

JOÃO BAPTISTA TEIXEIRA DA SILVA

SIMULAÇÃO E CONTROLE DE
UM ROBÔ DE PINTURA

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da USP
para obtenção do título
de Mestre em Engenharia
Mecânica.

1988

São Paulo, 1988

FD. 1005

JOÃO BAPTISTA TEIXEIRA DA SILVA
Engenheiro Mecânico, UFRGS, 1979

SIMULAÇÃO E CONTROLE DE
UM ROBÔ DE PINTURA

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da USP
para obtenção do título
de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Sotelo Jr., Depto. Eng. Mecânica

São Paulo, 1988

AGRADECIMENTOS

A Deus pela possibilidade de concluir este trabalho.

À minha esposa Lígia e às minhas filhas Patrícia e Maia pelo amor e compreensão, sobretudo em alguns momentos muito difíceis pelos quais passamos.

A meus pais pelo permanente exemplo de dedicação e persistência.

Ao Prof. Sotelo pela criteriosa orientação ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao Grupo Mangels pelo apoio e facilidades propiciadas e em especial aos colegas Luís Caldas, Estéfano Stábile e Volnei Campana da MEEL, Marta e Ferreira da MSI, pela ajuda desinteressada e fraterna nos momentos mais preciosos.

Ao amigo Linilson Padovese pelos estímulos positivos distribuídos ao longo da redação desta dissertação.

À Ima - Serviços Datilográficos pela cuidadosa datilografia deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador dinâmico flexível de um robô de pintura servo-hidráulico e do próprio processo de pintura.

Os modelos matemáticos adequados foram computacionalmente implementados. O simulador mostrou-se consistente em seus resultados, consumindo grande tempo computacional.

Avalia-se o desempenho de um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) digital — no controle dos movimentos de um robô de pintura, — por meio de simulações. Os resultados foram razoáveis, revelando contudo algumas limitações do controlador.

Apresenta-se, ainda, breve discussão sobre a utilização de alguns modelos matemáticos no projeto de sistemas robóticos.

ABSTRACT

This work presents the development of a flexible dynamic spray painting robot's simulator together with the modelling and simulation of just the painting process involved.

The adequate mathematical models were computationally implemented.

The simulator generate consistent results, consuming large computational processing time.

It is considered the performance of one digital PID (proportional-integral-derivative) controller in controlling the spray painting robot's movements, by means of simulations. The results were reasonable but there are some applicability controller's limitations.

Applications of some mathematical models to the robotics systems design are briefly discussed.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MODELOS MATEMÁTICOS DO MECANISMO.....	15
2.1. Modelo Geométrico Direto.....	15
2.2. Modelo Geométrico Inverso.....	18
2.3. Modelo Dinâmico Inverso.....	21
2.4. Modelo Dinâmico Direto.....	25
2.5. Utilização Direta dos Modelos Matemáticos.....	26
3. CONTROLE DO ROBÔ.....	31
4. SIMULAÇÃO DINÂMICA DO ROBÔ.....	43
4.1. Estrutura do Simulador.....	43
4.2. Resultados Numéricos.....	53
4.2.1. Influência da frequência 'FRQP' na velocidade média de movimentação da pistola de pintura.....	57
4.2.2. Influência da força virtualmente proveniente do acionamento da pistola.....	61
4.2.3. Influência da pressão da unidade hidráulica.....	62
4.2.4. Influência do número de pontos de interpolação do segmento de reta.....	62
4.2.5. Influência da frequência de controle.....	63
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
5.1. Conclusões.....	68
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

SIMBOLOGIA

[A]	- matriz
B	- base ortonormal
Cd	- coeficiente de descarga do orifício
E	- espessura de tinta depositada
<u>F</u>	- vetor de forças
FRQC	- frequência de controle
FRQI	- frequência de integração
FRQP	- frequência de geração de referências
GLT	- grau de liberdade da tarefa
<u>I</u>	- tensor de inércia de um corpo
K	- ganho do controlador
L	- distância entre os pontos extremos do segmento de reta
<u>M</u>	- vetor de momentos
NP	- número de pontos interpolados
NPLSA	- número de pulsos atualizados
NPLSR	- número de pulsos de referência
P	- ponto
<u>Q</u>	- matriz, de acordo com o contexto
Q	- vazão volumétrica
RMS	- raiz quadrada positiva de VQM
T	- período de amostragem
V	- tensão
<u>VATAT</u>	- vetor das tensões de atuação
VQM	- valor quadrático médio
a	- coeficiente matricial de acordo com o contexto
b	- termos independentes de um sistema de equações
d	- diâmetro

\underline{e}	- vetor de erro
f	- função
f^{-1}	- função inversa
k	- constante de servoválvula
l	- distância entre dois pontos interpolados consecutivos
m	- massa ou índice, de acordo com o contexto
n	- índice, de acordo com o contexto
p	- pressão
p_m	- diferença de pressão entre as câmaras de um atuador
\underline{q}	- vetor de coordenadas generalizadas
$\underline{\dot{q}}$	- vetor da derivada temporal de \underline{q}
$\underline{\ddot{q}}$	- vetor da derivada temporal de $\underline{\dot{q}}$
s	- variável de Laplace
t	- tempo
Δt	- intervalo de tempo
\underline{v}	- vetor de velocidade de um baricentro
$\underline{\dot{v}}$	- vetor da derivada temporal de \underline{v}
\underline{w}	- vetor de coordenadas operacionais
x	- deslocamento do carretel
ρ	- densidade
$\underline{\omega}$	- vetor de velocidade angular de um corpo
$\underline{\dot{\omega}}$	- vetor da derivada temporal de $\underline{\omega}$
ω_n	- frequência natural, de acordo com o contexto
δ	- trem de impulsos unitários
σ_{x^2}	- variância
ζ	- fator de amortecimento, de acordo com o contexto
$\underline{\mathcal{E}}$	- vetor de força e/ou torque num par cinemático

- (a r ∞ q) - parâmetros de Hartenberg e Denavit, de acordo com o contexto
- (r ψ ϕ) - coordenadas esféricas
- (x y z) - coordenadas ou eixos cartesianos, de acordo com o contexto
- (λ μ ν) - ângulos de Bryant

Subscritos

- D - derivativo
- I - integral
- P - proporcional
-
- a - índice de um p \acute{o} rtico da servov \acute{a} lvula
- ap - aplicada
- b - índice de um p \acute{o} rtico da servov \acute{a} lvula
- carr - carretel
- i, j - índices
- m - m \acute{e} dio (a)
- p - posi \tilde{c} ão
- r - orienta \tilde{c} ão
- s - suprimento
- t - tanque

Superscritos

- * - refer \acute{e} ncia, de acordo com o contexto.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. Robô de pintura servo-hidráulico (6R).....
- Figura 1.2. Diagrama de blocos da arquitetura eletrônica para cada grau de liberdade, sendo o microprocessador de 16 bits comum a todos os graus.....
- Figura 2.1. Sistema de bases ortonormais (B_i ; $i=0, 1, \dots, n$) vinculadas a cada um dos 'n+1' corpos do robô.....
- Figura 2.2. Programação do robô por aprendizado manual.....
- Figura 2.3. Molas de contrabalanceamento.....
- Figura 2.4. Mapeamento do esforço humano para equilíbrio estático do robô.....
- Figura 3.1. Diagrama esquemático da malha de controle de cada grau de liberdade do robô.....
- Figura 3.2. Diagrama do controlador PID adotado.....
- Figura 3.3. Amostragem do erro contínuo 'e(t)'.....
- Figura 3.4. Trem de impulsos unitários, sendo 'T' o período de amostragem.....
- Figura 3.5. Amostrador como um modulador.....
- Figura 3.6. Fluxograma do controlador PID digitalizado.....
- Figura 4.1. Fluxograma da estrutura de simulação do robô de pintura.....
- Figura 4.2. Placa retangular plana discretizada com células retangulares, com jato cônico de tinta incidente.....
- Figura 4.3. Relação entre 'FRQP' e o tempo consumido no movimento ($NP=150$; $p=70$ bar; $FRQC = 200$ Hz).....
- Figura 4.4. Aspecto da deposição de tinta na placa (Tabela 4.1 - caso (e)).....
- Figura 4.5. Erro de posição da extremidade da pistola de pintura durante o movimento operacional (Tabela 4.1 - caso (e))

- Figura 4.6. Erro de orientação da pistola de pintura durante o movimento operacional (Tabela 4.1 - caso (e)).....
- Figura 4.7. Aspecto da deposição de tinta numa placa menor com a mesma trajetória operacional (NP=150; p=70 bar; FRQC=300 Hz; FRQP = 150 Hz).....

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.1. Características dos robôs de pintura japoneses e norte-americanos (25) (51). Nota: os espaços não preenchidos correspondem a parâmetros não fornecidos nas referências pesquisadas.....
- Tabela 2.1. Resoluções obteníveis na extremidade do robô para diferentes combinações de resoluções de transdutores de posição angular, na configuração geometricamente mais crítica.....
- Tabela 4.1. Influência de 'FRQP' sobre ' v_m ' (NP = 150; p = 70 bar; FRQC = 200 Hz).....
- Tabela 4.2. Influência da força de reação na pistola (NP = 150; p = 70 bar; FRQP = 120 Hz; FRQC = 200 Hz).....
- Tabela 4.3. Influência da pressão da unidade hidráulica (NP = 150; FRQP = 150 Hz; FRQC = 200 Hz).....
- Tabela 4.4. Influência do número de pontos 'NP' (p = 70 bar; FRQC = 200 Hz).....
- Tabela 4.5. Influência da frequência de controle (NP = 75; p = 70 bar; FRQP = 75 Hz).....

PREFÁCIO

Já em seus primórdios a robótica mostrou-se matéria fértil para acalorados debates — provavelmente muito mais que a própria automação em si, porquanto esta, convencionalmente, substitui o homem até mesmo sem que este se sinta preterido diante de uma máquina, — polarizados via de regra entre extremos: o objetivo da robótica é a melhoria das condições de trabalho ou o único objetivo da robótica é o aumento da produtividade e destarte da acumulação.

À luz da ética do mundo contemporâneo, contudo, parece realmente existir pouco espaço para questionamentos quanto à utilidade social dos robôs, suas aplicações socialmente defensáveis, bem como quanto à velocidade de sua introdução na sociedade, quando esta já se tenha revelado interessante.

Os critérios de decisão acabam sendo quase que tão somente de natureza econômica — o homem deve apenas, então, ser convencido das pretensas vantagens da nova tecnologia, — ainda que disto resulte sofrimento para milhares de pessoas. O próprio pesquisador padece de dramas de consciência, de tempos em tempos, quando trabalha em tecnologias cujo emprego nem sempre privilegia o bem comum, destarte a omissão ética da ciência, como por vezes percebe-se com as tecnologias de automação e nuclear, a título de exemplo.

Abdicar do estudo de tais tecnologias por certo seria essencialmente inconsistente, dado que todas elas afloram da própria natureza, sendo a ciência em si mesma o conjunto permanentemente atualizado dos conhecimentos já alcançados acerca daquela.

A nível de robótica pode-se, quiçá, minimizar o impacto tecnológico se a sociedade capacitar seus membros, humanizando-os, a projetar robôs — em senso lato, — e não a se comportarem como tais, circunstância esta que, mutatis mutandis, dever-se-ia transportar

para todos os ramos do pensamento humano.

Percebe-se com nitidez que a tendência presente, neste país, é a aquisição de equipamentos robóticos importados ou mesmo da sua receita de fabricação — com pouca esperança de que se os possa projetar, fabricar e testar com efetivo domínio tecnológico, — trabalhando-se educacionalmente para treinar programadores de robôs e usuários genéricos.

Enquanto nos centros mundiais desenvolvidos trabalha-se na pesquisa de acionamento direto de robôs, de aplicação de novos materiais compostos para a construção de sua estrutura mecânica — o que permite que velocidades e acelerações mais elevadas possam ser empregadas, — de locomoção por pernas, de garras com vários dedos com finalidades múltiplas, de reconhecimento de voz, de servovisão — por meio da qual pode-se controlar os movimentos do robô através de realimentação visual, — de representação de conhecimento, de soluções para o problema ligado ao evitar de obstáculos, de sensores de tato, de multiprocessamento com arquiteturas hierarquizadas, de estratégias de movimentos não-rígidos, de inteligência artificial e de sistemas integrados de manufatura, dentre outras áreas que merecem a atenção dos centros de pesquisa, neste país busca-se ainda o domínio tecnológico básico da robótica. Oxalá se o obtenha rapidamente, permeado de discussões dentro da sociedade nacional.

Que cada um de nós esteja comprometido com o tão sofrido povo brasileiro: esta continua sendo sua grande esperança.

1 - INTRODUÇÃO

A tendência geral na indústria mundial é a diminuição da participação humana nos processos produtivos através da automação dos mesmos. Diante da variedade de produtos - seja de tamanho, seja de natureza dos mesmos, - inúmeras técnicas de automação são empregadas com tal objetivo. Muitas máquinas automáticas têm sido produzidas para linhas de montagem, de usinagem, de solda, de aspersão e outras, cada uma delas exigindo esforços variáveis de desenvolvimento para atendimento das peculiaridades dos processos nos quais são chamadas a intervir (64).

Nas linhas de pintura industriais, particularmente, pode-se encontrar ainda hoje métodos como a pintura com pincel até banhos de imersão com eletrodeposição, desde a pintura protetiva até a de acabamento.

