eixo \mathcal{E}_1 . A forma de EN é definida pelas dimensões a_2 e a_3 (modelos A1 e B1) ou a_2 e a_3+s_3 (modelo C), pelas varreduras angulares $\Delta\theta_2$ e $\Delta\theta_3$ e pela posição angular Γ da bissetriz b_3 de $\Delta\theta_3$ relativamente ao eixo de alinhamento dos braços (conforme figura 3.16). Desde que se adote o modelo otimizado para a estrutura de localização, com $a_2 = a_3$ ou $a_2 = a_3+s_3$, a forma de EN torna-se função apenas das variáveis angulares Γ , $\Delta\theta_2$ e $\Delta\theta_3$.

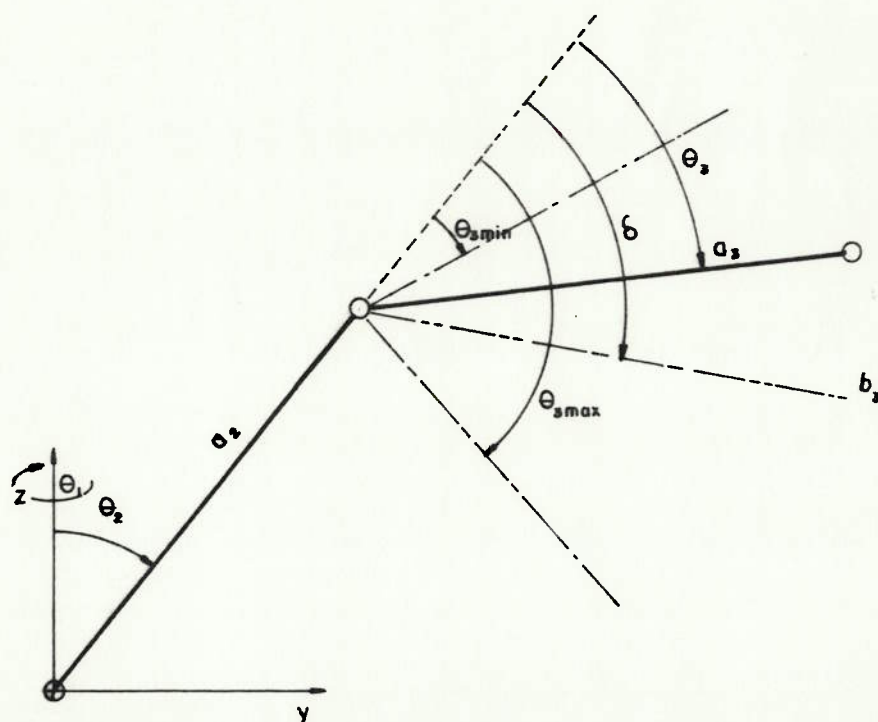


FIGURA 3.16. Parâmetros característicos da envoltória EN

As limitações aos movimentos de rotação θ_2 e θ_3 têm a sua origem em causas de natureza bastante variada, destacando-se:

- 1o. As interferências mecânicas;
- 2o. As limitações do sistema de acionamento empregado (conforme se apresenta na figura 3.17, onde as varreduras angulares são limitadas pelos cursos dos cilindros hidráulicos);
- 3o. A simetria do espaço de trabalho principal relativamente ao eixo \vec{s}_1 , tornando desnecessário o acesso ao semi-plano $Y < 0$.

Além dessas limitações naturais, muitas vezes, com o intuito de se impedir que o robô atinja configurações que apresentem problemas dinâmicos, impõem-se restrições matemáticas ao seu movimento, na forma de curvas $g(\theta_2, \theta_3) = 0$. Na figura 3.18, por exemplo, essas curvas são os arcos de epicyclóide E_1 e E_2 .

Nas fases iniciais de ante-projeto, contudo, não existem elementos que permitam uma avaliação da dinâmica do sistema, de modo que se deve considerar a envoltória EN como definida pelos 4 arcos de circunferência C_1 , C_2 , C_3 e C_4 (conforme se indica na figura 3.17) correspondentes aos seguintes movimentos extremos:

- C_1 : Braço em $\theta_{3\text{min}}$; antebraço varrendo todo o seu curso;
- C_2 : Antebraço em $\theta_{2\text{min}}$; braço varrendo todo o seu curso;
- C_3 : Braço em $\theta_{3\text{max}}$; antebraço varrendo todo o seu curso;
- C_4 : Antebraço em $\theta_{2\text{max}}$; braço varrendo todo o seu curso.

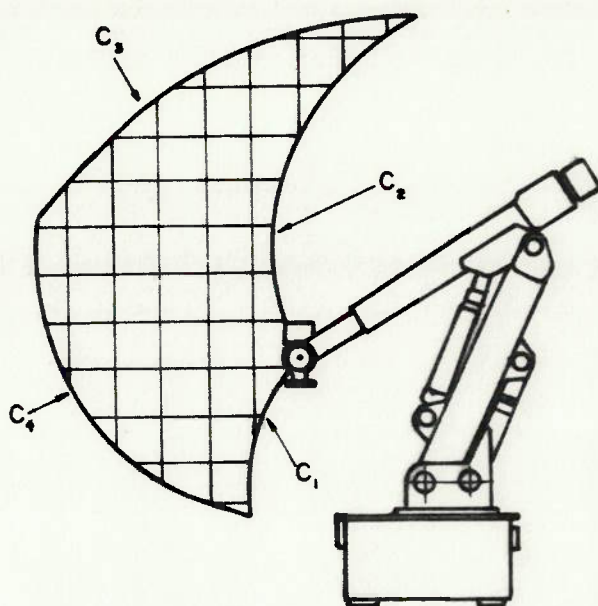


FIGURA 3.17. Robô Hidráulico: Envoltória definida por 4 arcos de circunferência

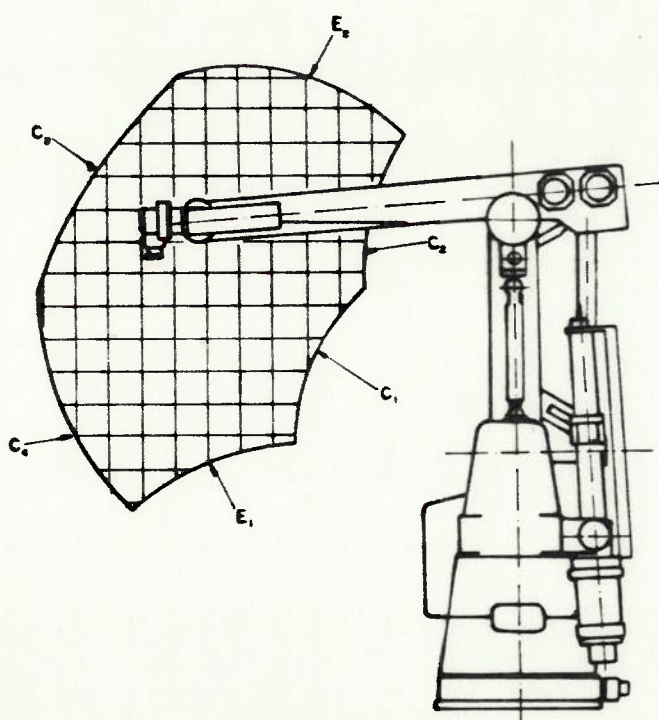


FIGURA 3.18. Envoltória definida por 4 arcos de circunferência e 2 arcos de epiciclóide

Três características geométricas importantes da envoltória EN devem ser consideradas para fins de projeto: a área compreendida, o alcance radial máximo e a largura radial máxima.

Considere-se a figura 3.16. Desde que os eixos a_2 e a_3 não se alinhem, a transformação $T: (\theta_2, \theta_3) \rightarrow P(y, z)$ é bi-unívoca. Na configuração de alinhamento, o jacobiano associado a essa transformação é singular, o que traz consideráveis problemas à representação das equações de movimento do sistema, conforme se apresenta no apêndice H.

Na hipótese de não ocorrer alinhamento, a área compreendida pela envoltória EN é o valor positivo da integral do determinante do jacobiano de T, sobre os intervalos $\theta_{2min} < \theta_2 < \theta_{2max}$ e $\theta_{3min} < \theta_3 < \theta_{3max}$, possuindo (conforme apêndice B) a seguinte expressão:

$$A_{EN} = 2a^2! \Delta\theta_2 \cdot \sin(\Delta\theta_3/2) \sin \Gamma! \quad (3.2)$$

onde $a = a_2 = a_3$

Analisando-se a expressão acima, observa-se que, fixados os parâmetros a , $\Delta\theta_2$ e $\Delta\theta_3$, a área compreendida por EN é máxima para $\Gamma = 90^\circ$, ou seja, quando a bissetriz b_3 se encontra em quadratura com o eixo \vec{a}_2 .

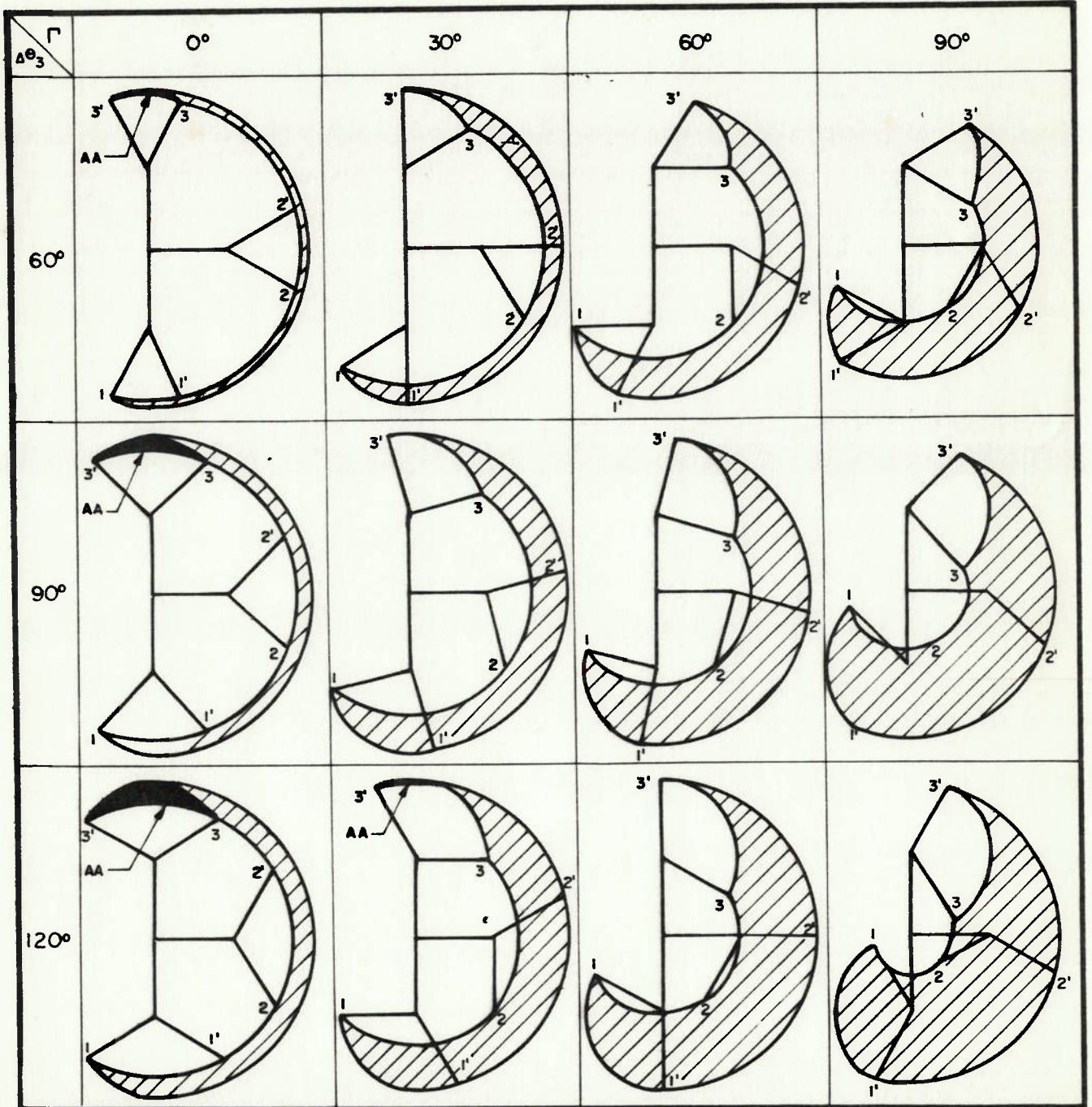


FIGURA 3.19. Variação da forma da envoltória com o ângulo Γ .

Por outro lado, admitindo-se que possa ocorrer alinhamento entre os eixos a_2 e a_3 , é fácil ver (figuras 3.19.a-r) que o pequeno acréscimo de área $.A$, motivado por esse fato, é máximo quando $\Gamma = 0^\circ$. Ora, em torno dessa configuração, as envoltórias resultantes são as mais estreitas e, portanto, as menos úteis. Logo, a condição

$$|\Gamma| > \Delta\theta_3/2$$

não só acarreta problemas de ordem matemática como também não traz em troca nenhuma vantagem geométrica.

Na figura 3.20 apresentam-se gráficos de variação da área da envoltória com Γ , para valores fixos de a , $\Delta\theta_2$ e $\Delta\theta_3$. Para fins de projeto pode-se considerar a condição $80^\circ < \Gamma < 100^\circ$ como a que dá origem à máxima área.

Para $|\Gamma| < \Delta\theta_3/2$, o alcance radial máximo a_r e a largura radial máxima l_r (conforme figura 3.21) são dados por:

$$\begin{aligned} a_r &= a[2+2\cos(\Gamma-\Delta\theta_3/2)]^{1/2} \\ l_r &= a\{[2+2\cos(\Gamma-\Delta\theta_3/2)]^{1/2} - [2+2\cos(\Gamma+\Delta\theta_3/2)]^{1/2}\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

que, para $\Gamma = 90^\circ$, se transformam em:

$$\begin{aligned} a_r &= a[2+2\sin(\Delta\theta_3/2)]^{1/2} \\ l_r &= 2a[1-\cos(\Delta\theta_3/2)]^{1/2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

As considerações anteriores permitem o estabelecimento de expressões simples (3.5 a 3.7) para a determinação dos parâmetros a , $\Delta\theta_2$ e $\Delta\theta_3$, a partir do conhecimento da área, alcance e largura radiais da envoltória EN:

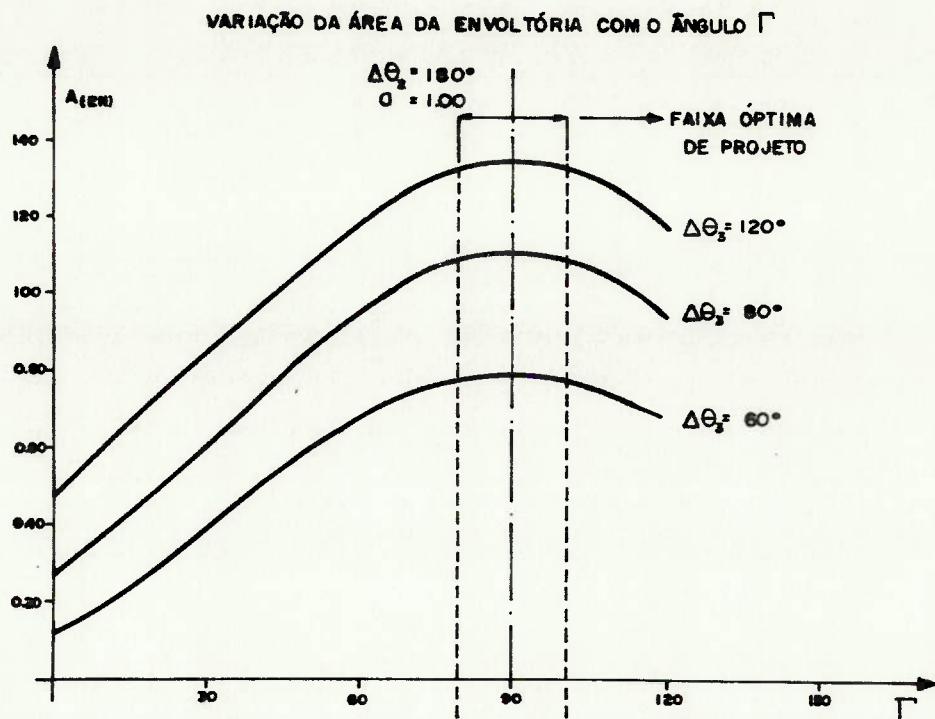


FIGURA 3.20. Variação a área da envoltória com o ângulo Γ

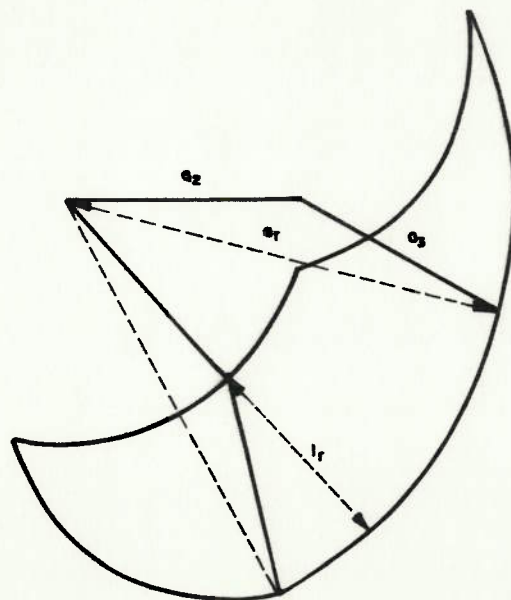


FIGURA 3.21. Parâmetros da envoltória: alcance e largura radiais

$$\Delta\theta_3 \text{ é tal que } l_r^2 [1 + \sin(\Delta\theta_3/2)] = 2a_r^2 [1 - \cos(\Delta\theta_3/2)] \quad (3.5)$$

$$a = a_r [2 + 2\sin(\Delta\theta_3/2)]^{-1/2} \quad (3.6)$$

$$\Delta\theta_2 = A_{EN} / [2a^2 |\sin(\Delta\theta_3/2)|] \quad (3.7)$$

Naturalmente, os resultados obtidos por meio dessas expressões poderão ser inadequados se os parâmetros de projeto não forem coerentes. Caberá ao projetista decidir a respeito.

A varredura angular $\Delta\theta_1$, por se tratar de um parâmetro que não afeta a forma da envoltória e não dá origem a problemas de interferência mecânica entre as diversas estruturas móveis do robô, pode ser, em princípio, arbitrada pelo projetista. Na grande maioria dos robôs articulados, $\Delta\theta_1$ varia entre 180° e 360° .

As dimensões do pulso devem ser as menores possíveis (conforme se indica na tabela 3.II) e só poderão ser definitivamente especificadas em fases posteriores do projeto, quando já estiverem escolhidos os dispositivos atuadores. As varreduras angulares $\Delta\theta_4$, $\Delta\theta_5$ e $\Delta\theta_6$, ao mesmo tempo, são dependentes desses dispositivos e das interferências mecânicas entre as partes móveis do pulso. É importante notar que, relativamente a esse último aspecto, o modelo C é o de melhor desempenho, pois apenas um de seus graus de liberdade (o 5o.) é passível de sofrer interferências mecânicas.

3.4.3. Síntese a partir de configurações críticas

A determinação da dimensão a e das coordenadas angulares limite $\theta_{1\min}, \theta_{1\max}, \dots, \theta_{4\min}, \theta_{4\max}$ de forma única é realizável por meio de um método que se utiliza dos seguintes elementos:

- 1o. Configurações críticas do dispositivo terminal;
- 2o. Estimação de dimensões;
- 3o. Processo de busca;

Esses elementos serão discutidos a seguir.

As configurações críticas do dispositivo terminal de um robô são aquelas que permitem delimitar o espaço operacional requerido para a execução de um determinado conjunto de tarefas.

Considere-se, por exemplo, um processo bastante simples - a fabricação de caixas metálicas a partir da soldagem a arco de chapas retangulares cujas dimensões máximas e mínimas são conhecidas (conforme figuras 3.22.a-d). Os passos necessários para a realização dessa tarefa poderiam ser os seguintes:

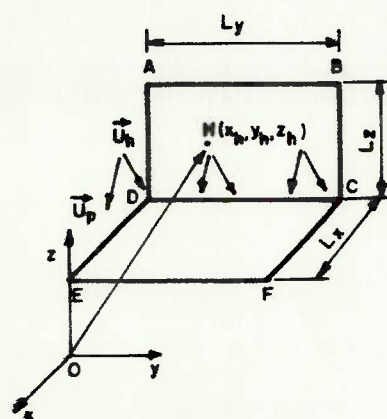
- 1o. Soldagem da chapa inferior com a posterior: Mantém-se a orientação da tocha praticamente constante (não totalmente constante por causa do "weaving");
- 2o. Soldagem da chapa posterior com as laterais: Varia-se a orientação da tocha à medida que esta se aproxima das quinas C ou D.

3o. Soldagem da chapa inferior com as laterais: Parte-se do centro da chapa, movimentando-se a tocha em direção às quinas C ou D com orientações variáveis à medida que delas se aproxima.

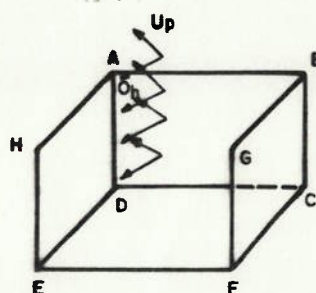
4o. Aplicação de uma rotação de 180° em torno de Z' à caixa: Essa operação pode ser realizada através de uma mesa rotativa.

5o. Soldagem ao longo da reta EF: Variando-se a orientação da tocha nas proximidades das quinas.

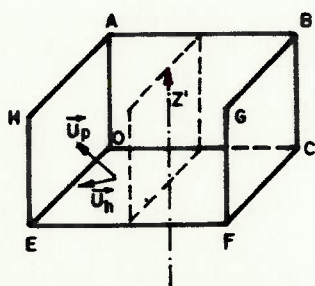
6o. Repetição dos passos 2 e 3.



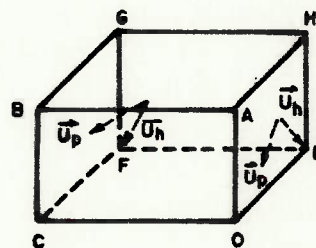
A - SOLDAGEM DA CHAPA POSTERIOR COM A INFERIOR



B - SOLDAGEM DAS CHAPAS LATERAIS COM AS POSTERIORES



C - SOLDAGEM DA METADE POSTERIOR DA CHAPA INFERIOR COM AS LATERAIS



D - ROTAÇÃO DE 180° EM TORNO DE Z'

FIGURA 3.22. a-d. Soldagem de caixas retangulares

Cada uma das etapas 1, 2, 3 e 5 gera n_1 , n_2 , n_3 e n_4 configurações a serem consideradas para efeito da delimitação do espaço de trabalho. Essas configurações ficam definidas pelo vetor-posição $\vec{H}(x_n, y_n, z_n)$ de um ponto da tocha e pelos vetores \vec{U}_n e \vec{V}_n que descrevem a sua orientação espacial.

Para o processo em questão seria necessário determinar essas configurações para duas situações extremas: caixa com dimensões L_x, L_y, L_z mínimas e máximas.

Portanto, mesmo para um caso relativamente simples como o que foi descrito, o número de configurações críticas pode ser bastante grande. Por outro lado, nem sempre é possível conhecer-se a priori essas configurações.

Para que a metodologia em questão possa ser aplicada é necessário ainda que se estimem certas dimensões características do pulso. Dependendo do modelo escolhido para o robô essas dimensões são: $a_w + s_d$ para o modelo C, $a_d + s_w$ e a_d para o modelo A1 e a_d e $a_w + s_d$ para o modelo B1.

O algoritmo (apresentado no apêndice C) para a determinação da dimensão a e das coordenadas angulares limite $\theta_{1\min}, \theta_{1\max}, \dots, \theta_{6\min}, \theta_{6\max}$ de tal forma a que todas as configurações críticas possam ser atingidas, baseia-se em um processo de busca sobre uma região de pesquisa definida pelo projetista.

A especificação dessa região de pesquisa em geral não é uma tarefa simples, principalmente se a envoltória das

configurações críticas $\vec{H}(x_n, y_n, z_n)$ não apresentar qualquer tipo de simetria.

Estabelecida uma malha tri-ortogonal sobre essa região, o algoritmo opera no sentido de fazer o centro da base do robô percorrer todos os nós da malha determinando, para cada uma dessas situações, o menor volume do espaço de trabalho capaz de assimilar todas as configurações críticas propostas. O nó que gerar o espaço de trabalho com menor volume corresponderá à localização ideal para o centro da base do robô. A partir dessa posição derivam as dimensões e varreduras angulares mínimas necessárias para que aquelas configurações críticas sejam atingidas.

3.4.4. Utilização dos métodos de síntese apresentados

Os dois processos de síntese abordados anteriormente são de grande utilidade durante a fase de ante-projeto de um robô articulado. No capítulo 6 discute-se sobre como esses processos, transformados em rotinas de auxílio ao ante-projeto de robôs, podem ser utilizados de modo a que produzam resultados satisfatórios.

4. PROBLEMAS DE NATUREZA ESTRUTURAL

4.1. Elementos do Projeto Estrutural

Certos requisitos de desempenho normalmente exigidos de robôs industriais fazem com que o projeto estrutural dos mesmos se constitua em uma tarefa relativamente difícil.

Os robôs do tipo articulado são, nesse particular, os que demandam os maiores esforços de cálculo e análise estrutural. Um mecanismo constituído por duas longas estruturas articuladas (braço e antebraço) por meio de rolamentos de alta precisão e rigidez e transportando não apenas o pulso e o dispositivo terminal na extremidade do braço, como também todos os componentes dos sub-sistemas de atuação, é bastante susceptível à ação de forças impulsivas provocadas pelos movimentos de partida e parada, que irão excitar as suas frequências naturais. Ao mesmo tempo, em configurações que implicam em grande afastamento radial entre o eixo de rotação da base giratória e o dispositivo terminal, as deflexões estáticas devidas ao peso próprio poderão ser grandes o bastante a ponto de comprometer a precisão de posicionamento do robô.

As tarefas normalmente automatizadas com o emprego de robôs requerem elevada precisão de posicionamento (da ordem de 0.25 mm), de modo que tanto deflexões estáticas quanto vibrações estruturais são fenômenos indesejáveis que devem ser mantidos sobre controle bastante rigoroso.

Por outro lado, as características estruturais do robô irão influenciar sobremaneira o seu comportamento dinâmico. As forças inerciais atuantes em cada um dos braços articulados dependem da distribuição de massa ao longo dos mesmos, e a estrutura é o componente que, via de regra, contribui com a maior parte dessa massa. Além disso, dependendo do algoritmo de controle utilizado, existe um valor mínimo de rigidez para as estruturas dos braços abaixo do qual começam a aparecer efeitos adversos sobre a estabilidade do sistema de controle [7].

4.1.1. Linhas de projeto estrutural

No âmbito da Robótica é possível, hoje, identificar-se 3 principais linhas de resolução do problema estrutural:

- 1a. Mediante o emprego de estruturas massivas e dotadas de grande rigidez;
- 2a. Mediante o emprego de estruturas leves, fabricadas com materiais sofisticados que lhes conferem grande rigidez;
- 3a. Utilizando-se estruturas leves e ressonantes fabricadas com materiais convencionais e adotando-se simultaneamente técnicas variadas de controle das deflexões estáticas e dos efeitos indesejáveis das vibrações sobre a estabilidade do sistema.

Desses métodos de abordagem do problema estrutural tratarão os próximos itens.

4.1.2. Estruturas rígidas e massivas

A quase totalidade dos robôs industriais com boa precisão de posicionamento hoje em operação possuem estruturas rígidas e massivas.

Nos primeiros anos da década de 70, quando a Robótica tomou grande impulso, não existiam ligas e materiais compostos de alta rigidez e baixa massa específica a custos acessíveis, de modo que as ligas de aço se apresentaram como a única opção capaz de dotar os robôs de boas características de rigidez. Ligas de alumínio também foram e continuam a ser empregadas, mas via de regra em robôs destinados a manipular pequenas cargas.

Em contraste com as substanciais facilidades relativas ao projeto e produção apresentadas pelas estruturas massivas, existem certas características que as tornam pouco eficientes:

- 1a. Baixa relação (Carga Transportada)/(Peso dos Braços): Em geral, da ordem de 1:10 [44].
- 2a. Redução relativa das velocidades angulares: Braços muito massivos dão origem a pesos e momentos de inércia elevados e, conseqüentemente, a torques inerciais maiores. Para se obter velocidades altas torna-se necessário o emprego de a-

tuadores mais potentes. A referência [7] apresenta um interessante estudo ilustrativo desse problema.

4.1.3. Estruturas fabricadas com materiais compostos

O emprego de materiais compostos na fabricação de robôs é uma proposta industrial recente, com vistas ao aumento simultâneo dos níveis de velocidade e precisão de posicionamento.

De acordo com a literatura especializada, esses materiais possuem relações (Resistência Estrutural)/(Peso) e (Rigidez)/(Peso) muito maiores que os metais convencionais [44]. Além disso, mediante o uso de compostos é possível projetar-se um material com determinadas propriedades físicas selecionadas a priori. Combinando-se, por exemplo, fibras de carbono e de vidro em uma matriz de epoxi obtém-se um material com elevada resistência estrutural e boa resistência ao impacto. Outras propriedades, como o módulo de elasticidade e o amortecimento interno também podem ser controladas através de uma combinação adequada dos elementos do material híbrido.

O emprego desses materiais na fabricação de robôs, contudo, é ainda bastante reduzido. Isso se deve não só aos elevados custos envolvidos como também às dificuldades técnicas inerentes ao projeto, fabricação e análise dos compostos.

4.1.4. Estruturas ressonantes

O emprego de estruturas flexíveis, fabricadas com materiais comuns (ligas de alumínio ou aço), e a simultânea adoção de técnicas de controle das deflexões estáticas e dinâmicas, é um caminho que vem sendo seguido com o intuito de se superar as limitações inerentes aos projetos de robôs massivos.

Existem diversas propostas de metodologias voltadas a esse objetivo [16,48]. As mais promissoras parecem ser aquelas em que se opera matematicamente sobre a planta do sistema controlado, determinando-se os ganhos da realimentação de modo a que os auto-valores dominantes introduzam amortecimento adequado em uma larga faixa de configurações do mecanismo. Nas referências [7, 8] essas técnicas são aplicadas a modelos de manipuladores geometricamente simples, com 2 graus de liberdade no mesmo plano e estruturas compostas por vigas de secção constante transportando em suas extremidades massas concentradas.

4.2. Projeto Estrutural de Robôs Massivos

O projeto de robôs com estrutura massiva apresenta como característica fundamental a simplicidade, que tem sua origem nos modelos matemáticos utilizados. Os elementos necessários ao seu desenvolvimento são os usuais: parâmetros de projeto, informações geométricas básicas, modelos matemá-

ticos e critérios de projeto. Desses elementos tratarão os próximos itens.

4.2.1. Parâmetros de projeto

Para o caso de robôs articulados com estrutura massiva, os parâmetros fundamentais necessários à delimitação dos contornos do projeto estrutural, são:

- 1o. Sistemas de acionamento;
- 2o. Máxima carga transportada;
- 3o. Precisão de posicionamento estático;
- 4o. Fator de qualidade.

4.2.1.1. Sistemas de acionamento

Os sistemas de acionamento em uso em robôs industriais articulados estão intimamente associados ao tipo de potência escolhida - elétrica, hidráulica ou pneumática, (o apêndice D faz uma breve análise acerca da utilização, em robôs, dessas formas de potência) correspondendo, a cada uma delas, projetos de sistemas de acionamento bastante variados. Por darem origem a diferentes modelos estruturais, os mais importantes desses sistemas serão apresentados a seguir.

i. Acionamento de robôs elétricos

Nos robôs 6R que utilizam motores DC, os projetos de acionamento dos graus de liberdade da estrutura de localização seguem duas diretrizes principais:

- 1a. Acionamento serial : figura 4.1;
- 2a. Acionamento paralelo: figuras 4.2a-b;

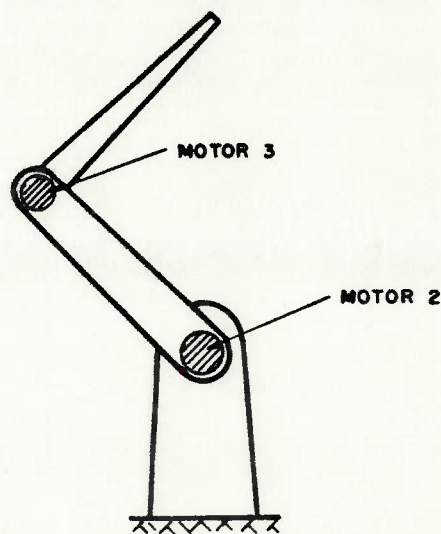


FIGURA 4.1. Acionamento elétrico serial

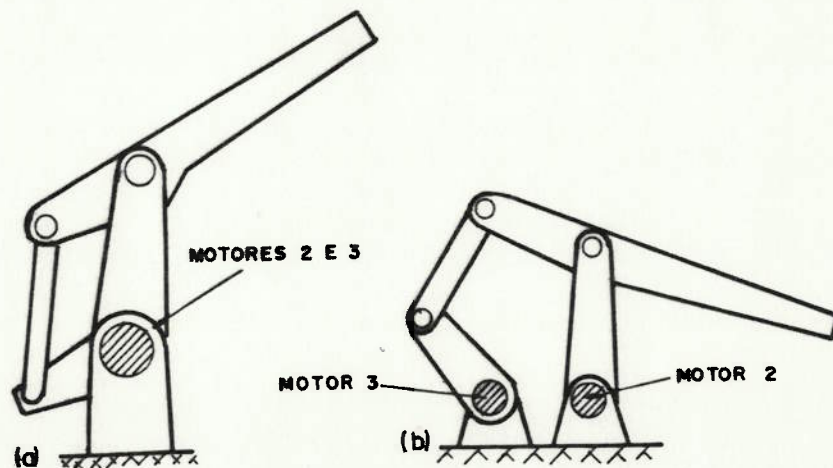


FIGURA 4.2. Acionamento elétrico paralelo:
 a. mecanismo de 4 barras
 b. mecanismo de 5 barras

Nos robôs seriais, os motores têm seus eixos colineares com os eixos de rotação dos braços, acionando-os diretamente ou por meio de redutores.

No primeiro caso (acionamento direto) utiliza-se motores DC de baixa rotação e elevado torque de saída evitando-se, assim, a necessidade de redução. De acordo com a referência [2], as principais vantagens desse sistema, são:

- 1a. Simplicidade construtiva;
- 2a. Grande rigidez mecânica;
- 3a. Baixo nível de atrito.

Em contrapartida, 3 problemas relativamente graves precisam ser considerados ao se optar por esse tipo de acionamento:

- 1o. Não é possível aplicar grandes torques em um largo intervalo de tempo sem, com isso, se super-aquecerem os motores;
- 2o. O peso desses motores é relativamente grande e, considerando-se que o segundo motor representa uma sobre-carga para o primeiro, corre-se o risco de se projetar um robô com braços muito pesados e pequena capacidade de carga;
- 3o. Motores DC de baixa rotação apresentam grande sensibilidade a variações bruscas de carga.

Os robôs com acionamento serial indireto utilizam motores DC convencionais (alta rotação e baixo torque), leves e compactos, acoplados a dispositivos redutores, que podem ser:

1o. "harmonic Drives": São frequentemente empregados em robôs, muito embora possuam rigidez mecânica insatisfatória e apresentem grandes flutuações no torque de saída;

2o. Redutores de Engrenagens e Sem-Fins: São bastante afetados pelo problema de folgas ("backlash") o qual, via de regra se soluciona mediante o pré-carregamento dos elementos de transmissão; com isso, no entanto, se incrementam as forças de atrito do sistema.

Nos robôs com acionamento paralelo, os 2 motores responsáveis pela movimentação dos braços são montados na base do antebraço, a transmissão dos movimentos se fazendo por meio de sistemas engrenagem/cremalheira, coroa/sem-fim ou, ainda, mecanismos de 4 ou 5 barras (conforme se apresentam nas figuras 4.2.a-b).

A característica mais importante desses robôs diz respeito ao acionamento do braço, o qual não exerce nenhuma influencia sobre o do antebraço.

Em robôs com acionamento paralelo é bastante recomendável o emprego de motores DC de baixa rotação acoplados a mecanismos de 4 ou 5 barras, sistema esse que dá origem a boas relações (carga transportada)/(peso dos braços) [40].

No que diz respeito ao acionamento do pulso, tem prevalecido, entre os robôs elétricos, soluções em que os motores são montados na base do antebraço, os torques e rotações sendo transmitidos por mecanismos de barras (conforme figura 4.3) ou, ainda, por mecanismos constituídos por

eixos concêntricos acoplados a engrenagens cilíndricas (conforme figura 4.4).

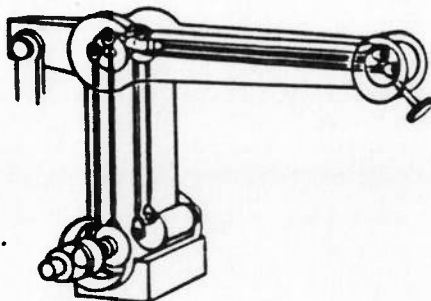


FIGURA 4.3. Sistema de transmissão dos movimentos ao pulso baseado em mecanismo de barras

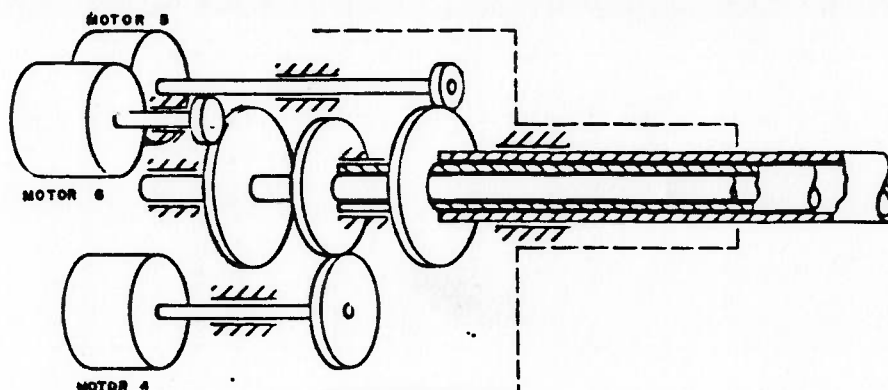


FIGURA 4.4. Sistema de transmissão dos movimentos ao pulso baseado em engrenagens acopladas a eixos concêntricos.