Na pintura por aspersão, especificamente, a tinta é atomizada por meios diversos para a obtenção de determinadas formas de jato — via de regra cônica ou em leque, — que deve ser dirigido para a peça a ser pintada por um operador ou por meios mecânicos. Aplica-se a tinta com uma pistola aspersora que deve ser entendida como um atomizador de média pressão que pode ser ajustado ou ter substituídas algumas de suas peças — como o bico aspersor, por exemplo, — para que se obtenha a adequada combinação da vazão de tinta, da forma do jato e do tamanho das partículas atomizadas de tinta, considerando-se tintas de diferentes densidade, viscosidade e demais propriedades físicas e/ou químicas.

Normalmente a tinta é aplicada por meio de uma série de aspersões intermitentes para a obtenção de uma camada uniforme de tinta na peça, método este que propicia rápida aplicação em peças de geometrias complexas. Nem toda a tinta, contudo, passa a recobrir as

peças pintadas: existem perdas devido ao excesso de aspensão nas bordas das peças bem como ao ricochetear de algumas partículas na(s) superfície(s) em que incidem — ainda que tais efeitos variem de método para método. Adicionalmente, algumas partículas de tinta não atingem a peça — conquanto estivessem dirigidas a esta, — gerando uma névoa de tinta.

A despeito do enfoque econômico que releva o desperdício, o excesso de tinta no ambiente é prejudicial à saúde daqueles que nele se encontram e condenável sob o ponto de vista da segurança industrial. Quando a aspensão é realizada em cabines confinadas de reduzido volume e com ventilação natural limitada são necessários arranjos especiais para a extração do excesso de tinta atomizada e dos vapores de solventes.

Tais cuidados são comumente adotados em cabines de pintura, que assim são projetadas para elevadas taxas de renovação de ar na zona de aspensão. Tais preocupações elevam substancialmente o custo das cabines de pintura (7).

Sistemas automáticos rígidos com pistolas de aspensão de tinta podem ser utilizados para trabalhos repetitivos de aplicação de tinta em peças geometricamente pouco complexas, sendo o operador substituído por máquinas automáticas que podem movimentar vertical ou horizontalmente a pistola de pintura, ou mesmo girá-la por meio de movimentos simples de rotação. Tais instalações são usualmente dedicadas porquanto foram projetadas para a satisfação de um objetivo específico e bem delimitado (10).

As exigências de qualidade da pintura e a conseqüente maior ou menor sofisticação do sistema de pintura originam-se do próprio fim a que esta se destina (28), de tal forma que pode-se utilizar desde pistolas com reservatório próprio de tinta, atomizada por meio de ar comprimido, sem exaustão forçada no ambiente, até sistemas que

recirculam a tinta — para acompanhamento e controle permanente de seu estado, com aplicação de catalisadores, — com aspersão obtida por inúmeros meios, com exaustão e tratamento de materiais líquidos ou vaporizados dispersos no ambiente.

No caso de pintura eletrostática — devido ao elevado aproveitamento da tinta, — a exaustão destina-se quase que tão somente à manutenção da concentração de vapor dos solventes de tintas dentro de níveis adequados para a saúde e para a segurança.

A contínua evolução técnica de métodos e processos nas linhas de pintura visa atender principalmente as seguintes necessidades (21):

- (a) aumento de produtividade;
- (b) melhoria da qualidade de acabamento, da resistência à corrosão e da durabilidade da pintura;
- (c) diminuição dos custos; e
- (d) melhoria das condições de segurança e de salubridade.

Para peças passíveis de corrosão o problema da pintura permanece como um dos mais preocupantes. A espessura do filme de tinta depositada — comprovadamente, respeitada a condição *ceteris paribus*, — influi largamente na resistência à corrosão (21). Assim, aquelas regiões das peças que apresentam ângulos agudos, arestas vivas ou sinuosidades acentuadas — nas quais seja difícil obter uma espessura suficiente, — são justamente aquelas nas quais há maior probabilidade de iniciar-se a corrosão.

A mínima espessura depositada de tinta depende — genericamente, dentre outros fatores, — da tinta, da forma da superfície, da relação geométrica entre a pistola, o jato e a superfície, da pressão e do bico de aspersão, da vazão de tinta, da velocidade de aplicação e do número de aplicações. No caso de pintura eletrostática tal espessura depende também dos potenciais elétricos aplicados (21).

Segundo Ortlieb e Thomer (45) os parâmetros mais importantes são a vazão do material, a forma do jato — o ângulo de saída, se este for cônico, — e a velocidade de aplicação. Os menos importantes são a inclinação da pistola e a tensão elétrica, o último deles presente na pintura eletrostática.

Também os processos de pintura vêm sofrendo crescente automação, seja ela rígida ou flexível. Cabe ressaltar, contudo, que a utilização de robôs industriais depende mais das características dos processos de manufatura do que da natureza dos produtos correspondentes a aqueles. Sua aplicação viabiliza-se normalmente em processos caracterizados por elevados graus de metodização, simplicidade, repetição e volumes de produção moderados, ainda que as justificativas variem de um tipo de robô para outro, de um tipo de indústria para outro, como bem demonstra a experiência (51).

Genericamente, contudo, os robôs oferecem vantagens sobre os seres humanos quando possuem capacidades que estes não possuem, quando podem executar uma tarefa melhor que os humanos — com maior precisão ou a custo inferior, por exemplo, — ou quando é desaconselhável que estes a executem sob o ponto de vista ergonômico. As duas primeiras situações também são aplicáveis na comparação de robôs com automatismos rígidos, ainda que neste caso a habilidade dos robôs na realização de tarefas — a imitar algumas habilidades humanas, — possa ser evocada como fonte de vantagens destes sobre a automação rígida.

A capacidade de manipulação de um robô de pintura por vezes justifica seu uso, ainda que suas capacidades sensorial e de transporte sejam reduzidas.

As aplicações de um material por meio de sua aspersão — seja uma tinta líquida, um colorante, um pó ou outro qualquer, — com ar, sem ar ou com equipamento eletrostático de aspersão, requerem

um controle acurado do movimento operacional⁽¹⁾. Nas situações em que este revela-se complexo, ou variável com razoável frequência ou mesmo quando este deve ser cumprido muito de perto, implica-se a necessidade de emprego de automatismos servocontrolados de trajetória contínua, caso típico dos robôs de pintura. Por vezes os automatismos rígidos são empregados com resultados satisfatórios, sobretudo na pintura de superfícies pouco complexas, ou quando do emprego de pintura eletrostática.

Além de serem servocontrolados e possuírem a capacidade consolidada de execução de trajetórias contínuas ou ponto-a-ponto, os robôs de pintura apresentam outras características típicas:

- (a) são, normalmente, servo-hidraulicamente⁽²⁾ acionados, porquanto as baixas correntes elétricas nas servoválvulas são sinônimo de segurança num ambiente contaminado por solventes e outros elementos inflamáveis;
- (b) sua topologia é a articulada, aproximando-se ainda que grosseiramente da topologia humana (67);
- (c) presença de seis graus de liberdade com possibilidade de expansão, capacitando o robô a posicionar e orientar uma ferramenta no espaço;
- (d) sua capacidade de carga situa-se entre 3 e 7 kg, ainda que

(1) Denomina-se movimento operacional à sucessão contínua de estados, em função do tempo, assumidos pelo órgão terminal — uma pistola no caso de um robô de pintura, — entre duas configurações discretas deste.

(2) A geração dos motores sem escovas apresenta-se como alternativa de acionamento. Todavia, ainda que não haja faiscamento no motor propriamente dito o mesmo poderia ocorrer numa ruptura de um cabo de alimentação. Uma solução tecnológica adotada foi a pressurização com nitrogênio do interior do robô — onde localizam-se tais cabos, nestes casos, — com vedação para a parte externa, de tal forma que se alguma troca de massa ocorrer esta será do nitrogênio de dentro para o ar de fora, impedindo-se que as faíscas atinjam vapores inflamáveis. Tal solução, contudo, não é barata e a garantia de sua permanente eficiência ainda constitui-se num problema à espera de uma resposta mais convincente. Por esta razão os robôs servo-hidráulicos ainda predominam nas aplicações classificáveis como tratamento de superfície, como é o caso da pintura.

- alguns fabricantes anunciem números superiores (3);
- (e) sua repetibilidade, de maneira geral, é sensivelmente mais pobre que a dos similares elétricos, situando-se na casa de ± 2 mm enquanto os robôs elétricos propalados como de pintura situam tal parâmetro por volta de $\pm 0,5$ mm — até porque nos robôs servo-hidráulicos os atuadores são normalmente vinculados diretamente na cadeia sinemática do mecanismo enquanto naqueles os usualmente empregados servomotores transmitem movimento ao mecanismo por meio de redutores, não raro harmônicos;
 - (f) no caso de robôs servo-hidráulicos a pressão de trabalho da unidade hidráulica situa-se, correntemente, entre 70 e 90 bar;
 - (g) em decorrência das peculiaridades da aplicação a que se destinam, os robôs de pintura possuem velocidades máximas da extremidade do órgão terminal na faixa de 1 a 2 m/s, ressalvando-se que tais valores oscilam muito em função do dimensionamento geométrico do robô; e
 - (h) possuem alguma versatilidade para emprego na manipulação de peças ou mesmo em outras aplicações, como solda, inspeção, montagem e aplicação de resinas e/ou adesivos, dentre outras menos usuais.

O perfil dos robôs de pintura japoneses (25) e norte-americanos (51), condensado na Tabela 1.1, corrobora as características acima listadas, à exceção de alguns casos.

Nas linhas de pintura industriais é comum que as peças a serem

(3) Não raro um robô que não foi especificamente desenvolvido para a pintura — sendo mais aplicável ao manuseio de peças de maior peso, — é anunciado pelo fabricante como um robô de pintura por motivos mercadológicos, buscando transmitir a imagem de múltiplo emprego para seu robô.

FABRICANTE	MODELO	ARQUITETURA PRIMARIA	ACIONAMENTO	SENSORES	REPETIBILIDADE (mm)	CAPACIDADE (kgf)	VELOCIDADE (m/s)	PRESSAO (kgf/cm ²)
DAINICHI KIKO CO., LTD.	BABOT 1440	CILINDRICA	ELETRICO	ENCODER	+/- 0.5	50	0.85	-
	BABOT 2600	CILINDRICA	ELETRICO	ENCODER	+/- 1	100	0.85	
	BABOT 4700	CILINDRICA	ELETRICO	ENCODER	+/- 1	350	0.55	
	PART TIME 500	CILINDRICA	ELETRICO	ENCODER	+/- 0.1	7	0.90	
HITACHI LTD.	SPRAY-PAINTING ROBOT	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	ENCODER/POTENCIOMETRO			1.75	90
KAWASAKI HEAVY IND., LTD.	KAWASAKI UNIMATE 2000	POLAR	SERVO-HIDRAULICO	ENCODER	+/- 1	35		
	KAWASAKI UNIMATE 3000	CARTESIANA	SERVO-HIDRAULICO	ENCODER	+/- 1	50	0.80	70
	KAWASAKI UNIMATE 4000	POLAR	SERVO-HIDRAULICO	ENCODER	+/- 1	135		85
	KAWASAKI UNIMATE 6000	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	ENCODER	+/- 1	20		85
KOBE STEEL, LTD.	KTR 3000 - CRC	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	POTENCIOMETRO	+/- 2	5	1.7	70
MITSUBISHI HEAVY IND. CO.	UNIMATE 5000 - AF	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	ENCODER	+/- 2	5	2	70
MITSUBISHI HEAVY IND. CO.	UNIMATE 5000 - AF	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	POTENCIOMETRO	+/- 2	5	1.75	70
	105	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	POTENCIOMETRO	+/- 2	5		70
	155	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	POTENCIOMETRO	+/- 2	5		70
MITSUBISHI HEAVY IND. CO.	85AE (RPS)	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO	POTENCIOMETRO	+/- 2	3	1.5	70
	MOTOMAND (TYPE I-4)	CARTESIANA	ELETRICO		+/- 0.5	5 - 150		
YASKAWA ELECTRIC MFG CO., LTD.	TR 3003	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO		+/- 1	22.08		
DE VILBISS		ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO		+/- 2.54	9		
HODSON	SER6	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO		+/- 3.175	8.16		
THEYWOOD		ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO					
CYBOTECH	P15	ARTICULADA	SERVO-HIDRAULICO		+/- 5.08	15		

Tabela 1.1 Características dos robôs de pintura japoneses e norte-americanos (25) (51).
Nota: os espaços não preenchidos correspondem a parâmetros não fornecidos nas referências pesquisadas.

pintadas ingressem na área de aspersão através de um transportador cujo movimento estará sincronizado com os movimentos do robô.

Na realização de tarefas mais complexas e/ou muito diferentes entre si a destreza do robô de pintura assume fundamental importância⁽⁴⁾.

Os maiores benefícios da utilização de robôs na pintura são a redução ou mesmo eliminação de participação humana num meio de trabalho perigoso e insalubre, no qual o trabalhador fica exposto a materiais tóxicos e combustíveis, e a melhoria da qualidade do produto, alcançada pela aplicação mais uniforme do material com diminuição de excessos localizados. Segue-se a estes benefícios a redução de custos, devido à eliminação do trabalho humano, ao aumento do percentual de tempo efetivamente consumido no trabalho e à redução do desperdício de material ou do reprocessamento do mesmo, nos casos em que o material não depositado possa ser reaproveitado (14). Devido a tais virtudes esta é justamente uma das mais antigas aplicações de robôs na indústria (51).