Os 3 motores 4, 5 e 6 são montados na base do braço. O motor 4 aciona o eixo interno, o motor 5 aciona o eixo intermediário e o motor 6 o eixo externo. Resultam 3 movimentos independentes na extremidade do braço para serem utilizados pelo mecanismo do pulso

ii. Acionamento de robôs hidráulicos

Não existem grandes variações nos sistemas de acionamento de robôs hidráulicos (pode-se estender essa afirmação aos robôs pneumáticos). Via de regra, os braços são movimentados por cilindros hidráulicos em disposição de paralelograma (conforme figura 4.5); o pulso é de construção muito simples, com cada um dos eixos sendo acionado por um atuador rotativo; a base giratória pode incluir ou não um redutor, mas o dispositivo motriz geralmente é um motor de pistões ou um atuador rotativo.

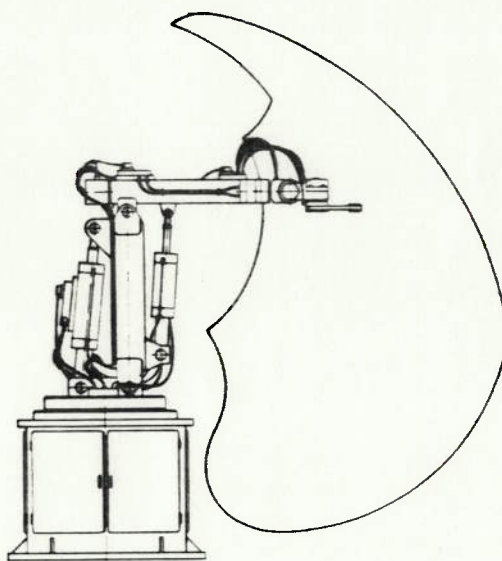


FIGURA 4.5. Robô hidráulico típico

4.2.1.2. Carga máxima transportada

É um parâmetro intrinsecamente ligado ao processo industrial em que se empregará o robô.

Um levantamento realizado a partir das especificações de robôs 6R japoneses [25] revelou a seguinte relação entre carga útil (P) e aplicação industrial típica:

a. Pintura a "Spray"	:	$P \approx 5$	kgf
b. Solda a Ponto	:	$25 < P < 80$	kgf
c. Solda a Arco	:	$5 < P < 10$	kgf
d. Montagem	:	$0.5 < P < 25$	kgf
e. Manipulação de Cargas	:	$25 < P < 1200$	kgf
f. Alimentação de Máquina-Ferramenta	:	$10 < P < 50$	kgf
g. Rebarbagem e Polimento	:	$5 < P < 10$	kgf

4.2.1.3. Precisão de posicionamento

Para um ponto fixo ao dispositivo terminal, é a máxima diferença admissível entre a posição, no espaço cartesiano, calculada para esse ponto (utilizando-se, para tanto, as equações descritivas do modelo topológico do robô) e aquela realmente atingida por ele.

Assim como a carga máxima transportada, a precisão de posicionamento é um parâmetro que deve ser especificado em função das tarefas para as quais se destina o robô. As

informações contidas em [25] permitem que se definam alguns valores típicos para esse parâmetro (ϵ):

a. Pintura a "Spray"	:	$1 < \epsilon < 2$	mm
b. Solda a Ponto	:	$0.1 < \epsilon < 1$	mm
c. Solda a Arco	:	$0.1 < \epsilon < 0.3$	mm
d. Montagem	:	$0.05 < \epsilon < 0.2$	mm
e. Manipulação de Cargas	:	$0.3 < \epsilon < 2$	mm

A precisão de posicionamento é afetada por:

1o. Deformações Estruturais Estáticas: São aquelas devidas ao peso próprio da estrutura dos braços, do pulso, do dispositivo terminal e de outras cargas eventualmente transportadas.

2o. Deformações Estruturais Dinâmicas: São causadas pelas forças inerciais oriundas do movimento do sistema mecânico.

3o. Folgas: Estão presentes em todos os sistemas de transmissão por engrenagens e correias dentadas e também nos mancais de rolamentos. Dão origem a um erro aleatório.

4o. Imprecisão nas dimensões: As equações de controle do movimento são baseadas em um modelo geométrico de referência cujas medidas são afetadas por imprecisões. Esse erro é variá-

vel em função da particular configuração geométrica do sistema mecânico articulado [29].

5o. Resolução dos Sensores: Os sensores de posição normalmente empregados são "encoders" ópticos (digitais) que realimentam as equações de controle com as posições angulares das junções, medidas com uma precisão limitada pela resolução dos mesmos. O erro a que dão origem é homogêneo e permanente [29].

Durante o ante-projeto de um robô deve-se procurar minimizar os efeitos adversos das deformações estruturais estáticas e dinâmicas sobre a sua precisão de posicionamento. Não é simples avaliar a importância dessas causas sobre o fenômeno global. De acordo com o professor Takashi Mizutani do Instituto de Tecnologia de Tóquio, tem sido prática comum no Japão atribuir a essas deformações cerca de 10% da responsabilidade pela imprecisão de posicionamento do robô.

4.2.1.4. Fator de qualidade

É um parâmetro indicativo da rigidez estrutural dos braços bastante empregado no projeto de robôs articulados, sendo definido por:

$$FQ(\theta_3) = A(\theta_3) \cdot f_1(\theta_3) \quad (4.1)$$

onde $f_1(\theta_3)$ é a menor frequência fundamental da estrutura dos braços na configuração θ_3 e $R(\theta_3)$ é a distância entre a articulação que liga o antebraço à base giratória e o ponto de fixação do pulso ao braço.

O fator de qualidade mínimo admissível deve ser especificado em função da atividade industrial em que se irá empregar o robô. De acordo com a referência [40], essa dependência é bem expressa pelo gráfico da figura 4.6.

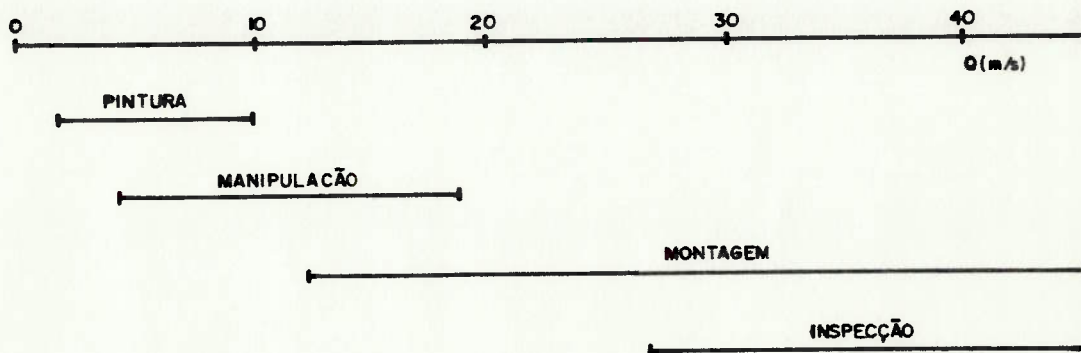


FIGURA 4.6. Fator de qualidade X Atividade industrial

Estruturas com fator de qualidade superior a 30 m/s destinam-se a tarefas de alta precisão e, por esse motivo, requerem consideráveis esforços de análise, projeto e fabricação.

4.2.2. Modelos matemáticos para o projeto estrutural

O ante-projeto estrutural de robôs articulados "massivos" requer a análise de pelo menos 3 problemas básicos: as deflexões estáticas, as vibrações estruturais e os efeitos da estrutura sobre a dinâmica do sistema mecânico. Por essa razão, é recomendável que se desenvolvam modelos matemáticos para:

- 1o. O controle das deflexões estruturais na interface do braço com o pulso;
- 2o. O controle do fator de qualidade da estrutura do robô;
- 3o. O controle de efeitos dinâmicos indesejáveis oriundos da forma da estrutura dos braços.

Os 3 modelos citados serão discutidos nos próximos itens.

4.2.3. O Controle das deflexões

4.2.3.1. O modelo estrutural

A quantidade relativamente restrita de informações, que é uma característica comum às primeiras etapas do ante-projeto, torna recomendável a adoção de modelos estruturais simples e conservativos. O modelo que se irá a-

qui considerar possui essas qualidades e é bastante adaptável à análise de estruturas de robôs hidráulicos típicos.

As principais hipóteses e considerações necessárias à caracterização do modelo, são apresentadas a seguir.

i. Sobre o pulso

Pulsos de robôs hidráulicos possuem estruturas compactas e praticamente indeformáveis sob a ação dos esforços a que normalmente são submetidos. As únicas deformações que nele se verificam são aquelas oriundas da torção dos eixos dos atuadores rotativos - mas podem ser controladas mediante escolha adequada dos mesmos.

Por se constituir em uma carga aplicada à estrutura dos braços, é necessário que nas primeiras etapas do ante-projeto se façam estimativas acerca de suas propriedades mecânicas de interesse. À medida que o projeto for avançando, essas estimativas irão sendo substituídas por informações mais exatas.

ii. Sobre a base giratória

Essa estrutura deve possuir excelentes características de rigidez, pois qualquer deformação que nela vier a ocorrer será bastante amplificada pela estrutura dos braços (conforme se esquematiza na figura 4.7). Como, porém, a sua massa se distribui proximamente ao eixo \vec{s}_1 , influenciando por-

tanto muito pouco nas características dinâmicas do sistema, o enrijecimento dessa estrutura pode ser realizado sem cuidados especiais.

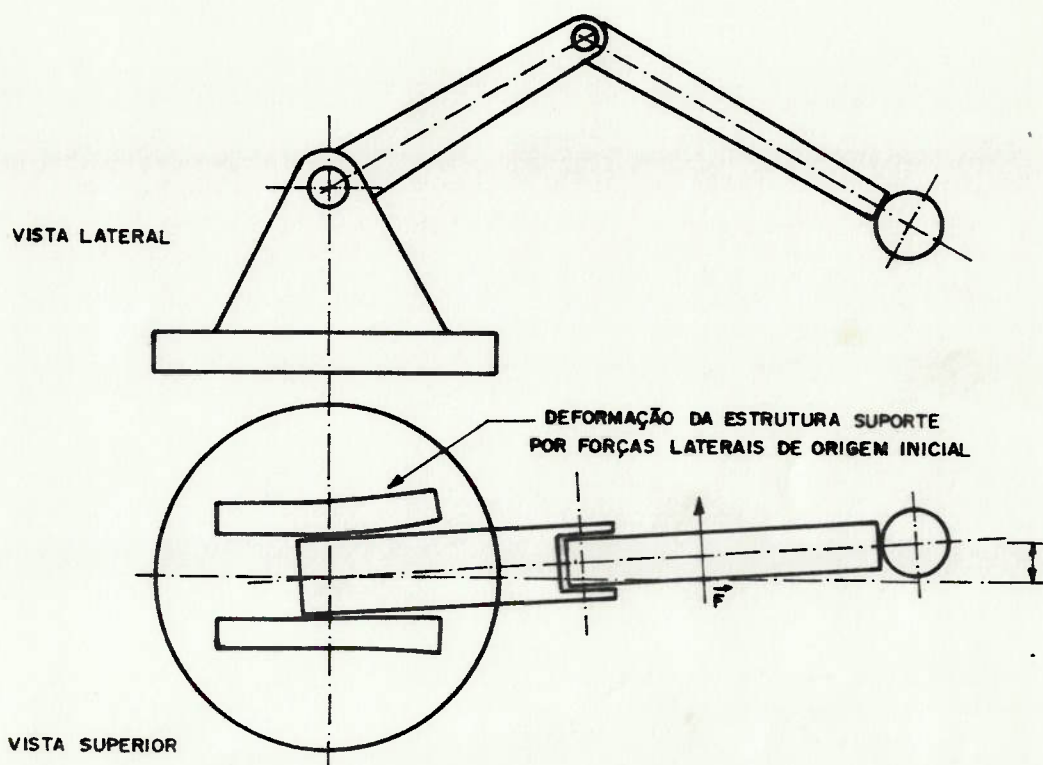


FIGURA 4.7. Amplificação das deformações da estrutura suporte da base giratória

iii. Sobre os braços.

A estrutura dos braços pode ser analisada com base em um modelo de pórtico (conforme figura 4.8) constituído por duas vigas de comprimentos a_2 e a_3 conhecidos e secções desconhecidas (a determinar). No caso de robôs hidráulicos esse modelo é bastante conservativo, de vez que os atuadores lineares, operando como apoios adicionais, reduzem sensivelmente a flexibilidade do sistema.

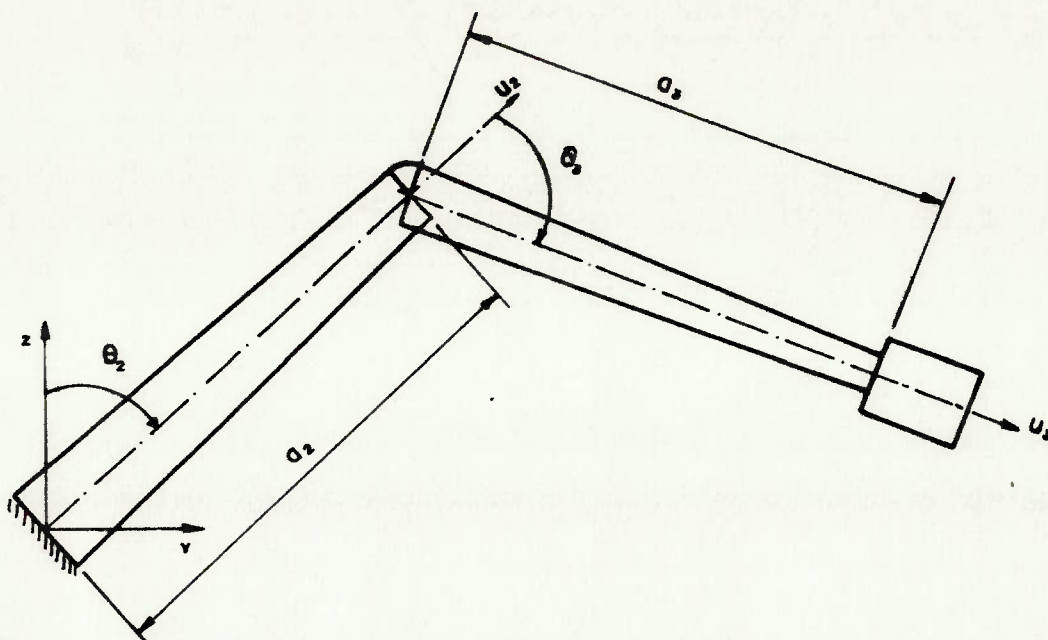


FIGURA 4.8. Modelo estrutural dos braços: pórtico engastado em uma configuração genérica (θ_2, θ_3)

Para que as secções mais solicitadas sejam as mais resistentes é conveniente o emprego de vigas com secção variável conforme indicado na figura 4.8. A forma propriamente dita das secções é um problema em aberto. Um grande número de robôs articulados possuem braços com secções retangulares em forma de caixa; essas estruturas, além de não apresentarem dificuldades especiais de fabricação e montagem, são muito resistentes a esforços de flexão e torção.

iv. Sobre os esforços externos

A estrutura dos braços aplicam-se esforços externos de origem gravitacional e inercial. Estes últimos, contudo, podem ser em princípio desprezados, de vez que as operações via de regra realizadas com robôs não envolvem grandes velocidades e acelerações.

Os esforços externos dependem dos seguintes fatores:

1o. Características da Carga Útil: A máxima carga transportada (placa de montagem) + (dispositivo terminal) + (carga) bem como as suas dimensões principais são um dado de projeto que se deve conhecer a priori.

2o. Características do Pulso: O peso e o baricentro do pulso na condição mais desfavorável (ou seja, com os eixos alinhados com o eixo do braço), devem ser estimados nas primeiras etapas do ante-projeto.

3o. Forma da Estrutura: Os esforços devidos ao peso próprio dependem da forma da estrutura dos braços, devendo ser expressos em função das variáveis que a caracterizam.

v. Sobre os esforços internos

Por serem de uma ordem de grandeza muito inferior, não devem ser levadas em consideração, na análise da estrutura idealizada, as deformações causadas por esforços cortantes e normais, mas apenas aquelas devidas aos momentos fletores segundo o eixo \vec{v} (conforme se mostra na figura 4.9).

4.2.3.2. O critério de projeto estrutural

Para o dimensionamento básico da estrutura dos braços é recomendável a adoção do seguinte critério de projeto: "O vetor deflexão elástica, com origem em um ponto C_4 situado no centro da interface do pulso com a estrutura do braço, deve medir deflexões sempre inferiores a um valor δl pré-estabelecido".

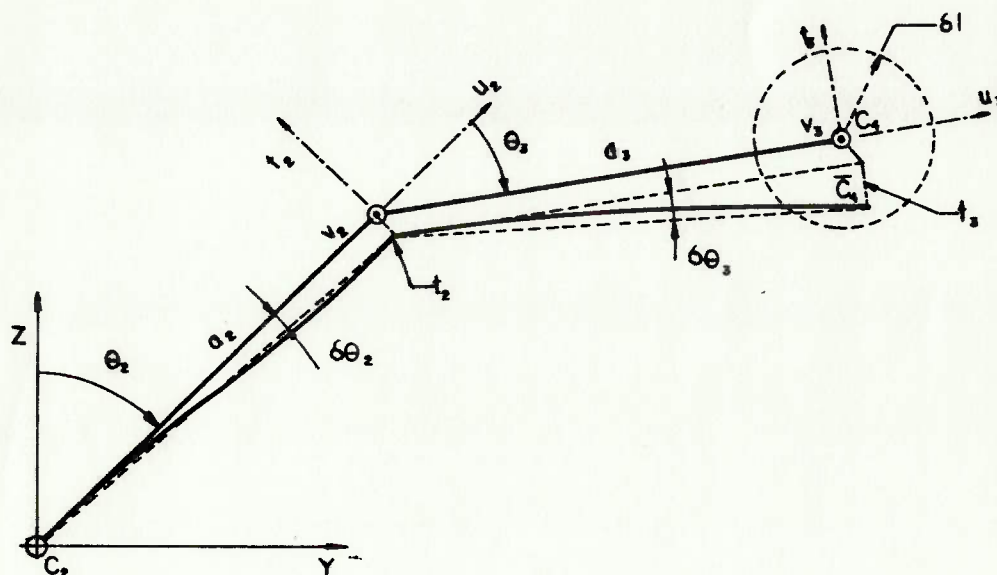


FIGURA 4.9. Deflexões estruturais dos braços

Na figura 4.9 representa-se esquematicamente as estruturas dos braços com e sem deformações. Com as hipóteses de linearidade e pequenas deflexões, pode-se escrever:

$$\theta_2 = t_2/a_2 \quad \text{e} \quad \theta_3 = t_3/a_3 \quad (4.2)$$

Os vetores $(C_4 - C_2)$ e $(\bar{C}_4 - C_2)$, descritos no referencial XYZ da figura, são dados por:

$$\begin{aligned} C_4: y &= a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ z &= a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_4: \bar{y} &= a_2 (\sin \theta_2 + \delta \theta_2 \cos \theta_2) + a_3 [\sin(\theta_2 + \theta_3) + (\delta \theta_2 + \delta \theta_3) \cos(\theta_2 + \theta_3)] \\ \bar{z} &= a_2 (\cos \theta_2 - \delta \theta_2 \sin \theta_2) + a_3 [\cos(\theta_2 + \theta_3) - (\delta \theta_2 + \delta \theta_3) \sin(\theta_2 + \theta_3)] \end{aligned} \quad (4.4)$$

O critério de projeto acima apresentado exige que:

$$|C_4 - \bar{C}_4| < \delta l \quad \text{ou} \quad (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 < (\delta l)^2 \quad (4.5)$$

Substituindo-se em 4.5 as coordenadas de C_4 e \bar{C}_4 expressas por 4.3 e 4.4, obtém-se:

$$a_2^2 \delta \theta_2^2 + 2a_2 a_3 \delta \theta_2 (\delta \theta_2 + \delta \theta_3) \cos \theta_3 + a_3^2 (\delta \theta_2 + \delta \theta_3)^2 < (\delta l)^2 \quad (4.6)$$

Aplicando-se a 4.6 as relações 4.2 resulta, finalmente:

$$a_2^2 t_2^2 + 2a_2 t_2 (a_3 t_2 + a_2 t_3) \cos \theta_3 + (a_3 t_2 + a_2 t_3)^2 < (\delta l)^2 \quad (4.7)$$

que representa uma restrição à livre escolha dos parâmetros de forma das secções estruturais.

No apêndice E as variáveis que medem as deflexões da estrutura são expressas em função das propriedades elásticas do material e das dimensões das secções dos braços, utilizando-se para tanto formulações básicas da Resistência dos Materiais.

O critério de projeto estrutural apresentado deve integrar-se ao sistema de rotinas de auxílio ao projeto conforme se apresenta no capítulo 6.

Em fases mais avançadas do projeto, quando estiverem disponíveis informações estruturais mais detalhadas, é recomendável a determinação das deflexões mediante o emprego de modelos passíveis de serem analisados pelo Método dos Elementos Finitos.

4.2.4. O controle do fator de qualidade

A estrutura dos braços, graças à sua esbeltez e distribuição de massas é uma importante fonte de vibrações do sistema mecânico de um robô articulado.

A estrutura dos braços apresenta vibrações devidas à flexão e flexo-torção (conforme se mostra na figura 4.10). As primeiras ocorrem ao longo dos planos transversais $u_2 t_2$ e $u_2 v_2$ enquanto que as últimas são induzidas pelo desalinhamento dos eixos \vec{u}_2 e \vec{u}_3 , manifestando-se ao longo de \vec{u}_2 .

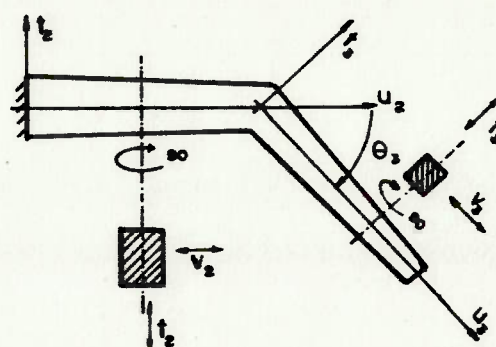


FIGURA 4.10. Vibrações estruturais dos braços

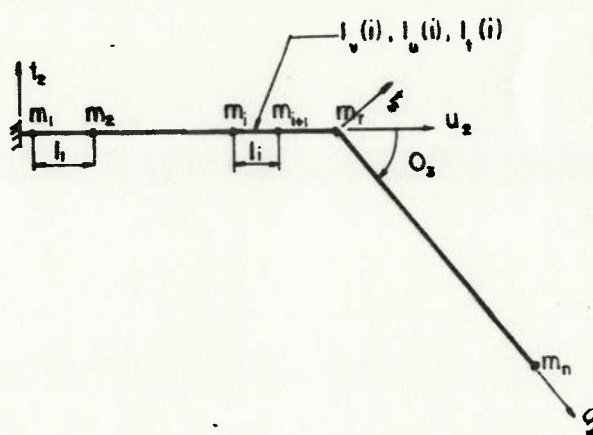


FIGURA 4.11. Modelo para a análise de vibrações

Diversos métodos podem ser utilizados para o cálculo das frequências naturais da estrutura dos braços. O método de Myklestad-Thomson (método das matrizes de influência), em particular, é bastante adequado à análise de vigas com secções transversais variáveis [24].

O modelo estrutural da figura 4.11 é a base para a aplicação desse método. As estruturas do antebraço e braço têm as suas distribuições contínuas de massa e rigidez subs-

tituídas por um conjunto de barras com rigidez constante delimitadas por massas puntuais.

No apêndice F, as frequências naturais da estrutura dos braços em uma dada configuração θ_3 são determinadas com o auxílio desse método.

Uma vez determinadas as frequências naturais fundamentais $f_{1t}(\theta_3)$ e $f_{1u}(\theta_3)$ de flexão e flexo-torção para θ_3 varrendo toda a faixa de variação $\theta_{3min} < \theta_3 < \theta_{3max}$, o fator de qualidade mínimo será dado por:

$$FQ_{min} = \min (f_{1t}(\theta_3).A(\theta_3), f_{1u}(\theta_3).A(\theta_3)) \quad (4.20)$$

Rotinas destinadas ao cálculo do fator de qualidade mínimo da estrutura do robô devem fazer parte do sistema de auxílio ao anteprojeto de robôs conforme se apresenta no capítulo 6.

4.2.5. O controle de efeitos dinâmicos indesejáveis

Desde as primeiras etapas do ante-projeto de um robô articulado é conveniente que se disponha de meios de avaliação da influência das formas estruturais sobre o seu comportamento dinâmico, que é bastante complexo, incluindo múltiplos acoplamentos entre os diversos corpos articulados, a presença de forças não lineares e a variação das características inerciais com a configuração do sistema.

A utilização de processos de simulação de movimentos típicos, muito embora seja capaz de fornecer ao projetista um certo grau de conhecimento das características dinâmicas do sistema mecânico articulado, é mais indicada, contudo, à especificação do sistema de acionamento do robô, conforme se apresenta no capítulo 5. O comportamento dinâmico de robôs articulados pode ser muito melhor compreendido a partir do conhecimento de certas características globais do sistema como, por exemplo, o seu tensor generalizado de inércia [1], que é uma extensão do conceito de tensor de inércia de um corpo rígido a um sistema de corpos rígidos articulados.

Na referência [1] determina-se a expressão desse tensor para um sistema de corpos articulados por meio de juntas rotativas segundo uma cadeia cinemática serial, analisando-se o comportamento dinâmico desse sistema a partir do estudo da forma do elipsóide de inércia associado ao tensor. No apêndice G apresenta-se uma reprodução desse estudo acrescida de certos comentários e explicações.

Decrevendo-se o tensor generalizado de inércia da estrutura de localização de um robô GR em um sistema de coordenadas cartesianas como o da figura 4.12, relativamente a um ponto situado na interface do pulso com o eixo do braço, torna-se possível analisar o comportamento dinâmico do robô a partir da forma do elipsóide generalizado de inércia (que, nesse caso, é uma elipse). Uma grande diferença entre os comprimentos dos eixos maior e menor da elipse indica que a

inércia do sistema varia fortemente com a direção do movimento. Além disso, a existência de modificações sensíveis na forma e orientação da elipse entre duas configurações próximas é um sinal indicativo da presença de consideráveis forças não-lineares.

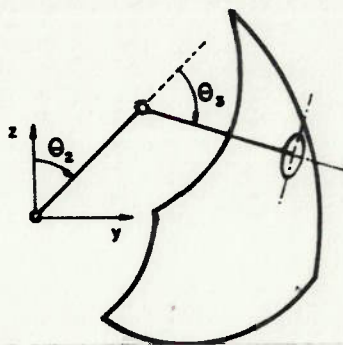


FIGURA 4.12. A elipse generalizada de inércia na configuração (θ_2, θ_3)

Gerar um robô articulado com características iso-inerciais em todo o espaço de trabalho principal é um objetivo que não pode ser atingido a menos que se empregue um sistema de acionamento paralelo [2]. Robôs com acionamento serial possuem características inerciais muito dependentes da configuração assumida pelo sistema mecânico articulado, e apenas ao longo da trajetória $\theta_3 = 90^\circ$, é possível estabelecer-se condições geométricas capazes de transformar a elipse de inércia em um círculo [1].

O projetista deve concentrar os seus esforços no sentido de obter um espaço de trabalho onde a elipse generalizada de inércia não apresente discrepâncias exageradamente grandes entre os comprimentos de seus eixos principais. Para tanto é conveniente que ele disponha de uma ferramenta

de auxílio capaz de mapear todo o interior do espaço de trabalho principal com a elipse generalizada de inércia. Um sistema de auxílio ao projeto de robôs deve prever a inclusão de rotinas com essa potencialidade conforme se apresenta no capítulo 6.

5. A ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

5.1. Introdução

A especificação dos sub-sistemas de atuação é uma etapa fundamental do ante-projeto de um robô. Por causa da complexidade do seu comportamento dinâmico, via de regra é necessário o emprego de simulação de operações de modo a que se obtenham dados cinemáticos e dinâmicos que permitam ao projetista a escolha de dispositivos atuadores adequados.

Essa escolha, que se realiza em função dos parâmetros de projeto básicos, das restrições industriais e geométricas e dos dados de simulação, evidentemente não é única devendo, portanto, ser submetida a critérios de avaliação apropriados.

5.2. Simulação de Operações

São três as etapas intrínsecas ao desenvolvimento do processo de simulação:

- 1o. Especificação das operações-padrão;
- 2o. Escolha e geração de um modelo cinemático-dinâmico para o robô;
- 3o. Aplicação desse modelo à simulação das operações-padrão.

Dessas etapas tratarão os próximos itens.

5.2.1. Operações-padrão

Cada operação-padrão deve ser caracterizada por uma carga operacional representativa do correspondente processo que se irá simular, e um conjunto de trajetórias-teste que se mostrem adequadas à análise daquele processo. A carga operacional (ferramenta de trabalho ou dispositivo terminal + carga manipulada) é um parâmetro de projeto relativamente fácil de especificar; o mesmo já não ocorre com as trajetórias-teste, que têm sido objeto de discussão em diversos trabalhos de pesquisa em Robótica [37]. Neste trabalho propõe-se a utilização de 2 tipos de trajetórias-teste, para a simulação de operações com as estruturas de localização e orientação.

i. Trajetórias-teste para a estrutura de localização

Para que o robô tenha capacidade de movimentar o dispositivo terminal em todas as direções, dentro do espaço de trabalho, com a máxima velocidade especificada, é conveniente que as trajetórias-teste sejam retas paralelas aos eixos de um sistema XYZ cartesiano (conforme se mostra na figura 5.1), varrendo um setor do espaço de trabalho delimitado por 2 planos Π_1 e Π_2 .

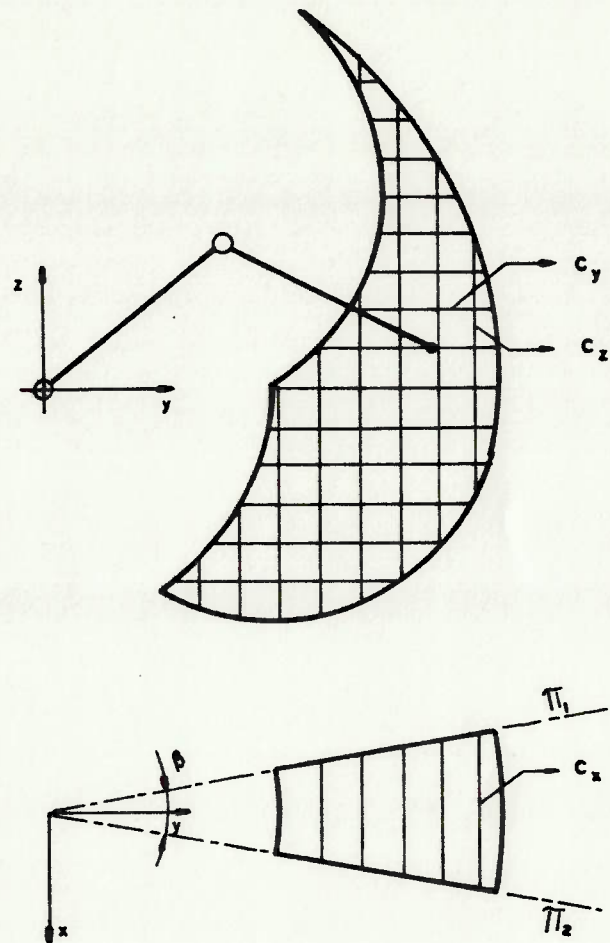


FIGURA 5.1. Trajetórias-teste para a estrutura de localização

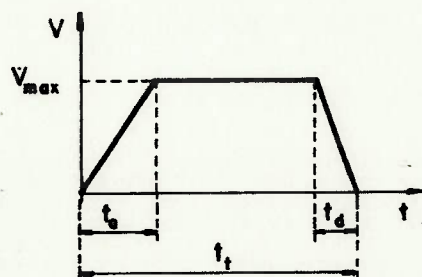


FIGURA 5.2. Perfil de velocidades de 3 fases

Essas retas devem ser percorridas segundo um perfil padrão de velocidades com 3 fases (conforme figura 5.2):

- aceleração constante durante um intervalo de tempo T_a ,
- velocidade constante ($V_{máx}$),
- desaceleração constante durante um intervalo de tempo T_d ,

perfil esse que é determinado a partir de considerações acerca da operação real que se busca simular.

As trajetórias-teste propostas, descritas no sistema de referência global da figura 5.1, têm expressão analítica bastante simples:

$$\begin{aligned} C_x: y = \bar{y} = \text{const.}; z = \bar{z} = \text{const.}; x = x(t) \\ C_y: x = \bar{x} = \text{const.}; z = \bar{z} = \text{const.}; y = y(t) \\ C_z: x = \bar{x} = \text{const.}; y = \bar{y} = \text{const.}; z = z(t) \end{aligned} \quad (5.1)$$

onde os pontos (x, y, z) são interiores ao setor angular do espaço de trabalho da figura 5.1 e as funções $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$ respeitam todas ao mesmo perfil de velocidades de 3 fases sendo, portanto, expressas por:

$$s(t) = \begin{cases} V_{máx} t^2 / (2t_a) & \text{para: } t < t_a \\ V_{máx} (t - t_a / 2) & \text{para: } t_a < t < (S_{máx} / V_{máx} + (t_a - t_d)) / 2 = t_{mú} \\ V_{máx} [t_{mú} - t_a / 2 + (t - t_{mú})^2 / (2t_d)] & \text{para: } t_{mú} < t < (t_{mú} + t_d) \end{cases} \quad (5.2)$$

onde $S_{máx}$ é o perímetro da trajetória limitada pela envoltória do espaço de trabalho (retas C_y e C_z) ou pelos planos Π_1 e Π_2 (retas C_x) e $t_{mú}$ o tempo gasto nos movimentos a aceleração constante e a velocidade constante.

ii. Trajetórias-teste para o pulso

Para que qualquer tarefa de orientação possa ser realizada em um intervalo de tempo inferior a T_o , é conveniente que se adote como trajetória-teste para o pulso um procedimento em que os seus 3 eixos se movem simultaneamente varrendo todos os respectivos cursos angulares durante o tempo T_o . Para robôs 6R com topologia C é necessária uma consideração adicional: o primeiro eixo, ξ_1 , deve estar localizado em uma direção ortogonal ao campo de gravidade, pois essa é a situação em que os 3 eixos são mais solicitados.

Fixando-se, portanto, o tempo máximo de orientação T_o e os tempos de aceleração e desaceleração (T_{o*} e T_{od}), é possível determinar os perfis de velocidade e aceleração associados a cada um dos 3 graus de liberdade do pulso:

$$\dot{\theta}_{1,max} = \Delta\theta_1 / [T_o - (T_{o*} + T_{od}) / 2] \quad (5.3)$$

$$\ddot{\theta}_{1,*} = \dot{\theta}_{1,max} / T_{o*} \quad (5.4)$$

$$\ddot{\theta}_{1,d} = \dot{\theta}_{1,max} / t_{od}$$

5.2.2. Modelos cinemático-dinâmicos

Destinam-se à determinação dos estados cinemáticos e dinâmicos locais - $[\theta]$, $[\dot{\theta}]$, $[\ddot{\theta}]$, $[T]$ - (isto é, de cada uma das articulações) a partir do conhecimento dos estados cinemáticos e dinâmicos globais $[H]$, $[U_n]$, $[U_o]$, $[\dot{H}]$, $[\dot{U}_n]$,

$[\dot{U}_n]$, $[\ddot{H}]$, $[\ddot{U}_n]$, $[\ddot{U}_n]$ associados ao movimento de um dispositivo terminal no espaço. Podem também ser empregados no sentido inverso, ou seja, na determinação dos estados globais a partir dos estados locais.

Os modelos cinemático-dinâmicos de robôs possuem 3 elementos básicos:

1o. Um sistema de descrição topológica: Praticamente todos os modelos existentes utilizam um sistema de coordenadas naturais composto de n (onde n = número de graus de liberdade) sistemas de referência locais encadeados de forma a que o sistema de ordem i , fixo ao i -ésimo corpo articulado da cadeia cinemática serial, é descrito recursivamente em função das coordenadas do sistema de referência de ordem $(i-1)$. Os sistemas de eixos locais podem ser gerados de acordo com a convenção de Denavit-Hartenberg [15] ou outras mais genéricas como, por exemplo, a da referência [42].

2o. Um conjunto de equações destinadas à determinação de velocidades e acelerações (lineares ou angulares): São as equações da cinemática de corpos rígidos descritas no sistema de coordenadas naturais do robô. Nessas equações os termos relacionados com a geometria podem ser completamente desacoplados das variáveis dinâmicas do sistema mediante o emprego dos assim chamados coeficientes de influência cinemática de primeira e segunda ordem [18].

3o. Um conjunto de equações destinadas à determinação de esforços (torques ou forças): São as equações da dinâmica - segundo as descrições de Euler ou Lagrange - aplicadas ao conjunto de corpos rígidos serialmente articulados e descritas no seu sistema de coordenadas naturais.

Muitos modelos voltados à descrição do comportamento dinâmico de robôs têm sido propostos. Na referência [30], por exemplo, apresenta-se um modelo em que todas as equações da cinemática e da dinâmica são escritas segundo uma formulação recursiva associada a eixos locais que seguem a convenção de Denavit-Hartenberg. Esse modelo foi aplicado à simulação do comportamento dinâmico do protótipo de robô industrial construído na Universidade de São Paulo com resultados bastante satisfatórios [35]. Na referência [42] apresenta-se um outro modelo em que as equações da cinemática e da dinâmica são expressas em função dos coeficientes de influência cinemática de primeira e segunda ordem. Pelas características de generalidade que possui e por se constituir em um excelente instrumento de análise do comportamento dinâmico de robôs, esse modelo é apresentado no apêndice H.