Os usuários dos robôs de pintura industriais possuem algumas expectativas em relação ao futuro destes: esperam que o preço dos mesmos diminua sensivelmente e que sejam aperfeiçoados ou mesmo criados novos mecanismos de programação fora da linha⁽⁵⁾ de tais robôs — a exigir concomitantemente maior precisão, melhor interfacçamento entre máquinas e linguagens de programação mais simples. Seguem-se a tais desafios outros tantos mais remotos, como a melhoria da confiabilidade e da segurança na operação dos robôs e a im-

(4) O número de graus de liberdade dos automatismos pode ser reduzido — naturalmente com perda da flexibilidade de aplicação, — se os demais parâmetros na pintura forem convenientemente ajustados em função do tempo. Inúmeras pesquisas em andamento no mundo, contudo, investigam o aumento do número de graus de liberdade conjugado com a variação dos parâmetros de pintura (45).

(5) Conhecida como programação "off-line", na língua inglesa.

plementação de um sistema de visão de baixo custo para inspeção, ou mesmo de sensores inteligentes para a monitoração automática do processo de pintura para realimentação e tomada de decisões.

Uma necessidade tecnologicamente mais remota, praticamente válida para todos os tipos de robôs industriais, é a capacitação dos robôs de pintura de recursos de autoprogramação. Os problemas a se rem resolvidos, contudo, para que se implemente autoprogramação em robôs de pintura parecem especialmente complexos, porquanto a pintura industrial ainda é essencialmente empírica, carecendo de formulações matemáticas genéricas (45).

Supõe-se que seja possível contornar tais dificuldades por meio da simulação dinâmica do robô e da pintura em si, tendo-se como re resultado a estimativa de deposição de tinta na peça considerada na simulação. As necessárias correções — seja no movimento operacio nal da pistola de pintura, seja nos parâmetros de pintura, seja em ambos, — seriam adotadas a partir da própria estimativa de deposição de tinta. Sucessivas simulações, empreendidas com recursos de inteligência artificial, poderiam ajustar os resultados estimados dentro dos níveis de exigência do processo em questão.

A simulação dinâmica do processo de pintura automatizado pode também constituir-se numa opção para a programação fora da linha de células robotizadas, subsidiando a própria simulação gráfica da dinâmica de postos de trabalho de linhas automatizadas (62).

Uma vez fixados os critérios de projeto pode-se, igualmente, em pregar a simulação dinâmica do robô como ferramenta de projeto, co mo instrumento de investigação do desempenho global robô-processo, útil para validação do controlador, como meio de pesquisa de algoritmos de controle alternativos ou mesmo para o estudo de aplicações do robô em atividades diversas daquela(s) para a(s) qual(is) foi originalmente projetado.

O presente trabalho apresenta a simulação dinâmica de um robô servo-hidráulico destinado à pintura industrial — considerando-se seus subsistemas mecânico, eletrônico e de controle através da construção, implementação e interligação dos modelos matemáticos necessários, a nível computacional, — juntamente com a simulação da deposição de tinta em peças com geometria conhecida, supondo-se determinados parâmetros associados especificamente à pintura — como geometria do jato, configuração pistola/peça e vazão de tinta, dentre outros.

Investiga-se, por intermédio de simulações, a aplicabilidade de um controlador digital do tipo PID (proporcional-integral-derivativo) para cada grau de liberdade do robô. Verifica-se a influência — no desempenho dinâmico do sistema, — da pressão da unidade hidráulica, da força de reação proveniente da operação da pistola, da frequência de descarga das configurações de referência e da frequência de controle.

Para possibilitar a geração de resultados numéricos na simulação, os modelos matemáticos desenvolvidos — ainda que seus preceitos sejam genéricos, — foram particularizados para um robô servo-hidráulico com seis graus de liberdade com pares cinemáticos rotativos, conforme a figura 1.1, atuados por três atuadores lineares — responsáveis pelo movimento da base, do braço e do antebraço, — e três atuadores rotativos ligados ao punho (16).

Sua cadeia cinemática e topologia permitem que a pistola de pintura seja livremente posicionada e orientada — respeitados os limites mecânicos, — dentro do volume de trabalho do robô.

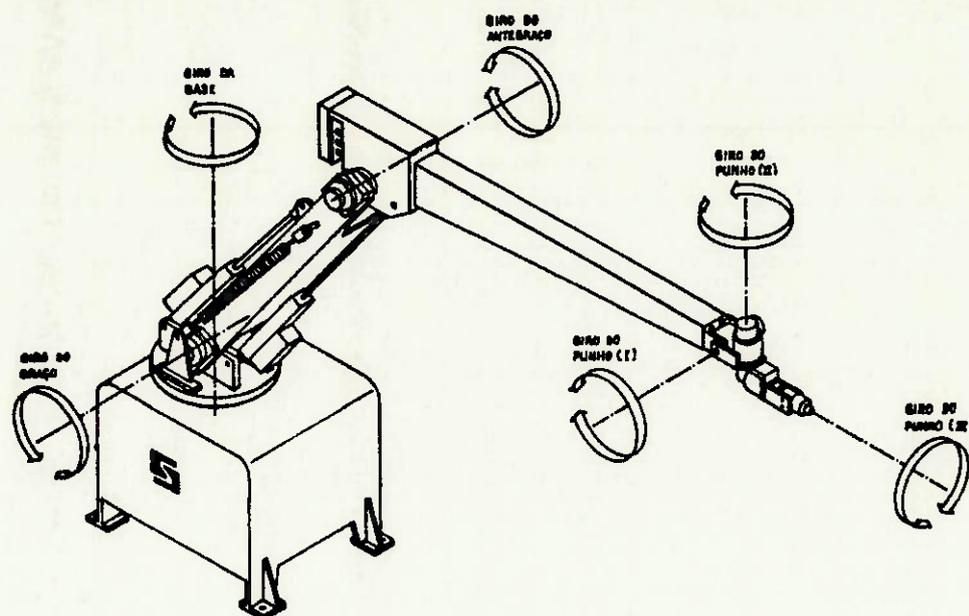


Figura 1.1 Robô de pintura servo-hidráulico (6R).

A arquitetura eletrônica imaginada para o controlador é composta por um microprocessador de 16 bits que se comunica com seis microprocessadores Z80, a cada um dos quais encontra-se vinculado um grau de liberdade⁽⁶⁾.

Cada grau de liberdade é controlado por meio de um controle PID (proporcional-integral-derivativo) digital, implementado por um microprocessador de 8 bits, cujo sinal de entrada é proporcional à diferença entre os sinais da posição de referência — gerenciada pelo microprocessador de 16 bits, — e da posição real, proveniente de um transdutor de posição angular disposto no respectivo par cinemático.

(6) Tal arquitetura é idêntica à adotada para o controlador de um robô servo-hidráulico destinado à pintura industrial, que chegou a ter seu desenvolvimento iniciado pela empresa Servus Tecnologia e Informática, cuja opção por tal arranjo deveu-se a interesses e circunstâncias tecnológicos.

A programação do robô, enquanto projeto voltado à pintura industrial, é feita por aprendizado, numa forma segundo a qual o controlador amostra as coordenadas generalizadas pertinentes à trajetória operacional⁽⁷⁾ do órgão terminal do robô, que é normalmente ensinada pelo operador, ou grava as coordenadas generalizadas correspondentes a posições discretas igualmente definidas e manualmente ensinadas pelo operador.

Quando da reprodução automática da trajetória amostrada ou da seqüência de configurações discretas ensinadas, os valores amostrados/gravados - que armazenados passaram a constituir uma tabela de configurações de referência, — são descarregados pelo microprocessador de 16 bits para os controladores digitais a uma dada frequência 'FRQP' ditada pelo programador, conforme o diagrama esquemático ilustrado na figura 1.2.

Os modelos matemáticos necessários para a simulação dinâmica do robô de pintura ilustrado na figura 1.1 foram computacionalmente implementados. Parâmetros gerais como as dimensões de tal robô, as massas, as coordenadas de baricentros e os momentos principais centrais de inércia de seus corpos constituintes foram estimados a partir do anteprojeto de um protótipo (16).

Para substituir artificialmente a participação humana no processo de programação do robô supôs-se que a extremidade de seu órgão terminal deve cumprir uma trajetória⁽⁸⁾ retilínea entre dois pontos quaisquer do volume de trabalho, cujas coordenadas cartesianas

(7) Denomina-se trajetória operacional à sucessão contínua de configurações assumidas pelo órgão terminal do robô entre duas configurações discretas deste.

(8) Tal hipótese fez-se necessária até para que se pudesse avaliar o desempenho do robô de pintura no cumprimento de uma trajetória operacional — calculando-se erros de posição e de orientação do órgão terminal, — o que não seria tão nítido se a simulação fosse realizada com configurações discretas que não guardam qualquer relação funcional entre si.

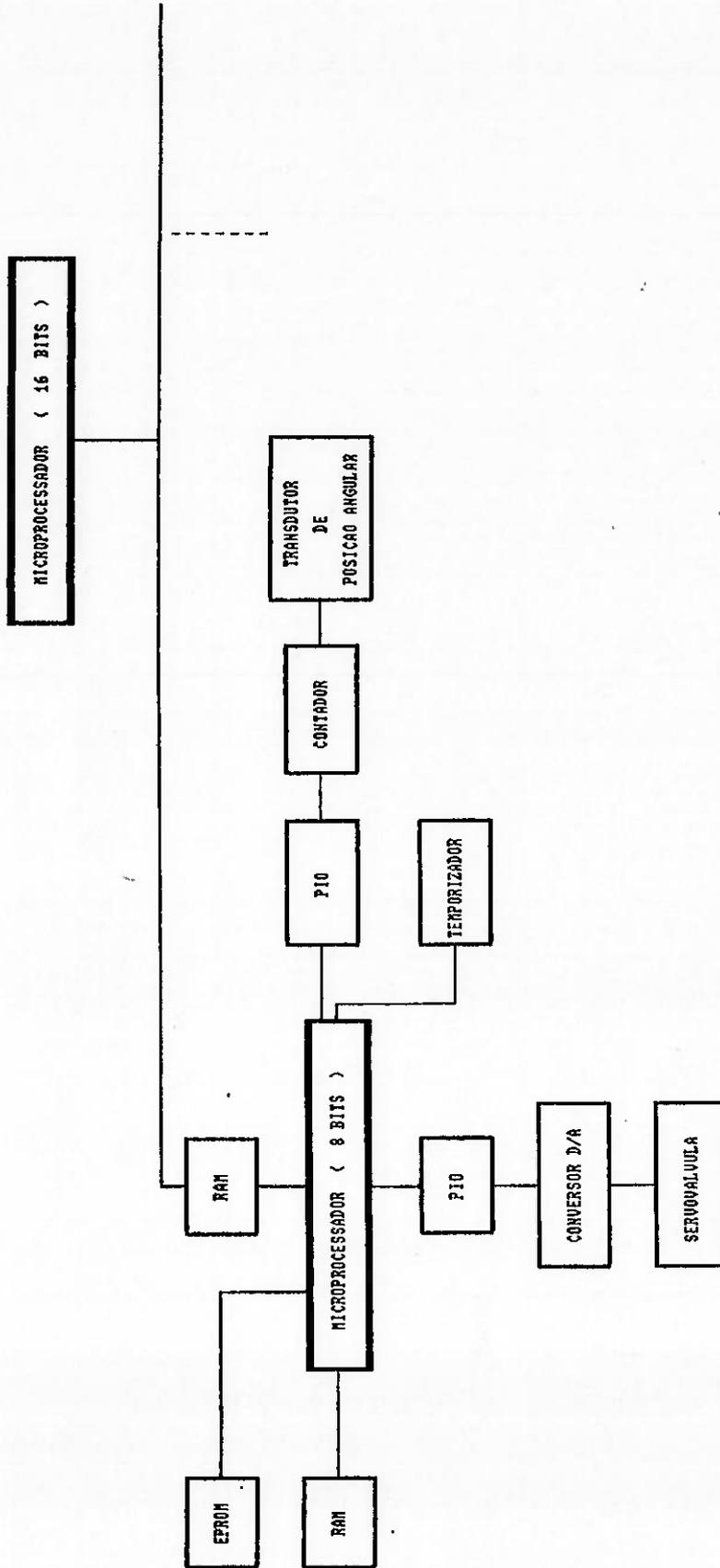


Figura 1.2 Diagrama de blocos da arquitetura eletrônica para cada grau de liberdade, sendo o microprocessador de 16 bits comum a todos os graus.

são fornecidas, mantendo uma dada orientação. A trajetória é discretizada através de pontos de interpolação — cujo número constitui-se em variável de entrada para o simulador, — de tal forma que a tabela de configurações de referência seja construída.

Assim, à medida que a simulação evolui, pode-se calcular o erro de posição da extremidade do órgão terminal em relação à trajetória retilínea definida bem como o afastamento angular da orientação de tal órgão em relação à orientação desejada. Sub-rotinas computacionais adicionais permitem que se estime a deposição de material aspergido com jato cônico sobre uma peça retangular cujos vértices tenham suas coordenadas cartesianas conhecidas, sem perda de generalidade na abordagem porquanto outras formas de peças e de jatos poderiam ser consideradas por intermédio da mesma metodologia empregada.

O simulador computacionalmente implementado apresentou resultados consistentes, à custa de elevado tempo de processamento. O controlador PID digital, individualizado para cada grau de liberdade, mostrou-se aplicável num robô de pintura, ainda que deva sofrer algumas alterações que podem melhorar seu desempenho.