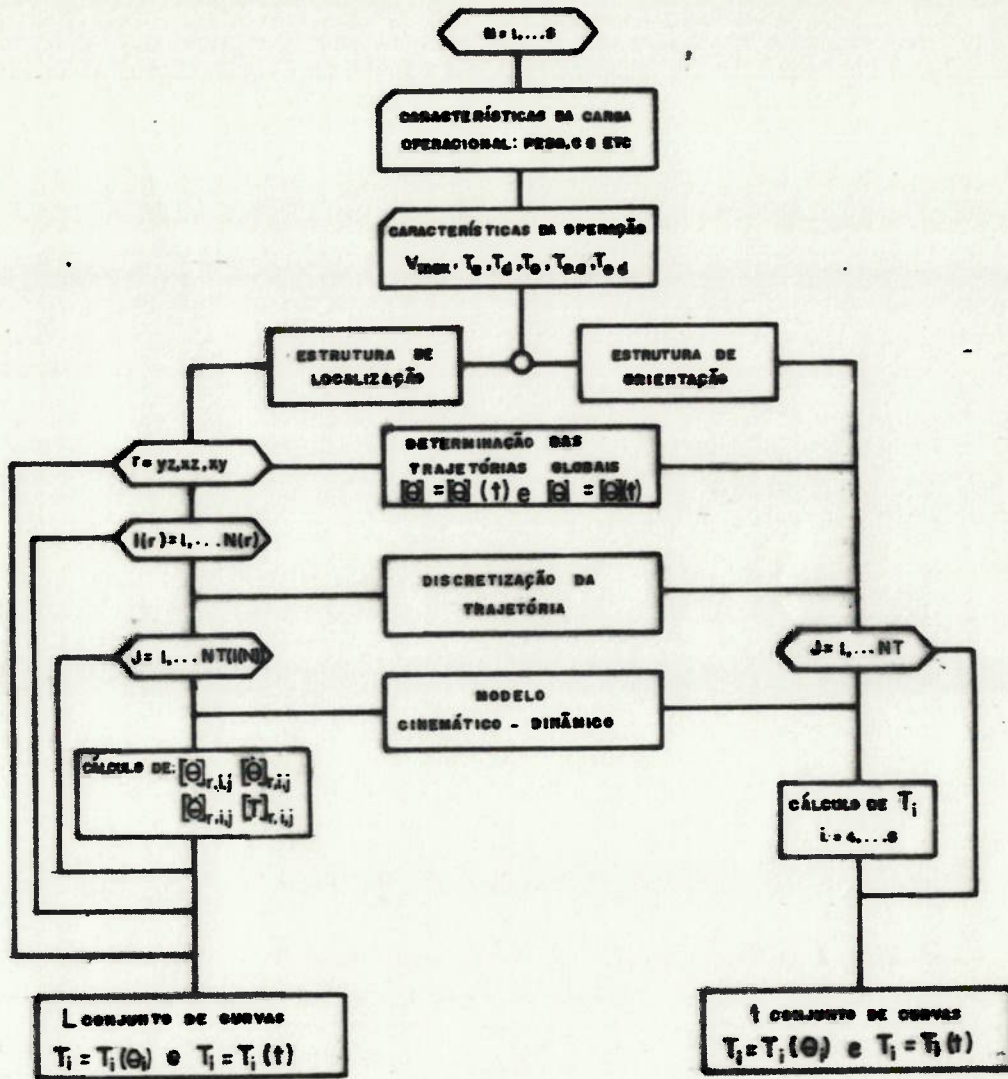


FIGURA 5.3. Simulação de trajetórias-teste

5.2.3. Um sistema de simulação de operações

O diagrama da figura 5.3 descreve de forma esquemática um possível procedimento de simulação de operações com um robô industrial.

5 operações-padrão são simuladas, cada uma delas com os seus correspondentes parâmetros característicos: carga operacional (peso, localização do baricentro, raio de giração médio) e perfis de velocidade definidos por V_{max} , T_m e T_d (estrutura de localização) e T_o , T_{om} e T_{od} (pulso).

Para a estrutura de localização emprega-se na simulação $L = N_x + N_y + N_z$ trajetórias-teste retas, conforme descritas em 5.2.1 e 5.2.2, onde N_x , N_y e N_z são, respectivamente, o número de retas C_x , C_y e C_z . Cada uma dessas trajetórias deve ser discretizada em um número NT , de pontos (i =índice da trajetória). A cada um desses pontos se aplica o modelo cinemático-dinâmico gerado para os 3 primeiros graus de liberdade do robô, obtendo-se assim as coordenadas locais $[\theta]$, as velocidades e acelerações angulares $[\dot{\theta}]$ e os torques $[T]$ que devem ser aplicados às articulações para que aquele estado cinemático-dinâmico global se verifique.

A simulação das operações do pulso é feita com a utilização da trajetória-teste apresentada em 5.2.1-ii. Ela deve ser discretizada em NT pontos, a eles se aplicando o modelo cinemático-dinâmico gerado para os 3 últimos graus de liberdade do robô. Como a trajetória-teste para o pulso é expressa em variáveis locais esse modelo é utilizado apenas para a obtenção dos torques.

Ao fim do processo resultam:

- a) para a estrutura de localização: L conjuntos de curvas
- $T_k = T_k(\dot{\theta}_k)$ torque em função da velocidade angular,
 - $T_k = T_k(t)$ torque em função do tempo,

- $\dot{\theta}_k = \dot{\theta}_k(t)$ velocidade angular em função do tempo,
com $k = 1, \dots, 3$;

b) para o pulso: 1 conjunto de curvas

- $T_k = T_k(\dot{\theta}_k)$ torque em função da velocidade angular,
- $T_k = T_k(t)$ torque em função do tempo,
- $\dot{\theta}_k = \dot{\theta}_k(t)$ velocidade angular em função do tempo,
com $k = 4, \dots, 6$;

Essas curvas são fundamentais para a especificação dos sub-sistemas atuadores do robô.

Um sistema de simulação de operações de robôs industriais foi desenvolvido durante a elaboração do projeto que deu origem a este trabalho, encontrando-se detalhadamente descrito em [35].

5.3. O Sistema Atuador de Um Robô Hidráulico

Nos próximos itens são apresentados e discutidos os problemas mais importantes relacionados com a especificação dos sub-sistemas atuadores de um robô hidráulico convencional, ou seja, dotado das seguintes características:

- 1a. Pulso acionado por atuadores rotativos diretamente acoplados aos eixos de rotação;
- 2a. Braços acionados por atuadores lineares em disposição de paralelograma;
- 3a. Base giratória acionada por motor hidráulico com redutor.

A adequada definição de cada um desses sub-sistemas requer considerações de ordem geométrica, estática e dinâmica.

5.3.1. Análise geométrica

5.3.1.1. Acionamento do pulso

Em um robô hidráulico, a destreza do pulso depende do curso angular dos atuadores rotativos (pois eles são diretamente acoplados aos eixos de rotação) e das interferências mecânicas entre as partes móveis.

Industrialmente são disponíveis dois tipos de atuadores rotativos - com aleta simples e com aleta dupla. O primeiro deles fornece torques menores, porém apresenta maiores cursos angulares (até 290°); com o segundo ocorre o oposto - os torques são maiores, contudo as varreduras angulares não ultrapassam 100° .

Portanto, sempre que possível, é conveniente que se especifiquem atuadores rotativos com aleta simples. Em assim se procedendo, os melhores pulsos hidráulicos passíveis de serem projetados apresentam as características indicadas na tabela 5.1:

Modelo	θ_4	θ_5	θ_6
C	290°	l.i.m.*	290°
A1	l.i.m.	290°	l.i.m.
B1	l.i.m.	l.i.m.	290°

TABELA 5.1. Máximas varreduras angulares de um pulso acionado por atuadores hidráulicos rotativos

(* l.i.m. = limitado por interferências mecânicas)

5.3.1.2. Acionamento da base giratória

Do ponto de vista geométrico, o acionamento da base giratória por um motor hidráulico acoplado a um redutor é bastante vantajoso, pois não apresenta problemas de limitação de curso (como no caso dos atuadores rotativos). No entanto, é necessário prover a base de um sistema de distribuição (alimentação e drenagem) de óleo que não limite mecanicamente o seu livre curso, como ocorre com o robô esquematizado na figura 5.4 cujo movimento é limitado pelo comprimento das mangueiras.

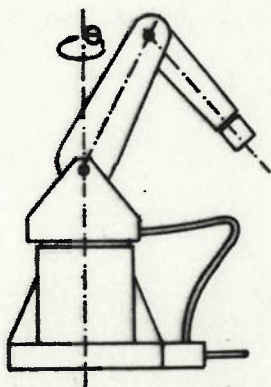


FIGURA 5.4. Curso θ_1 limitado pelo comprimento das mangueiras

Na figura 5.5 apresenta-se um sistema de distribuição de óleo projetado para conferir à base giratória total liberdade de rotação. O eixo rotor (1) da base gira no interior de uma camisa (2). No corpo do eixo existem 3 grandes ranhuras (a,b,c) que, juntamente com as paredes internas da camisa e com as vedações v_1, v_2, \dots, v_4 providas pelos anéis "O", constituem 3 câmaras anulares. Cada uma dessas câmaras possui comunicação com um dos furos f_1, f_2 ou f_3 paralelos à diretriz do eixo rotor e com um dos furos radiais F_1, F_2 ou F_3 da camisa. O óleo a alta pressão entra por F_1 e transmite-se a f_1 por meio da câmara anular a qualquer que seja a posição angular do eixo. O mesmo ocorre com o óleo de retorno (f_2 -b- F_2) e com o óleo do dreno (f_3 -c- F_3).

O protótipo de robô desenvolvido na Universidade de São Paulo possui um sistema de distribuição de óleo como o da figura 5.5.

5.3.1.3. Acionamento dos braços

O sistema de acionamento dos braços através de cilindros hidráulicos apresenta limitações de curso ligadas ao mecanismo de transformação de movimentos lineares em angulares. Considere-se o típico robô hidráulico da figura 4.5: os cilindros são pivotados em suas extremidades fixa e móvel em suportes convenientemente instalados nas estruturas dos braços e da base giratória.

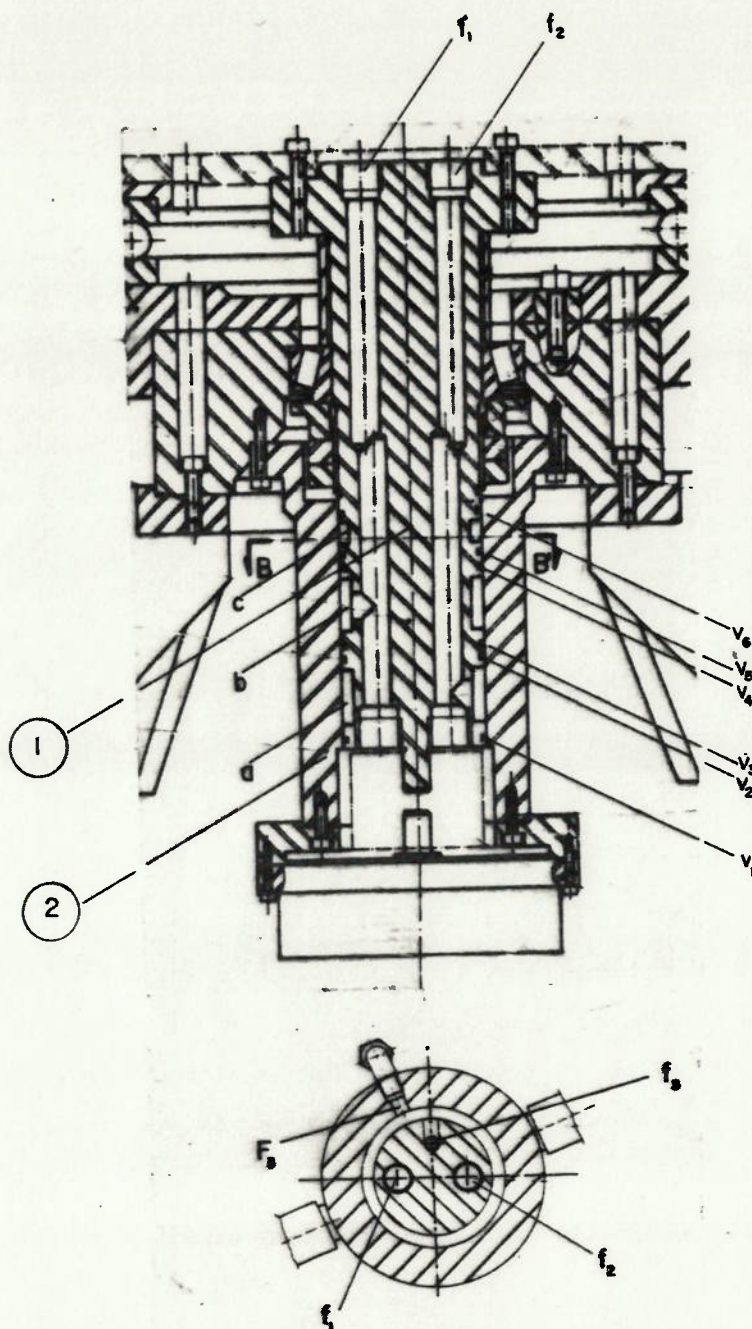


FIGURA 5.5. Sistema de distribuição de óleo

Para se ganhar espaço de montagem, normalmente os cilindros se encontram em oposição relativamente à estrutura do antebraço, resultando, dessa configuração, 2 mecanismos

distintos de acionamento (conforme se indica nas figuras 5.6 a-b):

1o. Acionamento do antebraço: com $l_2 > l_1$;

2o. Acionamento do braço : com $d_2 < d_1$;

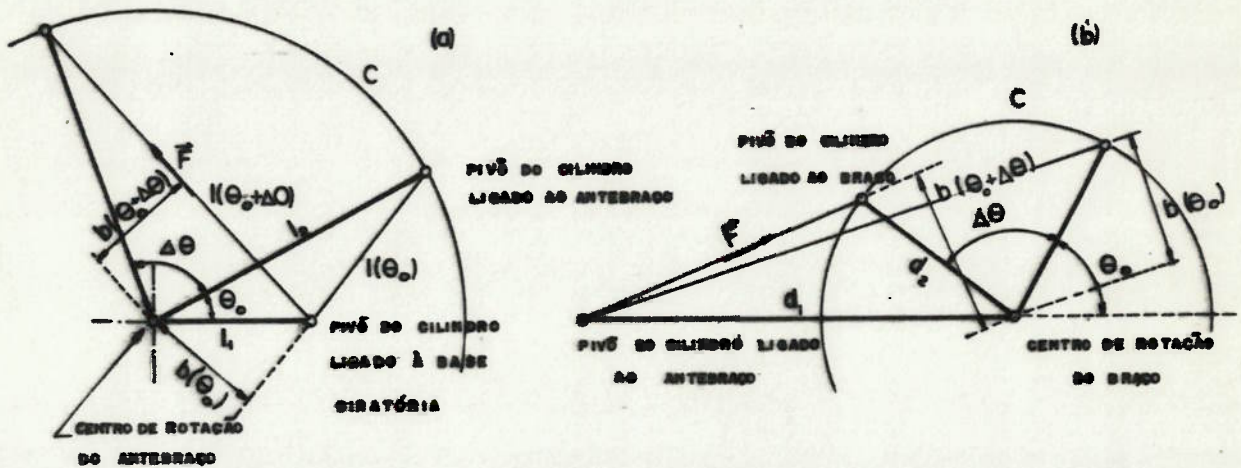


FIGURA 5.6. Mecanismos de acionamento:
a. do antebraço
b. do braço

O braço de alavanca da força F aplicada pelo cilindro aos pivôs é variável com a configuração do sistema. Portanto, ambos os mecanismos devem ser projetados de modo a que o braço de alavanca médio \bar{b} resulte máximo ao longo de toda a faixa operacional do cilindro, ou seja, uma vez fixadas as dimensões l_1 e l_2 e a varredura angular $\Delta\theta$, deve-se determinar θ_0 de modo a que \bar{b} seja máximo.

No caso do mecanismo da figura 5.6-a, o braço de alavanca, \underline{b} , é expresso por:

$$b = l_1 l_2 [l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos\theta]^{-1/2} \sin\theta \quad (5.5)$$

de modo que o valor médio de \underline{b} entre os ângulos θ_0 e $(\theta_0 + \Delta\theta)$ será:

$$\begin{aligned}\bar{b} &= (\Delta\theta)^{-1} \int_{\theta_0}^{\theta_0+\Delta\theta} b \cdot d\theta = \\ &= (\Delta\theta)^{-1} \cdot \left([l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\theta_0 + \Delta\theta)]^{1/2} - \right. \\ &\quad \left. [l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos\theta_0]^{1/2} \right) \quad (5.6)\end{aligned}$$

Fixado $\Delta\theta$, para que \bar{b} seja máximo deve-se ter:

$\partial \bar{b} / \partial \theta_0 = 0$, condição essa que dá origem à seguinte expressão:

$$\cos(\theta_0 + \Delta\theta) = [(l_1^2 + l_2^2) \cos\theta_0 - 2l_1 l_2] / [2l_1 l_2 \cos\theta_0 - l_1^2 - l_2^2] \quad (5.7)$$

que permite determinar o valor ótimo de θ_0 para que o braço de alavanca médio \bar{b} seja máximo.

Com relação ao mecanismo da figura 5.6-b, o braço b é dado por:

$$b = d_1 d_2 [d_1^2 + d_2^2 + 2d_1 d_2 \cos\theta]^{-1/2} \sin\theta \quad (5.8)$$

cujo valor máximo ocorre na condição de tangência do vetor \vec{F} com a circunferência C , ou seja, para:

$$\theta' = \cos^{-1}(-d_2/d_1) \quad (5.9)$$

Portanto, para que o valor médio de b seja máximo é suficiente que os movimentos de d_2 sejam simétricos em relação a θ' , isto é:

$$\theta_0 = \theta' - \Delta\theta/2 = \cos^{-1}(-d_2/d_1) - \Delta\theta/2 \quad (5.10)$$

Os mecanismos das figuras 5.6a-b devem ser montados na estrutura do robô de forma a que os cursos angulares $\Delta\theta_2$ e $\Delta\theta_3$ variem, respectivamente, nos intervalos $[\theta_{2min}, \theta_{2max}]$ e $[\theta_{3min}, \theta_{3max}]$.

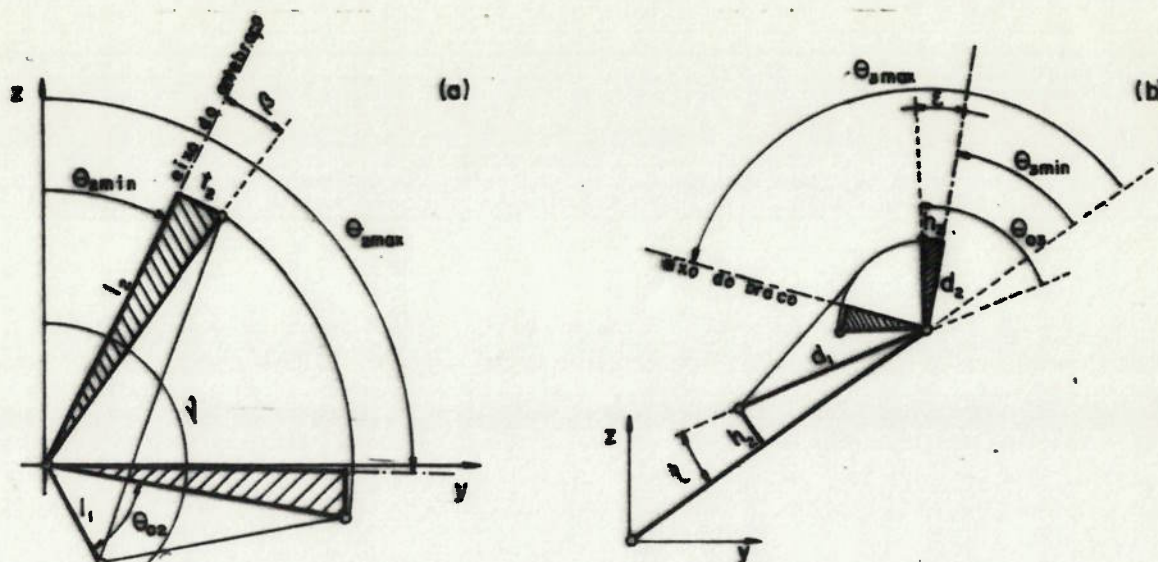


FIGURA 5.7. Parâmetros geométricos para a localização dos mecanismos: a) do antebraço; b) do braço

Considerem-se as figuras 5.7a-b. O ângulo γ entre o eixo vertical Z e a reta que une a articulação do antebraço com o pivô inferior do cilindro hidráulico, é:

$$\gamma = \theta_{2\min} + \beta + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_{02} \quad (5.11)$$

onde $\beta = \sin^{-1}(t_2/l_2)$

Os ângulos ϵ e η da figura 5.7b respeitam à seguinte relação:

$$\epsilon + \eta = \theta_{03} - \theta_{3\min} \quad (5.12)$$

de modo que resulta:

$$\sin^{-1}(h_3/d_2) = \theta_{03} - \theta_{3\min} - \sin^{-1}(h_2/d_1) \quad (5.13)$$

Os parâmetros geométricos acima referidos interagem de uma forma relativamente complexa e, além disso, estão ainda sujeitos a uma série de restrições como, por exemplo:

1. Limitações construtivas;
2. Interferências mecânicas;
3. Limitação dos cursos dos cilindros, ou seja:

$$\begin{aligned}
 l(\theta_{o2} + \Delta\theta_2) &= l(\theta_{o2}) + \text{curso}_2 \\
 l(\theta_{o3} + \Delta\theta_3) &= l(\theta_{o3}) + \text{curso}_3
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

sendo $\text{curso}_2/l(\theta_{o2})$ e $\text{curso}_3/l(\theta_{o3})$ menores que 0.7 para cilindros pivotados entre suas extremidades [39].

Para que os parâmetros geométricos do sistema de acionamento dos braços sejam especificados de forma adequada é conveniente a utilização de rotinas que forneçam ao projetista informações gráficas e geométricas que lhe permitam avaliar a propriedade ou não das alternativas propostas. Rotinas com essa finalidade devem fazer parte do sistema de auxílio ao projeto conforme se apresenta no capítulo 6.

5.3.2. Análise estática

Estando as características geométricas básicas do sistema de acionamento especificadas, deve-se proceder à seleção dos dispositivos servo-atuadores que, acoplados aos diversos eixos ou mecanismos sejam capazes de fornecer as entradas $T_k = T_k(\dot{\theta}_k)$ - torque x velocidade angular - requeridas pelas trajetórias-teste.

A análise do comportamento estático dos sub-sistemas de atuação é o primeiro passo para que se leve a bom termo esse processo. O comportamento estático é governado pelas curvas características dos dispositivos servo-hidráulicos utilizados - curvas de pressão-vazão X torque-velocidade angular (ou força X velocidade linear). No apêndice I

são apresentadas as curvas características de alguns dispositivos servo-hidráulicos comumente utilizados em robôs.

Considere-se um típico circuito hidráulico de acionamento de robôs, em que os 6 dispositivos atuadores (1 motor de pistões radiais, 2 cilindros lineares e 3 atuadores rotativos), comandados por servo-válvulas de duplo estágio, são ligados em paralelo às fontes de pressão e vazão constituídas por uma unidade hidráulica com bomba de palhetas com vazão variável e regulação de pressão e um acumulador hidráulico. Na figura 5.8 esquematiza-se esse circuito (o mesmo utilizado no acionamento do protótipo), valendo-se da simbologia da norma DIN-24300.

Ao se proceder à seleção dos dispositivos servo-atuadores, convém respeitar a uma escala de restrições que afetam a sua livre escolha:

- 1a. Restrições geométricas: as dimensões dos dispositivos devem ser compatíveis com a topologia e as dimensões do robô;
- 2a. Restrições industriais: os servo-atuadores disponíveis comercialmente possuem formas e dimensões padronizadas;
- 3a. Restrições operacionais: Os dispositivos escolhidos devem ser capazes de fornecer as entradas $T_k = T_k(\dot{\theta}_k)$ requeridas pelas trajetórias-teste.

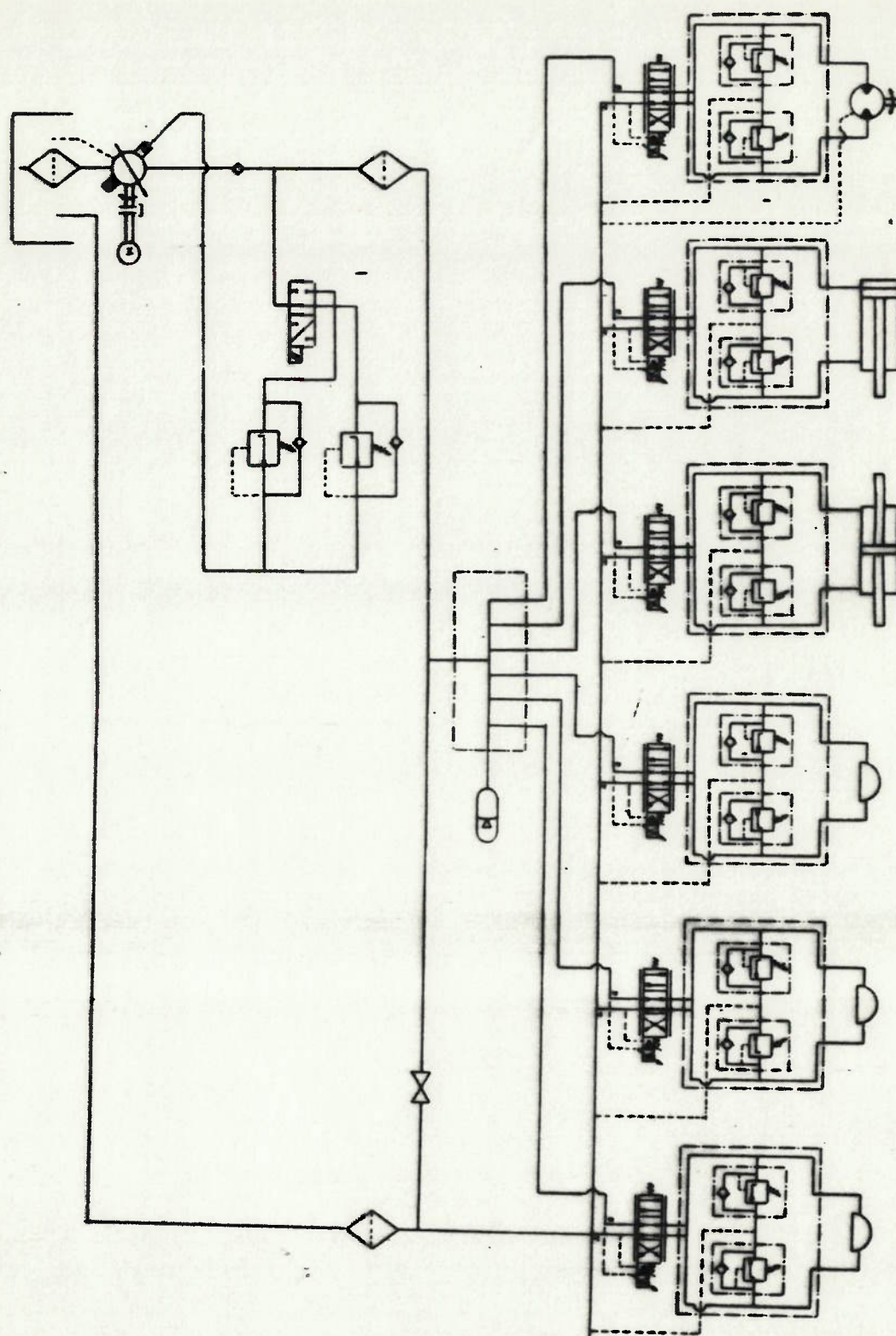


FIGURA 5.8. Circuito hidráulico para o acionamento do protótipo do robô industrial da USP

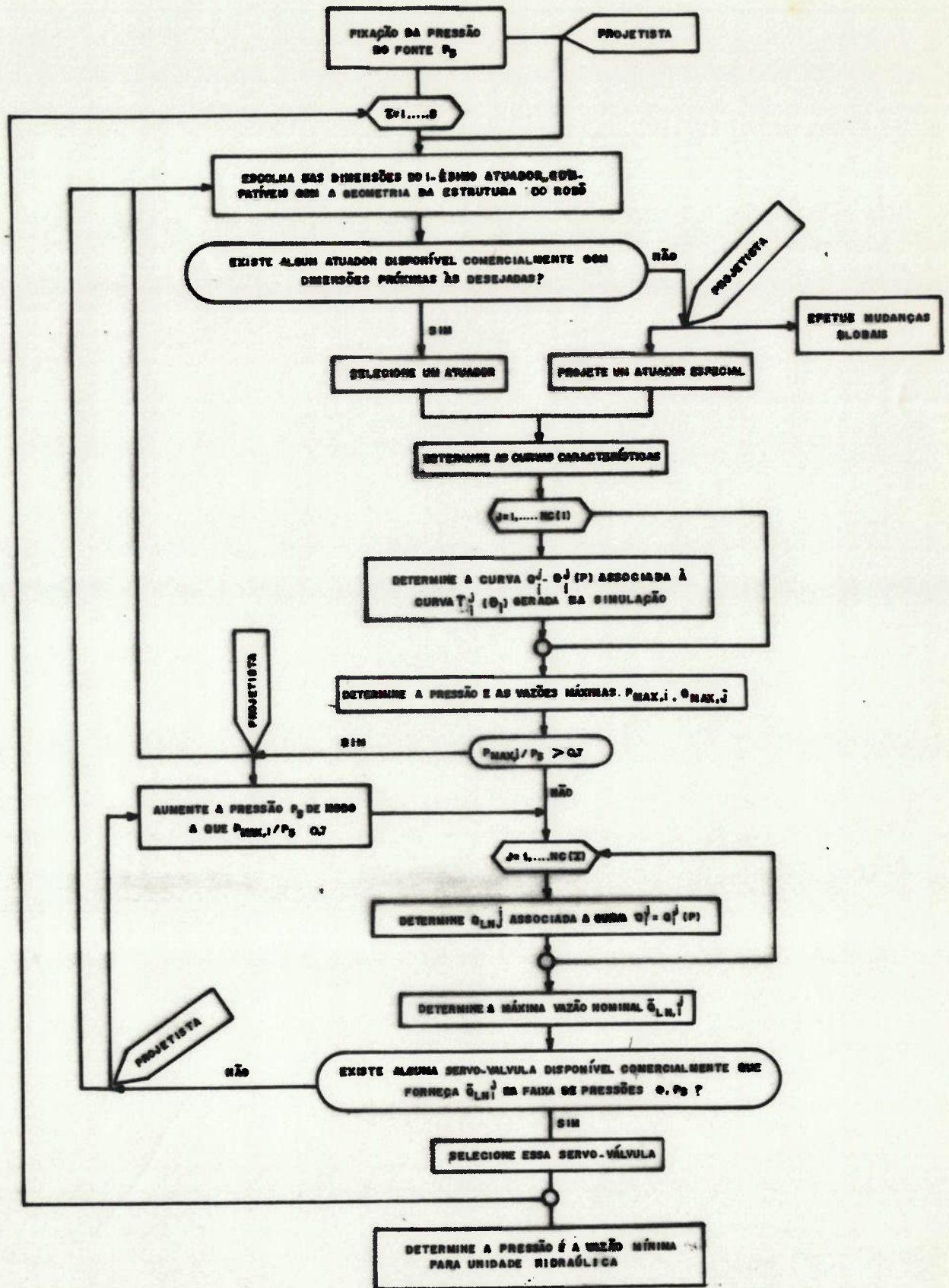


FIGURA 5.9. Procedimento para a especificação de dispositivos hidráulicos para o acionamento de robôs

O diagrama da figura 5.9 descreve de forma esquemática um procedimento de seleção de servo-atuadores para robôs hidráulicos, levando em conta essa escala de restrições e utilizando as curvas características dos dispositivos hidráulicos e os resultados da simulação das trajetórias-teste.

O projetista arbitra um valor que julga adequado para a pressão da bomba (P_b), valor esse inferior a 5000 psi que é a máxima pressão de alimentação das servo-válvulas de duplo estágio comercialmente disponíveis [20]. A pressão de retorno (P_r) é difícil de avaliar, pois depende das perdas de carga ao longo do circuito hidráulico. É mais conveniente, então, operar com um modelo idealizado em que $P_r = 0$ e o valor de P_b é sempre escolhido com uma margem de segurança adicional (20%, por exemplo).

Em seguida, procede-se à escolha de cada atuador, a partir de suas dimensões geométricas externas, as quais devem ser, naturalmente, adaptáveis à estrutura do robô. Um atuador com características próximas às desejadas pode ser disponível comercialmente ou não. Caso ele não seja disponível, há duas alternativas: projetar um atuador especial ou realizar alterações mais abrangentes na estrutura ou no sistema de acionamento.

Escolhidos os atuadores pelo critério anterior, imediatamente tornam-se disponíveis as suas curvas características. A partir delas, da geometria dos mecanismos de acionamento e das NC(i) curvas $T_{i,j} = T_{i,j}(\dot{\theta}_i)$, $j = 1, \dots, NC(i)$

referentes à i -ésima articulação, geram-se $NC(i)$ curvas $Q_{i,j} = Q_{i,j}(P_{i,j})$ de pressão x vazão para cada um dos atuadores. A máxima pressão $P_{i,max}$ atuante no atuador i deve ser menor do que 70% da pressão fornecida pela bomba (P_m) [4]. Se isso não ocorrer há dois possíveis procedimentos a adotar:

1o. Aumentar a pressão da fonte para P_m' de modo que

$$P_m' > P_{i,max} / 0.7;$$

2o. Selecionar um outro atuador;

Desde que $P_m' > P_{i,max} / 0.7$, pode-se dar início à escolha da servo-válvula correspondente. Para tanto, é necessária a determinação do valor correspondente da vazão nominal $QLN_{i,j}$ para as $NC(i)$ curvas $Q_{i,j} = Q_{i,j}(P_{i,j})$, supondo-se, conservativamente, que se utilize apenas uma fração da corrente nominal disponível ($I/I_n = 0.8$, por exemplo).

O valor máximo $QLN_{i,j,max}$ e a correspondente pressão P_m da fonte são os dados necessários à escolha da servo-válvula. A sua curva característica na condição "sem carga" deve ser tal que o ponto $(P_m, QLN_{i,j})$ esteja compreendido entre o eixo P e a curva $QLN = QLN(P)$. Se não forem disponíveis servo-válvulas que atendam a essa condição, há duas alternativas: aumentar a pressão da fonte ou selecionar um outro atuador. Em caso contrário, estará concluída a especificação básica do servo-atuador do eixo i .

O mesmo procedimento se aplica a cada um dos 6 atuadores, com certas ressalvas relativas às particularidades geométricas dos sub-sistemas de acionamento, conforme se indica a seguir:

i. Atuador rotativo

O torque e a velocidade angular atuantes no eixo do atuador rotativo que aciona um dos graus de liberdade 4, 5 ou 6, coincide com os correspondentes valores T e $\dot{\theta}$ gerados pelo processo de simulação, de modo que as variáveis hidráulicas P e Q (pressão e vazão do circuito com carga) são dadas por:

$$\begin{aligned} P_1 &= 2T, [(R^2 - r^2)h]^{-1} \\ Q_1 &= \dot{\theta}, (R^2 - r^2)h/2 \end{aligned} \quad (5.15)$$

onde h , R e r são dimensões características do atuador rotativo, conforme se apresenta no apêndice I.

ii. Motor hidráulico

Desde que ele se encontre acoplado a um redutor de engrenagens, o torque e a velocidade angular atuantes em seu eixo são os valores T e $\dot{\theta}$ obtidos pelo processo de simulação, multiplicados pelos apropriados fatores de redução, ou seja:

$$\begin{aligned} P_1 &= f(T_1 \cdot n, \dot{\theta}_1 / n) \\ Q_1 &= g(T_1 \cdot n, \dot{\theta}_1 / n) \end{aligned} \quad (5.16)$$

onde n é a relação de redução e f e g são as funções que descrevem a transformação hidráulico-mecânica no motor hidráulico.

iii. Cilindro hidráulico

A força e a velocidade linear do cilindro são obtidas a partir do torque e velocidade angular gerados pelo processo de simulação e da geometria do mecanismo de acionamento. Portanto, para os graus de liberdade 2 e 3, tem-se:

$$\begin{aligned}
 F_2 &= T_2 [l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\gamma - \beta - \theta_2)]^{1/2} \sin(\gamma - \beta - \theta_2) / l_1 l_2 \\
 F_3 &= T_3 [d_1^2 + d_2^2 + 2d_1 d_2 \cos(\theta_3 + \epsilon + \eta)]^{1/2} \sin(\theta_3 + \epsilon + \eta) / d_1 d_2 \\
 V_2 &= \dot{\theta}_2 l_1 l_2 [l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\gamma - \beta - \theta_2)]^{-1/2} [\sin(\gamma - \beta - \theta_2)]^{-1} \\
 V_3 &= \dot{\theta}_3 d_1 d_2 [d_1^2 + d_2^2 + 2d_1 d_2 \cos(\theta_3 + \epsilon + \eta)]^{-1/2} [\sin(\theta_3 + \epsilon + \eta)]^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

As curvas de pressão-vazão correspondentes às de força-velocidade podem ser determinadas desde que se conheça o sentido de deslocamento dos êmbolos dos cilindros, ou seja:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_2 < 0 \text{ logo } dl/dt > 0 & \text{ então } P_2 = |F_2| / AM_2 \\
 \dot{\theta}_2 > 0 \text{ logo } dl/dt < 0 & \text{ então } P_2 = |F_2| / Am_2 \\
 \dot{\theta}_3 < 0 \text{ logo } dl/dt < 0 & \text{ então } P_3 = |F_3| / Am_3 \\
 \dot{\theta}_3 > 0 \text{ logo } dl/dt > 0 & \text{ então } P_3 = |F_3| / AM_3
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

onde AM e Am são, respectivamente, as áreas maior e menor das câmaras dos cilindros hidráulicos conforme se apresenta no apêndice I.

Com relação à unidade hidráulica, o procedimento apresentado permite a especificação da vazão e pressão mínimas necessárias:

$$P_{min} = \max(P_{i,max} / 0.7)$$

$$Q_{min} = \sum_{i=1}^6 Q_{i,max} \tag{5.19}$$

Rotinas destinadas à especificação de servo-atuadores hidráulicos para robôs a partir de considerações acerca do comportamento estático dos mesmos são de grande utilidade durante a fase de ante-projeto, devendo fazer parte integrante do sistema de auxílio ao projeto de robôs conforme se apresenta no capítulo 6.

5.3.3. Análise dinâmica

Os atuadores selecionados através de critérios geométricos e estáticos devem, naturalmente, ser capazes de operar nas condições dinâmicas requeridas pelas trajetórias-teste, ou seja, fornecendo as saídas $T_i = T_i(t)$ e $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_i(t)$.