O problema principal observado nas simulações efetuadas é a dificuldade do controlador na superação do transiente de início de movimentação do robô, interregno no qual registram-se os erros máximos de posição e de orientação.

Alguns parâmetros — como a força proveniente do acionamento da pistola e a pressão da unidade hidráulica, — revelam-se pouco influentes no desempenho robô-processo dentro dos limites investigados, enquanto outros cumprem papel mais decisivo, como a frequência de controle e o número de pontos interpolados.

2 - MODELOS MATEMÁTICOS DO MECANISMO

Os robôs industriais, enquanto máquinas, podem ser constituídos a partir de diferentes arranjos cinemáticos (9), possuir diferentes graus de requinte mecânico e de sofisticação eletrônica. Podem ser atuados por inúmeros meios, empregar os mais diversos tipos de sensores. Podem atuar nos mais diferentes ambientes fabris, intervindo em processos de diversas naturezas.

A programação dos robôs pode ser desde aquela por aprendizado manual até a realizada por meio de uma linguagem de alto nível.

Já o controle dos mesmos pode ser analógico, digital ou mesmo híbrido, convencional, preditivo, adaptativo, dentre outros, ser simples ou complexo.

Assim, dada a multitudine de combinações possíveis dos subsistemas que uma vez integrados emprestam a denominação de sistema robótico ao sistema resultante, cada robô resulta único, peculiar ao menos em seus pormenores, a exigir um tratamento que na sua globalidade acaba sendo dedicado, ainda que estruturalmente nem o seja.

Para que seja possível simular dinamicamente os movimentos controlados de um robô é imprescindível o desenvolvimento de alguns modelos matemáticos do mecanismo. Considerando-se o robô como uma máquina rígida, sem folgas, alguns dentre os modelos geométricos, cinemáticos e dinâmicos têm que ser implementados (20), sendo possível fazê-lo por intermédio de ferramentas genéricas de análise e /ou de síntese.

2.1 Modelo Geométrico Direto

O modelo geométrico direto do robô, que se traduz por

$$\underline{w} = f(\underline{q}), \quad (2.1)$$

sendo ' \underline{w} ' o vetor de coordenadas operacionais, ' \underline{q} ' o vetor de coordenadas generalizadas e ' f ' uma função normalmente não linear, representável por ' m ' componentes ' f_1 ', ' f_2 ', ..., ' f_m ', — deve ser desenvolvido para que se calcule os erros de posição e de orientação do órgão terminal em relação à trajetória operacional de referência.

Visando-se a utilização de métodos gerais de cálculo, empregou-se como ferramenta para a modelagem do robô a álgebra tensorial (20) (53).

Para que fosse possível definir a posição e a orientação do órgão terminal vinculou-se bases ortonormais convenientes (B_i ; $i=0, 1, \dots, n$) a cada um dos ' $n+1$ ' corpos identificáveis a partir da cadeia cinemática do robô, conforme a figura 2.1, utilizando-se um algoritmo proposto por Renaud (20). Supôs-se que o ponto ' 0_6 ' coincide com a extremidade da pistola de pintura, o que significa dizer que a nível da simulação idealizada este é o ponto que deverá descrever uma trajetória retilínea entre dois pontos quaisquer designados como os extremos do segmento de reta a ser cumprido.

Ainda que haja outras técnicas passíveis de uso — como a vetorial e a que utiliza quaternions (66), — empregou-se matrizes de transformação homogênea (47), quadradas, de ordem 4, porquanto seu emprego é aproximadamente 15% mais eficiente, em termos computacionais, que o emprego de quaternions, cujo desempenho coloca-se em segundo lugar (48).

Para a obtenção dos componentes das matrizes de transformação homogêneas, algébrica ou numericamente, utilizou-se os parâmetros de Hartenberg e Denavit (13), a saber, no caso:

- a_i - comprimento da perpendicular comum aos eixos dos vetores ' \underline{z}_{i-1} ' e ' \underline{z}_i ';
- r_i - distância algébrica, ao longo de ' \underline{z}_{i-1} ', do suporte de ' \underline{x}_{i-1} ' ao suporte de ' \underline{x}_i ';
- α_i - ângulo entre ' \underline{z}_{i-1} ' e ' \underline{z}_i ' medido ao redor de ' \underline{x}_i '; e
- q_i - ângulo entre ' \underline{x}_{i-1} ' e ' \underline{x}_i ' medido ao redor de ' \underline{z}_{i-1} '.

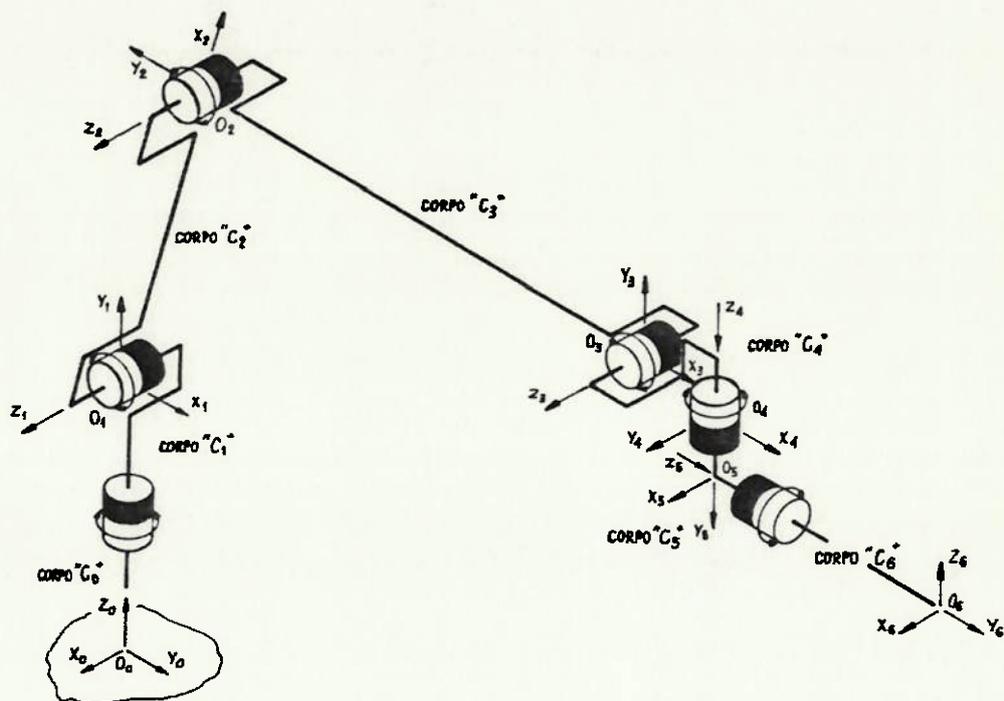


Figura 2.1 Sistema de bases ortonormais (B_i ; $i = 0, 1, \dots, n$) vinculadas a cada um dos ' $n+1$ ' corpos do robô.

Supõe-se, para os movimentos da base, do braço e do antebraço, a utilização de transdutores de posição angular com eixos colineari- zados com os respectivos eixos dos movimentos citados, ainda que o controle de tais movimentos seja realizado através das servovál- vulas que alimentam os atuadores lineares cujos comprimentos atua- lizados são, respectivamente, ' d_{28} ', ' d_3 ' e ' d_4 '. Foi necessário, portanto, correlacionar ($d_{28} \ d_3 \ d_4$) com ($q_1 \ q_2 \ q_3$) — coordenadas

nal o cumprimento de uma trajetória retilínea mantendo-se uma dada orientação, — de alguma forma se conhece o vetor \underline{w} das coordenadas operacionais a ela correspondente. Porquanto no controle de um robô as variáveis monitoradas são as coordenadas generalizadas e não as operacionais, deve-se resolver o problema inverso de determinar aquelas a partir destas.

Assim, deve-se obter uma função inversa f^{-1} , se esta existir, tal que

$$\underline{q} = f^{-1}(\underline{w}) \quad (2.5)$$

Sendo 'GLT' o grau de liberdade da tarefa, definido como o número de parâmetros independentes que permitem estabelecer qualquer situação geométrica que o órgão terminal deve assumir, para a maioria dos casos encontrados pode-se asseverar (20) que:

- (a) quando 'n', número de elos móveis da cadeia cinemática do robô, é inferior a 'GLT' não existe a solução procurada;
- (b) se 'n' é igual a 'GLT' então, à exceção das configurações singulares, existe um número finito de soluções; e que
- (c) se 'n' é superior a 'GLT' então existe uma infinidade de soluções.

Para obter-se um vetor ' \underline{q} ', com 'n' elementos, correspondente a um dado vetor ' \underline{w} ', de dimensão 'm x 1', pode-se empregar métodos analíticos, numéricos iterativos ou híbridos.

Paul (47) (48) (49), Lee (32) e Bazerghi (2) apresentam soluções analíticas, Lumelsky (36) e Goldenberg (18) (19) propõem métodos numéricos, enquanto Benati (3) emprega uma solução híbrida.

Nos métodos numéricos parte-se de uma solução inicial — que bem pode ser representada pelas coordenadas generalizadas (q_1, q_2, \dots, q_n) correspondentes à configuração atual ou mesmo anterior do

robô, — e a partir desta investiga-se uma solução que satisfaça a equação (2.1), presumivelmente muito próxima da solução inicial. Determina-se, desta forma, uma única solução. Tais métodos são de caráter genérico podendo aplicar-se, a princípio, a quaisquer robôs. Não raro, contudo, carecem de um grande número de operações e apresentam delicados problemas de convergência, o que os torna pouco confiáveis para uso em tempo real (20).

Os métodos analíticos, por sua vez, normalmente não se aplicam a robôs muito simples — quais sejam aqueles que possuem um grande número de parâmetros de Hartenberg e Denavit nulos, — mas podem ser utilizados em sistemas de controle em tempo real. Ao contrário do que se verifica com os métodos numéricos, que produzem uma única solução, os métodos analíticos geram um máximo de 32 soluções para um robô com seis pares cinemáticos do tipo R com todos os parâmetros de Hartenberg e Denavit não nulos, existindo, destarte, igual número de conjuntos de coordenadas generalizadas que satisfazem a equação (2.1), para um dado vetor ' \underline{w} '. Tal fato implica a necessidade de nomear-se algum índice de desempenho que possa iluminar a tomada de decisão por alguma das soluções possíveis, quando na construção do modelo geométrico inverso são empregados métodos analíticos.

À luz da figura 2.1, o que efetivamente se conhece são as coordenadas esféricas do ponto ' O_6 ' e os ângulos de Bryant que definem a orientação da base ' B_6 ' em relação à base ' B_0 '.

Empregou-se para a obtenção do modelo geométrico inverso um método analítico baseado numa técnica recursiva com matrizes de transformação homogêneas inversas (20) e em trigonometria simples (15).

Duas soluções matematicamente possíveis são sistematicamente investigadas, porém tão somente uma delas é fisicamente realizável, quando existe solução, em virtude das limitações físicas dos atua-

dores do mecanismo — dispensando-se assim a necessidade de nomeação de algum índice de desempenho para a seleção de uma dentre várias soluções.

2.3 Modelo Dinâmico Inverso

Para simular dinamicamente um robô é imprescindível que se construa seu modelo dinâmico inverso, sendo este o modelo que permite obter os torques e/ou forças requeridos dos atuadores para que sejam produzidas determinadas posições, velocidades e acelerações em cada um dos graus de liberdade do robô. Se tais torques e/ou forças forem representados pelo vetor ' $\underline{\tau}$ ' pode-se representar matematicamente o modelo em epígrafe pela expressão

$$\underline{\tau} = \underline{\mathcal{C}} (\underline{q} \ \underline{\dot{q}} \ \underline{\ddot{q}}) \quad (2.6)$$

As formulações usuais para a solução deste problema são a de Newton-Euler (61), a de Lagrange (8), a recursiva de Lagrange (23) e a generalizada de D'Alembert (33).

Para propósitos de controle o tempo computacional consumido na solução das equações do modelo dinâmico é de fundamental importância, uma vez que a mesma deve ser obtida em tempo real.

Independentemente da formulação empregada, duas são as estratégias mais empregadas para aumentar a eficiência na solução do problema em questão;

- (1) simplificação das equações do modelo dinâmico através da omissão de alguns termos, com correção dos erros por meio de realimentação; e
- (2) tabulação de soluções a partir de inúmeros conjuntos ($\underline{q} \ \underline{\dot{q}} \ \underline{\ddot{q}}$).

A maneira mais comum de simplificar a dinâmica tem sido ignorar as forças centrífugas e de Coriolis, cujo cálculo onera substancialmente o tempo computacionalmente consumido. A omissão de tais forças, contudo, só não traz problemas maiores nos movimentos com baixa velocidade: com velocidades mais elevadas de movimento as forças centrífuga e de Coriolis tornam-se componentes dominantes da dinâmica do sistema, tornando inócua a correção por realimentação devido aos excessivos torques e/ou forças de correção (35).

Soluções tabulares, por outro lado, recaem em outros problemas como:

- (a) são necessárias tabelas enormes para que se armazene uma tessitura suficientemente fina de soluções, o que só é possível através de grandes memórias;
- (b) necessidade de estudo de um critério para preenchimento tabular;
- (c) a questão da interpolação entre os valores armazenados; e
- (d) a inutilidade das tabelas diante da abrupta mudança de carregamento num órgão terminal do tipo garra, como a que ocorreria na liberação de uma peça apreendida.

Comparando-se as duas formulações computacionalmente mais eficientes, quais sejam a recursiva de Lagrange e a de Newton Euler — considerando-se sobretudo o número de operações de adição e de multiplicação associado a cada uma delas, — não se pode concluir pela translúcida vantagem de uma sobre a outra (31) (58). Porquanto a simulação dos movimentos controlados do robô dispensa a exigência de cálculos em tempo real, do ponto de vista da eficiência computacional — cuja importância, ainda que haja interesse em simular com a maior rapidez possível, pelo menos diminui, — qualquer uma das duas formulações seria aplicável.

Como a formulação de Newton-Euler, entretanto, implica o cálculo de reações vinculares — úteis para projeto mecânico ainda que não o sejam a nível de controle, — sem que o mesmo ocorra com a formulação de Lagrange (40), optou-se pelo emprego daquela formulação.

A formulação de Newton-Euler baseia-se nas leis que governam a dinâmica dos corpos rígidos. O vetor força agindo num determinado corpo relaciona-se à aceleração do centro de massa deste pela segunda lei de Newton:

$$\underline{F} = m \underline{\dot{v}}, \quad (2.7)$$

enquanto o vetor resultante de momento em torno do centro de massa relaciona-se às velocidade e aceleração angulares do corpo pela equação de Euler:

$$\underline{M} = \underline{I} \underline{\dot{\omega}} + \underline{\omega} \times (\underline{I} \underline{\omega}), \quad (2.8)$$

sendo ' $\underline{\omega}$ ' o vetor de velocidade angular e ' \underline{I} ' o tensor de inércia do corpo considerado.

Ao aplicar-se sucessivamente a equação de Euler a uma cadeia cinemática pode-se empregar a seguinte sistemática:

- (a) começando da base e trabalhando na direção do órgão terminal — na medida em que a base do mecanismo ou é fixa ou tem seu movimento conhecido, — calcula-se ' \underline{v}_i ', ' $\underline{\omega}_i$ ', ' $\underline{\dot{v}}_i$ ' e ' $\underline{\dot{\omega}}_i$ ' correspondentes ao corpo 'i' a partir de $[(q_j \dot{q}_j \ddot{q}_j), j=1, i]$;
- (b) calcula-se os vetores resultantes de força ' \underline{F}_i ' e de momento ' \underline{M}_i ' que atuam em cada corpo por meio das equações convenientes;
- (c) a força resultante computada no passo anterior é a soma ve-

torial das forças exercidas sobre o corpo pelos corpos vizinhos, através dos pares cinemáticos a este adjacentes, e da força gravitacional, enquanto o momento resultante é a soma vetorial dos momentos puros exercidos no corpo pelos corpos adjacentes e dos momentos gerados pelas reações vinculares. Assim sendo, se a força e o momento que agem numa extremidade do corpo são conhecidos pode-se utilizar as resultantes do passo precedente para calcular a força e o momento que atuam na outra extremidade do corpo, que serão iguais e opostos à força e ao momento exercidos pelo corpo dado sobre os corpos que lhe são adjacentes na cadeia cinemática, segundo o princípio de ação e reação. Portanto, se a força e o momento exercidos pelo ambiente sobre o órgão terminal forem conhecidos, pode-se calcular as reações vinculares em cada par cinemático do robô, progredindo-se na direção da base deste; e

- (d) nos pares cinemáticos rotativos projeta-se o vetor de momento determinado em (c) segundo o eixo de rotação para obter o torque na articulação. Nos pares cinemáticos deslizantes projeta-se o vetor de força calculado no mesmo passo segundo o eixo de deslizamento para que se possa calcular a força no par cinemático.

Tomando-se por base o trabalho de Takano (61) pode-se implementar tal sistemática, segundo um algoritmo (16) (55), e aplicá-la tanto a robôs que tenham pares cinemáticos deslizantes, rotativos ou ambos, ainda que se deva considerar as diferenças na construção de uma matriz de transformação homogênea correspondente a um par rotativo daquela relativa a um par deslizante, desigualdades estas que se propagam nas derivadas de tais matrizes (61).

A sistemática proposta por Takano (61), contudo, aplica-se sem quaisquer modificações tão somente a robôs cujas cadeias cinemáticas

cas sejam abertas, o que já não é o caso do robô de pintura ilustrado na figura 1.1 destarte o quadrilátero articulado — com um de seus lados com comprimento \overline{HE} variável, — formado pelos pontos (O_1, O_2, H, E) , conforme a figura 2.3, fato este que exige especial atenção (55).

Nos modelos dinâmicos, a exemplo do que supôs-se na construção dos modelos geométricos, assumiu-se inexistência de folgas no mecanismo e rigidez absoluta de todos os corpos deste. Por razões de simplificação, orientadas sobretudo para a diminuição do tempo computacional consumido na simulação, visando-se evitar cálculos necessariamente iterativos, adicionou-se às duas anteriores uma terceira hipótese: inexistência de atrito entre quaisquer partes móveis do mecanismo robótico.

2.4 Modelo Dinâmico Direto

Em circunstâncias normais apenas uma componente de cada um dos 'n' elementos do vetor ' \underline{Q} ' é conhecida, identificável com a componente pertinente ao eixo cuja direção coincide com a direção do eixo característico do atuador respectivo — componentes estas designadas componentes de ação.

Para a simulação dinâmica de um robô é indispensável a construção do modelo por meio do qual pode-se calcular o vetor ' \underline{d} ' resultante — uma vez conhecidos os vetores ' \underline{q} ' e ' $\underline{\dot{q}}$ ' e as componentes de ação, — modelo este denominado modelo dinâmico direto e que se notabiliza por uma expressão na forma

$$\underline{d} = \underline{d} (\underline{q} \underline{\dot{q}} \underline{Q}) \quad (2.8)$$

Construiu-se o modelo dinâmico direto a partir do modelo dinâmico

co inverso, o que é possível na medida em que se desenvolva as equações das componentes de ação tendo-se como únicas incógnitas ($\ddot{q}_1, \dots, \ddot{q}_n$). Obtém-se um sistema de equações lineares — 'n' equações para 'n' incógnitas, — válido para um dado instante:

$$\begin{array}{r} a_{11}\ddot{q}_1 + a_{12}\ddot{q}_2 + \dots + a_{1n}\ddot{q}_n = b_1 \\ \hline a_{n1}\ddot{q}_1 + a_{n2}\ddot{q}_2 + \dots + a_{nn}\ddot{q}_n = b_n \end{array} \quad (2.10)$$

cuja solução consubstancia-se na obtenção de \ddot{q} .

Empregou-se a técnica da eliminação Gaussiana para a solução do sistema de equações lineares obtido.

2.5 Utilização Direta dos Modelos Matemáticos

A despeito de sua utilização posterior na simulação dinâmica do robô de pintura, alguns dos modelos matemáticos desenvolvidos foram diretamente empregados para a seleção de parâmetros do robô a nível de anteprojeto:

- (a) a precisão dita local de um robô (24) depende, essencialmente:
- (1) das situações escolhidas para mensuração da precisão — considerando-se um robô qualquer cujo órgão terminal esteja imóvel numa situação 'A' e que deve deslocar-se a ponto de desacelerar-se completamente numa outra situação 'B', — e do tipo de movimento adotado para efetuar o deslocamento entre tais situações;
 - (2) da carga e da flexibilidade de cada corpo do robô;
 - (3) de problemas mecânicos como folgas, histereses e atrito;

(4) da resolução interna do controle, diretamente dependente do poder individual de resolução de cada sensor proprioceptivo do robô; e

(5) de influências externas como qualidade atmosférica, umidade e temperatura,

dentre outros fatores normalmente de menor repercussão.

Ainda que, segundo Jarvis (26), como a grande maioria dos robôs industriais não utiliza sensores externos, a repetibilidade seja o parâmetro mais correntemente empregado na avaliação de um robô, o projetista dirige sua atenção para a resolução do robô a cujo projeto está entregue — resolução esta que deve ser inferior à precisão que se pretende para o robô porquanto aquela é apenas um dos fatores de que depende esta, — até porque a modelagem requerida para que a precisão e a repetibilidade⁽⁹⁾ fossem estimadas é por demais complexa nas circunstâncias usuais.

Empregou-se o modelo geométrico direto para seleção da resolução de cada um dos seis transdutores de posição angular para que se obtivesse uma resolução de posição da extremidade do órgão terminal do robô melhor ou igual a ± 1 mm, no pior caso (16).

Algumas combinações foram estudadas, conforme a tabela 2.1, tendo sido selecionada a de número cinco.

Sobretudo nos casos em que se utiliza alguma amplificação mecânica entre os pares cinemáticos e os respectivos transdutores deve-se analisar a conjugação da resolução de cada transdutor de posição e a máxima velocidade no par cinemático

(9) Segundo Renaud (20) nos robôs industriais a repetibilidade é claramente inferior à precisão.

NÚMERO DA COMBINAÇÃO	NÚMERO DE PULSOS POR VOLTA DOS TRANSDUTORES DE POSIÇÃO ANGULAR						RESOLUÇÃO DO ROBO (mm)
	BASE	BRACO	ANTEBRAÇO	PUNHO (I)	PUNHO (II)	PUNHO (III)	
1	8000	8000	8000	8000	8000	8000	± 4,186
2	40000	8000	8000	8000	8000	8000	± 3,681
3	40000	40000	8000	8000	8000	8000	± 2,286
4	40000	40000	40000	8000	8000	8000	± 1,154
5	40000	40000	40000	40000	8000	8000	± 0,950
6	40000	40000	40000	40000	40000	8000	± 0,836
7	40000	40000	40000	40000	40000	40000	± 0,836

Tabela 2.1 Resoluções obteníveis na extremidade do robô para diferentes combinações de resoluções de transdutores de posição angular, na configuração geométrica mais crítica.

co correspondente porquanto a máxima freqüência admissível de pulsos é determinada pelo subsistema eletrônico do robô.

- (b) o modo de programação por aprendizado exige — uma vez que por razões de segurança a unidade hidráulica estará desativada durante a programação, — que o robô seja movimentado por meio tão somente de esforço humano, conforme a figura 2.2⁽¹⁰⁾. Pa

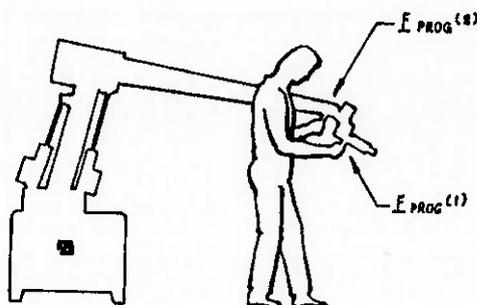


Figura 2.2 Programação do robô por aprendizado manual.

(10) Duas são as alternativas empregadas para mitigar tal problema. Uma delas consiste em realizar a programação através de uma espécie de esqueleto do robô, muito mais leve que este mas que guarda com o mesmo algumas características idênticas — cadeia cinemática, parâmetros de Hartenberg e Denavit, sensores de posição e pistola de pintura, — cuja movimentação é amostrada pelo controlador de maneira similar à que seria empregada se o próprio robô de pintura fosse movimentado. As configurações gravadas na amostragem são posteriormente impostas ao robô de pintura para que o mesmo as reproduza. A segunda alternativa, utilizada para robôs de pintura de maior porte, lança mão de um esqueleto em escala reduzida do robô original, com sensores de posição idênticos aos deste. O robô de pintura, entretanto, encontra-se ativo e funciona como escravo durante a programação. O programador movimenta o esqueleto e o robô simultaneamente procura copiar os movimentos. A amostragem dos pontos é feita de maneira usual. O incremento do custo do robô limita a adoção de tais alternativas (8).

ra situar tal esforço dentro de limites ergonomicamente recomendáveis (65) contrabalanceou-se o robô por meio de molas helicoidais de tração, conforme a figura 2.3.

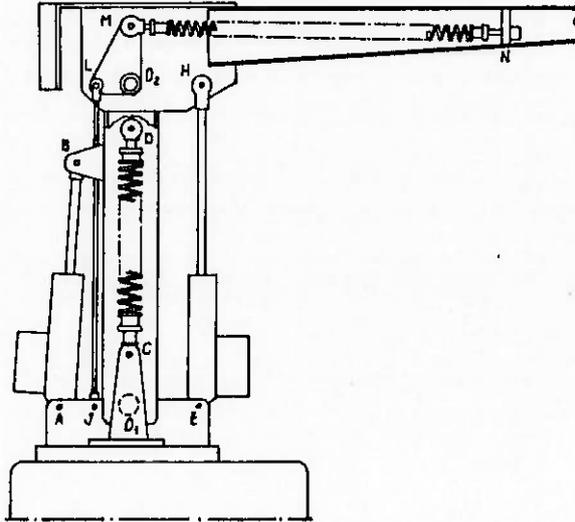


Figura 2.3 Molas de contrabalanceamento.