Considere-se, para tanto, o diagrama da figura 5.10, o qual esquematiza um procedimento para a obtenção das correntes de referência I_1, \dots, I_n para o controle. As entradas $T_i = T_i(t)$ e $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_i(t)$ são obtidas em cada articulação i a partir da aplicação da simulação das trajetórias-teste conforme indicado em 5.2.3. As correntes de controle de referência necessárias para reproduzirem aqueles estados dinâmicos em malha aberta podem ser determinadas desde que se conheçam as funções de transferência de cada um dos blocos indicados linearizadas em torno de cada configuração $\{\theta\}$ do robô.

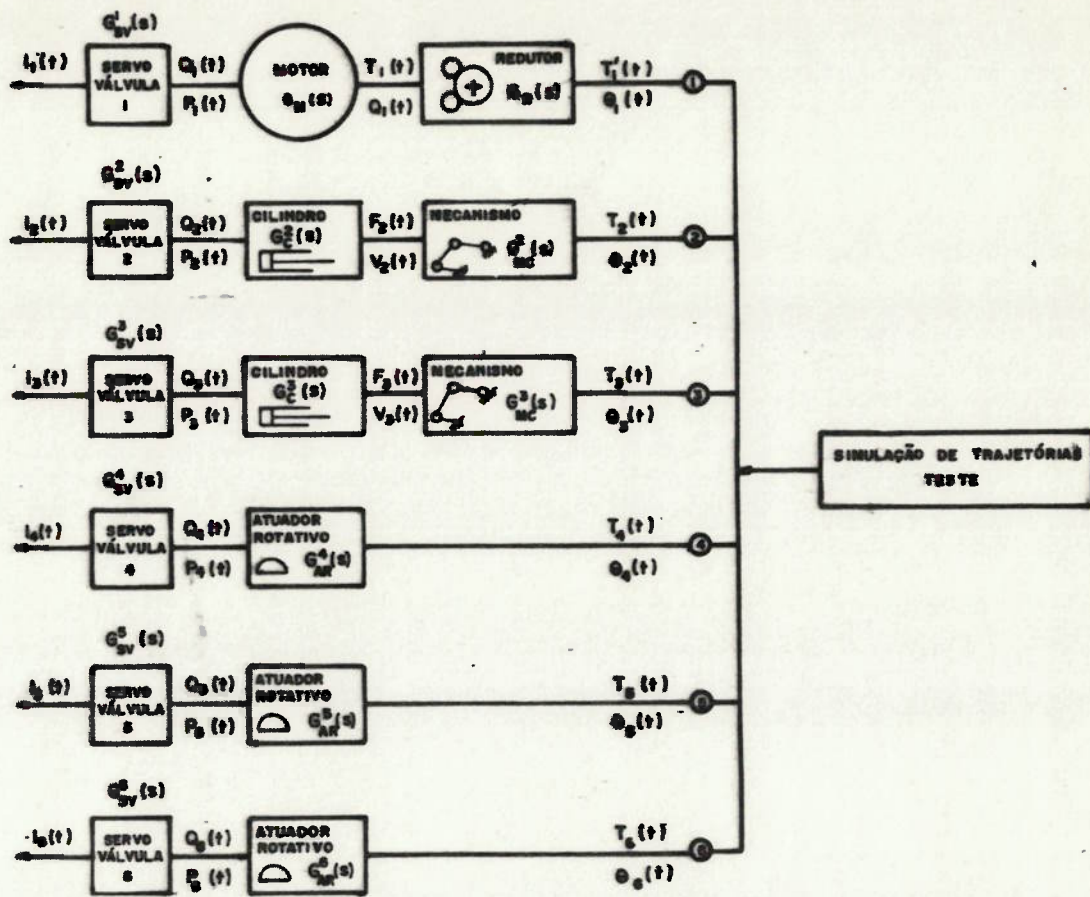


FIGURA 5.10. Geração das correntes de controle de referência

Ora, tanto as servo-válvulas quanto os dispositivos hidráulicos de potência possuem comportamento de 2a. ordem [13], sendo que alguns dos parâmetros característicos destes últimos (inércia da carga e compressibilidade da câmara a alta pressão dos cilindros, por exemplo), variam com a configuração $[\theta]$ do robô. Assim sendo, para a obtenção das funções de transferência desses dispositivos é necessário que se considerem z intervalos de tempo $\Delta t = t_r/z$ medidos ao longo da execução de cada trajetória-teste, (t_r é o tempo utilizado na sua execução) estimando-se, no ponto

médio de tais intervalos (conforme se indica na figura 5.11), esses parâmetros. No apêndice J são apresentadas as formulações básicas das funções de transferência de cilindros e motores hidráulicos servo-controlados.

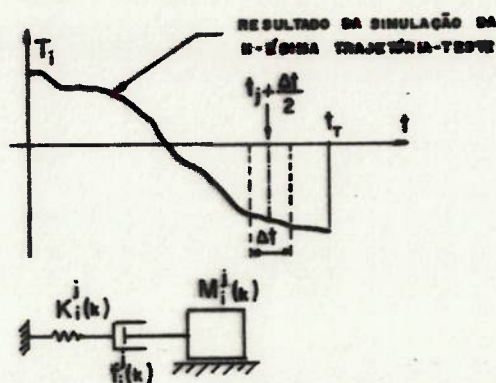


FIGURA 5.11. Características dinâmicas da carga aplicada ao i -ésimo atuador no instante $t = t_j + \Delta t/2$ da k -ésima trajetória-teste

A geração das funções de transferência dos servoatuadores em torno das diversas configurações assumidas pelo robô, é uma tarefa árdua mas que se constitui em um passo fundamental para que se leve a bom termo o processo de controle do sistema. Por outro lado, ao mesmo tempo que se constróem as funções de transferência obtêm-se naturalmente características dinâmicas importantes dos diversos dispositivos servo-controlados, características essas que permitem ao projetista avaliar se os dispositivos escolhidos se prestam ou não ao controle. Dessas características, a mais importante é a sua frequência natural de vibração. De acordo com as referências [5,6], em aplicações que envolvam elevada precisão de posicionamento (controle numérico e robótica), a

frequência fundamental dos sub-sistemas de acionamento baseados em motores e cilindros hidráulicos deve ser sempre superior a 20 Hz.

Rotinas destinadas à obtenção das funções de transferência e das frequências naturais dos diversos sub-sistemas de acionamento do robô em torno de configurações derivadas da simulação das trajetórias-teste devem fazer parte do sistema de auxílio ao projeto de robôs, conforme se apresenta no capítulo 6.

Graças ao elevado grau de complexidade e não-linearidade do comportamento dinâmico de um robô 6R hidráulico, a sua análise requer o emprego de técnicas complexas de simulação. O estabelecimento de metodologias destinadas à determinação de ganhos para a realimentação das variáveis de entrada do sistema controlado, de modo a que o mesmo apresente características de desempenho desejáveis (inexistência de "overshoot" e estabilidade assintótica, por exemplo) tem sido uma tônica entre os pesquisadores que se dedicam ao estudo de sistemas de controle para robôs. Tais assuntos encontram-se fora do escopo deste trabalho, mas podem ser localizados nas referências [9, 35] onde são discutidas algumas técnicas de controle de robôs.

5.4. Avaliação Global do Sistema de Acionamento

Estando definidos os diversos sub-sistemas de atuação do robô, é prática comum proceder-se a uma avaliação

global do sistema de acionamento, com vistas à sua otimização. Para tanto, estuda-se o comportamento de certos parâmetros indicativos da capacidade limite dos atuadores, quais sejam:

1o. Capacidade de manipulação de carga: a maior carga, em uma dada configuração, que pode ser aplicada estaticamente ao dispositivo terminal do robô, em qualquer direção, de modo a que nenhum dos atuadores seja solicitado a fornecer um torque superior ao seu torque máximo;

2o. Velocidade-limite: a máxima velocidade, em módulo, com que o dispositivo terminal pode se movimentar em uma dada configuração sem que sejam solicitadas a qualquer uma das articulações torques inerciais superiores aos admissíveis;

3o. Aceleração-limite: a máxima aceleração com que o dispositivo terminal pode se movimentar em uma dada configuração sem que sejam solicitadas a qualquer uma das articulações torques inerciais superiores aos admissíveis.

A referência [43] apresenta um método de cálculo desses parâmetros utilizando os coeficientes de influência cinemática de 1a. e 2a. ordem definidos no apêndice H.

O método citado, expresso na forma de rotinas especializadas, deve fazer parte do sistema de auxílio ao projeto de robôs conforme se apresenta no capítulo 6.

6. METODOLOGIA PARA O ANTE-PROJETO MECÂNICO DE ROBÔS

6.1. Introdução

Nos capítulos anteriores procurou-se apresentar os principais aspectos e problemas que devem ser analisados durante a execução do ante-projeto mecânico de um robô articulado. Muito embora essa abordagem tenha sido realizada de uma maneira sistemática, a obtenção de um processo de síntese de robôs articulados a partir da análise dos problemas então apresentados não é uma tarefa simples.

Nesse capítulo pretende-se descrever com um pouco mais de detalhes um procedimento de ante-projeto mecânico de robôs que utiliza os elementos já abordados.

6.2. O Sistema de Auxílio ao Ante-Projeto

O sistema de auxílio à síntese mecânica de um robô, conforme sumariamente apresentado no capítulo 2, deve possuir 3 elementos fundamentais:

- 1o. Um conjunto de rotinas de interação com o projetista;
- 2o. Um conjunto de rotinas de projeto;
- 3o. Um banco de dados numéricos e gráficos;

Este sistema deve ser necessariamente interativo, estabelecendo com o projetista um diálogo objetivo, rápido e

ao mesmo tempo isento de ambiguidades. A função das rotinas interativas é justamente criar esse diálogo, através da edição e recepção de informações no vídeo e em relatórios impressos. Pela própria natureza das informações manipuladas pelas rotinas de projeto, a interação requer muitas vezes a edição de desenhos explicativos que instruem o projetista, tanto durante o processo de fornecimento dos dados necessários, quanto durante a análise dos resultados obtidos.

As rotinas de projeto, para o caso de robôs articulados com acionamento hidráulico, são aquelas relacionadas com os problemas discutidos nos capítulos 3, 4 e 5. Em geral, lidam com cálculos matemáticos complexos (problemas de álgebra linear, por exemplo) e fornecem não apenas resultados numéricos como também resultados gráficos.

É conveniente que os valores numéricos e os resultados gráficos gerados ao longo de todo o ante-projeto sejam armazenados em um banco de dados. A utilização de um banco de dados em lugar de um conjunto de arquivos é preferível pois confere ao sistema muito maior coerência e confiabilidade, de vez que a cada interação com o projetista todos os dados são atualizados. Para que se opere com esse banco de dados é necessário, contudo, que se desenvolvam rotinas de manipulação especializadas - rotinas de busca, cadastramento, eliminação, compactação, etc.

Os elementos fundamentais do sistema de auxílio ao ante-projeto de robôs anteriormente apresentados tornam recomendável o seu desenvolvimento em um microcomputador pes-

soal de 16 bits (IBM-PC, por exemplo) com unidade de disco rígido, impressora e "plotter". Dispositivos de interação gráfica ("light pens", "mouses", etc) não são, em princípio, indispensáveis, uma vez que os resultados gráficos apresentados destinam-se apenas a esclarecer o projetista acerca do comportamento do sistema em projeto, os dados de entrada sendo sempre valores numéricos.

O Turbo-Pascal é um compilador bastante adequado ao desenvolvimento de um sistema com as características esboçadas acima. Além de possuir um código muito eficiente (que se traduz em grande velocidade de processamento - ideal para um sistema interativo), esse compilador é voltado à resolução de problemas matemáticos variados e possui rotinas gráficas intrínsecas que permitem a construção de desenhos bi-dimensionais de razoável complexidade.

6.3. Organização das Rotinas de Projeto

Considere-se o diagrama da figura 6.1. Nele se esquemmatiza grosso modo a estrutura através da qual as diversas rotinas de projeto são ligadas.

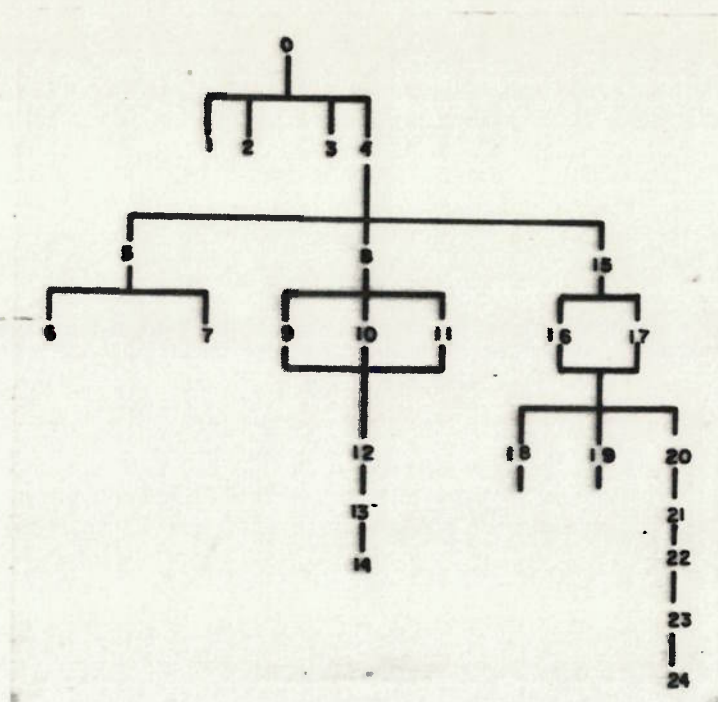


FIGURA 6.1. Organização das rotinas de auxílio ao projeto

Os números presentes na figura 6.1 têm por significado:

- 0 = Modelo do robô;
- 1 = Rotinas para robôs com coordenadas cartesianas;
- 2 = Rotinas para robôs com coordenadas cilíndricas;
- 3 = Rotinas para robôs com coordenadas polares;
- 4 = Rotinas para robôs articulados;

(Muito embora nesse trabalho se tenha tratado apenas dos robôs articulados com acionamento hidráulico, em um sistema completo de auxílio ao projeto de robôs devem-se incluir todos os demais modelos e formas de acionamento industrialmente utilizados)

- 5 = Rotinas para a síntese geométrico-topológica;
- 6 = Síntese a partir do espaço de trabalho;
- 7 = Síntese a partir de configurações críticas do dispositivo terminal;
- 8 = Rotinas de análise e projeto estrutural;
- 9 = Modelos estruturais para a análise de robôs hidráulicos
- 10 = Modelos estruturais para a análise de robôs com acionamento elétrico serial;
- 11 = Modelos estruturais para a análise de robôs com acionamento elétrico paralelo;
- 12 = Cálculo de deflexões estruturais;
- 13 = Cálculo do fator de qualidade;
- 14 = Análise dinâmica a partir do tensor generalizado de inércia;
- 15 = Rotinas para a especificação do sistema de acionamento;
- 16 = Simulação de trajetórias-teste para a estrutura de localização;
- 17 = Simulação de trajetórias-teste para o pulso;
- 18 = Robôs acionados por motores de passo: seleção dos motores;
- 19 = Robôs acionados por motores DC: seleção dos motores;
- 20 = Robôs acionados hidráulicamente: seleção dos dispositivos servo-atuadores;
- 21 = Análise geométrica do sistema de acionamento;
- 22 = Análise estática do sistema de acionamento;
- 23 = Cálculo das frequências naturais dos sub-sistemas de a-

acionamento;

24 = Análise global do sistema de acionamento;

6.4. Procedimento de Síntese de um Robô BR com Acionamento Hidráulico

Considerando-se que se disponha de um sistema de auxílio ao ante-projeto de robôs conforme esboçado anteriormente, a geração de um robô BR com acionamento hidráulico poderia se realizar através do roteiro que se apresenta nos itens a seguir:

6.4.1. Síntese geométrico-topológica

Hipótese A: Partindo de características básicas do espaço de trabalho.

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Relação entre os comprimentos do antebraço e do braço;
- . Ângulo Γ ;
- . Área compreendida pela envoltória do espaço de trabalho;
- . Alcance radial máximo;
- . Largura radial máxima;

2. Resultados:

- . Comprimento do antebraço;
- . Comprimento do braço;

- . Varredura angular do antebraço;
- . Varredura angular do braço;
- . Desenho em escala mostrando a envoltória do espaço de trabalho principal;

3. Comentários:

Esse procedimento admite implicitamente que os eixos do braço e do antebraço estão alinhados e, além disso, não fornece nenhuma informação a respeito das varreduras angulares do pulso e da base giratória. O projetista deve, uma vez que tenha concordado com os resultados gerados, cadastrar valores desejáveis para aquelas varreduras angulares.

Hipótese B: Partindo de configurações críticas do dispositivo terminal.

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Modelo do robô:
 - A1 ou
 - B1 ou
 - C;
- . Dimensões estimadas para:
 - $a_4 + a_5$ e a_6 (modelo A1) ou
 - $a_5 + s_4$ e a_4 (modelo B1) ou
 - $a_5 + s_4$ (modelo C);
- . Número de configurações críticas do dispositivo terminal;

- . Vetores necessários para a orientação do dispositivo terminal:
 - nenhum ou
 - \vec{U}_h ou
 - \vec{U}_h e \vec{U}_p ;
- . Configurações críticas do dispositivo terminal:
 - X_h, Y_h, Z_h (coordenadas do vetor \vec{H}),
 - L_h, M_h, N_h (cossenos diretores do vetor \vec{U}_h),
 - L_p, M_p, N_p (cossenos diretores do vetor \vec{U}_p);
- . Forma da região de busca:
 - a) segmentos de reta ou
 - b) coroa circular ou
 - c) coroa esférica ou
 - d) eventualmente outras formas que venham a ser cadastradas;
- . Definição geométrica da malha de busca:
 - a) Segmentos de reta
 - número de segmentos
 - número de subdivisões ao longo dos segmentos
 - coordenadas das extremidades A e B dos segmentos: (X_a, Y_a, Z_a) e (X_b, Y_b, Z_b) ;
 - b) Coroa circular
 - número de sub-divisões radiais
 - número de sub-divisões angulares
 - coordenadas do centro F (X_f, Y_f, Z_f)
 - plano da coroa definido por duas retas AF e BF concorrentes no centro F: $A(X_a, Y_a, Z_a)$ e $B(X_b, Y_b, Z_b)$

- raio externo
- raio interno;
- c) Coroa esférica
 - número de sub-divisões radiais
 - número de subdivisões angulares ao longo de 2 círculos ortogonais
 - coordenadas do centro F (X_f, Y_f, Z_f)
 - raio maior
 - raio menor;

2. Resultados:

- . Comprimentos $a_2 = a_3$ dos braços;
- . Coordenadas angulares $[\theta]$ máxima e mínima de cada um dos 6 graus de liberdade;
- . Desenho em escala mostrando a envoltória do espaço de trabalho principal;

3. Comentários:

Os resultados gerados por esse procedimento requerem cuidadosa análise:

1. Os comprimentos do braço e do antebraço são, por hipótese, sempre iguais.
2. As varreduras angulares resultantes para os diversos graus de liberdade podem ser exageradamente grandes. Em um tal caso, o projetista automaticamente recusaria os resultados obtidos e realizaria nova tentativa, talvez com uma ou-

tra malha de busca, ou ainda, após solicitar um relatório detalhado com todas as topologias oriundas de cada um dos pontos da malha, contentar-se-ia com alguma que não fosse otimizada mas que, por outro lado, não implicasse em varreduras angulares exageradas.

3. Por outro lado, as varreduras angulares resultantes para os diversos graus de liberdade podem ser bastante pequenas, encontrando-se muito aquém das limitações naturais dos respectivos cursos angulares. Essa situação indica apenas que as configurações críticas do dispositivo terminal utilizadas para a síntese não requerem do robô grandes movimentos angulares e não que se deva de fato tomar as coordenadas limite geradas como limitações aos movimentos do robô. Caberá ao projetista decidir a respeito, cadastrando novas coordenadas angulares limite para os graus de liberdade que, segundo seu julgamento, se apresentarem sub-dimensionados.

6.4.2. Procedimentos de projeto e análise estrutural

Passo 1: Cálculo de deflexões estruturais

1. Informações obtidas no banco de dados:

- . Comprimentos do antebraço e do braço;
- . Coordenadas angulares limite do antebraço e do braço;

2. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Precisão de posicionamento desejada;

- . Propriedades mecânicas (peso, baricentro e tensor de inércia em torno do baricentro) estimadas para:
 - base giratória
 - pulso
 - placa de montagem
 - dispositivo terminal
 - carga manipulada;
 - . Massa específica do material da estrutura;
 - . Módulo de elasticidade do material da estrutura;
 - . Forma das secções transversais da estrutura:
 - a) Perfil I ou
 - b) Caixa fechada ou
 - c) Outras formas eventualmente cadastradas;
 - . Forma das estruturas:
 - a) estruturas com secção transversal constante:
 - dimensões da secção transversal do antebraço: espessura, largura e altura;
 - ídem para a secção transversal do braço;
 - b) estruturas com uma das dimensões (h) da secção transversal variando linearmente:
 - taxa de variação linear de h
 - dimensões da menor secção transversal do braço: espessura, largura e altura;
4. Resultados:
- . Deflexão na extremidade do braço;
 - . Deflexão máxima permitida;

- . Margem de segurança à deflexão;
- . Propriedades mecânicas calculadas para cada uma das estruturas do braço e antebraço:
 - peso
 - coordenadas locais do baricentro
 - tensor de inércia em torno do baricentro
- . Desenho em escala mostrando o perfil da estrutura dos braços na configuração (θ_2, θ_3) em que os cálculos foram realizados e os respectivos baricentros;

5. Comentários:

A rotina de cálculo de deflexões faz uso não apenas de dados fornecidos pelo projetista como também de informações já cadastradas no banco de dados, oriundas da síntese geométrica. Essa situação ocorre em quase todas as etapas do ante-projeto.

Graças à simplicidade da forma das estruturas dos braços, o cálculo de suas propriedades mecânicas é realizado por meio de expressões simples, não sendo necessário o emprego de uma "rotina para cálculo de propriedades mecânicas de corpos de forma qualquer", o que já não ocorrerá em etapas posteriores.

As propriedades mecânicas estimadas para a base giratória não tomam parte no cálculo das deflexões da estrutura dos braços. No entanto, elas devem ser fornecidas para

que nas próximas etapas seja possível construir o modelo dinâmico do robô.

Passo 2: Análise do fator de qualidade

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Fator de qualidade mínimo admissível;

2. Informações obtidas direta ou indiretamente^(*) do banco de dados:

- . Comprimentos do antebraço e braço;
- . Coordenadas angulares limite do braço;
- . Massa específica e módulo de elasticidade do material;
- . Raio de giração médio do conjunto: (pulso)+(placa de montagem)+(dispositivo terminal)+(carga manipulada);
- . Massas discretizadas;
- . Momentos de inércia de secção discretizados

(*) Calculadas a partir de valores cadastrados no banco de dados

3. Resultados:

- . Fator de qualidade mínimo calculado;
- . Configuração correspondente ao fator de qualidade mínimo;
- . Causa da vibração (flexão ou flexo-torção) que origina o fator de qualidade mínimo;
- . Desenho mostrando a variação do fator de qualidade em função da configuração da estrutura;

4. Comentários:

Se o fator de qualidade mínimo calculado for inferior ao admissível, o projetista deverá redefinir a estrutura dos braços, voltando ao procedimento de cálculo de deflexões.

Passo 3: Análise do tensor generalizado de inércia

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Graus de liberdade a considerar;
- . Número de posições angulares para os graus considerados;

2. Informações extraídas do banco de dados:

- . Dimensões geométricas básicas e varreduras angulares;
- . Massas dos corpos associados aos graus de liberdade em consideração;
- . idem para os baricentros e tensores de inércia em torno desses baricentros;

3. Resultados:

- . Tabela fornecendo, para cada configuração do robô, a relação entre o comprimento das diagonais maior e menor do elipsóide de inércia;
- . Desenho apresentando o mapeamento da envoltória do espaço de trabalho principal com os elipsóides de inércia;

4. Comentários:

Enquanto o pulso não estiver completamente definido, esse procedimento deve ser utilizado apenas para a análise dinâmica do sub-sistema dos braços. Portanto, os graus de liberdade considerados devem ser o 2o. e o 3o.

A rotina que constrói os elipsóides generalizados de inércia necessita das propriedades mecânicas (massas, coordenadas locais dos baricentros, tensores de inércia em torno dos baricentros) de cada uma das estruturas em consideração. Esses valores já se encontram cadastrados no banco de dados. Os vetores $[s_i]$, (conforme se apresenta no apêndice G) utilizados ao longo do procedimento, são facilmente determinados, pois dependem tão-somente da topologia das estruturas de localização e orientação do robô.

Ao analisar o "mapa dinâmico" da envoltória do espaço de trabalho principal do robô, o projetista deverá observar o grau de variação de forma e direção da elipse generalizada de inércia. É de se esperar [2] que em configurações afastadas do lugar geométrico $\theta_x = 90^\circ$, a anisotropia inercial seja bastante acentuada. Se isso de fato ocorrer, caberá a ele decidir ou não por alterações. A única mudança que se pode fazer consiste na diminuição da varredura angular dos braços de modo a que aquelas configurações dinamicamente desfavoráveis não venham a ser atingidas. Modificações dessa natureza, contudo, implicam em toda uma redefinição

geométrica e estrutural do robô, de vez que o volume do espaço de trabalho resulta diminuído.

6.4.3. A especificação do sistema de acionamento

Passo 1: Simulação de operações com a estrutura de localização

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Identificação da operação simulada;
- . Características da carga transportada:
 - peso
 - baricentro
 - raio de giração médio;
- . Características da operação:
 - velocidade máxima
 - tempo de aceleração
 - tempo de desaceleração;
- . Características da malha de trajetórias retas:
 - espaçamento entre as trajetórias C_u
 - espaçamento entre as trajetórias C_x
 - ângulo do setor do espaço de trabalho;

2. Informações extraídas do banco de dados:

- . Dimensões geométricas básicas e varreduras angulares;
- . Propriedades mecânicas dos corpos constituintes da estrutura de localização;

- . Propriedades mecânicas do pulso, placa de montagem e dispositivo terminal;

3. Resultados: '*'

- . Curvas de torque X velocidade angular $(T, X \dot{\theta}_i)$ $i=1, \dots, 3$;
- . Curvas de torque X tempo $(T, X t)$ $i=1, \dots, 3$;
- . Curvas de velocidade angular X tempo $(\dot{\theta}_i, X t)$ $i=1, \dots, 3$;
- . Desenho apresentando a envoltória do espaço de trabalho e a malha de retas utilizada na simulação;

(*) Para cada uma das trajetórias-teste e cada uma das 5 operações-padrão simuladas

4. Comentários:

Devem ser cadastradas tantas operações-padrão quantas se julgar necessárias. Para cada uma delas são fornecidas as características da carga manipulada e o perfil de velocidades a ser seguido pelo baricentro da carga.

Essa, por sua vez, não tem necessariamente nenhuma relação com aquela carga que é utilizada pelas rotinas de cálculo estrutural. Para estas, a carga transportada deve ser a mais pesada que se espera manipular com o robô. Ao se analisar o seu comportamento dinâmico, contudo, convém considerá-lo operando em pelo menos duas situações extremas: transportando um equipamento pesado (máquina de solda a ponto, por exemplo) em baixas velocidades e manipulando um e-

equipamento leve (pistola de pintura, por exemplo) em altas velocidades.

Para a geração do conjunto de retas utilizadas na simulação fazem-se necessários os seguintes passos:

1. Cálculo da intersecção das retas C_u e C_x com as fronteiras do espaço de trabalho;
2. Determinação dos perímetros de cada um dos segmentos resultantes;
3. Discretização dos segmentos;
4. Cadastramento no banco de dados;

Uma vez estando as trajetórias-teste determinadas, é suficiente a aplicação das equações do modelo cinemático-dinâmico do robô aos estados dinâmicos prescritos para o baricentro da carga manipulada. Os dados geométricos básicos e as propriedades mecânicas dos corpos articulados - valores necessários à determinação dos estados cinemáticos e dinâmicos locais - estão disponíveis no banco de dados. Os coeficientes de influência cinemática são calculados apenas uma vez (dependem tão-somente da configuração do robô) para cada configuração $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ devendo ser armazenados no banco de dados para serem utilizados em outras rotinas.

O procedimento anterior gera um grande número de curvas $T_i = T_i(\dot{\theta}_i)$, $T_i = T_i(t)$ e $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_i(t)$ para $i = 1, \dots, 3$. Caberá ao projetista analisar cuidadosamente o relatório em que elas são apresentadas, selecionando apenas aquelas que, em seu entender, representam as condições operacionais mais críticas (maiores torques, maiores velocidades angulares,

maiores taxas de variação temporal dos torques e das velocidades angulares). Esse procedimento é recomendável para que se evite o processamento de informações redundantes.

Passo 2: Simulação de operações com o pulso

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Características das operações de orientação:
 - tempo de orientação
 - tempo de aceleração
 - tempo de desaceleração;

2. Informações extraídas do banco de dados:

- . Modelo 6R:
 - R1 ou
 - B1 ou
 - C;
- . Varreduras angulares dos graus de liberdade 4, 5 e 6;
- . Propriedades mecânicas dos seguintes componentes:
 - placa de montagem
 - dispositivo terminal
 - cargas manipuladas;

3. Resultados: '*'

- . Curvas de torque X velocidade angular $(T, X \dot{\theta}_i)$ $i=4, \dots, 6$;
- . Curvas de torque X tempo $(T, X t)$ $i=4, \dots, 6$;
- . Curvas de velocidade angular X tempo $(\dot{\theta}_i, X t)$ $i=4, \dots, 6$;

. Desenho apresentando a curva descrita pelo baricentro da carga manipulada;

(*) Para cada uma das S operações-padrão simuladas;

4. Comentários:

As informações relativas ao pulso até então disponíveis são muito vagas. De exato, conhece-se a sua topologia. As varreduras angulares desejáveis para cada um dos seus graus de liberdade são também conhecidas, mas não passam de expectativas a serem confirmadas a posteriori. As propriedades mecânicas dos corpos articulados são completamente desconhecidas, muito embora se disponha de uma estimativa para o conjunto. Não se conhece nenhuma de suas dimensões principais.

Diante de uma tal ausência de informações é impossível descrever topologicamente o pulso de modo a se aplicar o modelo cinemático-dinâmico apresentado no apêndice H. Os torques nas articulações devem, então, ser estimados a partir de um modelo simples em que o conjunto (placa de montagem) + (dispositivo terminal) + (carga transportada) é manipulado por um pulso constituído por 3 corpos articulados "sem massa".

Passo 3: Cadastramento de dispositivos servo-hidráulicos

1. Dados fornecidos pelo projetista:

. Tipo do dispositivo:

- cilindro hidráulico
- atuador rotativo
- motor hidráulico
- servo-válvula;

. Para o cilindro hidráulico:

- código de identificação
- haste simples ou dupla
- comprimento mínimo entre pivôs
- curso linear
- máximo diâmetro externo
- diâmetro externo da câmara
- diâmetro da haste

. Para o atuador rotativo:

- código de identificação
- aleta simples ou dupla
- máxima varredura angular
- diâmetro externo
- largura do atuador
- diâmetro externo da câmara
- diâmetro interno da câmara
- altura da câmara

. Para o motor hidráulico:

- código de identificação

- dimensões externas principais: diâmetro máximo e altura
 - curvas características na forma de quádruplas (pressão, vazão, torque, rotação)
 - deslocamento (volume deslocado por radiano)
 - volume total interno das câmaras de óleo
 - momento de inércia em relação ao seu eixo
 - coeficiente de vazamento interno
 - coeficiente de vazamento externo
- . Para a servo-válvula:
- código de identificação
 - curva característica para o circuito sem carga:
pares pressão X vazão
 - curva característica para o circuito com carga:
pares de % de pressão X % de vazão
 - coeficientes de vazão e pressão-vazão em torno do ponto de operação central

2. Informações geradas:

- . Curvas características dos dispositivos cadastrados

3. Comentários:

O cadastramento de dispositivos hidráulicos passíveis de serem obtidos junto ao mercado industrial deve estar completo antes de se dar início à especificação do sistema de acionamento. Obviamente, devem ser cadastrados ape-

nas os dispositivos que tenham um mínimo de afinidade geométrica com o projeto em execução.

As curvas características do motor hidráulico e da servo-válvula, fornecidas ponto a ponto, deverão ser submetidas a uma rotina de regressão linear, de modo a que se obtenha expressões algébricas utilizáveis durante o procedimento de seleção dos dispositivos. Portanto, cuidados especiais relativos ao número mínimo de pontos a serem fornecidos devem ser tomados. As curvas características dos cilindros hidráulicos e dos atuadores rotativos são determinadas de forma imediata a partir das dimensões principais da câmara de pressão.

Passo 4: Seleção de dispositivos hidráulicos através de critério geométrico

1. Dados fornecidos pelo projetista:

. Sobre o motor hidráulico:

- dimensões externas desejáveis
- redução máxima admitida;

. Sobre os mecanismos de acionamento dos braços:

- distância entre a articulação do antebraço e o pivô inferior do cilindro;
- ídem para o braço;
- distância entre a articulação do antebraço e o pivô superior do cilindro;
- ídem para o braço;

- . Sobre os atuadores rotativos:
 - dimensões externas desejáveis;

- 2. Informações extraídas do banco de dados:
 - . Dimensões básicas;
 - . Varreduras angulares dos 6 eixos;
 - . Dimensões das estruturas dos braços;

- 3. Resultados:
 - . Comprimento mínimo ideal entre os pivôs do cilindro que aciona o antebraço;
 - . idem para o braço;
 - . Curso resultante para o cilindro que aciona o antebraço;
 - . idem para o braço;
 - . Desenho apresentando esquematicamente o melhor sistema de acionamento que foi possível construir a partir das informações existentes no banco de dados e daquelas fornecidas pelo projetista. Desse desenho devem constar (sempre em vista lateral e superior):
 - a) representação esquemática do motor e redutor
 - b) representação das estruturas dos braços em uma posição genérica (θ_2, θ_3);
 - c) representação esquemática dos cilindros acionando os braços;
 - d) identificação clara dos pontos de pivotamento;
 - e) representação esquemática do pulso resultante admitindo que ele se constitua apenas de 3 atuadores rotati-

vos;

- . Tabela contendo todas as características importantes dos dispositivos de potência selecionados;

4. Comentários:

Esse procedimento destina-se à especificação dos dispositivos hidráulicos de potência que mais se adaptem à geometria do robô em projeto. A seleção do motor hidráulico e dos atuadores rotativos é feita a partir de uma busca no banco de dados de dispositivos que tenham dimensões próximas às especificadas pelo projetista. Com relação aos cilindros hidráulicos destinados ao acionamento dos braços, o processo é um pouco mais elaborado. Determina-se, inicialmente, os parâmetros que otimizam os mecanismos de acionamento e, a seguir, procede-se à busca de cilindros que respeitem às condições impostas pelos mecanismos otimizados.

Ao projetista caberá todo o trabalho de análise da alternativa proposta. Ele poderá aceitá-la, rejeitá-la ou ainda aceitá-la por partes. Nesse último caso deverá indicar os sub-sistemas de acionamento que não o satisfizeram.

Passo 5: Seleção de dispositivos hidráulicos através de critério estático

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Pressão da unidade hidráulica;

2. Informações extraídas do banco de dados:

- . Curvas características dos dispositivos hidráulicos selecionados pelo critério geométrico;
- . Curvas $T_i = T_i(\theta_i)$ para $i = 1, \dots, 6$;

3. Resultados:

- . Pressão mínima para a unidade hidráulica;
- . Vazão mínima para a unidade hidráulica;
- . Códigos dos dispositivos hidráulicos especificados;

4. Comentários:

Esse procedimento está intrinsecamente ligado ao anterior. Conforme se indica no diagrama de blocos da figura 5.9, o projetista pode sempre optar ou por um novo valor de pressão ou por um outro dispositivo hidráulico. De qualquer maneira, ao fim da execução do procedimento global, todo o sistema de acionamento do robô deverá estar especificado.

Passo 6: Cálculo das frequências naturais dos servo-atuadores

1. Dados fornecidos pelo projetista:

- . Características do fluido hidráulico:
 - densidade
 - coeficiente de compressibilidade

2. Informações extraídas do banco de dados:

- . Curvas $T_i = T_i(t)$ e $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_i(t)$ para $i = 1, \dots, 6$;
- . Características geométricas dos dispositivos de acionamento selecionados pelo critério estático;
- . Características geométricas dos mecanismos de acionamento;
- . Coeficientes da servo-válvula;
- . Coeficientes de vazamento do motor;

3. Resultados:

- . Frequências naturais fundamentais de cada um dos sub-sistemas de acionamento ao longo de cada uma das curvas $T_i = T_i(t)$;
- . Tabela associando, a cada configuração $[\theta]$, as frequências as naturais mais baixas (dentre as calculadas para as diferentes curvas $T_i = T_i(t)$) de cada um dos sub-sistemas de acionamento;

4. Comentários:

As curvas $T_i = T_i(t)$ e $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_i(t)$ são utilizadas para a estimação das características inerciais do sistema de segunda ordem representativo dos diversos dispositivos de acionamento. Conhecendo-se o torque em um dado instante de tempo t e a variação da velocidade angular entre os instantes t e $t+dt$, o "momento de inércia aparente" em relação a

cada um dos eixos (no instante t) pode ser estimado dividindo-se o torque pela respectiva aceleração angular naquele instante. Na realidade, conforme se apresenta no apêndice H, o fenômeno é bem mais complexo, a aceleração total sendo a somatória das acelerações inercial, centrífuga e de Coriolis. Para os graus de liberdade 2 e 3, acionados por cilindros hidráulicos, determina-se ainda, a partir de cada configuração (θ_2, θ_3) , no instante t , os volumes das câmaras de alta pressão necessários ao cálculo da flexibilidade do sistema (naquele instante e naquela configuração).

A ocorrência de frequências naturais de um servo-atuador inferiores ao mínimo admissível em longas faixas operacionais do robô poderá determinar a sua reprovação e, conseqüentemente, o retorno ao procedimento de seleção de servo-dispositivos a partir de critérios estáticos.

Passo 7: Análise global do sistema de acionamento

1. Informações extraídas do banco de dados:

- . Dados geométricos básicos;
- . Coeficientes de influência cinemática para configurações que varram todo o espaço de trabalho do robô;
- . Matrizes de inércia equivalente e matrizes de potência de inércia nas mesmas configurações;

2. Resultados:

- . Tabelas apresentando, para configurações que varram todo

o espaço de trabalho principal:

- máxima capacidade de carga
 - máxima velocidade em módulo
 - máxima aceleração em módulo
- . idem para configurações que varram todo o espaço de trabalho do pulso;
- . Tabelas apresentando, para cada configuração [θ] do robô o grau de liberdade responsável pela limitação à
- capacidade de carga ou
 - velocidade ou
 - aceleração

3. Comentários:

O mapa da capacidade de carga e das velocidades e acelerações limite do robô, ao longo de todo o seu espaço de trabalho, é um poderoso instrumento de análise do potencial do sistema de acionamento especificado. A partir dele, o projetista poderá localizar os "pontos de estrangulamento" do sistema de acionamento, representados por sub-sistemas de acionamento que limitam a capacidade global do robô.

6.4.4. Realimentação do processo

Para que o processo de ante-projeto produza resultados confiáveis, é necessário que as informações geradas durante as 3 fases da etapa inicial - síntese geométrica, a-

nálise estrutural e especificação do sistema de acionamento - sejam recicladas um número suficiente de vezes.

Para tanto, deve-se proceder às seguintes operações:

- 1a. Atualização de todas as informações do banco de dados;
- 2a. Atualização das rotinas de auxílio ao projeto.

Muitas das informações utilizadas durante o primeiro ciclo de ante-projeto são meras estimativas ou, então, valores obtidos a partir de modelos idealizados.

As propriedades mecânicas do pulso são estimadas sem que se empregue algum critério especial. Contudo, terminado o primeiro ciclo de ante-projeto, pode-se estimar de forma muito mais adequada essas propriedades, partindo-se das informações então disponíveis referentes aos atuadores rotativos escolhidos para o acionamento dos diversos graus de liberdade do pulso.

As propriedades mecânicas dos braços articulados no primeiro ciclo de ante-projeto não levam em conta a presença de dispositivos atuadores, sendo calculadas apenas em função da estrutura idealizada. Pode-se abandonar essa simplificação, uma vez que, finda essa etapa, torna-se disponível uma quantidade razoável de informações referentes ao mecanismo de acionamento dos braços.

A maneira mais razoável de se determinar as propriedades mecânicas (massa, baricentro, matrizes de inércia) de corpos de forma qualquer é mediante a discretização dos mesmos em um conjunto de elementos idealizados. Durante o

desenvolvimento do protótipo de robô industrial do Centro de Computação da USP utilizou-se um programa, desenvolvido para um micro-computador pessoal Apple com uma biblioteca de 4 elementos básicos - paralelepípedos, cilindros de base circular, prismas de base triangular e massas concentradas.

Com relação às rotinas de projeto, também são passíveis de atualização, mediante a substituição de modelos simples por outros mais refinados. Alguns exemplos podem ser mencionados:

1. O processo de síntese geométrica a partir de características básicas do espaço de trabalho, proposto para o primeiro ciclo de ante-projeto, não leva em consideração a influência das varreduras angulares do pulso sobre a envoltória do espaço de trabalho.
2. O modelo estrutural utilizado durante o primeiro ciclo é bastante simples e conservativo, não considerando as estruturas de ligação representadas pelos mecanismos de acionamento baseados em cilindros hidráulicos.

Os aspectos acima apresentados põem em evidência a necessidade de o sistema de auxílio ao ante-projeto não apenas possuir um conjunto de rotinas de projeto como também de estas últimas possuírem uma biblioteca de modelos matemáticos para serem utilizados ao longo dos diversos ciclos do ante-projeto do robô.

7. O PROTÓTIPO DE ROBO INDUSTRIAL DA USP

7.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as principais características associadas ao sub-sistema mecânico do protótipo de robô industrial desenvolvido pelo Centro de Computação Eletrônica da Universidade de São Paulo. Algumas informações referentes aos seus demais sub-sistemas também serão citadas, mas apenas para que se possa formar uma idéia mais completa do conjunto, de vez que eles se encontram detalhados nas referências [9, 28, 35].

Todo o desenvolvimento do projeto "Um Robô Industrial para Aplicações Múltiplas" foi permeado de dificuldades as mais variadas, cabendo destacar:

1. Restrições de Ordem Financeira: O projeto foi realizado com limitados recursos financeiros - oriundos da própria Universidade;
2. Restrições de Ordem Industrial: Muitos componentes que teriam ótima aplicação no projeto do robô não são ainda disponíveis no mercado industrial brasileiro;
3. Restrições Bibliográficas: É muito difícil localizar na literatura especializada disponível no país informações que possam ser facilmente transformadas em critérios apropriados ao desenvolvimento de projetos de robôs industriais.

A despeito dessas dificuldades, executou-se o projeto e a construção de um protótipo de robô industrial que,

diante dos testes a que vem sendo submetido, tem apresentado resultados bastante promissores.

7.2. Descrição do Sub-Sistema Mecânico

Na tabela 7.1 encontram-se discriminadas as principais e atuais características do sub-sistema mecânico do protótipo do robô industrial da USP. No apêndice K são apresentados os seus desenhos mais significativos.

! ÍTENS	! ESPECIFICAÇÕES
! Modelo Geométrico	! Tipo Articulado
! Graus de Liberdade	! 5
! Tipo de Acionamento	! Hidráulico
! Varreduras Angulares da Estrutura de Localização	! Base ! 300° ! Antebraço ! 80° ! Braço ! 90°
! Varreduras Angulares do Pulso	! "Pitch" ! 80° ! "Yaw" ! 70°
! Espaço de Trabalho	! Secção Vertical ! 2.30 m ² ! Alcance Radial ! 2.10 m ! Altura ! 3.10 m
! Capacidade de Carga	! 70 kgf
! Peso	! 1000kgf (aprox.)
! Potência Disponível	! 12000 W

Tabela 7.1: Características mecânicas principais do protótipo do robô industrial da USP

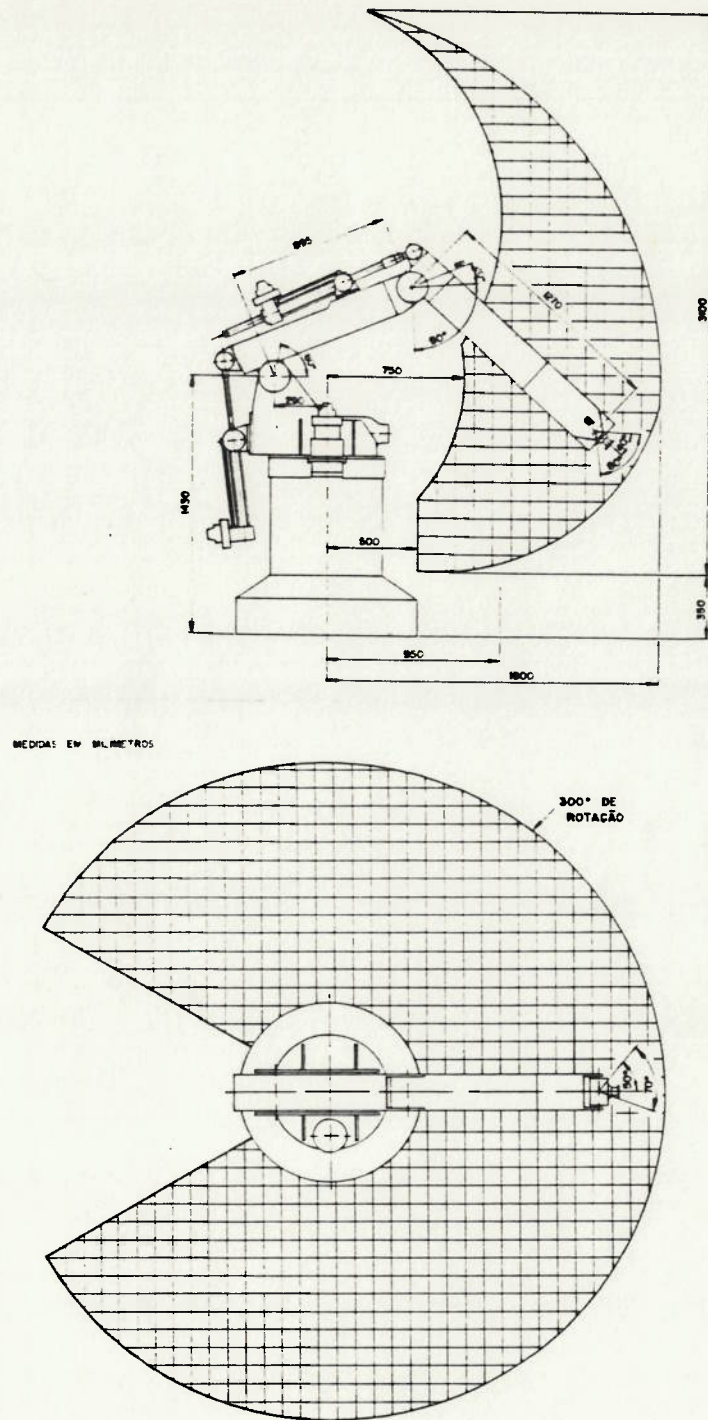


FIGURA 7.1. Principais características mecânicas do protótipo: dimensões básicas, espaço de trabalho e varreduras angulares

Trata-se de um robô do tipo articulado (figura 7.1) com estrutura em aço, acionamento hidráulico e pulso com 2 graus de liberdade. Cada um dos 5 eixos é ligado a um codificador incremental óptico de posição que monitora a sua respectiva posição angular. Esses sensores são constituídos por um disco transparente contendo um número variável (em função da precisão requerida) de marcas opacas que interrompem 2 feixes de luz em quadratura. Todos os dispositivos hidráulicos de atuação são controlados por servo-válvulas proporcionais MOOG modelo ZO-76 conforme se pode ver no circuito hidráulico da figura 5.8.

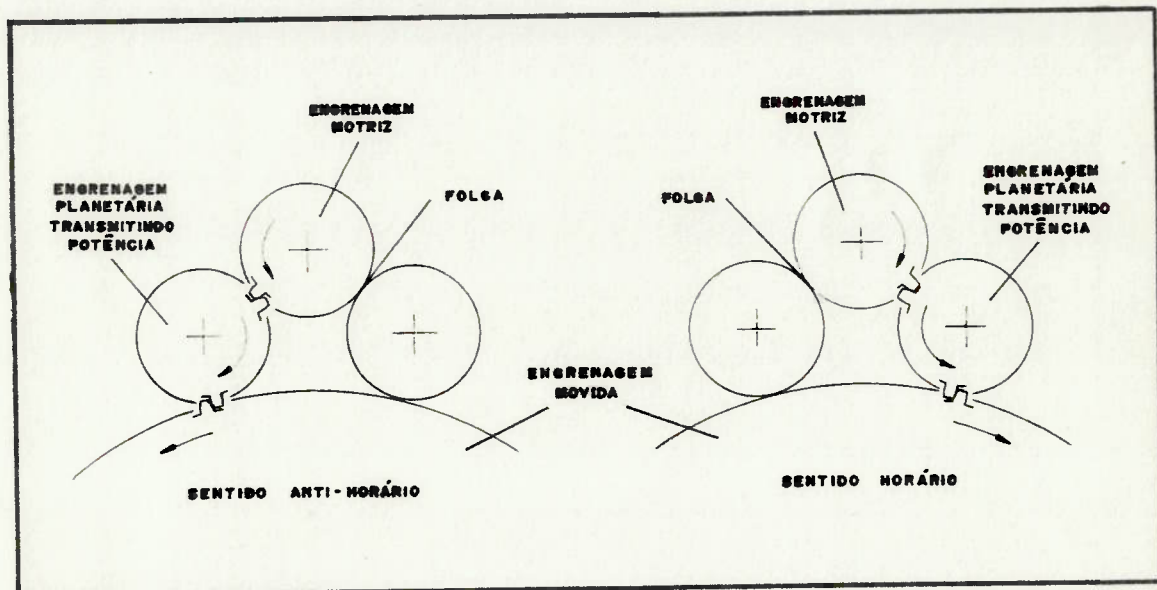


FIGURA 7.2. Princípio de funcionamento do redutor de engrenagens da base giratória

A base giratória é acionada por um motor hidráulico de pistões radiais (modelo KM 21/21Z da G.DUSTERLOH GmbH) acoplado a um redutor de engrenagens cilíndricas de simples redução - 1:6 (desenho CCE045-A, do apêndice K). A função

das duas engrenagens planetárias é manter uma das faces dos dentes engrenados em contacto permanente com a coroa, de modo a que se diminuam as folgas do engrenamento (conforme se mostra na figura 7.2). A estrutura da base giratória é fabricada com chapas de aço de classificação SAE-1020 soldadas e submetidas a posterior usinagem nos assentos dos rolamentos. O seu acoplamento à estrutura de apoio é realizado com o auxílio de 2 mancais de rolamentos (desenho CCE002-A): um, com rolamentos axiais de esferas, suporta os esforços verticais e ao mesmo tempo confere estabilidade e suavidade aos movimentos de rotação; o outro, com rolamentos cônicos, resiste aos esforços laterais e permite a fixação de forma simples do conjunto à estrutura suporte. A circulação do óleo (pressão, retorno e dreno) entre a unidade hidráulica e o robô se faz por meio de um sistema de distribuição, já descrito no capítulo 5, baseado em câmaras formadas entre o eixo móvel da base giratória e uma camisa fixa à estrutura suporte. A camisa é ainda aproveitada para a fixação do corpo do sensor de posição cujo eixo se acopla ao eixo da base giratória.

As estruturas do antebraço e do braço (desenhos CCE073-A e CCE119-A), são fabricadas com chapas de aço de classificação SAE-1020 soldadas na forma de vigas com perfil "I" de secção constante com reforçadores transversais. O acionamento do antebraço é realizado por um atuador linear de haste simples enquanto que o do braço se faz por meio de um atuador linear de haste dupla. As articulações entre a

base giratória e o antebraço e entre este e o braço são constituídas por mancais de rolamentos esféricos. Dois cilindros hidráulicos destinados ao acionamento do pulso são fixados à estrutura do braço. Toda a distribuição de óleo sob pressão para o acionamento dos cilindros e do óleo de retorno se faz por meio de mangueiras flexíveis fixadas convenientemente às diversas estruturas.

O pulso (desenho CCE150-A), no atual estágio de desenvolvimento do protótipo, é dotado de apenas 2 graus de liberdade ("pitch" e "yaw"). O seu acionamento se realiza por meio de 2 atuadores hidráulicos lineares cujas hastes são ligadas a mecanismos de barras articuladas conforme se esquematisa na figura 7.3. Essa forma de acionamento possui o inconveniente de acoplar os 2 movimentos do pulso, tornando obrigatório o controle simultâneo dos seus graus de liberdade; por outro lado, é um meio eficaz de substituir os atuadores hidráulicos rotativos, difíceis de serem encontrados junto ao mercado industrial do país. O desenho CCE208-B é um ante-projeto de pulso com 3 graus de liberdade (modelo C) que se pretende implementar em uma próxima fase de desenvolvimento do protótipo. A viabilização desse projeto depende, fundamentalmente, da fabricação de atuadores hidráulicos rotativos com boas características de desempenho (torques elevados e movimentos suaves em toda a sua faixa de atuação) com dimensões compatíveis com aquelas que se apresentam no desenho citado.

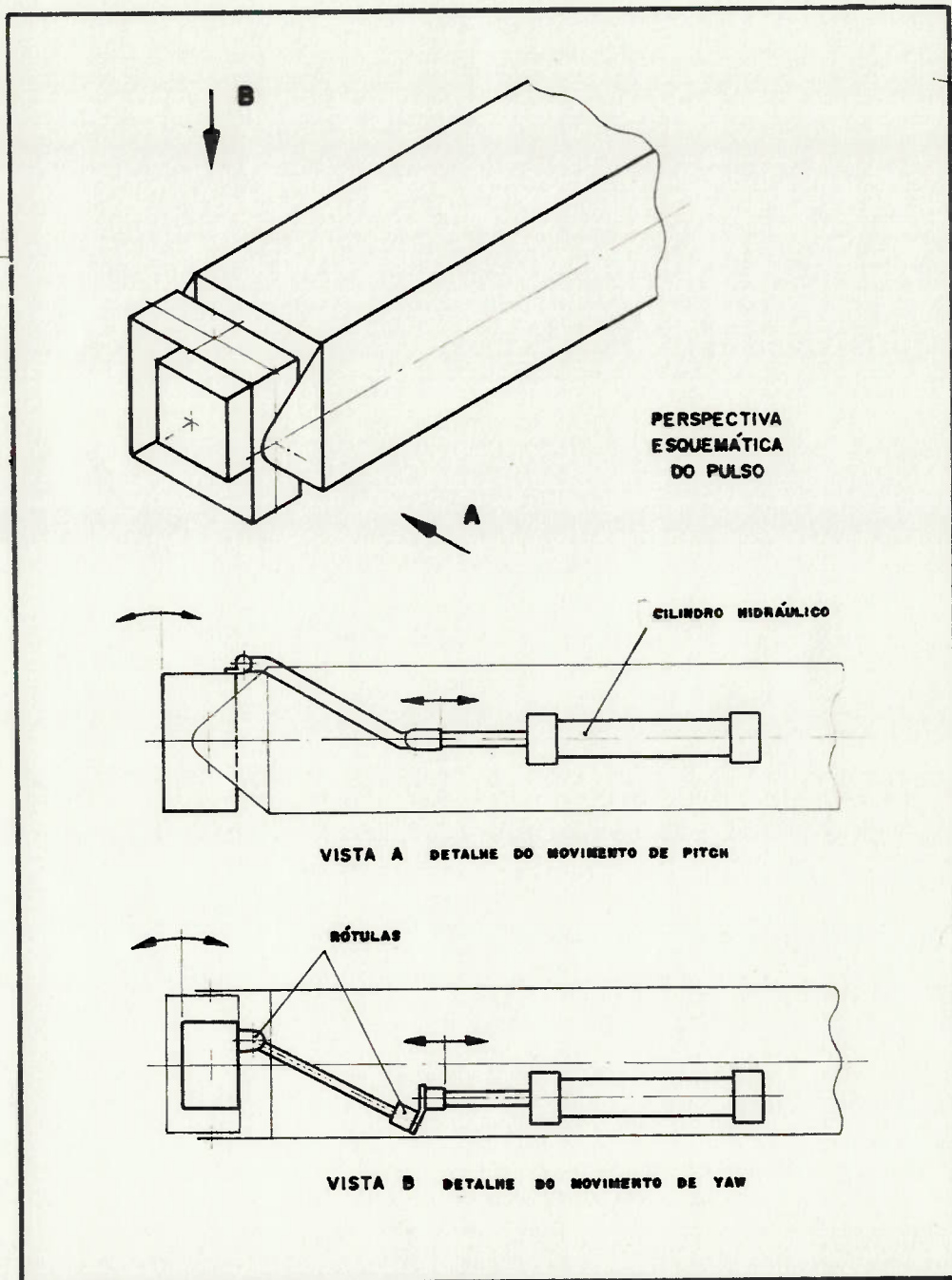


FIGURA 7.3. Esquema dos movimentos do pulso atual do robô

7.3. O Sistema de Controle

O sistema de controle do protótipo [28] compõe-se de uma rede de 5 placas de controle responsáveis pelo controle direto de cada um dos graus de liberdade, gerenciadas por um microprocessador central de 16 bits.

Cada uma das placas de controle consiste de um microprocessador de 8 bits (Motorola 6803) e de circuitos para a codificação de posição, acionamento da servo-válvula e comunicação com o microprocessador central.

O microcomputador central é composto de um microprocessador de 16 bits da Motorola 68000 com "clock" de 7.5 MHz, 128 Kbytes de RAM, 16 Kbytes de EPROM, co-processador de ponto flutuante 8087 para a realização de operações aritméticas, uma unidade de floppy-disk e interfaces de comunicação serial RS-232 para a interligação com o monitor, o computador Burroughs 6900 e os 5 microprocessadores das placas de controle dos graus de liberdade.

Todos os programas destinados ao controle do robô são desenvolvidos no computador Burroughs 6900, em ALGOL, e submetidos a um "cross-compiler" que gera o código objeto que é enviado ao microprocessador 68000 através de uma interface serial com protocolo Poll-Select. Uma unidade de "floppy-disk" armazena os programas gerados, permitindo a desconexão com o B-6900.

O microcomputador possui recursos que permitem ao usuário inserir e executar programas, verificar e modificar

o conteúdo das memórias, transmitir para e receber dados do B-6900, salvar programas em disquete e realizar operações matemáticas com precisão e rapidez.

7.4. O "Software" de Controle

Presentemente, o robô é capaz de operar com um programa de controle de trajetórias contínuas que, utilizando-se de um modelo cinemático-dinâmico com variáveis desacopladas [9], realimenta as variáveis de estado $\theta_1, \dots, \theta_5$ com sinais proporcionais ao erro medido. Outros métodos de controle já testados [35] apresentaram resultados promissores mas não totalmente conclusivos, encontrando-se ainda em processo de estudos e experimentação. Certas limitações do sistema em sua atual configuração dificultam, de certa forma, a adoção de técnicas de controle mais sofisticadas: não existem tacômetros para a realimentação das velocidades angulares de seus 5 eixos, de modo que se pode realimentar apenas as suas posições angulares; além disso, a máxima frequência de amostragem admissível (40 Hz) é ainda insuficiente para a realização, em tempo real, de um grande número de operações matemáticas entre 2 instantes sucessivos, o que é uma exigência comum de todos os métodos de controle mais elaborados. Operações "por aprendizado" não são ainda realizáveis, muito embora a sua implementação não se constitua em um problema de grande dificuldade.

7.5. Potencialidade do Protótipo

No atual estado em que se encontra, o protótipo está habilitado a realizar operações industriais que não requeiram elevadas velocidades e/ou excelente repetibilidade. Isso se deve não só às limitações oriundas do sistema de controle apresentadas no ítem anterior, como também a certos problemas no sub-sistema mecânico que necessitam urgente correção: o cilindro hidráulico de haste dupla que aciona o braço apresenta um comportamento muito irregular em certas faixas de velocidade; o pulso atual, graças ao acoplamento entre seus graus de liberdade, dificulta o processo de controle; a distribuição de massa ao longo da estrutura dos braços não é favorável à dinâmica do sistema.

Operações como, por exemplo, manipulação de cargas e corte de chapas são plenamente realizáveis pelo protótipo, em sua atual configuração. Soldagem a ponto, pintura e soldagem a arco virão a sê-lo tão logo se resolvam os problemas anteriormente expostos.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Conclusões

Um dos principais propósitos deste trabalho foi o de reunir de forma didática informações úteis à compreensão e ao desenvolvimento de projetos mecânicos de robôs industriais. Em relação a este aspecto, acredita-se que o objetivo tenha sido alcançado. O texto procura abordar o processo de projeto como um todo, identificando, na medida do possível, as inter-relações entre os diversos problemas que afetam o seu desenvolvimento. A literatura técnica especializada, pelo que se pôde julgar durante a elaboração deste trabalho, tem carácter mais descritivo ou, então, profundamente analítico; textos que estudam o problema do projeto como um todo não são facilmente localizáveis.

O procedimento de síntese de robôs 6R com acionamento hidráulico que se apresentou no capítulo 6, acredita-se que se constitua em um roteiro bastante útil àqueles que se propuserem a projetar um robô com tais características. O sistema de auxílio ao ante-projeto, ferramenta essencial ao processo, não foi desenvolvido, mas apenas esboçado, procurando-se identificar os seus elementos e características essenciais. O desenvolvimento e implementação desse sistema requer tempo considerável e se constitui em meta a ser atingida em futuros trabalhos.

O protótipo de robô industrial projetado e construído pelo Centro de Computação da USP ainda apresenta uma série de limitações, mas outra coisa não se poderia esperar de um protótipo. O aprendizado que se adquiriu no trato com tais dificuldades deve ser considerado como um ganho maior.

8.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Graças ao comportamento complexo e a certas peculiaridades do sub-sistema mecânico de robôs industriais, o desenvolvimento e implementação de um sistema de auxílio ao ante-projeto de tais dispositivos, de acordo com os princípios expostos no capítulo 6, é um trabalho que se justifica realizar. Para tanto, deve-se:

- 1o. dar continuidade ao estudo e análise dos diversos aspectos relacionados à cinemática, dinâmica e projeto estrutural e de mecanismos de robôs;
- 2o. estudar técnicas computacionais apropriadas à geração de um sistema de auxílio ao ante-projeto que apresente: fácil interação com o usuário, confiabilidade e coerência do banco de dados, capacidade de operar com informações gráficas.

Com relação ao protótipo do robô, ainda há muito que se fazer e aprender. As modificações sugeridas no capítulo 7 são essenciais para que se possa ter uma avaliação mais correta da sua potencialidade. A partir do cumprimento dessas recomendações tornar-se-á necessário submeter o protótipo aos testes usuais [47] e, a partir da análise dos re-

sultados que se apresentarem, identificar atividades industriais compatíveis com as suas características de desempenho. Fixadas essas atividades, dever-se-á ainda realizar o projeto das células de trabalho e dos dispositivos terminais e o desenvolvimento de todo o "software" específico necessário.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ASADA, H.: "A Geometrical Representation of Manipulator Dynamics and its Application to Arm Design," ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 105, Sept. 1983, pg. 131-135.

(2) ASADA, H. e YOUCEF-TOUMI, K.: "Analysis and Design of Direct Drive Arm with a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism," ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 106, Sept. 1984, pg. 225-230.

(3) AVILÉS, R. e AJURIA, M.B.: "A numerical Method for the Position Problems in Manipulators with Redundant Freedoms".

(4) BELL, R.: "Linear Analysis of a Valve Controlled, Loaded Hydraulic Servo-Motor," Proceedings of the 2nd Fluid Power Symposium, Guildford (England), 1971.

(5) BELL, R.: "The Use of Hydraulic Cylinder Drives on N.C. Machine Tools: a re-evaluation," Proceedings of the 2nd Fluid Power Symposium, Guildford (England), 1971.

(6) BELL, R. e COWAN, P.: "The Performance of a 'High Speed' Servomotor," Proceedings of the 2nd Fluid Power Symposium Guildford (England), 1971.

(7) BOOK, W.J. e MAJETTE, M.: "Controller Design for Flexible Distributed Parameter Mechanical Arms Via Combined State Space and Frequency Domain Techniques," ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 105, Dec. 1983, pg. 245-254.

(8) BOOK, W.J., MAIZZA, D., Whitney, D.: "Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility," ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control Vol. 97, No. 4, Dec. 1975, pg. 424-431.

(9) CAMILLI, A.: "Controle de Manipuladores por Modelo Dinâmico Desacoplado," Anais do 2o. Congresso Nacional de Automação Industrial, São Paulo, 1985, pg. 20-23.

(10) CAMPOS, G.L. de: "Robótica, Estado da Arte," Anais do 1o. Simpósio sobre Robótica - SOBRACON (Sociedade Brasileira de Controle Numérico), São Paulo, 1984, pg. 1.1-1.14.

(11) CAMPOS, G.L. de: "Construção de um Robot para Aplicações Múltiplas," Anais do 1o. Congresso Nacional de Automação Industrial, São Paulo, 1983, pg. 337-341.

(12) COIFFET, P., CHIROUZE, M.: An Introduction to Robot Technology, Koogan Page, 1983.

(13) COSTA, A., CUNHA, H., GONÇALVES, L.A.M., AGUIAR, M.L.: "Controle de Manipuladores Industriais por Modelo com Variáveis de Estado," Anais do 2o. Congresso Nacional de Automação Industrial, São Paulo, 1985, pg. 68-75.

(14) CRITCHLOW, A.J.: Introduction to Robotics, McMillan Publishing Co., 1985.

(15) DENAVIT, J. e HARTENBERG, R.S.: "A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices," ASME, Journal of Applied Mechanics, June 1955, pg. 215-221.

(16) DERBY, S.: "The Deflection and Compensation of General Purpose Robot Arms," Mechanism and Machine Theory, Vol. 18, No. 6, 1983, pg. 445-450.

(17) DUFFY, J.: Analysis of Mechanisms and Robot Manipulators Edward Arnold Ltd., London, 1980.

(18) FREEMAN, R.A. e TESAR, D.: "The Generalized Coordinate Selection for the Dynamics of Complex Planar Mechanical Systems," ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 104, Jan. 1982, pg. 206-217.

(19) GONÇALES, C.M.: "Nova Tecnologia de Soldagem a Arco com a Utilização de Robot," SOBRACON, Anais do 1o. Simpósio sobre Robótica, São Paulo, 1984, pg. 6.1-6.22.

(20) GUILLON, M.: Hydraulic Servo Systems, Analysis and Design, Butterworth & Co. Ltd., 1969.

(21) GUILLON, M.: L'Asservissement Hydraulique et Electrohydraulique: Complements techniques et technologiques, Dunod, Paris, 1972.

(22) GUPTA, A.K.: "Vibration of Tapered Beams," ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, no. 1, Jan. 1985, pg. 19-36.

(23) HALFMAN, R.L.: Dynamics of Particles, Rigid Bodies and Systems, Addison-Wesley Publishers, 1962.

(24) HURTY, W.C. e RUBINSTEIN, M.F.: Dynamics of Structures Prentice Hall, Series in Engineering of the Physical Sciences, 1964.

(25) J.I.R.A.: The Specifications and Applications of Industrial Robots in Japan, Japan Industrial Robots Association Publishers.

(26) KARNOPP, D. E ROSENBERG, R.C.: Analysis and Simulation of Multiport Systems: the bond graph approach to physical systems dynamics, Cambridge M.I.T. Press, 1968.

(27) KATO, I.: *Mechanical Hands Illustrated*, Kogyo Chosakai Publishing Co. Ltd., Oct. 1977.

(28) KASHIWAKURA, M.K.: "Sistema de Controle do Robô do Centro de Computação Eletrônica da USP," SOBRACON, Anais do 1o. Simpósio sobre Robótica, São Paulo, 1984, pg. 83-89.

(29) KUMAR, A. e WALDRON, K.J.: "Numerical Plotting of Surface of Positioning Accuracy of Manipulators," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 16, No. 4, 1981, pg. 361-368.

(30) LUH, J.Y.S., WALKER, M.W. et al: "On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators," *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control*, Vol. 102, June 1980, pg. 69-76.

(31) MERRIT, H.E.: *Hidraulic Control Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.

(32) OGATA, K.: *Modern Control Engineering*, N.J. Prentice-Hall Inc., 1970.

(33) PENNINGTON, A.de, MARSLAND, D.W. e BELL, R.: "The Improvement of the Accuracy of Electrohydraulic Cylinder Drives for N.C. Machine Tools by the Use of Active Feedback Compensation," *Proceedings of the 2nd Fluid Power Symposium Guildford (England)*, 1971.

(34) PENZIEN, J. e CLOUGH, R.W.: Dynamics of Structures, Tokyo Mc. Graw-Hill Kogakusha, 1975.

(35) PERES, R.M.V.: "Núcleo Básico de um Sistema de Rotinas para Manipuladores de Aplicações Múltiplas," dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, Depto. de Engenharia Elétrica, 1986.

(36) PINHEIRO, F.C. e ADADE, A.: "Anteprojeto de um Manipulador," SOBRACON, Anais do 1o. Simpósio sobre Robótica, São Paulo, 1984, pg. 4.1-4.22.

(37) POTKONJAK, V. e VUKOBRATOVIC, N.: "Computer Aided Design of Manipulation Robots Via Multi-Parameter Optimization," Mechanism and Machine Theory, Vol. 18, no. 6, 1983, pg. 431-438.

(38) ROTH, B.: "Robots: State of the Art in Regard to Mechanism Theory," ASME, Journal of Mechanism, Machine and Theory, Vol. 105, Mar. 1983, pg. 11-12.

(39) SCHMITT, A.: Treinamento Hidráulico, G.L. Rexroth GmbH.

(40) SOBRACON: "Robot Industrial Articulado: Aplicações e Viabilidade Econômica," Anais do 1o. Simpósio sobre Robótica, São Paulo, 1984, pg. 3.1-3.20.

(41) TRUILE, J.R.: "O Desenvolvimento Internacional da Robótica: Dados e Reflexões," Anais do 2o. Congresso Internacional de Automação Industrial, São Paulo, 1985, pg. 41-61.

(42) THOMAS, M. e TESAR, D.: "Dynamic Modelling of Serial Manipulator Arms," ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 104, Sept. 1982, pg. 218-228.

(43) THOMAS, M., YUAN-CHOU, H.C., e TESAR, D.: "Optimal Actuator Sizing for Robotic Manipulators Based on Local Dynamic Criteria," ASME, Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design, Vol. 107, June 1985, pg. 163-169.

(44) THOMPSON, B.S. e SUNG, C.K.: "The Design of Robots and Intelligent Manipulators Using Modern Composite Materials," Mechanism and Machine Theory, Vol. 20, No.6, 1985, pg. 471-482.

(45) TSAI, Y.C. e SONI, A.H.: "The Effect of Link Parameter on the Working Space of General 6R Robot Arms," Mechanism and Machine Theory, Vol. 19, No. 1, 1984

(46) TSAI, Y.C. e SONI, A.H.: "Workspace Synthesis of 3R, 4R, 5R and 6R Robots," Mechanism and Machine Theory, Vol. 20, No. 6, 1985.

(47) WARNECKE, H.J. e SCHRAFT, R.D.: Industrial Robots, Application Experience, I.F.S. Publication, Ltd., England, 1982.

(48) ZALUCKY, A. e HARDT, D.E.: "Active Control of Robot Structure Deflections," ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 106, Mar. 1984, pg. 63-69.