Empregou-se para tal o modelo dinâmico inverso em situações de equilíbrio estático, com intervenção humana, selecionando-se as molas de contrabalanceamento e estimando-se o esforço humano necessário (16) — mapeado conforme a figura 2.4; e

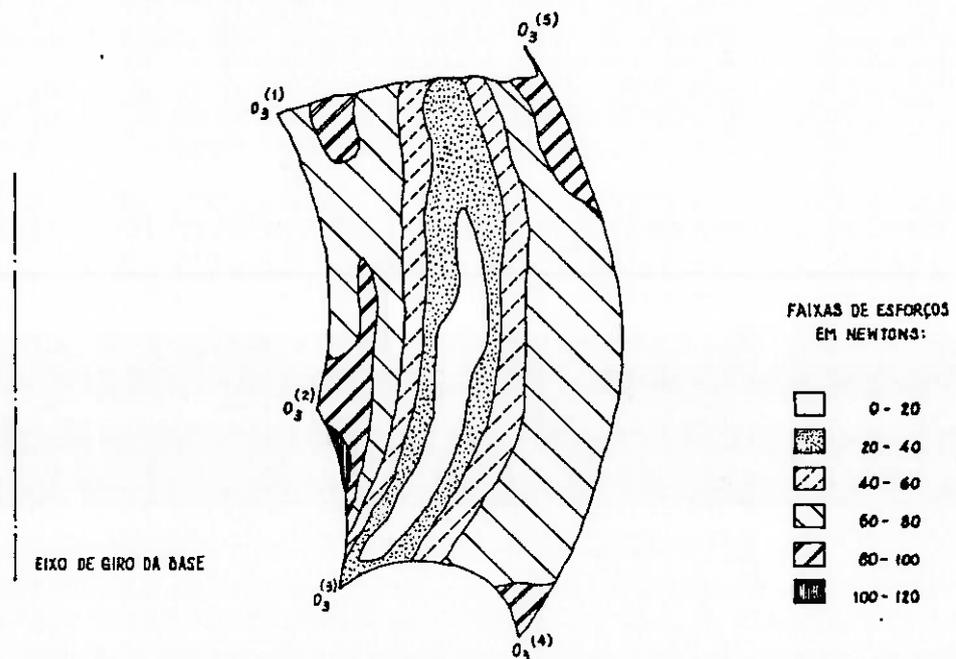


Figura 2.4 Mapeamento do esforço humano para equilíbrio estático do robô.

(c) para que fosse possível estimar as características dimensionais dos atuadores hidráulicos, bem como descartar a possibilidade de existência de algum ponto com comprometimento estrutural, implementou-se um programa computacional para simulação do movimento do robô com estratégia de trajetórias ponto-a-ponto⁽¹¹⁾, desconsiderando-se o subsistema de controle. Utilizou-se, dentre outros, o modelo dinâmico inverso. Calculou-se forças e torques nos atuadores e tensões mecânicas — utilizando-se o princípio de d'Alembert, transformando-se o problema dinâmico num problema estático (40), — em pontos de interesse, supondo-se movimentação sinérgica dos seis graus de liberdade (56).

(11) Excogitou-se que as maiores solicitações ocorreriam não propriamente durante a pintura de peças quaisquer — com perseguição de uma trajetória contínua previamente programada, — mas sim quando do emprego da estratégia de trajetórias ponto-a-ponto, muito usada em trechos improdutivos dos processos.

3 - CONTROLE DO ROBÔ

A complexidade do subsistema de controle a ser adotado tem íntima vinculação com o tipo de problema de controle do robô. Renaud (20) propõe três categorias de problemas, independentemente de maiores considerações acerca das possíveis aplicações do robô e das peculiaridades dos processos nos quais este é chamado a intervir:

Problema do tipo I: define-se as situações inicial e final do órgão terminal sem qualquer exigência quanto à evolução deste entre aquelas;

Problema do tipo II: impõe-se uma trajetória operacional definida em função de algum parâmetro, como um comprimento 's' medido ao longo da curva traçada pelo ponto extremo do órgão terminal quando este evolui segundo tal trajetória; e

Problema do tipo III: a evolução do órgão terminal é conhecida em função do tempo, sendo denominada movimento operacional do órgão terminal.

Não enquadram-se satisfatoriamente em tais categorias os robôs utilizados em tarefas mais complexas nas quais não seja possível conhecer aprioristicamente a trajetória que o robô deve cumprir, como em situações nas quais obstáculos móveis devem ser evitados.

Os robôs de maneira geral apresentam uma dificuldade comum na síntese do controle: seus atuadores — salvo casos particulares, — agem diretamente no espaço generalizado e não no espaço operacional. Em decorrência disto, transforma-se o problema conhecido em termos da evolução do vetor ' w^* ' num problema de obediência ao movimento generalizado que lhe é correspondente, em termos de evolução do vetor ' q^* '. Num problema do tipo I, por exemplo, tal transformação só diz respeito às situações inicial e final do órgão terminal.

A maneira segundo a qual tal transformação se processa — se diretamente através da amostragem dos sensores correspondentes aos graus de liberdade ou indiretamente por meio de modelamento matemático, — depende intimamente dos próprios mecanismos de programação do robô: as situações inicial e final e/ou a trajetória operacional e/ou o movimento operacional podem ter sido informados ao sistema de controle por meio de uma caixa de aprendizado⁽¹²⁾, por aprendizado manual com pontos discretos ou com parâmetros amostrados, ou mesmo por meio de uma linguagem de programação.

Conquanto não se tenha proclamado, até o momento, a adoção de uma definição de robô a ser seguida no país, o senso comum parece inclinar-se para algo similar, senão idêntico, à definição proposta pelo RIA⁽¹³⁾. Mantendo-se certa fidelidade a tal definição, pode-se caracterizar os robôs segundo o tipo de controle da seguinte forma (12) (57):

(I) Robô ponto-a-ponto

Um robô ponto-a-ponto constitui um problema do tipo I, movimentando-se de um ponto específico a outro, previamente programados, a despeito da trajetória cumprida entre eles. Três são as categorias possíveis de movimento em tais robôs:

- (a) Controle seqüencial: cada grau de liberdade é atuado com os demais em posições fixas. Tal procedimento simplifica o controle porque não há interação entre os movimentos porém, dentre outros problemas, ocasiona um tempo de operação superior ao esperado na hipótese de simultaneidade dos mesmos;

(12) "Teaching box" na língua inglesa.

(13) Robot Institute of America: "A robot is a reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move material, parts, tools or specialized devices through variable programmed motions for the performance of a variety of tasks."

- (b) Controle simultâneo não coordenado: os graus de liberdade são conjuntamente acionados, sem coordenação entre os mesmos, de tal forma que o órgão terminal cumpre uma trajetória normalmente impossível de se prever, uma vez que os torques e as forças vinculares e de atrito podem variar de tal forma que as velocidades nos pares cinemáticos variem de maneira imprevisível; e
- (c) Controle simultâneo coordenado: este é o tipo de controle mais empregado na estratégia ponto-a-ponto — ainda que requeira maior refinamento no controlador, — operando de tal forma que os graus de liberdade são sinergicamente movimentados, iniciando e terminando seus movimentos simultaneamente.

Mesmo os robôs mais sofisticados têm a faculdade de operar no modo ponto-a-ponto, normalmente empregado nos trechos dos processos que representam tempos improdutivos;

(II) Robô de trajetória contínua

Neste tipo de robô — caso típico dos robôs de pintura, — a trajetória operacional propriamente dita não é conhecida pelo subsistema de controle, mas sim muitos de seus estados, individualmente armazenados em memória. Se instado a parar entre dois estados discretos quaisquer o robô assumirá um estado que não guarda qualquer relação funcional com os demais estados. Tal é o caso de um robô de pintura: uma tabela de dados — relativos aos estados amostrados da trajetória ensinada pelo programador, — é constituída e sucessivamente editada para ajustes, em conjugação com os resultados visualizados no próprio processo aplicativo. Durante a execução da tarefa os dados são des-

carregados da tabela a uma frequência compatível com os requisitos de processo — constituindo-se, até pela ausência de categorias mais aplicáveis, num problema do tipo III, — e passam a representar as posições de referência a serem perseguidas na malha fechada de controle de cada atuador. A estratégia de controle, em realidade, limita-se ao controle de posição de forma direta⁽¹⁴⁾, ainda que indiretamente resultem velocidades adequadas, sem que estas sejam, contudo, realimentadas na malha de controle. À exceção dos cálculos inerentes à malha de controle — realizados em linguagem de baixo nível do(s) microprocessador(es) adotado(s), — nenhum cálculo ou modelo faz-se necessário em tal estratégia, normalmente indicada para robôs que não requeiram grande precisão. Via de regra em tais sistemas o operador pode especificar a frequência de amostragem para a programação por aprendizado manual, a princípio tão maior quanto maior seja a precisão requerida. Para dispensar a necessidade de aumentar muito a frequência de amostragem para obtenção de maior precisão — o que exige memória razoável ou um trabalho de tratamento de estados amostrados para descarte daqueles excessivamente próximos, — pode-se, por assim dizer, intuir uma relação funcional entre os estados discretos, utilizando-se então uma técnica de interpolação; e

(III) Robô de trajetória controlada

O controlador num robô de trajetória controlada pode gerar linhas retas, arcos de circunferência, curvas interpoladas e outras trajetórias com alta precisão. As trajetó-

(14)A maioria dos robôs industriais, segundo Critchlow (12), utiliza técnica similar, denominada "servocontrole standard".

rias podem ser especificadas algebricamente, além do que basta definir os estados final e inicial para que a geometria do movimento fique completamente delineada. Controla-se cada grau de liberdade para que a trajetória projetada para o órgão terminal seja respeitada. Para que tal ocorra, forças e/ou torques adequados devem ser aplicados nos atuadores dos pares cinemáticos do robô.

Nas situações nas quais é necessário também controlar a velocidade e a aceleração em cada par cinemático consubstancia-se um problema do tipo III, para cuja solução concorrem alguns modelos matemáticos (20), dentre os quais por vezes se inclui o modelo dinâmico inverso, ainda que com grandes simplificações.

Alguns modelos matemáticos empregados em controle em malha fechada têm como característica inerente suas validade e autosuficiência restritas a estreitas regiões de aplicação (8). Para o controle de posição e velocidade de um sistema mecânico articulado, por exemplo, pode-se empregar modelos geométricos e cinemáticos tão somente, supondo-se que a cada instante atinge-se um estado de equilíbrio, qualquer que seja a configuração assumida pelo robô. Naturalmente tal suposição torna-se menos representativa da situação real à medida que as velocidades aumentam e as forças inerciais, centrífugas e de Coriolis tornam-se significativas — assim como as forças de atrito e as deformações elásticas nos corpos do robô, — de tal forma que nos robôs que trabalham com velocidades elevadas os fenômenos dinâmicos devem ser de alguma maneira considerados (15).

(15) A observação da operação de robôs industriais confirma tal circunstância: são mais rápidos nos trechos que não requeiram precisão e mais lentos, dada a relativa simplicidade de seus controladores, quando se necessita alta precisão dos movimentos controlados.

Quando, porém, as velocidades são elevadas e os requisitos de precisão estreitos não resta outra alternativa senão a de se considerar os efeitos de natureza dinâmica. Dada a complexidade, contudo, do modelo dinâmico inverso, o problema principal a nível de sua utilização para fins de controle está associado ao tempo de processamento computacional. Pode-se superar tal dificuldade através de inúmeros métodos (8):

- (a) simplificando o modelo, negligenciando-se alguns termos — é prática comum, em tais casos, o negligenciar das forças centrífugas e de Coriolis, obtendo-se uma equação do modelo dinâmico na forma

$$[A(q)] \ddot{q} = \underline{Q}(q) + \underline{C}, \quad (3.1)$$

cuja principal desvantagem é justamente a fácil perda de aplicabilidade;

- (b) calculando-se alguns termos antecipadamente, para estados discretizados — armazenando-se tais termos juntamente com o movimento generalizado planejado e utilizando-os durante a execução da tarefa, — com duas inevitáveis conseqüências: aumento do tempo de planejamento e elevada capacidade de armazenamento requerida;
- (c) empregando-se processadores mais poderosos, no limite do nível tecnológico; e
- (d) modificando-se o algoritmo de controle, empregando-se a linguagem mais adequada ao problema e ao processador adotado, otimizando-se métodos matemáticos e fatorando-se convenientemente os termos nas equações, preferencialmente desacopladas do modelo.

Na síntese do controle de robôs servo-hidráulicos três são os

problemas principais que se apresentam (22):

- (1) características dinâmicas não-lineares, dependentes das coordenadas generalizadas e da cadeia cinemática;
- (2) severidade do carregamento inercial; e
- (3) interação de movimentos em robôs com vários graus de liberdade (16).

Para a obtenção de movimentos mais precisos com robôs servo-hidráulicos pode-se contornar tais problemas — segundo Hanafusa(22), — através da realimentação da pressão diferencial entre as câmaras de cada atuador, visando-se reduzir os efeitos das forças não-lineares e das forças de interação entre as partes do mecanismo robótico.

Em sendo a pintura industrial uma aplicação que não apresenta requisitos estreitos quanto à precisão dos movimentos adotou-se para o controlador uma estrutura simples como a da figura 3.1: cada grau de liberdade é controlado por meio de um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) digital cujo sinal de saída é convertido, num conversor D/A, para tensão de alimentação da servoválvula correspondente ao respectivo atuador. O sinal de entrada do controlador PID é proporcional à diferença entre os sinais da posição de referência — gerenciada por um microprocessador de 16 bits, — e da posição real, o último deles proveniente de um transdutor de posição angular montado no par cinemático correspondente ao grau de liberdade controlado.

(16) As variações dos momentos de inércia e dos momentos gravitacionais, em função das coordenadas generalizadas e da condição de carregamento, e a interação entre os múltiplos elementos mecânicos em movimento constituem-se em perturbações na força ou no torque de cada atuador individualmente controlado.

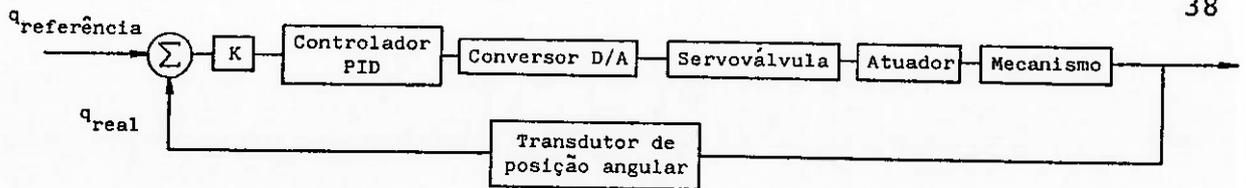


Figura 3.1 Diagrama esquemático da malha de controle de cada grau de liberdade do robô.

A figura 3.2 apresenta o diagrama de blocos do controlador PID adotado (6), cuja função de transferência pode ser escrita como

$$\frac{M(s)}{E(s)} = G(s) = K_P + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (3.2)$$

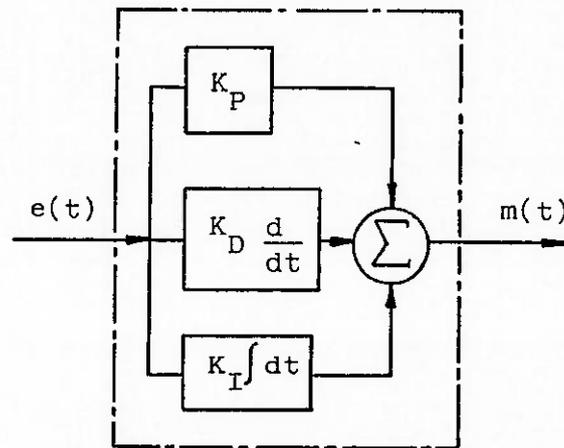


Figura 3.2 Diagrama do controlador PID adotado.

Na realidade, porém, porquanto o sinal de posição de um determinado grau de liberdade é amostrado a uma certa frequência, o sistema configurado é de tempo discreto, de tal forma que o erro — originalmente contínuo no tempo, — passa a ser um trem de impulsos com certos pesos, sendo possível relacionar o sinal contínuo 'e(t)' com a saída do amostrador 'e*(t)', conforme a figura 3.3, através de (43)

$$e^*(t) = \delta_T(t) e(t), \quad (3.3)$$

onde ' $\delta_T(t)$ ' representa um trem de impulsos unitários, conforme a figura 3.4.



Figura 3.3 Amostragem do erro contínuo ' $e(t)$ '.

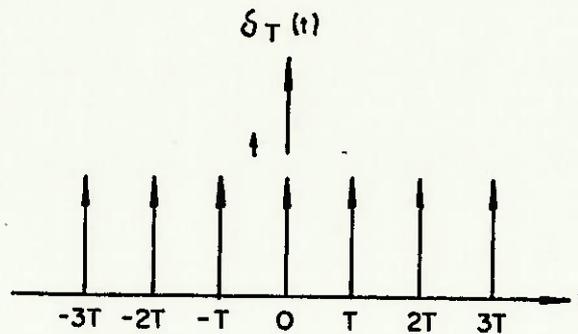


Figura 3.4 Trem de impulsos unitários, sendo ' T ' o período de amostragem.

Pode-se considerar o amostrador como um modulador com a entrada ' $e(t)$ ' como o sinal modulador e o trem de impulsos unitários como a portadora, conforme a figura 3.5.

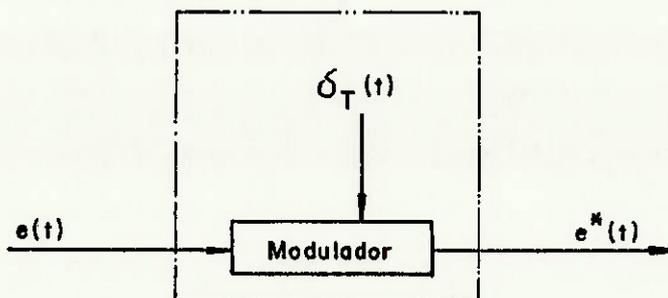


Figura 3.5 Amostrador como um modulador.

Supõe-se que a freqüência de controle é idêntica à freqüência de atualização da leitura dos sinais dos transdutores de posição — sendo a primeira limitada pela capacidade de processamento do microprocessador de 8 bits na execução dos cálculos inerentes ao PID digitalizado, — de tal maneira que o sinal de saída do controlador no instante 't' foi processado a partir dos erros detectados no instante '(t-T)'.

Dado o diagrama da figura 3.2 pode-se escrever

$$m(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int e(t) dt \quad (3.4)$$

Para implementá-la computacionalmente supõe-se que tal equação diferencial pode ser expressa como (50)

$$m(kT) = K_P e((k-1)T) + K_I T \sum_{j=0}^{k-1} e(jT) + \frac{K_D}{T} [e((k-1)T) - e((k-2)T)] \quad (3.5)$$

utilizando-se um extrapolador de ordem zero (5) com um atraso 'T' que é o próprio período de amostragem.

Adotou-se na expressão (3.5) uma diferença simples para o termo derivativo e integração retangular para o termo integrador, ainda que haja recomendações para a adoção, respectivamente, de diferença segunda e integração trapezoidal (29) para atenuação dos efeitos de ruídos (1), podendo-se também utilizar integração poligonal (30) para o termo integrador.

Pode-se implementar o algoritmo implícito na equação (3.5) — conforme o fluxograma da figura 3.6, — em cada um dos microprocessadores de 8 bits. O erro atual é igual à diferença entre o número de pulsos de referência 'NPLSR' — que traduzem a posição desejada, — e o número de pulsos atual 'NPLSA', obtido a partir da contagem dos pulsos emitidos pelo transdutor de posição angular. As

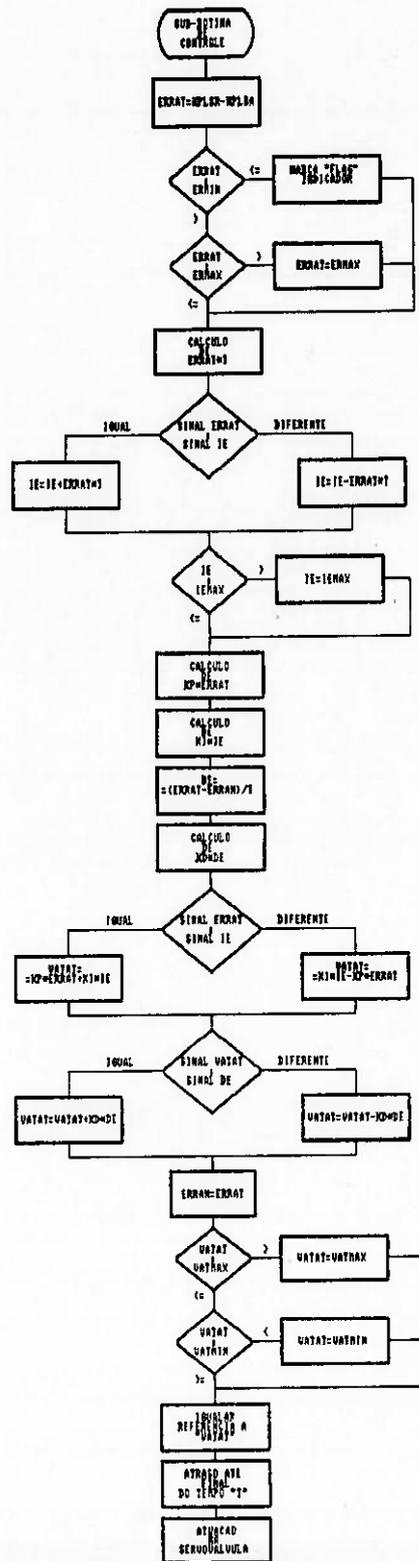


Figura 3.6 Fluxograma do controlador PID digitalizado.

variáveis 'VATMIN' e 'VATMAX' traduzem os valores de saturação da tensão a ser aplicada na servoválvula correspondente ao controlador, existindo conversores D/A para a geração dos sinais analógicos.

4 - SIMULAÇÃO DINÂMICA DO ROBÔ

4.1 Estrutura do Simulador

O processo global de síntese de um robô industrial assemelha-se em muitos aspectos a processos similares desenvolvidos para máquinas automáticas que também empreguem eletrônica e controle.

Os fenômenos dinâmicos envolvidos em robôs dos quais se exija elevado desempenho cinemático, particularmente em robôs articulados, com requisitos crescentes de precisão e repetibilidade, aumentam a complexidade do projeto porquanto se exige afinada sinergia de cada um dos subsistemas⁽¹⁷⁾ do robô — mecânico, eletrônico e de controle, sobretudo, — na consecução de um fim qualquer.

A despeito da complexidade da tarefa, manifesta pela multitude de aspectos e soluções possíveis a serem considerados, inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de sistematizar o projeto do subsistema mecânico de robôs industriais (37) (52) (63).

A arquitetura eletrônica empregada num robô industrial — mesmo que por vezes cerceada pela disponibilidade tecnológica circunstante bem como pela viabilidade econômica, com as quais debate-se toda e qualquer iniciativa no campo da engenharia, — traduz ainda como que uma subjetividade industrial, diferenciando-se de um fabricante de robôs para outro, muito embora já seja possível perceber uma tendência à padronização. Tem crescido, contudo, a tendência à modularidade e ao aumento da capacidade de processamento, prelúdio de robôs com mais graus de liberdade que os atuais, com capacidades globais muito superiores às encontradas no patamar tecnológico presente.

(17) Se não constitui-se numa área genuína — tema ainda controvertido, — a robótica contudo representa um desafio peculiar de integração de subsistemas, a exigir a contribuição técnico-científica multidisciplinar.

O subsistema de controle, por sua vez, tem experimentado contínuos avanços — até mesmo porque inúmeras técnicas de controle e algoritmos computacionais alternativos podem ser implementados e testados em protótipos já configurados mecânica e eletronicamente, ou mesmo num robô industrial, visando-se o aprimoramento de seu desempenho global.

Trabalhos voltados à integração dos subsistemas ou à simulação dinâmica da mesma (44) (62), porém, são mais escassos.

A simulação dinâmica de robôs industriais pode subsidiar o projeto de cada um de seus subsistemas, pode integrar a simulação de uma célula automatizada de manufatura ou mesmo permitir a investigação da compatibilidade dos subsistemas que integram um robô.

A nível de um robô de pintura, contudo, além das aplicações acima delineadas, a simulação dinâmica pode permitir o estudo de deposição de tinta ou outro material qualquer sobre superfícies cuja forma seja conhecida, uma vez conhecidos todos os parâmetros do processo.

Para possibilitar a investigação de tal aplicação através da geração de resultados numéricos particularizou-se o processo de pintura, sem perda de generalidade porquanto pode-se construir uma biblioteca de casos específicos. Supôs-se a pintura de placas retangulares planas, cujos vértices têm coordenadas conhecidas, por meio de aspensão de tinta com jato cônico, sabendo-se o ângulo entre o eixo do cone de pintura e sua geratriz e a vazão volumétrica de tinta por ângulo sólido.

A estrutura apresentada na figura 4.1 constitui a base da simulação dinâmica do robô de pintura com estimativa de deposição de tinta. Princípiase pela leitura global de dados e promove-se a discretização da placa retangular plana em células retangulares através da sub-rotina DISCRET.FOR.

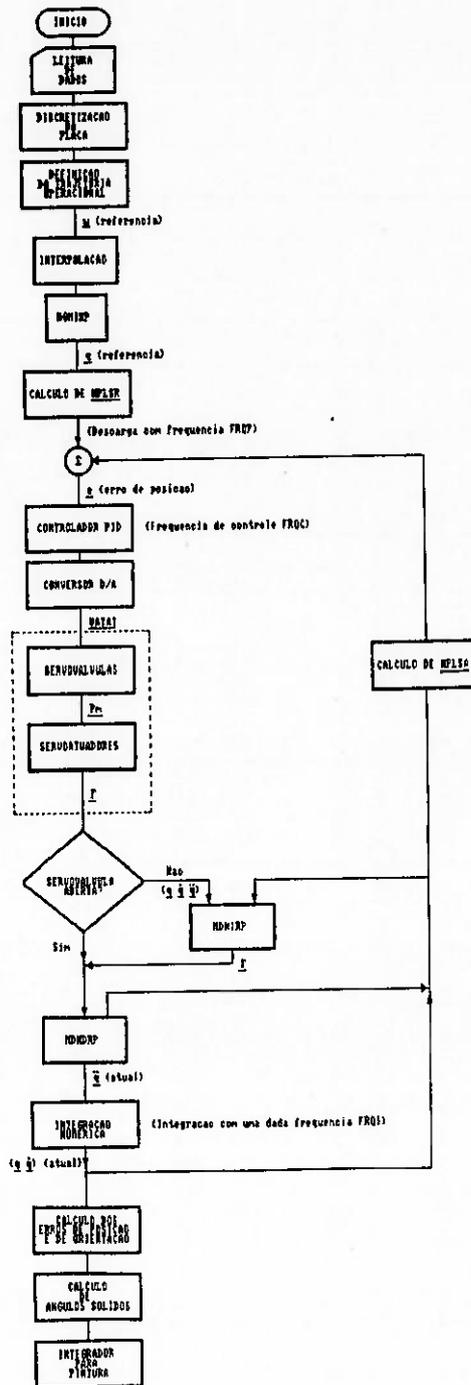


Figura 4.1 Fluxograma da estrutura de simulação do robô de pintura.