A. ALGORITMOS DE TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS

A.1. A Cadeia Cinemática 3R

Considere-se a cadeia cinemática 3R da figura A.1 com $a_2 = a_3$, $s_1 = \theta$ e $s_2 = s_3 = \theta$. Conhecidas as coordenadas (x_p, y_p, z_p) do ponto P situado na extremidade do segmento a_3 , determina-se as correspondentes coordenadas angulares θ_1 , θ_2 e θ_3 , a partir das expressões a seguir:

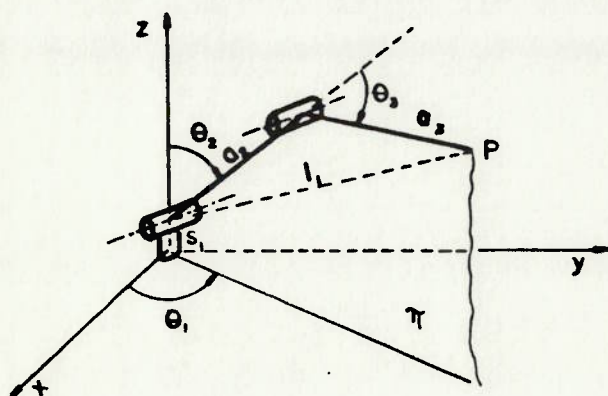


FIGURA A.1. Cadeia cinemática 3R

$$\theta_1 = \tan^{-1}(y_p / x_p) \quad (\text{A.1})$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}[(z_p - s_1) / l_1] - \cos^{-1}[(l_1^2 + a_2^2 - a_3^2) / (2a_2 l_1)] \quad (\text{A.2})$$

$$\theta_3 = \cos^{-1}[(l_1^2 - a_2^2 - a_3^2) / (2a_2 a_3)] \quad (\text{A.3})$$

$$l_1 = [x_p^2 + y_p^2 + (z_p - s_1)^2]^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

A.2. Cadeias Cinemáticas BR

A.2.1. Modelo C

Considere-se a figura A.2. Dados os vetores $\vec{H}(x_n, y_n, z_n)$, $\vec{U}_n(L_n, M_n, N_n)$ e $\vec{U}_p(L_p, M_p, N_p)$, onde L, M e N são cossenos diretores, a determinação das correspondentes coordenadas angulares $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ pode ser realizada a partir dos seguintes passos:

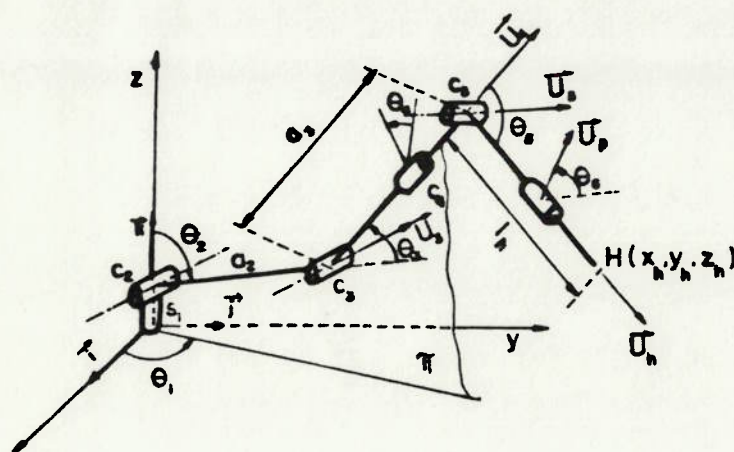


FIGURA A.2. Modelo C

a. Obtenção do ponto C_B

$$x_B = x_n - l_n \cdot L_n$$

$$y_B = y_n - l_n \cdot M_n$$

$$z_B = z_n - l_n \cdot N_n$$

(A.5)

b. Obtenção de θ_1 , θ_2 e θ_3

Expressões A.1-A.4, com $(x_p, y_p, z_p) = (x_w, y_w, z_w)$

c. Obtenção de \vec{U}_3 , \vec{U}_4 e \vec{U}_w

$$\vec{U}_3 = -\sin\theta_1 \cdot \vec{i} + \cos\theta_1 \cdot \vec{j} \quad (\text{A.6})$$

$$\vec{U}_4 = L_4 \cdot \vec{i} + M_4 \cdot \vec{j} + N_4 \cdot \vec{k} \quad (\text{A.7})$$

$$L_4 = \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos\theta_1$$

$$\text{com } M_4 = \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin\theta_1 \quad (\text{A.8})$$

$$N_4 = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\vec{U}_w = -(\vec{U}_4 \times \vec{U}_h) / |\vec{U}_4 \times \vec{U}_h| \quad (\text{A.9})$$

d. Obtenção de θ_4 , θ_w e θ_d

$$\theta_4 = \cos^{-1}(\vec{U}_3 \cdot \vec{U}_w) \quad (\text{A.10})$$

$$\theta_w = \cos^{-1}(\vec{U}_4 \cdot \vec{U}_h) \quad (\text{A.11})$$

$$\theta_d = \cos^{-1}(\vec{U}_w \cdot \vec{U}_p) \cdot \text{sgn}$$

$$\text{onde } \text{sgn} = \begin{cases} 1 & \text{para } (\vec{U}_w \times \vec{U}_p) \cdot \vec{U}_h > 0 \\ -1 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

A.2.2. Modelo A1

Considere-se a figura A.3. Determina-se as coordenadas $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_4$ mediante o seguinte procedimento:

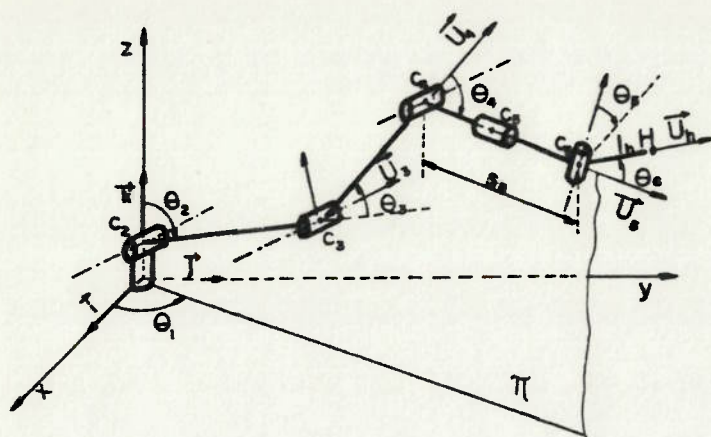


FIGURA A.3. Modelo A1

a. Obtenção do ponto C_4

$$x_4 = x_3 - L_3 \cdot L_3$$

$$y_4 = y_3 - L_3 \cdot M_3$$

$$z_4 = z_3 - L_3 \cdot N_3$$

(A.12)

b. Obtenção de \vec{U}_3

Os vetores \vec{U}_3 e $(C_4 - C_1)$ são coplanares (pertencem ao plano Π), de modo que a componente \vec{k} do produto vetorial $(C_4 - C_1) \times \vec{U}_3$ é nula:

$$x_4 \cdot M_3 - y_4 \cdot L_3 = 0 \quad (A.13)$$

O vetor \vec{U}_3 é perpendicular a \vec{U}_2 , logo:

$$\vec{U}_3 \cdot \vec{U}_2 = L_2 L_3 + M_2 M_3 + N_2 N_3 = 0 \quad (A.14)$$

Como \vec{U}_3 é um vetor unitário, resulta:

$$L_3^2 + M_3^2 + N_3^2 = 1 \quad (A.15)$$

As expressões A.13-A.15 permitem determinar \vec{U}_3 :

$$L_5 = (1+E^2+F^2)^{-1/2} ; \quad M_5 = EL_5 ; \quad N_5 = -FL_5 \quad (\text{A.16})$$

$$\text{com } E = y_4/x_4 \quad \text{e } F = L_p/N_p + M_p \cdot E/N_p \quad (\text{A.17})$$

c. Determinação do ponto C_4

$$x_4 = x_4 - s_5 L_5$$

$$y_4 = y_4 - s_5 M_5 \quad (\text{A.18})$$

$$z_4 = z_4 - s_5 N_5$$

d. Determinação das coordenadas angulares θ_1 , θ_2 e θ_3 :

Expressões A.1-A.4 com $(x_p, y_p, z_p) = (x_4, y_4, z_4)$

e. Determinação dos vetores \vec{U}_3 e \vec{U}_4

$$L_4 = \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1$$

$$M_4 = \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 \quad (\text{A.19})$$

$$N_4 = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\vec{U}_3 = -\sin \theta_1 \cdot \vec{i} + \cos \theta_1 \cdot \vec{j} \quad (\text{A.20})$$

f. Determinação das coordenadas angulares θ_4 , θ_5 e θ_6

$$\theta_4 = \cos^{-1}(\vec{U}_4 \cdot \vec{U}_5) \text{sgn onde } \text{sgn}=+1 \text{ para } (\vec{U}_4 \times \vec{U}_5) \cdot \vec{U}_4 > 0 \quad (\text{A.21})$$

$$\theta_5 = \cos^{-1}(\vec{U}_4 \cdot \vec{U}_p) \text{sgn onde } \text{sgn}=+1 \text{ para } (\vec{U}_4 \times \vec{U}_p) \cdot \vec{U}_5 > 0 \quad (\text{A.22})$$

$$\theta_6 = \cos^{-1}(\vec{U}_5 \cdot \vec{U}_p) \text{sgn onde } \text{sgn}=+1 \text{ para } (\vec{U}_5 \times \vec{U}_p) \cdot \vec{U}_4 > 0 \quad (\text{A.23})$$

A.2.3. Modelo B1

Considere-se a figura A.3. O procedimento para a determinação das coordenadas angulares $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$ a partir de \vec{H} , \vec{U}_h e \vec{U}_p requer os seguintes passos:

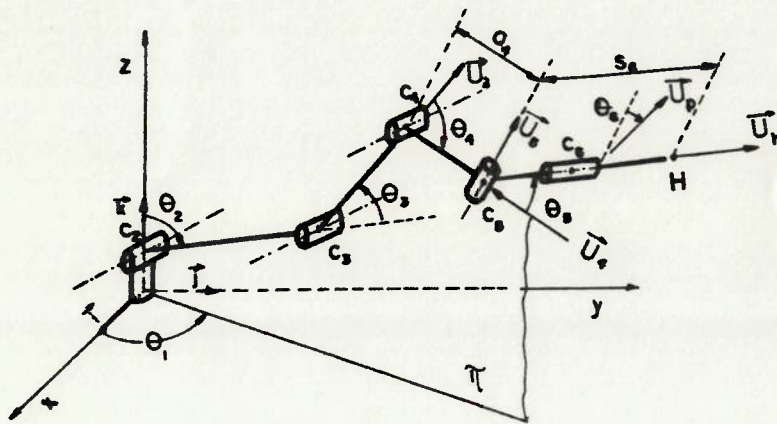


FIGURA A.4. Modelo B1

a. Determinação do ponto C_5

$$x_5 = x_h - s_6 L_h$$

$$y_5 = y_h - s_6 M_h$$

$$z_5 = z_h - s_6 N_h$$

(A.24)

b. Determinação do vetor \vec{U}_5

Os vetores \vec{U}_5 e $(C_5 - C_1)$ pertencem ao plano π , de modo que se pode escrever:

$$x_5 M_5 - y_5 L_5 = 0$$

(A.25)

Ao mesmo tempo, \vec{U}_5 e \vec{U}_h são ortogonais e unitários, resultando:

$$L_5 L_h + M_5 M_h + N_5 N_h = 0 \quad (\text{A.26})$$

$$L_5^2 + M_5^2 + N_5^2 = 1 \quad (\text{A.27})$$

Partindo-se das relações A.25-A.27, obtém-se \vec{U}_5 :

$$L_5 = (1+A^2+B^2)^{-1/2}; \quad M_5 = AL_5; \quad N_5 = -BL_5 \quad (\text{A.28})$$

$$\text{com } A = y_5/x_5 \quad \text{e} \quad B = L_h/N_h + AM_h/N_h \quad (\text{A.29})$$

c. Determinação do vetor \vec{U}_4

\vec{U}_4 e $(C_5 - C_1)$ pertencem ao plano Π e \vec{U}_4 e \vec{U}_5 são ortogonais. Dessas condições resulta:

$$L_4 = (1+C^2+D^2)^{-1/2}; \quad M_4 = CL_4; \quad N_4 = -DL_4 \quad (\text{A.30})$$

$$\text{com } C = y_5/x_5 \quad \text{e} \quad D = L_5/N_5 + CM_5/N_5 \quad (\text{A.31})$$

d. Determinação do ponto C_4

$$x_4 = x_5 + a_4 L_4$$

$$y_4 = y_5 + a_4 M_4 \quad (\text{A.32})$$

$$z_4 = z_5 + a_4 N_4$$

e. Determinação das coordenadas angulares θ_1 , θ_2 e θ_3

Expressões A.1-A.4 com $(x_p, y_p, z_p) = (x_4, y_4, z_4)$

f. Determinação de θ_a , θ_b e θ_c

$$\theta_a = \cos^{-1}(\vec{U}_a \cdot \vec{U}_a)$$

$$\theta_b = \cos^{-1}(\vec{U}_a \cdot \vec{U}_b) \quad (\text{A.33})$$

$$\theta_c = \cos^{-1}(\vec{U}_b \cdot \vec{U}_c) \text{sgn onde sgn}=+1 \text{ para } (\vec{U}_b \times \vec{U}_c) \cdot \vec{U}_a > 0$$

B. A ENVOLTÓRIA DO ESPAÇO DE TRABALHO PRINCIPAL

B.1. Área da Envoltória

Considere-se a figura B.1. A transformação de coordenadas $T: (\theta_2, \theta_3) \rightarrow (y, z)$ é expressa por:

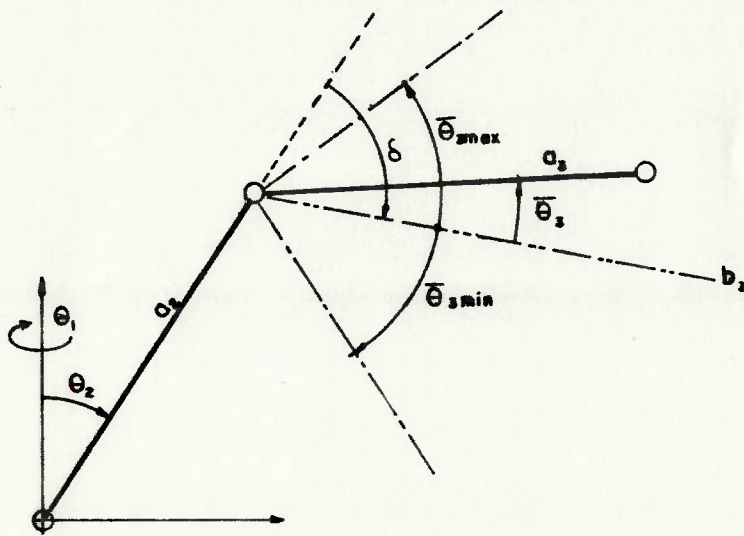


FIGURA B.1. A transformação $T(\theta_2, \theta_3) \rightarrow (y, z)$

$$T: \begin{cases} y = a(\sin\theta_2 + \cos[\pi/2 - \theta_2 - (\Gamma - \bar{\theta}_3)]) \\ z = a(\cos\theta_2 + \sin[\pi/2 - \theta_2 - (\Gamma - \bar{\theta}_3)]) \end{cases} \quad (B.1)$$

O jacobiano dessa transformação é:

$$\begin{aligned} [J] &= \begin{bmatrix} \partial y / \partial \theta_2 & \partial y / \partial \theta_3 \\ \partial z / \partial \theta_2 & \partial z / \partial \theta_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a(\cos\theta_2 + \sin[\pi/2 - \theta_2 - (\Gamma + \bar{\theta}_3)]) & a(\sin[\pi/2 - \theta_2 - (\Gamma + \bar{\theta}_3)]) \\ -a(\sin\theta_2 + \cos[\pi/2 - \theta_2 - (\Gamma + \bar{\theta}_3)]) & -a(\cos[\pi/2 - \theta_2 - (\Gamma + \bar{\theta}_3)]) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (B.2)$$

A expressão do determinante de [J] é dada por:

$$|J| = a^2(-\cos[\Pi/2 - \theta_2 - (\Gamma + \bar{\theta}_3)])(\cos\theta_2 + \sin(\Pi/2 - \theta_2 - \Gamma - \bar{\theta}_3)) + \\ \sin[\Pi/2 - \theta_2 - (\Gamma + \bar{\theta}_3)][\sin\theta_2 + \cos(\Pi/2 - \theta_2 - \Gamma - \bar{\theta}_3)] \quad (B.3)$$

Desenvolvendo-se essa expressão e efetuando-se as devidas simplificações, chega-se a:

$$|J| = a^2 \sin(-\Gamma + \bar{\theta}_3) \quad (B.4)$$

A área delimitada pela envoltória EN é o módulo da integral do determinante de [J] calculada sobre os intervalos $\theta_{2min} < \theta_2 < \theta_{2max}$ e $-\Delta\theta_3/2 < \bar{\theta}_3 < \Delta\theta_3/2$:

$$A = \int_{\theta_{2min}}^{\theta_{2max}} \int_{\bar{\theta}_{3min}}^{\bar{\theta}_{3max}} a^2 \sin(-\Gamma + \bar{\theta}_3) d\theta_2 d\bar{\theta}_3 \quad (B.5)$$

que, desenvolvida, resulta em:

$$A = 2a^2 |\Delta\theta_2 \sin(\Delta\theta_3/2) \sin\Gamma| \quad (B.6)$$

B.2. O Baricentro $Y_{c.g.}$ da Envoltória

O baricentro $Y_{c.g.}$ da envoltória EN é dado pela seguinte integral:

$$Y_{c.g.} = A^{-1} \int_{\theta_{2min}}^{\theta_{2max}} \int_{\bar{\theta}_{3min}}^{\bar{\theta}_{3max}} y(\theta_2, \bar{\theta}_3) |J| d\theta_2 d\bar{\theta}_3 =$$

$$A^{-1} \int_{\theta_{2min}}^{\theta_{2max}} \int_{\theta_{3min}}^{\theta_{3max}} a^3 \{ \sin\theta_2 + \cos[\Pi/2 - \theta_2 - (\Gamma - \bar{\theta}_3)] \} \sin(\bar{\theta}_3 - \Gamma) d\theta_2 d\bar{\theta}_3 \quad (B.7)$$

Desenvolvendo-se e simplificando-se essa expressão chega-se a:

$$\begin{aligned} Y_{ce} = (a^3/A) & \{ (\cos\theta_{2min} - \cos\theta_{2max}) [(\cos\theta_{3max} - \cos\theta_{3min}) - \\ & (\sin\theta_{3max}^2 - \sin\theta_{3min}^2)/2] + \\ & (\sin\theta_{2min} - \sin\theta_{2max}) [(\theta_{3max} - \theta_{3min}) + \\ & (\sin 2\theta_{3max} - \sin 2\theta_{3min})/2] / 2 \} \quad (B.8) \end{aligned}$$

C. ALGORITMO DE SÍNTESE GEOMÉTRICA

Na figura C.1 apresenta-se o diagrama de blocos representativo de um algoritmo, cuja fonte é a referência [46], para a síntese de um robô 6R com estrutura de localização otimizada ($a_2 = a_3$, $s_2 = s_3 = 0$), permitindo a determinação da dimensão a_2 e das coordenadas angulares limite $\theta_{1\min}$, $\theta_{1\max}$, ..., $\theta_{6\min}$, $\theta_{6\max}$.

Os dados de entrada para esse algoritmo, são:

- 1o. Modelo do robô: A1, B1 ou C;
- 2o. Configurações críticas: m conjuntos de vetores \vec{H} , \vec{U}_n e \vec{V}_n descritos em um sistema de coordenadas cartesianas OXYZ conforme se indica na figura C.2;

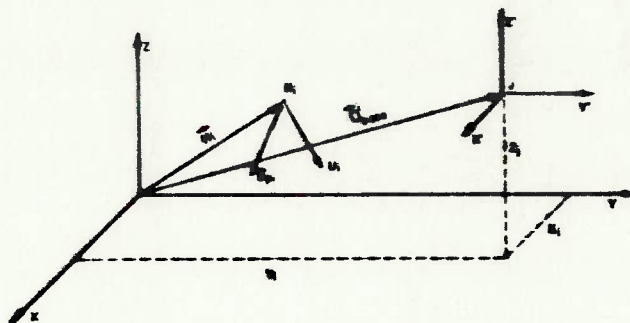


FIGURA C.2. Sistemas de referências utilizados pelo algoritmo de síntese geométrica

- 3o. Região de Busca: malha tri-ortogonal constituída por n nós com coordenadas (x, y, z) descritas no mesmo sistema de referência OXYZ;

Os passos mais importantes do diagrama da figura C.1 são explicados a seguir:

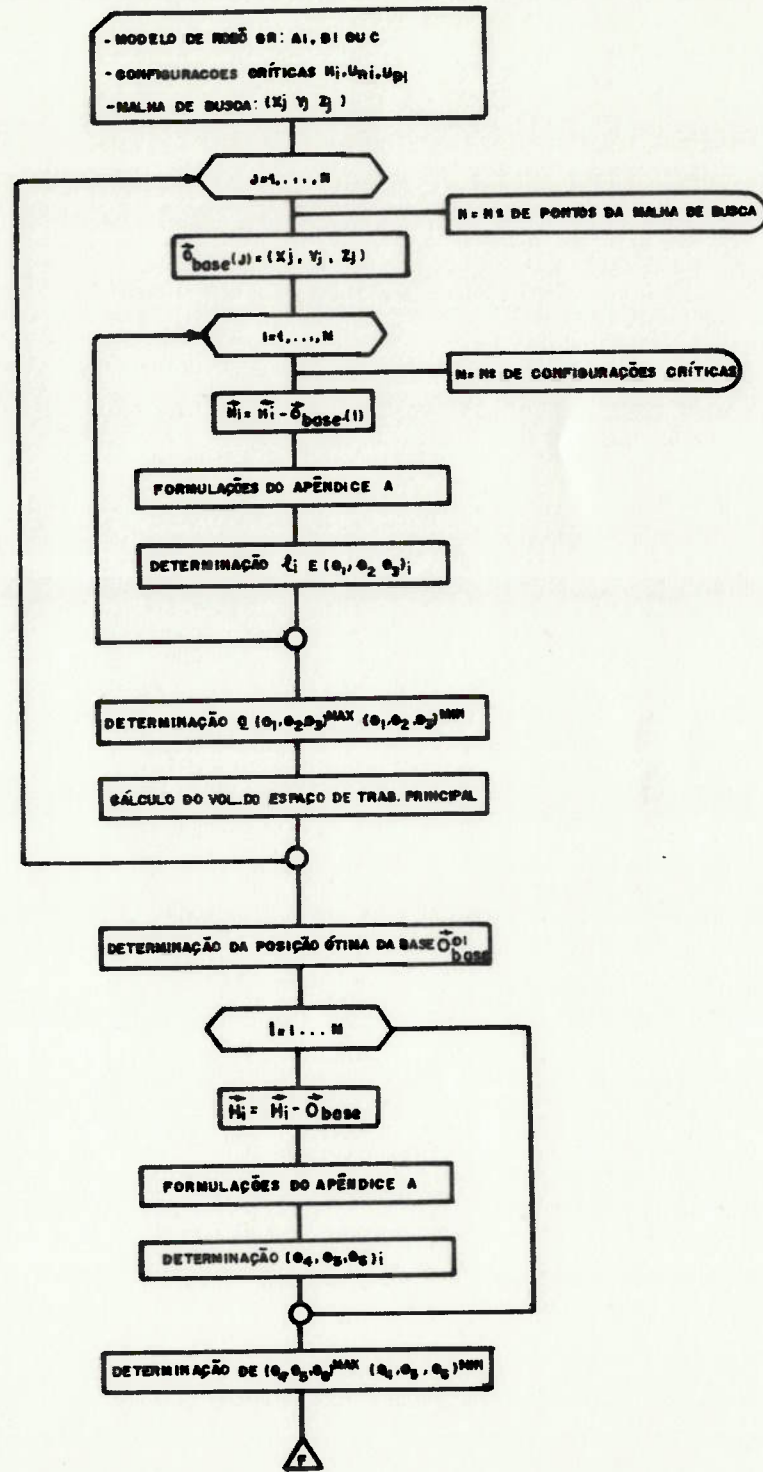


FIGURA C.1. Algoritmo para a síntese geométrica de um robô 6R

1o. Situa-se o centro da base do robô no nó j da malha de busca.

2o. Para cada uma das m configurações críticas determina-se, a partir de \vec{H} , \vec{U}_n e \vec{U}_p , a dimensão \underline{l} e as coordenadas angulares θ_1 , θ_2 e θ_3 utilizando-se os algoritmos de transformação de coordenadas descritos no apêndice A para as topologias A1, B1 e C.

3o. Determina-se os valores máximos e mínimos de θ_1 , θ_2 e θ_3 , bem como a dimensão \underline{a} , a partir de:

$$\begin{aligned} (\theta_1, \theta_2, \theta_3)_{\max} &= \max \{(\theta_1, \theta_2, \theta_3)_i\} \\ (\theta_1, \theta_2, \theta_3)_{\min} &= \min \{(\theta_1, \theta_2, \theta_3)_i\} \text{ para } i=1, \dots, m \quad (C.3) \\ a &= 0.5 \cdot \max \{l_i\} \end{aligned}$$

4o. Determina-se o volume do espaço de trabalho principal correspondente aos valores obtidos em 3, a partir de:

$$\begin{aligned} V_j &= (\theta_{1\max} - \theta_{1\min}) \cdot Y_{cg}(\theta_{2\max}, \theta_{2\min}, \theta_{3\max}, \theta_{3\min}, a)_j \cdot \\ &A(\theta_{2\max}, \theta_{2\min}, \theta_{3\max}, \theta_{3\min}, a) \quad (C.2) \end{aligned}$$

onde A e Y_{cg} são dados, respectivamente, pelas expressões B.6 e B.8.

5o. Repetem-se os passos 1 a 4 para todos os n nós da malha. A posição ótima da base é aquela que corresponde a um volume mínimo para o espaço de trabalho:

$$D_{\text{ótimo}} = (X_j, Y_j, Z_j) \text{ tal que } V = \min \{V_j\} \quad j=1, \dots, n \quad (C.3)$$

6o. Fixando-se a base nessa posição, determina-se, para cada uma das m configurações críticas do dispositivo terminal, as coordenadas angulares θ_4 , θ_5 e θ_6 . Para isso, utiliza-se os algoritmos de transformação de coordenadas apresentados no apêndice A.

70. Os valores-limite de θ_4 , θ_5 e θ_6 são obtidos a partir de:

$$\begin{aligned} (\theta_4, \theta_5, \theta_6)_{\max} &= \max \{ (\theta_4, \theta_5, \theta_6)_i \} \\ (\theta_4, \theta_5, \theta_6)_{\min} &= \min \{ (\theta_4, \theta_5, \theta_6)_i \} \end{aligned} \quad i = 1, \dots, n \quad (C.4)$$

D. SISTEMAS DE POTÊNCIA PARA ROBÔS

D.1. Sistemas Pneumáticos

De todos os sistemas empregados é o que apresenta o menor custo. Muito embora os dispositivos pneumáticos se assemelhem, em princípio, aos hidráulicos, certas características suas contribuem para a diminuição do custo total: os níveis de pressão de trabalho são muito inferiores aos dos circuitos hidráulicos correspondentes e os problemas de vedação se apresentam bem menos graves.

Por outro lado, os robôs que utilizam sistemas de acionamento pneumático não possuem precisão de posicionamento aceitável. O elevado índice de compressibilidade do ar torna difícil o controle preciso dos movimentos dos atuadores, de vez que, para se efetuar ações de partida e parada requer-se a aplicação de forças capazes de vencer não apenas a inércia do sistema mecânico como também as forças oriundas da compressão do fluido de trabalho.

O acionamento pneumático normalmente é utilizado em robôs do tipo "pick and place" que trabalham em malha aberta movimentando objetos entre duas posições. É importante notar, contudo, que existem esforços de pesquisa no sentido de se projetar motores de palhetas de alta precisão acionados por ar comprimido.

D.2. Sistemas Hidráulicos

Atuadores e motores hidráulicos são capazes de fornecer potências muito maiores que os dispositivos pneumáticos e elétricos correspondentes, providos de dimensões similares. Eles possuem grande rapidez de resposta e uma relação entre torque e inércia ou entre força e inércia bastante elevada podendo, graças a essas características, responder rápida e precisamente em uma larga faixa operacional.

Os cilindros hidráulicos, em particular, apresentam um movimento linear muito preciso, de modo que se torna bastante vantajoso utilizá-los sempre que for possível.

É grande, contudo, a variedade de dispositivos hidráulicos de potência que podem ser empregados em robôs industriais além dos cilindros hidráulicos: motores de pistões radiais, motores de palhetas, atuadores rotativos, etc. Nos últimos anos tem-se observado um crescimento na utilização de atuadores rotativos, pois estes, apesar de apresentarem custos elevados, possuem excelentes características de linearidade e precisão.

De todas as vantagens oferecidas pelos sistemas hidráulicos, a segurança operacional é a mais significativa. Em atmosferas explosivas como, por exemplo, as cabines de pintura a "spray", o uso de robôs hidráulicos é bastante indicado, pois estes não apresentam risco de formação de arco elétrico.

As principais desvantagens dos robôs hidráulicos estão ligadas a manutenção e custo. As servo-válvulas utilizadas para controlar o fornecimento de pressão/vazão aos elementos motores são muito dispendiosas e requerem o emprego de óleo filtrado com alto grau de pureza. Além disso, por causa das altas pressões de trabalho existe sempre o risco de graves vazamentos de óleo nas conexões, mangueiras e tubulações.

D.3. Sistemas Elétricos

Os robôs elétricos utilizam motores de corrente contínua ou motores de passo.

Os motores de corrente contínua apresentam movimentos rotativos contínuos e suaves em ambas os sentidos. Em tais motores, o controle preciso de posição e velocidade é plenamente possível, utilizando-se para tanto amplificadores de potência e algum tipo de sensor de posição. O controle pode atuar tanto sobre a corrente de campo quanto sobre a de armadura.

Existem motores DC disponíveis comercialmente com elevada relação entre torque e volume do motor, capazes de competir com os motores hidráulicos existentes, excepto em faixas de potência muito altas. Sob o ponto de vista de rapidez de resposta, os motores DC são bastante adequados, apresentando respostas muito rápidas graças à baixa perda de indutância na armadura.

Os motores de passo, por seu turno, são úteis em robôs cujas articulações são solicitadas por pequenos torques, sendo geralmente empregados em tarefas que requeiram um controle preciso em malha aberta.

D.4. Escolha do Sistema de Potência

As seguintes recomendações para a escolha de sistemas de potência para robôs podem ser tomadas, em princípio, como regras básicas:

1. Sistema Pneumático: Adequado ao acionamento de robôs destinados à execução de tarefas que não exijam grande precisão de posicionamento, situação essa para a qual esse sistema é o que apresenta o menor custo.

2. Sistema Elétrico:

a. Motores de Passo: Adequados ao acionamento de robôs destinados a tarefas que requeiram um controle preciso em malha aberta e que, ao mesmo tempo, não envolvam grandes esforços.

b. Motores DC: Adequados ao acionamento de robôs que executam tarefas que requeiram grande precisão de posicionamento e potência máxima inferior a 2HP por grau de liberdade, a menos que o ambiente de trabalho possua uma atmosfera potencialmente explosiva.

3. Sistema Hidráulico: Adequado ao acionamento de robôs destinados à execução de tarefas que requeiram movimentos rápidos e precisos associadas a torques elevados, de forma que a potência máxima por grau de liberdade seja superior a 5HP.

Na faixa de potências entre 2 e 5HP por grau de liberdade não existe uma clara predominância de um dos sistemas elétrico ou hidráulico [14].

E. CALCULO DE DEFLEXÕES ESTRUTURAIS

E.1. Esforços Externos

Na figura E.1 são apresentados os esforços externos de origem gravitacional atuantes na estrutura dos braços de um robô. A simbologia adotada é a seguinte:

$p_2(u_2)$, $p_3(u_3)$: pesos próprios por unidade de comprimento do antebraço e braço respectivamente;

P_2 , M_2 : reações de força e momento aplicadas ao ponto C_3 pelo conjunto de esforços à sua direita;

P_3 , M_3 : reações de força e momento aplicadas ao ponto C_4 pelo conjunto de esforços à sua direita, isto é, pelo conjunto (pulso) + (placa de montagem) + (dispositivo terminal) + (carga transportada);

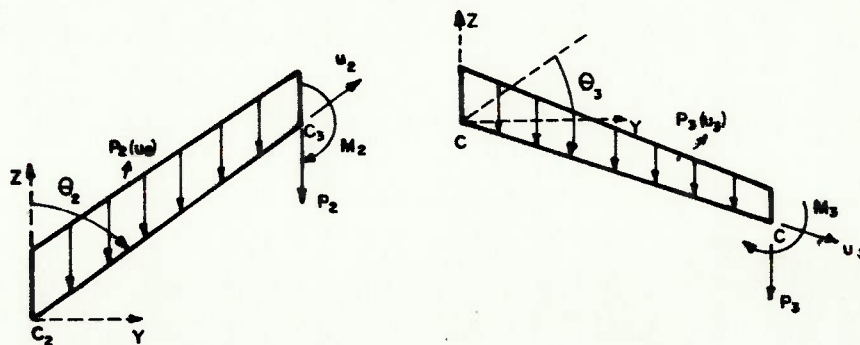


FIGURA E.1. Esforços externos aplicados à estrutura dos braços

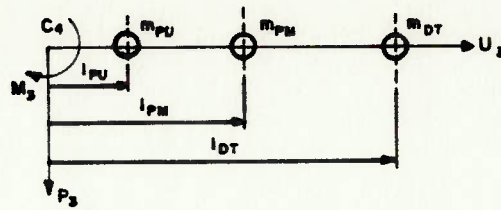


FIGURA E.2. Esforços externos aplicados ao ponto C₄

Considerando-se a estrutura dos braços fixa em uma posição genérica (θ_2, θ_3) resultam, para as componentes dos esforços externos, as seguintes expressões:

$$1. P_3 = P_{PU} + P_{PM} + P_{DT} + P \quad (E.1)$$

$$2. M_3 = (P_{PU} l_{PU} + P_{PM} \cdot l_{PM} + P_{DT} l_{DT} + Pl) \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (E.2)$$

onde P_{PU} , P_{PM} , P_{DT} e P são os pesos do pulso, placa de montagem, dispositivo terminal e carga transportada e l_{PU} , l_{PM} , l_{DT} e l as coordenadas dos respectivos baricentros conforme se esquematiza na figura E.2.

$$3. p_{3t}(u_3) = \gamma S_3(u_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (E.3)$$

onde γ é o peso específico do material, $S_3(u_3)$ é a área da secção transversal do braço variável ao longo de seu eixo \vec{u}_3 e p_{3t} é a componente de p_3 paralela ao eixo \vec{t}_3 , responsável pelos esforços gravitacionais de flexão;

$$4. P_{2t} = [P_3 + \gamma \int_0^{u_3} S_3(u_3) du_3] \cos \theta_2 \quad (E.4)$$

$$5. M_2 = M_3 + P_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + \gamma \int_0^{u_3} S_3(u_3) u_3 du_3 \quad (E.5)$$

$$6. p_{2t}(u_2) = \gamma S_2(u_2) \cos \theta_2 \quad (E.6)$$

onde $S_2(u_2)$ é a área da secção transversal do antebraço, variável ao longo de seu eixo \vec{U}_2 ;

E.2. Deflexões para Vigas com Secção Variável

Cada uma das estruturas do braço e do antebraço deve ser tratada como uma viga de secção variável engastada em uma extremidade e submetida a esforços externos conforme indicado na figura E.3.

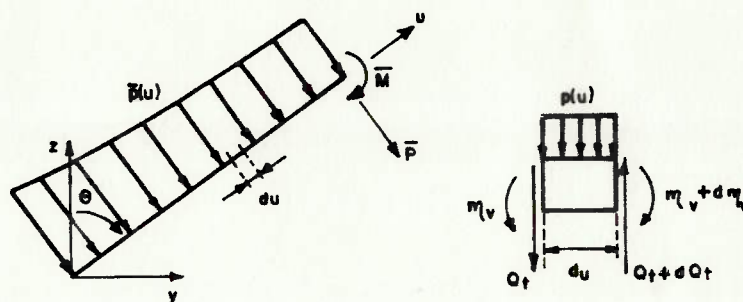


FIGURA E.3. Esforços atuantes em viga de secção variável engastada em uma extremidade

As deflexões estruturais devidas a cada um dos carregamentos são facilmente explicitadas em função dos esforços internos de flexão e das características elásticas e geométricas da viga utilizando-se para tanto formulações básicas da Resistência dos Materiais:

i. Deformações devidas aos momentos concentrados:

$$t(M) = \frac{M}{E} \int_0^u \int_0^u \frac{d_u d_u}{I_v(u)} \quad (E.7)$$

ii. Deformações devidas às forças concentradas na extremidade:

$$t(P) = \frac{P}{E} \int_0^u \int_0^u \frac{l-u}{I_v(u)} du du \quad (E.8)$$

iii. Deformações devidas às forças distribuídas:

$$t(p) = \frac{1}{E} \int_0^u \int_0^u \frac{1}{I_v(u)} \left[\int_0^l p(u) u du \right] du du \quad (E.9)$$

Tomando-se por referência as expressões anteriores, pode-se determinar as deflexões t_2 e t_3 necessárias ao cálculo da deflexão total na extremidade da estrutura dos braços:

$$t_3 = \frac{1}{E} \left\{ M_3 \int_0^{a_3} \int_0^{a_3} \frac{du_2 du_3}{I_{v_3}(u_3)} + P_{3+} \int_0^{a_3} \int_0^{a_3} \frac{a_3 u_3}{I_{v_3}(u_3)} du_3 du_3 + \right. \\ \left. + \int_0^{a_3} \int_0^{a_3} \frac{1}{I_{v_3}(u_3)} \left[g \sin(\theta_2 + \theta_3) \int_{u_3}^{a_3} S_3(u_3) u_3 du_3 \right] \right\} \quad (E.10)$$

$$t_2 = \frac{1}{E} \left\{ [M_3 + P_{3+} a_3 + g \int_0^{a_3} S_3(u_3) u_3 du_3] \int_0^{a_2} \int_0^{a_2} \frac{du_2 du_2}{I_{v_2}(u_2)} + \right. \\ [P_3 + \rho g \int_0^{a_2} S_3(u_3) du_3] \cos(\theta_2) \int_0^{a_2} \int_0^{a_2} \frac{a_2 - u_2}{I_{v_2}(u_2)} du_2 du_2 + \\ \left. \int_0^{a_2} \int_0^{a_2} \frac{1}{I_{v_2}(u_2)} \left[\rho g \cos \theta_2 \int_{u_2}^{a_2} S_2(u_2) du_2 \right] du_2 du_2 \right\} \quad (E.11)$$

As integrais que aparecem nas expressões E.10 e E.11 serão avaliadas admitindo-se que as estruturas do braço e antebraço sejam vigas que apresentem secções com uma das dimensões (h) decrescendo linearmente desde a raiz do antebraço até a extremidade do braço (conforme se indica nas figuras E.4.a-b).

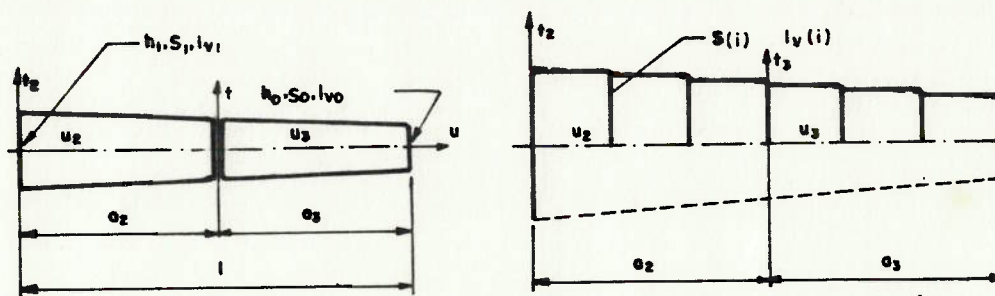


FIGURA E.4. Forma da estrutura dos braços:
a. h variando linearmente
b. modelo discretizado

Para a maioria das formas de secção transversal de vigas, a área S bem como o momento de inércia de área I_y em relação à linha neutra, podem ser representados com boa aproximação, [22] por:

$$S(u) = S_0 [1 + r(l-u)/l]^f \quad (E.12)$$

$$I_y(u) = I_{y0} [1 + r(l-u)/l]^g \quad (E.13)$$

$$\text{com } r = h_1/h_0 - 1 \quad (E.14)$$

$$f = [\log(S_1/S_0)] / \log(h_1/h_0) \quad (E.15)$$

$$g = [\log(I_{y1}/I_{y0})] / \log(h_1/h_0) \quad (E.16)$$

Escrevendo-se E.12 e E.14 relativamente aos sistemas de eixos do antebraço e braço, resulta:

$$S_2(u_2) = S_0 [1 + r(a_2 + a_3 - u_2)/(a_2 + a_3)]^f$$

$$S_3(u_3) = S_0 [1 + r(a_3 - u_3)/a_3]^f \quad (E.17)$$

$$I_{v_2}(u_2) = I_{v_0} [1+r(a_2+a_3-u_2)/(a_2+a_3)]^w$$

$$I_{v_3}(u_3) = I_{v_0} [1+r(a_3-u_3)/a_3]^w \quad (E.18)$$

Substituir diretamente as expressões anteriores nas equações E.10 e E.11 não é uma boa solução, pois resultam integrais difíceis de avaliar analiticamente. Mais razoável é substituir, nas referidas equações, aproximações numéricas discretas de E.17 e E.18, conforme se indica na figura E.5:

$$\Delta u_2 = a_2/n_2 \quad \text{e} \quad \Delta u_3 = a_3/n_3$$

$$u_2(i) = \Delta u_2(i-1/2) \quad i=1, \dots, n_2 \quad (E.19)$$

$$u_3(i) = \Delta u_3(i-1/2) \quad i=1, \dots, n_3$$

Em assim se procedendo, resultam como aproximações das funções área e momento de inércia:

$$S_2(i) = S_0 \{1+r[a_2+a_3-u_2(i)]/(a_2+a_3)\}^f$$

$$S_3(i) = S_0 \{1+r[a_3-u_3(i)]/a_3\}^f \quad (E.20)$$

$$I_{v_2}(i) = I_{v_0} \{1+r[a_2+a_3-u_2(i)]/(a_2+a_3)\}^w$$

$$I_{v_3}(i) = I_{v_0} \{1+r[a_3-u_3(i)]/a_3\}^w \quad (E.21)$$

Substituindo-se as integrais das funções contínuas que comparecem em E.10 e E.11 por somatórias das funções discretas E.20 e E.21, obtém-se:

$$t_3 = [n_3(\Delta u_3)^2/E] \{ (M_3 + P_{3t} a_3) \sum_{i=1}^{n_3} [1/I_{v_3}(i)] -$$

$$P_{3t} \sum_{i=1}^{n_3} [u_3(i)/I_{v_3}(i)] +$$

$$p g \sin(\theta_2 + \theta_3) \Delta u_3 \sum_{j=1}^{n_3} [1/I_{v_3}(j)] \sum_{i=1}^{n_3} S_3(i) [u_3(i)] \} \quad (E.22)$$

$$t_2 = [n_2 (u_2)^2 / E] ([M_3 + P_{3t} (a_3 + a_2 \cos \theta_2)] +$$

$$\rho g \Delta u_3(i) \left[\sum_{i=1}^{n_3} S_3(i) u_3(i) + a_2 \cos \theta_2 \sum_{i=1}^{n_3} S_3(j) \right] \sum_{i=1}^{n_2} [1/I_{J_2}(i)] -$$

$$(P_{3t} + \rho g \Delta u_3 \sum_{i=1}^{n_3} S_3(i)) \cos \theta_2 \sum_{i=1}^{n_2} [u_2(i) / I_{J_2}(i)] +$$

$$\rho g \cos \theta_2 \sum_{j=1}^{n_2} [1/I_{J_2}(j)] \sum_{i=1}^{n_2} S_2(i) u_2(i) \quad (E.23)$$

que são as expressões necessárias ao cálculo da deflexão total da estrutura dos braços.

F. CÁLCULO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DA ESTRUTURA

F.1. Oscilações de Flexão

Considere-se, para a aplicação do método das matrizes de transferência (método de Myklestad-Thompson), o modelo estrutural da figura F.1.

Para as estruturas do antebraço e braço, os vetores de estado [24] são dados, respectivamente, por:

$$[Z]_i = \begin{bmatrix} W_{t_2}(i) \\ \psi_{v_2}(i) \\ M_{v_2}(i) \\ V_{t_2}(i) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [Z]_j = \begin{bmatrix} W_{t_3}(j) \\ \psi_{v_3}(j) \\ M_{v_3}(j) \\ V_{t_3}(j) \end{bmatrix} \quad (\text{F.1})$$

para $1 < i < r$ e $r < j < n$

onde: n é o número total de massas discretas;

r é o número de massas discretas ao longo da estrutura do antebraço;

$W_{t_2}(i)$ e $W_{t_3}(j)$ são as deflexões lineares segundo os eixos t_2 e t_3 medidas nas posições das massas i e j do antebraço e braço, respectivamente;

$\psi_{v_2}(i)$ e $\psi_{v_3}(i)$ são as deflexões angulares segundo os eixos v_2 e v_3 medidas nas posições das massas i e j do antebraço e braço, respectivamente;

$M_{v_2}(i)$ e $M_{v_3}(j)$ são os momentos fletores segundo os eixos v_2 e v_3 atuantes nas posições das massas i e j do antebraço e braço, respectivamente;

$V_{t_2}(i)$ e $V_{t_3}(j)$ são os esforços cortantes segundo os eixos t_2 e t_3 atuantes nas posições das massas i e j do antebraço e braço, respectivamente;

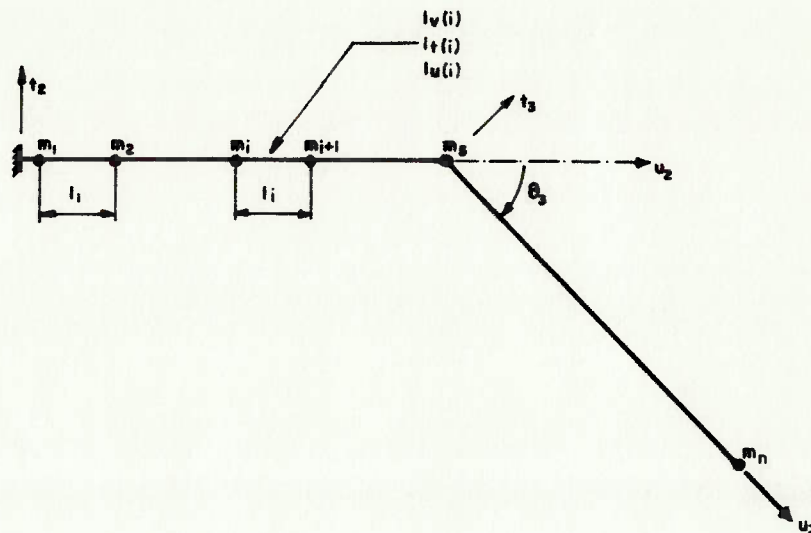


FIGURA F.1. Modelo para o cálculo das frequências naturais

As condições de contorno do problema, são:

$$[Z]_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{v_2}(1) \\ V_{t_2}(1) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [Z]_n = \begin{bmatrix} W_{t_3}(n) \\ \psi_{v_3}(n) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{F.2})$$

No nó n as condições de compatibilidade de deslocamentos e esforços permitem que se escreva:

$$\begin{bmatrix} W_{t_2}(r) \\ \psi_{v_2}(r) \\ M_{v_2}(r) \\ V_{t_2}(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{t_3}(r) \cos \theta_3 \\ \psi_{v_3}(r) \\ M_{v_3}(r) \\ V_{t_3}(r) \cos \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{t_3}(r) \\ \psi_{v_3}(r) \\ M_{v_3}(r) \\ V_{t_3}(r) \end{bmatrix} \\
 = [C_v][Z]_r \quad (F.3)$$

uma vez que a rigidez longitudinal de cada uma das vigas é grande o bastante para que se possa desprezar as deflexões e esforços longitudinais atuantes ao longo do antebraço por efeito dos esforços cortantes à sua direita.

As matrizes de campo $[UF_v]_i$ e $[UF_v]_j$, associadas aos tramos i , do antebraço e j do braço, são expressas por:

$$[UF_v]_i = \begin{bmatrix} 1 & l_i & l_i^2 / (2EI_{v_2}(i)) & l_i^3 / (6EI_{v_2}(i)) \\ 0 & 1 & l_i / (EI_{v_2}(i)) & l_i^2 / (2EI_{v_2}(i)) \\ 0 & 0 & 1 & l_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [UF_v]_j = \begin{bmatrix} 1 & l_j & l_j^2 / (2EI_{v_3}(j)) & l_j^3 / (6EI_{v_3}(j)) \\ 0 & 1 & l_j / (EI_{v_3}(j)) & l_j^2 / (2EI_{v_3}(j)) \\ 0 & 0 & 1 & l_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (F.4)$$

e as matrizes de ponto associadas às massas i , do antebraço e j , do braço, por:

$$[UP]_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \omega^2 m_1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(F.5)

$$[UP]_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & D & 1 & 0 \\ \omega^2 m_j & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{onde } D = \begin{cases} 0 & \text{para } r < j < n-1 \\ -\omega^2 m_j (RG)^2 & \text{para } j=n \end{cases}$$

O efeito de inércia rotacional pode ser desprezado ao longo da estrutura desde que ela seja discretizada em um número suficientemente grande de massas concentradas. Todavia, na extremidade do braço é necessário incorporar-se não só a massa estrutural correspondente ao último tramo como também a massa e a inércia rotacional do conjunto (pulso) + (placa de montagem) + (dispositivo terminal) + (carga transportada), razão pela qual a expressão da n-ésima matriz de ponto é diferente das demais (nela comparece o raio de giração médio RG daquele conjunto de dispositivos).

Expressando-se os vetores de estado em função das matrizes de transferência, obtém-se:

$$[Z]_n = \{ [UF_v]_{n-1} [UP]_{n-1} \dots [UF_v]_1 [UP]_1 \} [Z]_1 = [P'] [Z]_1$$

(F.6)

$$[Z]_n = \{ [UF_v]_{n-1} [UP]_{n-1} \dots [UF_v]_n [UP]_n \} [Z]_n = [Q] [Z]_n$$

Aplicando-se às expressões acima as condições de contorno e de compatibilidade F.2 e F.3, resultam:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{\nu 2}(1) \\ V_{t 2}(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{t 3}(r) \cos \theta_3 \\ \psi_{\nu 3}(r) \\ M_{\nu 3}(r) \\ V_{t 3}(r) \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (F.7)$$

sendo $[P] = [P']^{-1}$

$$\begin{bmatrix} W_{t 3}(n) \\ \psi_{\nu 3}(n) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{t 3}(r) \\ \psi_{\nu 3}(r) \\ M_{\nu 3}(r) \\ V_{t 3}(r) \end{bmatrix} \quad (F.8)$$

Utilizando-se as duas primeiras equações de F.7 e as duas últimas de F.8, gera-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} p_{11} \cos \theta_3 & p_{12} & p_{13} & p_{14} \cos \theta_3 \\ p_{21} \cos \theta_3 & p_{22} & p_{23} & p_{24} \cos \theta_3 \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{t 3}(r) \\ \psi_{\nu 3}(r) \\ M_{\nu 3}(r) \\ V_{t 3}(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (F.9)$$

que tem solução diferente da trivial para:

$$\begin{vmatrix} p_{11} \cos \theta_3 & p_{12} & p_{13} & p_{14} \cos \theta_3 \\ p_{21} \cos \theta_3 & p_{22} & p_{23} & p_{24} \cos \theta_3 \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{vmatrix} = 0 \quad (F.10)$$

que é a expressão que fornece as frequências naturais de flexão da estrutura dos braços na configuração θ_3 .

F.2. Oscilações de Flexo-Torção

O procedimento para a determinação das frequências naturais associadas a essas oscilações é análogo ao da seção precedente, mudando apenas os vetores de estado, as condições de compatibilidade e, naturalmente, as propriedades de rigidez que comparecem nas expressões das matrizes de campo. Assim sendo, resultam:

$$[Z]_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{t2}(1) \\ V_{v2}(1) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [Z]_n = \begin{bmatrix} W_{v3}(n) \\ \psi_{t3}(n) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{F.11})$$

como condições de extremidade e

$$[Z]_n = \begin{bmatrix} W_{v2}(r) \\ \psi_{t2}(r) \\ M_{t2}(r) \\ V_{v2}(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{v3}(r) \\ \psi_{t3}(r) \cos \theta_3 \\ M_{t3}(r) \cos \theta_3 \\ V_{v3}(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{v3}(r) \\ \psi_{t3}(r) \\ M_{t3}(r) \\ V_{v3}(r) \end{bmatrix} = [C_u][Z]_n \quad (\text{F.12})$$

como condição de compatibilidade;

As matrizes $[UF_t]_i$ e $[UF_t]_j$ são obtidas substituindo-se na expressão (F.4) $I_{\cup_2}(i)$ e $I_{\cup_3}(j)$ por $I_{t_2}(i)$ e $I_{t_3}(j)$, respectivamente.

G. ANÁLISE DINÂMICA PELO TENSOR GENERALIZADO DE INÉRCIA

G.1. Determinação do Tensor Generalizado de Inércia

Considere-se a figura G.1, representativa de um sistema de corpos serialmente articulados, e a seguinte simbologia a ela associada:

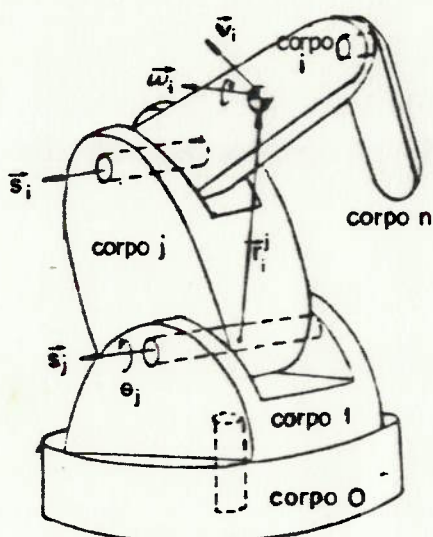


FIGURA G.1. Modelo de manipulador com juntas rotacionais

- \vec{s}_i = vetor de rotação da i -ésima articulação;
- $\vec{r}_{i,j}$ = vetor-posição descrevendo o centro de gravidade (CG) do corpo i no referencial da articulação j ;
- m_i = massa do corpo i ;
- $[I_i]$ = tensor de inércia do corpo i relativamente ao seu CG;
- V_i = velocidade de translação do CG do corpo i
- ω_i = velocidade angular do corpo i em torno de seu CG;

Utilizando-se a simbologia anterior, pode-se exprimir a energia cinética do i -ésimo corpo através de:

$$K_i = (1/2)\{m_i [V_i]^T [V_i] + [I_i]^T [I_i] [\dot{\omega}_i]\} \quad (6.1)$$

onde :

$$[\omega_i] = \sum_{j=1}^i \vec{s}_j \dot{\theta}_j = [\vec{s}_1 \ \vec{s}_2 \ \dots \ \vec{s}_i \ 0 \ \dots \ 0] [\dot{\theta}] = [S_i] [\dot{\theta}] \quad (6.2)$$

$$[V_i] = \sum_{j=1}^i \vec{b}_j \dot{\theta}_j = [\vec{b}_1 \ \vec{b}_2 \ \dots \ \vec{b}_i \ 0 \ \dots \ 0] [\dot{\theta}] = [B_i] [\dot{\theta}] \quad (6.3)$$

$$\vec{b}_i = \vec{s}_i \times \vec{r}_{i,j} \quad (6.4)$$

Substituindo-se em 6.1 as expressões 6.2 e 6.3, resulta:

$$K_i = (1/2) [\dot{\theta}]^T \{m_i [B_i]^T [B_i] + [S_i]^T [I_i] [S_i]\} [\dot{\theta}] \quad (6.5)$$

Portanto, a energia cinética armazenada nos n corpos articulados, será:

$$K = \sum_{j=1}^n K_j = (1/2) [\dot{\theta}]^T [H] [\dot{\theta}] \quad (6.6)$$

$$\text{onde } [H] = \sum_{i=1}^n \{ [S_i]^T [I_i] [S_i] + m_i [B_i]^T [B_i] \} \quad (6.7)$$

Expressando-se a energia cinética do conjunto de corpos em um sistema de coordenadas generalizadas q_1, \dots, q_n , resulta:

$$K = (1/2) [q]^T [G] [q] \quad (6.8)$$

$$\text{onde } [G] = [J]^T [H] [J] \quad (6.9)$$

e $[J]$ é a matriz jacobiana associada à transformação $T:[q] \rightarrow [\theta]$.

A matriz $[G]$ simétrica e definida positiva, expressa em um sistema de coordenadas generalizadas, é o tensor generalizado de inércia de uma série de corpos rígidos articulados conforme indicado na figura G.1. Associada a esse tensor existe uma forma quadrática expressa por:

$$[q]^T [G] [q] = 1 \quad (G.10)$$

que representa a equação de uma superfície elipsoidal descrita em um sistema de coordenadas ortogonais q_1, \dots, q_n . Essa superfície é denominada elipsóide generalizado de inércia.

Como todo tensor simétrico de segunda ordem, o tensor generalizado de inércia pode ser expresso sob uma forma diagonal, mediante uma apropriada transformação de similaridade, ou seja:

$$[q]^T [G] [q] = [q]^T [D] [q] \quad (G.11)$$

onde $[D]$ é o tensor diagonalizado e q_1, \dots, q_n são as coordenadas de um sistema cujos eixos são as diagonais principais do elipsóide generalizado de inércia. As dimensões desses eixos estão alinhadas com os auto-vetores de $[G]$ e os comprimentos das diagonais são dados pelos inversos das raízes quadradas dos correspondentes auto-valores [23].

F.2. O Momento Generalizado de Inércia

O conceito de momento de inércia em torno de um eixo n de um corpo rígido pode ser estendido a um sistema de corpos rígidos articulados. Para tanto, é necessário que se obtenha uma expressão que apresente uma relação de semelhança formal com aquela que se aplica a um corpo rígido e que é derivada da expressão de sua energia cinética em torno de n :

$$K = (1/2)[\dot{n}]^T [I] [\dot{n}] \quad \text{para um corpo rígido}$$

$$\text{de modo que } I_n = 2K/\Omega^2 \quad (G.12)$$

onde $[I]$ é o tensor de inércia do corpo rígido relativamente a um ponto situado sobre o eixo n , Ω é o módulo da velocidade angular do corpo e I_n o momento de inércia em torno de \vec{n} .

Para a extensão do conceito de momento de inércia é necessário adotar-se uma quantidade escalar que represente a velocidade de rotação do sistema de corpos articulados. Adotando-se, por exemplo, a norma de velocidade

$$V = \{[\dot{q}]^T [\dot{q}]\}^{1/2} \quad (G.13)$$

expressa em um sistema de coordenadas generalizadas e aplicando-a à expressão G.13 resulta, como o momento de inércia do sistema de corpos:

$$h = 2K/V^2 = \{[\dot{q}]^T [G] [\dot{q}]\} / \{[\dot{q}]^T [\dot{q}]\} \quad (G.14)$$

A determinação dos valores máximo e mínimo de h é um problema clássico de auto-valores. O máximo h corresponde ao máximo autovalor de $[G]$ sendo sua direção dada pelo respectivo auto-vetor. "Mutatis mutandi", o mesmo se aplica

ao valor mínimo de h [23]. Portanto, o máximo momento de inércia do sistema, conforme definido em G.14, corresponde ao eixo menor do elipsóide generalizado de inércia, e o mínimo ao eixo maior. Para estados cinemáticos com a mesma energia cinética, a velocidade do sistema é mínima se está alinhada com o eixo menor do elipsóide e é máxima quando se alinha com o eixo maior.

F.3. Forças Não-Lineares

Considere-se um ponto A situado no interior da envoltória do espaço de trabalho principal de um robô articulado, e um sistema de coordenadas generalizadas P com origem em A e eixos coincidentes com as diagonais do elipsóide de inércia do robô. Um tal sistema é bastante adequado à descrição dos movimentos do robô nas vizinhanças de A.

Seja [G] o tensor generalizado de inércia do robô referente ao ponto A e [D_A] a matriz diagonal cujos elementos são os auto-valores de [G]. Descrevendo-se a velocidade generalizada do sistema, [P], no mesmo referencial, obtém-se a expressão da sua energia cinética a partir de:

$$K = (1/2)[P]^T[D_A][P] \quad (G.15)$$

O movimento do sistema em torno de A pode ser descrito pelas equações de Lagrange, expressas em coordenadas generalizadas p_i :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{p}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial p_i} = Q_i \quad (G.16)$$

onde Q_i é a força generalizada na direção do i -ésimo eixo p_i .

Os termos dessa equação serão determinados a seguir:

1o. cálculo da derivada em relação às velocidades:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \dot{p}_i} &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{p}_i} \{ [\dot{p}]^T [D_A] [\dot{p}] \} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial \dot{p}_i} [\dot{p}]^T [D_A] [\dot{p}] + [\dot{p}]^T \frac{\partial}{\partial \dot{p}_i} [D_A] [\dot{p}] + [\dot{p}]^T [D_A] \frac{\partial}{\partial \dot{p}_i} [\dot{p}] \right\} = \\ &= \frac{\partial}{\partial \dot{p}_i} [\dot{p}]^T [D_A] [\dot{p}] \quad (G.17) \end{aligned}$$

Como os elementos da cadeia cinemática se movimentam de forma independente, resulta:

$$\frac{\partial \dot{p}_j}{\partial \dot{p}_i} = \begin{cases} 0 & \text{para } i \neq j \\ 1 & \text{para } i = j \end{cases} \quad (G.18)$$

de modo que

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{p}_i} = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0] \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ & \\ 0 & D_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \\ \dot{p}_n \end{bmatrix} = D_{i,i} \dot{p}_i \quad (G.19)$$

2o. cálculo da derivada temporal:

$$\frac{dK}{dt} = \left(\frac{\partial K}{\partial p_i} \right) = \frac{d}{dt} (D_{i,1} \dot{p}_i) = D_{i,1} \ddot{p}_i \quad (G.20)$$

3o. cálculo da derivada espacial:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial p_i} &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial p_i} \{ [\dot{p}]^T [D_A] [\dot{p}] \} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial p_i} [\dot{p}]^T [D_A] [\dot{p}] + [\dot{p}]^T \frac{\partial}{\partial p_i} [D_A] [\dot{p}] + [\dot{p}]^T [D_A] \frac{\partial}{\partial p_i} [\dot{p}] \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left[[\dot{p}]^T \frac{\partial}{\partial p_i} [D_A] [\dot{p}] + \frac{\partial}{\partial p_i} [\dot{p}]^T [D_A] [\dot{p}] \right] \quad (G.21) \end{aligned}$$

Na expressão anterior, a parcela definida por $L = [P]^T [D_A]$ representa o momento angular do sistema de corpos articulados na configuração A, o qual, naturalmente, deve se conservar:

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = 0 \quad (G.22)$$

$$\text{de modo que } \frac{\partial}{\partial p_i} \{ [\dot{p}]^T [D_A] + [\dot{p}]^T \frac{\partial}{\partial p_i} [D_A] \} = 0 \quad (G.23)$$

resultando:

$$\frac{\partial}{\partial p_i} [\dot{p}]^T [D_A] = -[\dot{p}]^T \frac{\partial}{\partial p_i} [D_A] =$$

$$= -[p]^T \begin{bmatrix} \frac{\partial D_{11}}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial D_{1n}}{\partial p_1} \\ \frac{\partial D_{n1}}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial D_{nn}}{\partial p_1} \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

É natural que, ao se calcular a variação do tensor com a configuração do mecanismo, considerem-se todos os seus termos e não apenas a diagonal principal, pois $[D_A]$ torna-se não-diagonal em quaisquer outros eixos coordenados que não os eixos principais. Desenvolvendo-se a expressão 6.24, chega-se a:

$$\frac{\partial}{\partial p_i} [\dot{p}]^T [D_A] = - \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial D_{j1}}{\partial p_i} p_j \quad \dots \quad \sum_{j=1}^n \frac{\partial D_{jn}}{\partial p_i} p_j \right] = [N_i]^T \quad (6.25)$$

Substituindo-se 6.25 em 6.21, resulta:

$$\frac{\partial T}{\partial p_i} = \frac{1}{2} [p]^T \frac{\partial}{\partial p_i} [D_A] [\dot{p}] + [N_i]^T [\dot{p}] \quad (6.26)$$

Portanto, as equações que descrevem o movimento do sistema nas vizinhanças da configuração A, são dadas por:

$$[Q] - [D_A] [\ddot{p}] + [FN] = 0 \quad (6.27)$$

onde $[FN]$ é o vetor que contém as forças não-lineares, expressas por:

$$(FN)_i = \frac{1}{2} [\dot{p}]^T \frac{\partial}{\partial p_i} [D_A] [\dot{p}] + [N_i]^T [p] \quad (6.28)$$

Considere-se a figura G.2, que ilustra a variação do elipsóide generalizado de inércia em forma e em direção entre duas configurações A e B infinitesimalmente próximas. Sejam $[D_A]$ e $[D_B]$ os tensores generalizados de inércia nessas configurações. $[D_A]$ é descrito em relação aos eixos principais no ponto A.

Com as considerações anteriores é possível determinar as variações em forma e em direção do elipsóide de inércia.

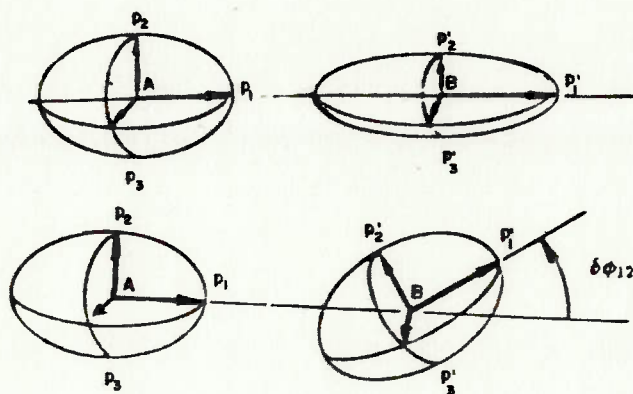


FIGURA G.2. Variação de forma e orientação do elipsóide

i. Variação de forma:

Quando os comprimentos dos eixos principais do elipsóide sofrem uma pequena variação δl_i , os elementos da diagonal principal de $[D_A]$ variam de:

$$\delta(\lambda_i) = \delta(1/l_i^2) = -2\delta l_i / l_i^3 \quad (G.29)$$

onde os λ_i 's são os elementos da diagonal principal de $[D_A]$.

Portanto, após a variação de forma, pode-se escrever:

$$[D_B] = \text{diag}[\lambda_i + \delta\lambda_i] = \text{diag}[(1/l_i^2 - 2\delta l_i / l_i^3)] \quad (G.30)$$

ii. Variação de direção:

A variação de direção das diagonais do elipsóide corresponde uma variação nos termos da diagonal principal do tensor que é dada por:

$$[G_B] = [C]^T [D_B] [C] \quad (G.31)$$

onde as componentes de $[D_B]$ são os auto-valores de $[G_B]$ e a orientação dos eixos principais é dada pelos seus auto-ve-tores. A matriz $[C]$ que comparece nessa expressão é o produ-to encadeado de n matrizes de rotação infinitesimal em torno dos eixos principais do elipsóide, sendo dada por:

$$[C] = \begin{pmatrix} 1 & -\delta\theta_{12} & \dots & \delta\theta_{1n} \\ \delta\theta_{12} & 1 & \dots & -\delta\theta_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta\theta_{1n} & -\delta\theta_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (G.32)$$

III. Variação total:

A variação total do tensor entre as configurações A e B é dada por:

$$\delta[D_A] = [G_B] - [D_A] = [C][D_B][C]^T - [D_A] \quad (G.33)$$

Escrevendo a expressão acima de forma expandida, submetendo-a a desenvolvimento algébrico e eliminando-se os termos de ordem superior, obtém-se:

$$[D_{\lambda}] = \begin{bmatrix} \delta\lambda_1 & (\lambda_1 - \lambda_2)\delta\theta_{12} & \dots & (\lambda_1 - \lambda_m)\delta\theta_{1m} \\ (\lambda_1 - \lambda_2)\delta\theta_{12} & \delta\lambda_2 & & \dots & (\lambda_2 - \lambda_m)\delta\theta_{2m} \\ & & \dots & & \\ (\lambda_1 - \lambda_m)\delta\theta_{1m} & (\lambda_2 - \lambda_m)\delta\theta_{2m} & & \delta\lambda_m & \end{bmatrix} \quad (G.34)$$

Considere-se uma particular trajetória (t_i) infinitesimal do sistema de corpos articulados ao longo da i -ésima diagonal do elipsóide em A . Nessas condições, apenas a i -ésima coordenada generalizada do sistema - p_i - sofre variações, de modo que o vetor velocidade será:

$$[\dot{p}]^T(t_i) = [0 \ 0 \ \dots \ \dot{p}_i \ 0 \ \dots \ 0] \quad (G.35)$$

As forças não-lineares resultantes desse movimento, são:

$$\begin{aligned}
 FN_k(t_i) &= \frac{1}{2} [\dot{p}]^T(t_i) \frac{\partial}{\partial p_k} [D_{\lambda}][\dot{p}](t_i) + [N_k]^T[\dot{p}](t_i) = \\
 &= \frac{1}{2} \frac{\partial D_{i,i}}{\partial p_k} \dot{p}_i^2 - \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{\partial D_{j,i}}{\partial p_k} \dot{p}_j \right\} \dot{p}_i \quad (G.36)
 \end{aligned}$$

Analisando-se o segundo termo da expressão acima, observa-se que:

$$k=j : \frac{\partial D_{j,i}}{\partial p_k} \dot{p}_j \dot{p}_i = \frac{\partial D_{j,i}}{\partial p_j} \frac{\partial p_j}{\partial t} \dot{p}_i = \frac{\partial D_{j,i}}{\partial \dot{p}_i} \frac{\partial p_i}{\partial p_j} \frac{\partial p_j}{\partial t} \dot{p}_i = \frac{\partial D_{j,i}}{\partial p_i} \dot{p}_i^2 \quad (G.37)$$

$$k \neq j : \frac{\partial D_{j,i}}{\partial p_k} \dot{p}_j \dot{p}_i = 0$$

Substituindo-se em G.36 as relações G.37, chega-se à expressão das forças não-lineares ao longo da trajetória t_1 :

$$[FN](t_1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \frac{\partial D_{11}}{\partial p_1} - \frac{\partial D_{21}}{\partial p_1} \\ \dots \\ \frac{1}{2} \frac{\partial D_{11}}{\partial p_i} \\ \dots \\ \frac{1}{2} \frac{\partial D_{11}}{\partial p_m} - \frac{\partial D_{m1}}{\partial p_i} \end{bmatrix} \dot{p}_1^2 \quad (G.38)$$

Aplicando-se à expressão anterior o operador $[D_A]$ (equação G.35), obtém-se finalmente a expressão das forças não-lineares oriundas da movimentação do sistema entre duas configurações infinitesimalmente próximas, escrita em função dos auto-valores do tensor $[D_A]$.

$$[FN](t_1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda_1}{\partial p_1} - (\lambda_1 - \lambda_i) \frac{\partial \theta_{11}}{\partial p_1} \\ \dots \\ \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda_i}{\partial p_i} \\ \dots \\ \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda_i}{\partial p_m} - (\lambda_m - \lambda_i) \frac{\partial \theta_{m1}}{\partial p_i} \end{bmatrix} \quad (G.39)$$

H. MODELO CINEMÁTICO-DINÂMICO

H.1. Introdução

A modelagem cinemático-dinâmica de robôs seriais com graus de liberdade rotacionais e/ou translacionais que ora se apresenta é da autoria de M. Thomas e D. Tesar, podendo ser encontrada na referência [42]. Certos desenvolvimentos matemáticos e explicações que não se encontram no texto original foram incluídas de modo a torná-la mais facilmente compreensível e, além disso, foram considerados apenas os resultados referentes aos robôs com graus de liberdade rotacionais.

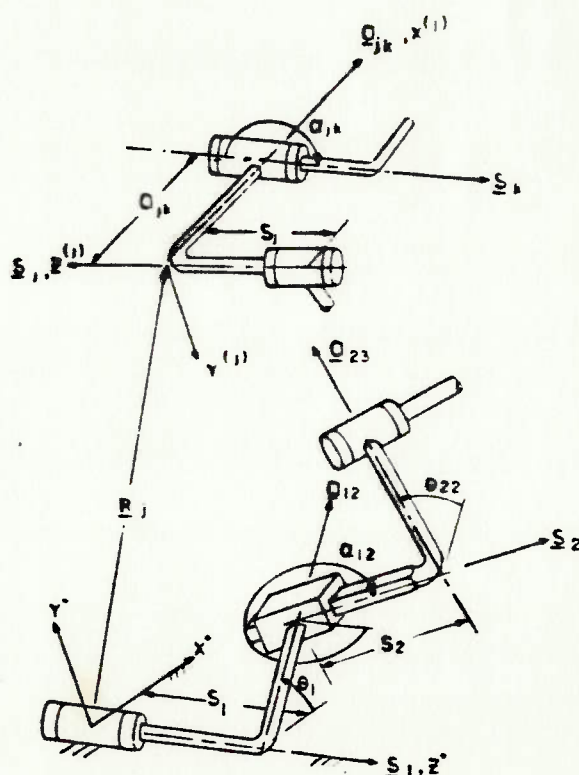


FIGURA H.1. Representação de um manipulador serial

H.2. Representação Topológica

Considere-se a figura H.1, onde um manipulador serial é representado como uma sequência de ligações estruturais rígidas unidas por articulações com 1 grau de liberdade rotacional.

A cada uma dessas articulações estão associados os parâmetros geométricos:

- 1o. s_j = distância medida ao longo do eixo de rotação entre dois corpos unidos pela junta;
 - 2o. θ_j = rotação relativa em torno de \vec{e}_j ;
- (Para cada articulação j , s_j é um valor fixo enquanto que θ_j é uma variável)

A estrutura de ligação jk associada a articulações sucessivas j e k é definida por 2 parâmetros geométricos fixos:

- 1o. a_{jk} = distância perpendicular entre os eixos de rotação j e k , medida ao longo da perpendicular comum a_{jk} ;
- 2o. α_{jk} = ângulo entre os eixos j e k medido de acordo com a regra da mão direita aplicada ao vetor \vec{a}_{jk} ;

Os versores $[s_j]$ e $[a_{jk}]$ são representados pelos respectivos cossenos diretores calculados em um sistema de referência ortogonal (X^*, Y^*, Z^*) fixo, com o eixo Z^* coincidente com o eixo da primeira articulação e os eixos X^* e Y^* arbitrários.

Além do sistema de referência fixo, são definidos, com origem em cada articulação, sistemas de referência ortogonais móveis (X^j, Y^j, Z^j) onde:

$$[X^j] = [a_{jk}] \quad ; \quad [Z^j] = [s_j] \quad ; \quad [Y^j] = [s_j] \times [a_{jk}] \quad (H.1)$$

As componentes dos vetores $[a_{jk}]$ e $[s_j]$ serão denotadas respectivamente por $(X_{jk}^*, Y_{jk}^*, Z_{jk}^*)$ e (X_j^*, Y_j^*, Z_j^*) .

H.3. Transformação de Coordenadas

A transformação de coordenadas de um ponto descrito no j -ésimo sistema de referência móvel para o sistema de referência fixo é realizada com o auxílio da matriz de rotação $[T_j]$, dada por:

$$[T_j] = \begin{bmatrix} [a_{jk}] & [s_j] \times [a_{jk}] & [s_j] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{jk}^* & (Y_j^* Z_{jk}^*) & X_j^* \\ Y_{jk}^* & (Z_j^* X_{jk}^*) & Y_j^* \\ Z_{jk}^* & (X_j^* Y_{jk}^*) & Z_j^* \end{bmatrix} \quad (H.2)$$

onde $(Y_j^* Z_{jk}^*) = \begin{vmatrix} Y_j^* & Z_j^* \\ Y_{jk}^* & Z_{jk}^* \end{vmatrix}$ e assim por diante $(H.3)$

A matriz $[T_j]$ relaciona o j -ésimo sistema de referência móvel com um sistema de mesma origem e eixos paralelos aos do sistema de referência global.

Sendo $[R_j]$ o vetor posição que localiza a origem do sistema móvel de ordem j relativamente ao sistema global (X^*, Y^*, Z^*) , a posição de um ponto $[P^j]$ qualquer loca-

lizado na estrutura jk pode ser descrita nas coordenadas do sistema de referência global a partir de:

$$[P] = [R_j][P_j] \quad (H.4)$$

onde o vetor $[R_j]$ é dado por:

$$[R_j] = s_1[s_1] + a_{12}[a_{12}] + s_2[s_2] + \dots + s_j[s_j] = s_1[s_1] + \sum_{l=2}^j (a_{l-1,l}[a_{l-1,l}] + s_l[s_l]) \quad (H.5)$$

Os versores $[a_{jk}]$ e $[s_j]$ podem ser determinados de uma forma recursiva com o auxílio das seguintes expressões:

$$(X_{1*}, Y_{1*}, Z_{1*}) = (0, 0, 1) = [s_1] \quad (H.6)$$

$$(X_{12*}, Y_{12*}, Z_{12*}) = (c\theta_1, s\theta_1, 0) = [a_{12}]$$

onde \underline{c} = cosseno e \underline{s} = seno

$$\begin{bmatrix} X_{j*} \\ Y_{j*} \\ Z_{j*} \end{bmatrix} = [T_{j-1}] \begin{bmatrix} 0 \\ -s\alpha_{j-1,j} \\ c\alpha_{j-1,j} \end{bmatrix} \quad (H.7)$$

$$\begin{bmatrix} X_{j-j+1*} \\ Y_{j-j+1*} \\ Z_{j-j+1*} \end{bmatrix} + [T_{j-1}] \begin{bmatrix} c\theta_j \\ c\alpha_{j-1,j}s\theta_j \\ s\alpha_{j-1,j}s\theta_j \end{bmatrix}$$

Utilizando-se as expressões H.4 a H.7 pode-se descrever em coordenadas globais a posição de um ponto genérico de quaisquer das N estruturas da cadeia cinemática.

H.4. Coefficientes de Influência Cinemática

O emprego dos coeficientes de influência cinemática de primeira e segunda ordem nas equações descritivas do movimento de robôs seriais é de grande utilidade pois conduz ao desacoplamento entre os parâmetros geométricos da estrutura do robô e as suas entradas dinâmicas $[\dot{\theta}]$ e $[\ddot{\theta}]$.

Esses coeficientes de influência - rotacional e translacional - são definidos a seguir.

H.4.1. Coefficientes de 1a. ordem

i. Influência rotacional

A velocidade angular da estrutura jk é dada pela soma das velocidades angulares relativas das estruturas precedentes, ou seja:

$${}^{0j}[\omega_{jk}] = {}^{01}[\omega_{12}] + {}^{12}[\omega_{13}] + \dots + {}^{ij}[\omega_{jk}] \quad (\text{H.8})$$

onde ${}^{ij}[\omega_{jk}]$ é a velocidade angular relativa entre estruturas sucessivas ij e jk .

Como cada estrutura é compelida fisicamente a girar em torno do eixo $[s_j]$, resulta:

$${}^{ij}[\omega_{jk}] = \dot{\theta}_j [s_j] \quad (\text{H.9})$$

de modo que:

$${}^{0j}[\omega_{jk}] = \sum_{n=1}^j \dot{\theta}_n [s_n] \quad (\text{H.10})$$

O coeficiente de influência rotacional de primeira ordem para a estrutura jk é definido pela expressão:

$$[\omega_{jk}] = [G_{jk}][\dot{\theta}] \quad (H.11)$$

$$\text{onde } [G_{jk}] = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_1} [\omega_{jk}] & \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_2} [\omega_{jk}] & \dots & \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [\omega_{jk}] \end{array} \right] \quad (H.12)$$

e o n -ésimo termo é dado por:

$$[G_{jk}]_n = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [\omega_{jk}] = \left[\begin{array}{c} \partial \omega_{jk}^x / \partial \dot{\theta}_n \\ \partial \omega_{jk}^y / \partial \dot{\theta}_n \\ \partial \omega_{jk}^z / \partial \dot{\theta}_n \end{array} \right] \quad (H.13)$$

Diferenciando-se a equação H.10 em relação a $\dot{\theta}_n$ obtém-se, de forma explícita, a expressão do coeficiente de influência rotacional de 1a. ordem:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [\omega_{jk}] &= \frac{\partial \dot{\theta}_1}{\partial \dot{\theta}_n} [s_1] + \dot{\theta}_1 \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [s_1] + \dots + \frac{\partial \dot{\theta}_m}{\partial \dot{\theta}_n} [s_m] + \dots + \frac{\partial \dot{\theta}_j}{\partial \dot{\theta}_n} [s_j] + \\ &+ \dot{\theta}_j \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [s_j] = [s_n] \end{aligned}$$

$$\text{de modo que } [G_{jk}]_n = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [\omega_{jk}] = \begin{cases} [s_n] & \text{para } n \leq j \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (H.14)$$

Portanto, para $n \leq j$, a influência de uma variação unitária no parâmetro θ_n sobre a estrutura jk consiste em uma rotação dessa estrutura em torno do eixo $[s_n]$; sendo $n > j$, a influência é nula.

ii. Influência translacional

A velocidade translacional de um ponto P fixo à estrutura jk é obtida diferenciando-se a expressão do vetor posição (P-O) descrito no sistema de referência global:

$$[P] = s_1[s_1] + \sum_{l=2}^j \{a_{1-1..1}[a_{1-1..1}] + s_1[s_1]\} + [T_j][P^j] \quad (H.15)$$

ou seja:

$$[V_p] = \dot{s}_1[s_1] + \sum_{l=2}^j \{a_{1-1..1}[a_{1-1..1}] + s_1[s_1]\} + \frac{d}{dt} \{[T_j][P^j]\} \quad (H.16)$$

Como os vetores a serem diferenciados são fixos em relação às estruturas que orientam, a derivada temporal de cada um deles é dada pelo seu produto vetorial com a velocidade angular da correspondente estrutura [23]:

$$\begin{aligned} [V_p] &= \sum_{l=2}^j [\omega_{j,k}] \times \{a_{1-1..1}[a_{1-1..1}] + s_1[s_1]\} + [\omega_{j,k}] \times \{[T_j][P^j]\} = \\ &= \sum_{l=2}^j \left\{ \left[\sum_{n=1}^j \dot{\theta}_n[s_n] \times (a_{1-1..1}[a_{1-1..1}] + s_1[s_1]) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\sum_{n=1}^j \dot{\theta}_n[s_n] \right] \times [T_j][P^j] \right\} = \\ &= \sum_{n=1}^j \left\{ \dot{\theta}_n[s_n] \times \left(\sum_{l=n+1}^j (a_{1-1..1}[a_{1-1..1}] + s_1[s_1]) + [T_j][P^j] \right) \right\} \quad (H.17) \end{aligned}$$

O termo à direita do produto vetorial é o próprio vetor (P-O) descrito em coordenadas do n-ésimo sistema de referência, isto é:

$$\sum_{i=0}^j (a_{i-1,1} [a_{i-1,1}] + s_1 [s_1]) + [T_j] [P^j] = [P] - [R_n] \quad (H.18)$$

Dessa simplificação, resulta:

$$[V_p] = \sum_{n=1}^j (\dot{\theta}_n [s_n] \times ([P] - [R_n])) \quad (H.19)$$

Os coeficientes de influência translacional de 1a. ordem ficam definidos a partir da expressão:

$$[V_p] = [G_p] [\dot{\theta}] \quad (H.20)$$

$$\text{onde } [G_p] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_1} [V_p] & \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_2} [V_p] & \dots & \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [V_p] \end{bmatrix} \quad (H.21)$$

e o n-ésimo termo dessa matriz é o vetor

$$[G_p]_n = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_n} [V_p] = \begin{bmatrix} \partial V_{p_x} / \partial \dot{\theta}_n \\ \partial V_{p_y} / \partial \dot{\theta}_n \\ \partial V_{p_z} / \partial \dot{\theta}_n \end{bmatrix} \quad (H.22)$$

Diferenciando-se a equação H.19 em relação a $\dot{\theta}_n$ obtém-se explicitamente a expressão do n-ésimo coeficiente de influência translacional de 1a. ordem:

$$[G_p]_n = \begin{cases} [s_n] \times ([P] - [R_n]) & \text{para } n \leq j \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (H.23)$$

Portanto, a influência de uma variação unitária na velocidade de rotação $\dot{\theta}_n$ da articulação n sobre a velocidade de um ponto P fixo à estrutura jk , é dada por $[s_n] \times ([P] - [R_n])$ se a articulação n preceder a estrutura jk ; a influência é nula em caso contrário.

H.4.2. Coefficientes de influência de 2a. ordem

i. Influência rotacional

A aceleração angular da estrutura jk é obtida diferenciando-se a expressão H.11 relativamente ao tempo:

$$[\Lambda_{jk}] = \frac{d}{dt} [G_{jk}] [\dot{\theta}] + [G_{jk}] [\ddot{\theta}] \quad (H.24)$$

$$\text{sendo } \frac{d}{dt} [G_{jk}] = \begin{cases} [s_n] & \text{para } n < j \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (H.25)$$

A influência da m -ésima rotação θ_m sobre o n -ésimo coeficiente de influência rotacional de 1a. ordem é medida por:

$$[H_{jk}]_{m,n} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \left\{ \frac{d}{dt} [G_{jk}]_{,n} \right\} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} [G_{jk}]_{,n} \quad (H.26)$$

que é o termo geral da matriz $[H_{jk}]$ dos coeficientes de influência rotacional de 2a. ordem. Dentro de $[H_{jk}]$, o vetor $[H_{jk}]_{m,n}$ situa-se na linha m e coluna n e a sub-matriz $[H_{jk}]_{,n}$ ocupa toda a coluna n . Portanto, a derivada temporal

da matriz dos coeficientes de influência rotacional de 1ª. ordem relativa à n-ésima articulação, é dada por:

$$\frac{d}{dt} [G_{jk}]_m = [\dot{\theta}]^T [H_{jk}]_{r,n} \quad (H.27)$$

Substituindo-se essa expressão em H.24, resulta:

$$[\Lambda_{jk}] = [\dot{\theta}]^T [H_{jk}] [\dot{\theta}] + [G_{jk}] [\ddot{\theta}] \quad (H.28)$$

a qual, separada em suas componentes escalares, dá origem a 3 equações na forma:

$$\Lambda_{jkx} = [\dot{\theta}]^T [H_{jkx}] [\dot{\theta}] + [G_{jkx}] [\ddot{\theta}] \quad \text{e ídem para } y \text{ e } z \quad (H.29)$$

A partir das equações H.25 e H.26, pode-se explicitar os coeficientes de influência rotacional de 2ª. ordem:

$$\begin{aligned} [H_{jk}]_{m,r,n} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \left\{ \frac{d}{dt} [G_{jk}]_m \right\} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \{ [\omega_{jk}] \times [G_{jk}]_m \} = \\ &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \left\{ \left(\sum_{l=1}^j \dot{\theta}_l [s_l] \right) \times [s_m] \right\} = \\ &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \{ (\dot{\theta}_1 [s_1] + \dots + \dot{\theta}_m [s_m] + \dots + \dot{\theta}_j [s_j]) \times [s_m] \} \\ &= \begin{cases} [s_m] \times [s_m] \text{ para } m < n < j \\ 0 \text{ em caso contrário} \end{cases} \quad (H.30) \end{aligned}$$

Portanto, a influência de uma variação unitária no parâmetro $\dot{\theta}_m$ sobre a taxa de variação temporal do n-ésimo coeficiente de influência rotacional de primeira ordem relativo à estrutura jk é dada por $[s_m] \times [s_m]$ para $m < n < j$, sendo nula em caso contrário.

ii. Influência translacional

Diferenciando-se a expressão H.20 relativamente ao tempo, obtém-se:

$$[A_p] = [\dot{V}_p] = \frac{d}{dt}[G_p][\dot{\theta}] + [G_p][\ddot{\theta}] \quad (H.31)$$

Definindo-se a matriz dos coeficientes de influência translacional de 2a. ordem como:

$$\frac{d}{dt}[G_p] = [\dot{\theta}]^T [H_p] \quad (H.32)$$

$$\text{onde } [H_p]_{m,n} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \left\{ \frac{d}{dt} [G_p]_{,n} \right\} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} [G_p]_{,n} \quad (H.33)$$

$$\text{resulta: } [A_p] = [\dot{\theta}]^T [H_p][\dot{\theta}] + [G_p][\ddot{\theta}] \quad (H.34)$$

Utilizando-se as expressões H.22 e H.33 obtém-se de forma explícita os coeficientes de influência translacional de 2a. ordem:

$$\begin{aligned} [H_p]_{m,n} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \left\{ \frac{d}{dt} ([s_m] \times ([P] - [R_n])) \right\} = \\ &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} ([\Lambda_{j,k}] \times ([s_m] \times ([P] - [R_n]))) = \\ &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \left(\left(\sum_{i=1}^j \dot{\theta}_i [s_i] \right) \times ([s_m] \times ([P] - [R_n])) \right) = \end{aligned}$$

$$= \begin{cases} [s_m]x([s_n]x([P]-[R_n])) & \text{para } m \leq n \leq j \\ [s_n]x([s_m]x([P]-[R_n])) & \text{para } n \leq m \leq j \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (\text{H.35})$$

Portanto, a influência de uma variação unitária no parâmetro θ_m sobre a taxa de variação temporal do n -ésimo ($n \leq j$) coeficiente de influência translacional de 1a. ordem relativo a um ponto [P] fixo à estrutura jk é dada por $[s_m]x([s_n]x([P]-[R_n]))$ se $m \leq n \leq j$ ou por $[s_n]x([s_m]x([P]-[R_n]))$ se $n \leq m \leq j$, sendo nula nos demais casos.

H.5. Determinação das Velocidades e Acelerações

Tomando-se por referência a cadeia cinemática da figura H.1 e utilizando-se os coeficientes de influência definidos acima, serão determinados:

- 1o. O estado cinemático-dinâmico de um dispositivo terminal ligado à última estrutura da cadeia cinemática a partir de informações acerca dos estados cinemático-dinâmicos de cada uma das articulações;
- 2o. O estado cinemático-dinâmico de cada uma das articulações a partir do conhecimento do estado cinemático-dinâmico de um dispositivo terminal, ligado à última estrutura da cadeia cinemática (problema inverso);

O estado de velocidades de um dispositivo terminal (B) de forma qualquer é definido por 2 vetores de velocidade:

1o. Velocidade angular $[\omega_H] = [\omega_{N..N+1}]$;

2o. Velocidade translacional $[v_H]$ de um ponto de referência H fixo a (B);

Seja $[V_H]$ o vetor que contém as 3 componentes da velocidade angular $[\omega_H]$ e as 3 da velocidade translacional $[v_H]$. Utilizando-se os coeficientes de influência de 1a. ordem, resulta:

$$[V_H] = \begin{bmatrix} [v_H] \\ [\omega_{N..N+1}] \end{bmatrix} \quad (\text{H.36})$$

$$\text{ou ainda: } [V_H] = [J][\dot{\theta}] \quad (\text{H.37})$$

em que $[J]$ é o jacobiano da transformação do sistema de coordenadas naturais $(\theta_1, \dots, \theta_N)$ para o sistema de coordenadas globais $(X, Y, Z, \phi, \psi, \zeta)$:

$$[J] = \begin{bmatrix} [G_H] \\ [G_{N..N+1}] \end{bmatrix} \quad (\text{H.38})$$

Analogamente, pode-se determinar o estado de acelerações de (B) a partir de:

1o. aceleração angular $[\tau_H] = [\tau_{N..N+1}]$;

2o. aceleração translacional $[a_H]$ de um ponto de referência H fixo a (B);

Sendo $[A_H]$ o vetor que contém as 3 componentes da aceleração angular e as 3 da aceleração translacional, resulta:

$$\begin{aligned}
[A_H] &= \begin{bmatrix} [a_H] \\ [\tau_{N..N+1}] \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} [\dot{\theta}]^T [H_H] [\dot{\theta}] \\ [\dot{\theta}]^T [H_{N..N+1}] [\dot{\theta}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [G_H] \\ [G_{N..N+1}] \end{bmatrix} [\ddot{\theta}] \\
&= [A_{H\checkmark}] + [J][\ddot{\theta}] \tag{H.39}
\end{aligned}$$

onde $[A_{H\checkmark}]$ é a parcela da aceleração de (B) associada às velocidades $[\dot{\theta}]$ das articulações - acelerações centrífuga e de Coriolis.

Desde que a cadeia cinemática do robô possua 6 graus de liberdade ($N=6$) e que o jacobiano $[J]$ seja não singular, é possível determinar os estados dinâmicos das articulações a partir do estado dinâmico de (B):

$$[\dot{\theta}] = [J]^{-1} [V_H] \tag{H.40}$$

$$[\ddot{\theta}] = [J]^{-1} \{ [A_H] - [A_{H\checkmark}] \} \tag{H.41}$$

Existem numerosas configurações para as quais $[J]$ é singular (para os robôs articulados, basta que os eixos dos seus braços se encontrem alinhados) não podendo, portanto, ser invertido. Nestes casos, não existe um conjunto único de velocidades e acelerações das articulações capaz de originar um determinado estado dinâmico de (B) estabelecido a priori, tornando-se necessário o emprego de algum(ns) critério(s) adicional(is) para a eliminação da redundância.

H.6. Determinação dos Torques

Em cada articulação n do robô, o equilíbrio dinâmico se estabelece a partir da interação de 4 componentes de torque:

- 1a. Torque estático T_{n^L} : torque oriundo da aplicação de cargas estáticas (cargas gravitacionais) ao sistema;
- 2a. Torque inercial T_{n^I} : torque requerido para acelerar a inércia do sistema;
- 3a. Torque viscoso T_{n^B} : torque devido às forças de atrito nos mecanismos;
- 4a. Torque motor T_{n^M} : torque suprido pelo sistema de acionamento;

Desprezando-se os efeitos de atrito, em uma dada configuração $[\theta]$ associada a estados $[\dot{\theta}]$ e $[\ddot{\theta}]$, o torque suprido pelo sub-sistema atuador da articulação n deverá equilibrar os torques inercial e estático equivalentes de n , ou seja:

$$T_{n^M} = T_{n^I} - T_{n^L} \quad (H.42)$$

As expressões dos torques equivalentes estático e inercial em torno do eixo $[s_n]$ serão determinadas nos itens a seguir.

i. Componente estática

Aplicando-se o Princípio dos Trabalhos Virtuais à articulação n , resulta que o trabalho virtual realizado pelo

torque estático equivalente em torno do eixo $[s_m]$ é igual à soma dos trabalhos virtuais de todas as forças e momentos aplicados a cada uma das estruturas jk do robô, ou seja:

1. Trabalho virtual realizado pelo torque equivalente T_m^L em torno de $[s_m]$:

$$W = T_m^L (\dot{\theta}_m \delta t) \quad (H.43)$$

2. Trabalho virtual devido aos momentos $[m_{j,k}]$ aplicados às diversas estruturas:

$$W_1 = \sum_{j=1}^N [m_{j,k}]^T [\omega_{j,k}] \delta t = \sum_{j=1}^N [m_{j,k}] [G_{j,k}]_m \dot{\theta}_m \delta t \quad (H.44)$$

3. Trabalho virtual devido às q cargas aplicadas de forma estática às diversas estruturas do robô:

$$W_2 = \sum_{r=1}^q [F_{P_r}]^T [v_{P_r}] t = \sum_{r=1}^q [F_{P_r}]^T [G_{P_r}]_m \dot{\theta}_m \delta t \quad (H.45)$$

Sendo $\delta W = \delta W_1 + \delta W_2$, resulta:

$$T_m^L = \sum_{r=1}^q ([F_{P_r}]^T [G_{P_r}]_m) + \sum_{j=1}^N ([m_{j,k}]^T [G_{j,k}]_m) \quad (H.46)$$

onde $[F_{P_r}]$ é a força aplicada a um ponto P_r do robô e

$[m_{j,k}]$ é o momento aplicado à estrutura jk do robô

Em geral, as forças $[F_{P_r}]$ são os pesos de cada uma das estruturas articuladas bem como o peso da carga transportada juntamente com o dispositivo terminal, os pontos P_r sendo os respectivos centros de gravidade. Os momentos $[m_{j,k}]$

são normalmente nulos para todas as estruturas articuladas, com exceção da última que suporta o peso excêntrico do sistema (dispositivo terminal) + (carga).

ii. Componente inercial

As componentes inerciais dos torques equivalentes nas articulações podem ser determinadas a partir das equações do movimento de Lagrange aplicadas a um sistema de corpos serialmente articulados.

A energia cinética de um robô em movimento é dada por:

$$K = (1/2) \sum_{j=1}^N \{ M_{jk} [v_{C_j}]^T [v_{C_j}] + [\omega_{jk}]^T [II_{jk}] [\omega_{jk}] \} \quad (H.47)$$

onde M_{jk} é a massa da estrutura jk com centro de gravidade em C_j e $[II_{jk}]$ é o tensor de inércia dessa estrutura em torno de C_j , descrito nos eixos do sistema de referência fixo.

Enquanto $[II_{jk}]$ depende da orientação da estrutura jk no espaço, o mesmo não ocorre com o tensor $[II_{jk}^j]$ associado a um referencial fixo à estrutura jk com origem em seu centro de gravidade. Como a energia cinética é invariante com o particular sistema de referência adotado, ou seja:

$$[\omega_{jk}]^T [II_{jk}] [\omega_{jk}] = [\omega_{jk}^j]^T [II_{jk}^j] [\omega_{jk}^j] \quad (H.48)$$

$$\text{e } [\omega_{jk}^j] = [T_j]^{-1} [\omega_{jk}] = [T_j]^T [\omega_{jk}] \quad (H.49)$$

resulta:

$$[\omega_{jk}]^T [II_{jk}] [\omega_{jk}] = \{ [T_j]^T [\omega_{jk}] \}^T [II_{jk}^j] \{ [T_j]^T [\omega_{jk}] \} =$$

$$= [\omega_{j,k}]^T [T_j] [II_{j,k}] [T_j]^T [\omega_{j,k}]$$

$$\text{isto é: } [II_{j,k}] = [T_j] [II_{j,k}^0] [T_j]^T \quad (\text{H.50})$$

Introduzindo-se em H.47 os coeficientes de influência, obtém-se:

$$\begin{aligned} K &= (1/2) \sum_{j=1}^N \{ M_{j,k} [\dot{\theta}]^T [G_{c,j}]^T [G_{c,j}] [\dot{\theta}] + [\dot{\theta}]^T [G_{j,k}]^T [II_{j,k}] [G_{j,k}] [\dot{\theta}] \} \\ &= (1/2) [\dot{\theta}]^T [I^*] [\dot{\theta}] \end{aligned} \quad (\text{H.51})$$

$$\text{onde } [I^*] = \sum_{j=1}^N \{ M_{j,k} [G_{c,j}]^T [G_{c,j}] + [G_{j,k}]^T [II_{j,k}] [G_{j,k}] \} \quad (\text{H.52})$$

A matriz simétrica $[I^*]$ é denominada matriz equivalente de inércia, associando a cada entrada $\dot{\theta}$, do sistema a "massa efetiva" (componentes da diagonal) e a inércia devida ao acoplamento 2 a 2 entre as diversas entradas. O elemento (m,n) dessa matriz é dado por:

$$I_{m,n}^* = \sum_{j=1}^N \{ M_{j,k} [G_{c,j}]_m^T [G_{c,j}]_n + [G_{j,k}]_m^T [II_{j,k}] [G_{j,k}]_n \} \quad (\text{H.53})$$

O torque generalizado de inércia em torno do eixo $[s_m]$ é dado pelas equações de Lagrange:

$$T_m^i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_m} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_m} \quad (\text{H.54})$$

Substituindo-se H.51 na expressão acima, obtém-se:

$$T_m^i = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \left(\frac{1}{2} [\dot{\theta}]^T [I^*] [\dot{\theta}] \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial \theta_m} \left\{ \frac{1}{2} [\dot{\theta}]^T [I^*] [\dot{\theta}] \right\} =$$

Agrupando-se os resultados expressos por H.55 a H.57, obtém-se finalmente o momento generalizado de inércia em torno do eixo $[s_m]$:

$$\begin{aligned} T_{m^1} &= [\ddot{\theta}]^T [I^*]_{,m} + [\dot{\theta}]^T \left(\frac{\partial}{\partial [\dot{\theta}]} [I^*]_{,m} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_m} [I^*] \right) [\dot{\theta}] = \\ &= [\ddot{\theta}]^T [I^*]_{,m} + [\dot{\theta}]^T [P_m] [\dot{\theta}] \end{aligned} \quad (H.58)$$

onde os componentes da matriz de potência de inércia na articulação \underline{n} , $[P_m]$ são dados por:

$$[P_m]_{1,m} = \frac{\partial}{\partial \theta_m} [I^*]_{1,m} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_m} [I^*]_{1,m} \quad (H.59)$$

que, desenvolvidos, resultam em:

$$\begin{aligned} [P_m]_{1,m} &= \sum_{j=1}^N (M_{jk} [H_{cj}]_{1,m}^T [G_{cj}]_m + [H_{jk}]_{1,m}^T [II_{jk}] [G_{jk}]_m + \\ &+ [G_{jk}]_1^T [II_{jk}] ([G_{jk}]_m \times [G_{jk}]_m)) \end{aligned} \quad (H.60)$$

1. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DISPOSITIVOS HIDRAULICOS

1.1. Dispositivos Transformadores de Potência

Para os dispositivos hidráulicos transformadores de potência, as curvas características são relações de transformação estática entre variáveis hidráulicas (pressão e vazão) e variáveis mecânicas (torque e velocidade angular ou força e velocidade linear), as quais dependem, fundamentalmente, do mecanismo utilizado para a transformação.

As curvas características de certos dispositivos de potência utilizados em robôs são apresentadas a seguir.

i. Cilindro hidráulico de haste simples

Transforma a pressão e a vazão fornecidas em força e velocidade (conforme figuras I.1.a-b), de acordo com as relações:

$$F_a = P_a A_m - P_r A_m \quad (I.1)$$

$$V_a = Q_a / A_m = Q_r / A_m$$

$$F_b = P_b A_m - P_r A_m \quad (I.2)$$

$$V_b = Q_b / A_m = Q_r / A_m$$

onde A_m e A_m são, respectivamente, as áreas maior e menor dos êmbolos, dadas, por:

$$A_m = \pi D^2 / 4 \quad \text{e} \quad A_m = \pi (D^2 - d^2) / 4 \quad (I.3)$$

e os índices s e r se referem, respectivamente, a "fonte" e "retorno".

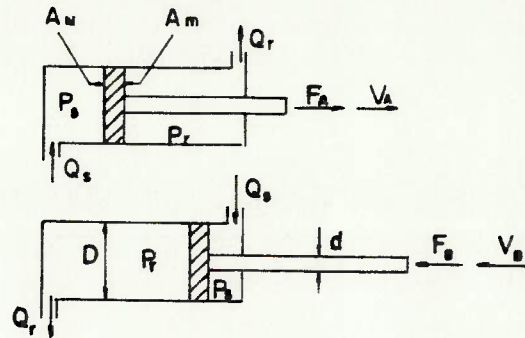


FIGURA I.1. Operação de um cilindro hidráulico

ii. Atuador rotativo de aleta simples

Transforma a pressão e a vazão fornecidas em torque e velocidade angular, de acordo com as relações:

$$T = (P_s - P_r)(R^2 - r^2)h/2$$

$$= 2Q/[(R^2 - r^2)h]$$

(I.4)

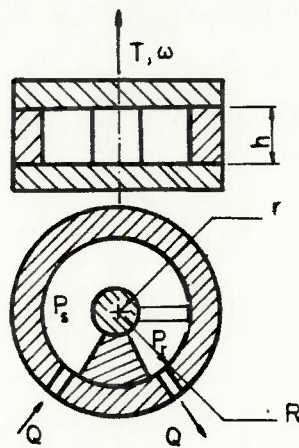


FIGURA I.2. Dimensões características de um atuador rotativo

onde h, R e r são, respectivamente, a altura, o raio externo e o raio interno das câmaras, conforme indicado na figura I.2.

iii. Motor hidráulico

Transforma a pressão e a vazão supridas em torque e velocidade angular, de acordo com relações complexas normalmente obtidas através de ensaios. Na figura I.3 apresenta-se as curvas características do motor de 21 pistões radiais (modelo KM 21/21Z da G.DUSTERLOH GmbH) utilizado no acionamento da base giratória do robô da Universidade de São Paulo.

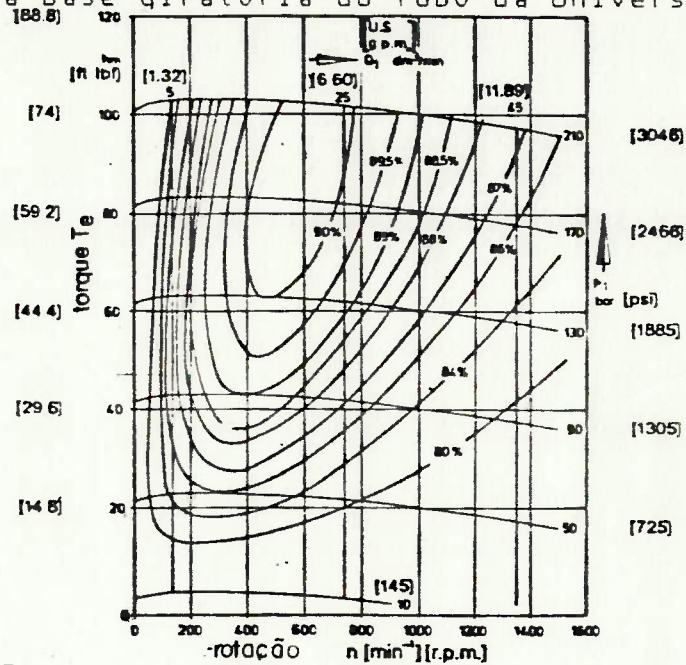


FIGURA I.3. Curvas características de um motor de pistões radiais

I.2. Dispositivos Controladores de Potência

As servo-válvulas de 4 vias com duplo estágio são bastante adequadas ao controle dos dispositivos hidráulicos de acionamento de robôs, apresentando alta resolução e linearidade, rápidas respostas e baixo índice de histerese.

Essas válvulas (ver figura I.4) possuem 4 resistências hidráulicas moduladas simultaneamente pela posição y do carretel ("spool"). Quando a válvula é conectada a uma fonte de pressão e a uma carga (dispositivo atuador qualquer), consideráveis fluxos de potência hidráulica são comandados por pequenos movimentos do carretel o qual, por sua vez, é acionado por um pequeno motor elétrico controlado por sinais de corrente.

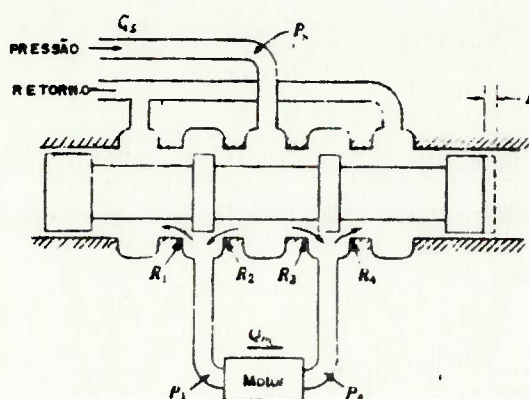


FIGURA I.4. Estágio hidráulico de uma servo-válvula

O circuito de uma servo-válvula pode ser modelado como uma ponte de Wheatstone com 4 resistências hidráulicas não lineares [26].

As curvas características das servo-válvulas fornecidas pelos fabricantes são, via de regra, apresentadas na forma de gráficos como os da figura I.5.a - que descreve a variação da vazão do circuito sem carga em função da queda de pressão da válvula - e da figura I.5.b - que descreve a variação percentual da vazão de controle em função da queda

percentual da pressão P na carga e da porcentagem de corrente de controle utilizada.

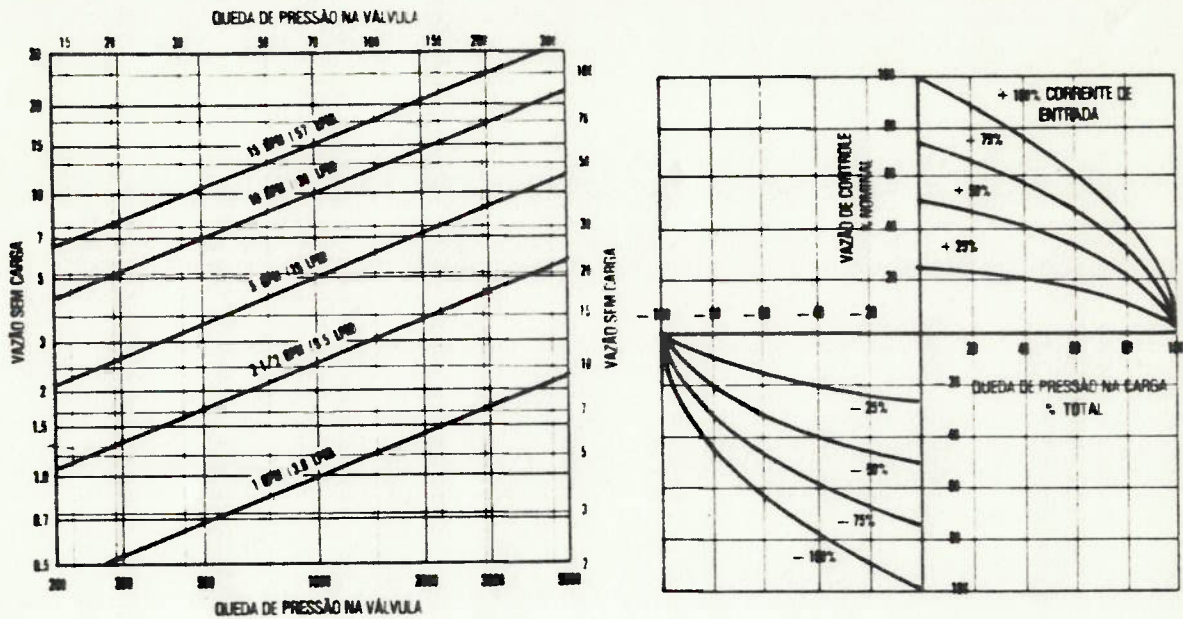


FIGURA I.5. Curvas características da servo-válvula 20-76 MOOG: a. Vazão X queda de pressão (circuito sem carga) b. Variação percentual da vazão X queda percentual de pressão

A expressão da vazão de controle Q_L em função da queda de pressão na válvula aproxima-se bastante de uma relação quadrática [20], da forma:

$$Q_L = K I (P_v)^{1/2} \quad (I.5)$$

onde K é uma constante que depende da forma das bordas dos orifícios e I é a corrente de controle.

A relação entre os valores de pressão-vazão para o circuito com carga podem ser expressos em função dos valores nominais (circuito sem carga) a partir de:

$$Q_L / Q_{L_n} = (I / I_n) [P_v / P_{v_n}]^{1/2} = (I / I_n) [1 - PL / (P_{v_n} - P_m)]^{1/2} \quad (I.6)$$

onde os índices n se referem aos valores nominais (circuito sem carga) e PL é a pressão do circuito com carga.

J. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE SERVO-ATUADORES HIDRAULICOS

J.1. Hipóteses preliminares

As funções de transferência dos dispositivos de atuação servo-hidráulicos que se apresentam a seguir têm validade desde que se considerem as seguintes hipóteses básicas:

1. O coeficiente de compressibilidade do fluido ("Bulk modulus") é independente da pressão;
2. A pressão da fonte (P_s) é constante;
3. A pressão de retorno (P_r) é nula;
4. As condições dos orifícios de entrada e saída da servo-válvula são similares;
5. Os vazamentos internos são de origem puramente viscosa;
6. O fluido não possui inertância;
7. O escoamento é não-cavitante;
8. A curva de operação da servo-válvula $Q = Q(x, P_1)$, onde x é a coordenada da posição do carretel ("spool") e P_1 é a queda de pressão na válvula, é substituída por uma curva linearizada, na forma:

$$Q = K_v x - K_c P_1 \quad (J.1)$$

onde $K_v = \partial Q / \partial x$ é o ganho de vazão e

$K_c = \partial Q / \partial P$, é o ganho de pressão-vazão da servo-válvula

Os coeficientes K_1 e K_2 são parâmetros da servo-válvula extremamente importantes, que afetam diretamente a sua estabilidade, resposta em frequência e demais características dinâmicas. Os valores dos coeficientes da válvula variam com o ponto de operação. Do ponto de vista de estabilidade, a origem das curvas pressão-vazão, isto é, o ponto $P_1=Q_1=x_v=0$ é o mais crítico, apresentando o maior ganho de vazão (e, portanto, o maior ganho do sistema) e o menor ganho de pressão-vazão (e, portanto, a mais baixa taxa de amortecimento).

J.2. Dinâmica da Servo-Válvula

Para as servo-válvulas de duplo estágio e controle de vazão, a função de transferência relacionando a vazão de saída com a corrente de controle, é dada por:

$$\frac{Q(s)}{I(s)} = G_{ve}(s) \cdot G_{vh}(s) \quad (J.2)$$

onde $G_{ve}(s)$ - função de transferência do estágio elétrico - e G_{vh} - função de transferência do estágio hidráulico - são expressas por:

$$G_{ve}(s) = \frac{K_1}{1+sT_m} \quad (J.3)$$

$$G_{vh}(s) = \frac{K_2}{\left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\zeta_v s}{\omega_v} + 1 \right)} \quad (J.4)$$

Sendo:

T_m = constante de tempo indutiva do torque do motor elétrico

ω_n = frequência angular natural

ζ_n = fator de amortecimento

K_e = ganho do estágio elétrico

K_h = ganho do estágio hidráulico

Os valores que comparecem nas expressões J.3 e J.4 são obtidos através de ensaios e fazem parte, normalmente, do conjunto de especificações fornecidas pelos fabricantes de servo-válvulas.

É importante destacar ainda que, via de regra, as frequências naturais do estágio hidráulico da servo-válvula são bastante altas, encontrando-se acima da faixa de frequências que devem ser consideradas para efeito de controle. Portanto, muitas vezes modela-se a servo-válvula como um sistema de primeira ordem com constante de tempo T_m .

J.3. Cilindro Hidráulico Servo-Controlado

Considere-se a figura J.1, onde um cilindro hidráulico de haste dupla, comandado por uma servo-válvula, aciona uma carga com massa M que desliza sobre uma superfície sem atrito.

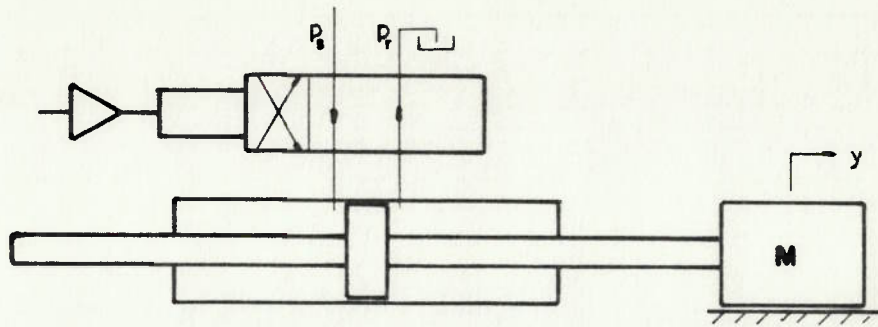


FIGURA J.1. Cilindro hidráulico servo-comandado acionando carga inercial

A função de transferência que relaciona a posição Y da carga com a vazão Q de entrada no cilindro é dada por:

$$\frac{Y(s)}{Q(s)} = \frac{1}{\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta_1 s}{\omega_n} + 1 \right) A s} \quad (J.5)$$

Sendo:

ω_n = frequência natural da carga

ζ_1 = fator de amortecimento da carga

A = área do pistão

A configuração em que o êmbolo do cilindro se encontra a meio curso é a que dá origem às menores frequências naturais. Nessa situação, valem as seguintes expressões:

$$\omega_n = 2[BA^2/(MV)]^{1/2} \quad (J.6)$$

$$\zeta_1 = [K_c/(2A)][MB/V]^{1/2} \quad (J.7)$$

onde:

B = coeficiente de compressibilidade do fluido

V = volume do cilindro

É importante destacar que os parâmetros característicos (frequência natural e fator de amortecimento) da função de transferência expressa por J.5, são dependentes da posição Y da carga

J.4. Motor Hidráulico Servo-Controlado

Considere-se a figura J.2, onde um motor hidráulico comandado por uma servo-válvula aciona uma carga predominantemente inercial diretamente acoplada ao seu eixo.

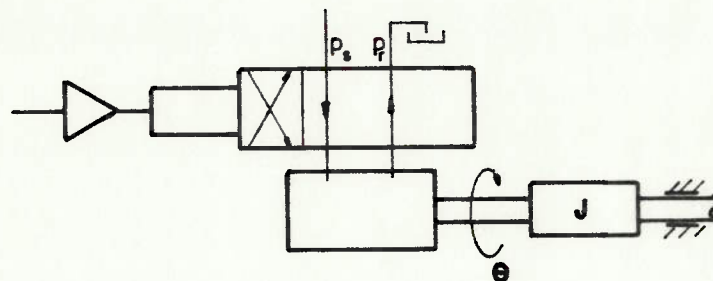


FIGURA J.2. Motor hidráulico servo-comandado acionando carga inercial

A função de transferência que relaciona a posição angular θ_m do eixo do motor com o deslocamento x_v do carretel da servo-válvula, é dada por:

$$\frac{\theta_m(s)}{x_c(s)} = \frac{K_{ce}/D_m}{\left(\frac{s^2}{\omega_{1c}^2} + \frac{2\zeta_{1c}}{\omega_{1c}}s + 1 \right)} \quad (\text{J.8})$$

Sendo:

ω_{1c} = frequência natural de vibração da carga

ζ_{1c} = fator de amortecimento da carga

D_m = deslocamento do motor (volume/rad)

A frequência natural de vibração da carga e o fator de amortecimento são expressos por:

$$\omega_{1c} = [4BD_m^2 / (V_L J_L)]^{1/2} \quad (\text{J.9})$$

$$\zeta_{1c} = (K_{ce}/D_m)[BJ_L/V_L]^{1/2} + (B_m/4D_m)[V_L/(BJ_L)]^{1/2} \quad (\text{J.10})$$

Sendo:

V_L é o volume total do óleo confinado no motor

J_L é o momento de inércia da carga e do motor, considerados como massas concentradas em torno do seu eixo

B_m é o coeficiente de amortecimento viscoso da carga, incluindo o amortecimento interno do motor

K_{ce} é o coeficiente total de pressão-vazão do motor, dado por:

$$K_{ce} = K_c + C_{i,m} + C_{e,m}/2 \quad (\text{J.11})$$

onde $C_{i,m}$ é o coeficiente de vazamento interno do motor (de

uma linha para outra)

C_{m} é o coeficiente de vazamento externo do motor (de
uma linha para o dreno)

K. DESENHOS DO PROTÓTIPO DE ROBO INDUSTRIAL DA USP

Em anexo seguem os desenhos de conjunto mais significativos do sub-sistema mecânico do protótipo de robô industrial desenvolvido pelo Centro de Computação da USP.

Esses desenhos são executados de acordo com a norma NB-8.