Prosegue-se pela definição da trajetória operacional artificial — decorrente da necessidade de substituir a participação humana na programação do robô, — retilínea, com manutenção de uma dada orientação do órgão terminal, conhecendo-se as coordenadas cartesianas dos pontos extremos do segmento de reta definido. Discretiza-se tal segmento em vários outros — cujos pontos extremos têm seu número total fornecido como dado de entrada na simulação, — através da sub-rotina INTERP.FOR, cuja saída é uma tabela obtida a partir das coordenadas cartesianas dos pontos interpolados. Tais pontos hipoteticamente teriam sido justamente os pontos amostrados pelo controlador numa suposta programação por aprendizado. Tudo se passa como se o robô fosse programado, por meio de uma linguagem dedicada, para o traçado de um segmento de reta ao longo do qual a orientação do órgão terminal, conhecida, deve ser preservada.

A sub-rotina INTERP.FOR, após a interpolação propriamente dita, solicita a sub-rotina MGMIRP.FOR — correspondente ao modelo geométrico inverso, — para cada um dos pontos interpolados, de tal forma a obter-se em cada um deles o vetor correspondente das coordenadas generalizadas. Os vetores obtidos — cujos componentes, fisicamente, são ângulos, — são convertidos para vetores cujos componentes são os números de pulsos nos sensores dispostos nos pares cinemáticos do robô — cujas resoluções também constituem-se em dados de entrada para a simulação.

Os vetores assim formados — em número idêntico ao número de pontos interpolados, — constituem a tabela de saída de INTERP.FOR, representando os valores de referência a serem perseguidos pelo controlador, atualizados para este com uma frequência selecionada 'FRQP'.

O vetor de erro 'e' — gerado pela comparação, individualizada para cada grau de liberdade, dos números de pulsos de referência e

de pulsos entendidos como atualizados no evoluir da simulação, — é processado pelo controlador digital do tipo PID, cuja frequência 'FRQC' é suposta idêntica à frequência de atualização das coordenadas generalizadas através da leitura dos sinais dos transdutores de posição angular. O vetor de saída do controlador é transformado num conversor D/A, obtendo-se então o vetor 'VATAT' de tensões aplicadas nas servoválvulas pertinentes ao sistema. Modelou-se as servoválvulas e os atuadores: naquelas obtém-se — a partir de 'VATAT', — a diferença de pressão disponível nas câmaras dos atuadores, enquanto nestes calcula-se as forças e/ou torques disponíveis para o mecanismo robótico.

Se uma servoválvula estiver fechada — como ocorre, por exemplo, se o grau de liberdade a que corresponde não deve movimentar-se para a consecução da tarefa, — emprega-se o modelo dinâmico inverso para, a partir de $(\underline{q} \ \underline{\dot{q}} \ \underline{\ddot{q}})$, calcular o componente de 'e' relativo ao grau de liberdade em questão. Se todas as servoválvulas estiverem abertas utiliza-se diretamente o modelo dinâmico direto, que de qualquer forma é utilizado.

Integrando-se numericamente o vetor 'ü', utilizando-se os vetores 'q' e 'q̇' do instante anterior — integração efetuada pelo método de Euler com uma frequência 'FRQI', — pode-se atualizar os vetores de posição e de velocidade do robô.

Emprega-se o vetor 'q', atualizado, nos cálculos inerentes ao próximo instante de simulação, no cálculo dos componentes do vetor 'NPLSA' do número de pulsos atualizados — que subtraídos dos pulsos de referência permitem recalcular o vetor 'e', — no cálculo dos erros de posição e de orientação do órgão terminal do robô em relação à trajetória operacional definida — calculados na sub-rotina ERRO.FOR, — e no cálculo dos ângulos sólidos internos de poliedros cujos vértices são identificáveis com a extremidade da pis

tola de pintura e com os vértices das células retangulares discretizadoras da placa retangular plana.

Supondo-se que pistola, jato e placa estejam configurados como na figura 4.2, pode-se calcular os ângulos sólidos de tetraedros ir regulares, como aqueles definidos pelos vértices EABC e EACD, a par tir do vértice comum 'E'. Repete-se tal procedimento, em cada ins tante considerado, para cada uma das células recobertas pelo jato de tinta.

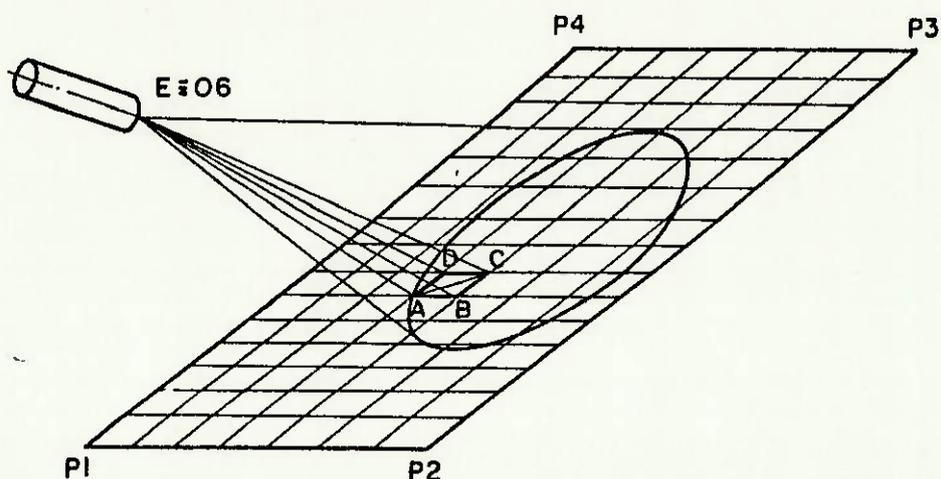


Figura 4.2 Placa retangular plana discretizada com células re-
tangulares, com jato cônico de tinta incidente.

Supondo-se que a vazão de tinta por ângulo sólido seja uniforme e constante em todo o volume do cone — hipótese não obrigatória, haja vista que poder-se-ia supor uma lei de distribuição de vazão, — que não ocorra ricochete de tinta na placa e nem formação de né voa na aspersão, e desprezando-se a dinâmica das partículas de tin ta, pode-se estimar o volume de tinta dirigido para uma célula co- mo a ABCD, conforme a figura 4.2, num dado intervalo de tempo, co- mo sendo o produto da vazão volumétrica de tinta por ângulo sólido, do ângulo sólido interno ao pentaedro ABCDE calculado a partir do

vértice 'E' e do intervalo de tempo. Automatizou-se tal processo de cálculo, célula a célula, verificando-se através da sub-rotina VERIF.FOR a pertinência ou não da célula considerada, no cone de pintura, instante a instante — porquanto as células não contidas no cone num dado instante não estão a ser pintadas, — e calculando-se os ângulos sólidos adequados por meio da sub-rotina ANGSOL.FOR.

Um acumulador matricial armazena o total do volume de tinta dirigido a cada célula. Ao final da simulação, o quociente do volume total de tinta de uma célula pela sua área produz uma estimativa da espessura média do filme de tinta depositado na mesma. A forma geométrica da superfície pintada, o tipo de célula discretizadora e a forma do jato de aspensão podem ser diferentes daqueles assumidos, sem que isto signifique um comprometimento da generalidade da solução proposta.

Para a simulação dinâmica do robô de pintura servo-hidráulico foram assumidas algumas hipóteses adicionais no modelo global, a seguir descritas:

- (a) na condição inicial do movimento operacional o robô encontra-se parado na configuração correspondente ao ponto inicial do segmento de reta, com todas as servoválvulas fechadas;
- (b) a compressibilidade efetiva de fluidos na transmissão de potência depende essencialmente — em sistemas hidráulicos convencionais, — da quantidade de ar diluído no fluido, do próprio fluido, dos reservatórios e tubulações, e da temperatura e pressão vigentes nos mesmos (38). Supôs-se, entretanto, que a compressibilidade efetiva do fluido empregado é nula;
- (c) para que não fosse necessário modelar matematicamente todo o subsistema hidráulico provedor das servoválvulas — o que

além de exigir a clara definição do mesmo e de seus componentes, bem como das suas características dinâmicas, ultrapassa o objetivo deste trabalho, — supôs-se que o mesmo é representado por um reservatório infinito de fluido pressurizado, sendo sua pressão um dado de entrada. Tal hipótese constitui-se, aliás, em algo desejado no projeto de servosistemas hidráulicos, nos quais a tentativa de supressão das flutuações de pressão, provocadas principalmente pela pulsação na vazão das bombas hidráulicas empregadas, é prática usual (41);

- (d) desconsiderou-se a dinâmica do conversor D/A — concernente à arquitetura eletrônica, — supondo-se que sua função de transferência seja unitária;
- (e) desconsiderou-se as perdas de pressão na tubulação inerente ao circuito hidráulico: se assim não se procedesse ter-se-ia que conhecer, dentre outras coisas, o arranjo físico, as conexões e os diâmetros empregados;
- (f) supôs-se que a temperatura do fluido hidráulico, na condição de regime, mantém-se localmente constante, de tal forma que as propriedades físicas médias daquele também se mantenham inalteradas porquanto quaisquer outras influências sobre estas foram igualmente ignoradas;
- (g) admitiu-se a inexistência de vazamentos internos nos atuadores hidráulicos, como é razoável supor em tais condições (42);
- (h) desconsiderou-se a dinâmica dos transdutores de posição angular bem como da transmissão de dados entre estes e o controlador, supondo-se a instantaneidade dos eventos correspondentes; e
- (i) supôs-se a utilização de servoválvulas de dois estágios com motor de torque de imã permanente, com realimentação de po

sição entre estes, conforme acurada descrição de Merritt (41). A equação que relaciona o deslocamento do carretel e a voltagem aplicada, em tais servoválvulas, é diferencial de sexta ordem (60), cuja aplicação na simulação foi descartada pelo desconhecimento de valores significativos para todos os parâmetros envolvidos. Adotou-se, então, uma equação de segunda ordem para relacionar o deslocamento ' x_{carr} ' do carretel da servoválvula e a tensão ' V_{ap} ' nela aplicada:

$$\frac{x_{carr}}{V_{ap}} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}, \quad (4.1)$$

sendo ' ζ ' o fator de amortecimento e ' ω_n ' a frequência natural da servoválvula. Simulações iniciais revelaram que o sistema robótico a ser controlado é relativamente de baixa frequência: a partir de então adotou-se para cada servoválvula a expressão

$$x_{carr} = K V_{ap}, \quad (4.2)$$

diminuindo-se sensivelmente o tempo de processamento consumido nas simulações. Partindo-se da equação de Bernoulli empregou-se para as servoválvulas a idéia de escoamento em orifícios de cantos vivos, de tal forma que as vazões volumétricas nos seus pôrticos sejam obteníveis por meio de

$$Q_a = C_d \pi d_{carr} x_{carr} (p_s - p_a)^{1/2} \left(\frac{2}{\rho}\right)^{1/2} \quad (4.3)$$

$$Q_b = C_d \pi d_{carr} x_{carr} (p_b - p_t)^{1/2} \left(\frac{2}{\rho}\right)^{1/2} \quad (4.4)$$

sendo ' C_d ' o coeficiente de descarga do orifício, ' d_{carr} ' o diâmetro do carretel da servoválvula, ' p_s ' a pressão de suprimento, ' p_a ' e ' p_b ' as pressões respectivamente nos pôrticos 'a' e 'b' da servoválvula, ' p_t ' a pressão de retorno e ' ρ ' a densidade do fluido.

Supondo-se a adoção de atuadores lineares de dupla haste admitiu-se que

$$Q_a = Q_b \quad (4.5)$$

Admitiu-se, além disto, que

$$p_t = 0 \quad (4.6)$$

de tal maneira que seja possível condensar as expressões (4.3) e (4.4) sob a forma

$$Q = C_d \pi d_{carr} x_{carr} (p_s - p_m)^{1/2} \left(\frac{1}{\rho}\right)^{1/2}, \quad (4.7)$$

desde que ' p_m ' seja igual a

$$p_m = p_a - p_b \quad (4.8)$$

Assim, conhecendo-se o estado de um dado atuador hidráulico a nível cinemático pode-se calcular a vazão 'Q' desde que se conheça a densidade ' ρ ' e as características dimensionais da quele. Sendo ' C_d ', ' d_{carr} ' e ' p_s ' dados de entrada, pode-se calcular ' p_m ' por intermédio da equação (4.7) desde que se conheça ' x_{carr} ' através da expressão (4.2), considerando-se a atualização de ' v_{ap} ' conforme a atuação do controlador.

Calcula-se as forças e torques disponíveis nos atuadores, obtendo-se as acelerações em cada par cinemático através do modelo dinâmico direto do robô, conforme a figura 4.1. Dadas tais acelerações atualiza-se os valores das velocidades respectivas, o que possibilita que se recalcule a vazão 'Q' em um dado atuador, reiniciando-se o processo pormenorizado.

4.2 Resultados Numéricos

Após a construção, implementação e testes — que destinaram-se à investigação de eventuais inconsistências, — do simulador computacional algumas simulações foram efetuadas. As primeiras delas foram utilizadas para a sintonia do controlador, enquanto as demais prestaram-se à investigação das influências de alguns parâmetros no desempenho operacional do robô de pintura.

Estudos e dados publicados sobre a sintonia de controladores do tipo PID, de diferentes estruturas, trazem consigo duas características que exigem alguma reflexão quando deseja-se utilizar aqueles num controlador destinado ao controle de um robô industrial (11) (17) (27) (39):

- (a) a sintonia de tais controladores pelos critérios convencionais da integral do erro admite um comportamento oscilatório amortecido da variável de saída do controlador (34), o que por vezes não é admissível num robô industrial; e
- (b) os critérios aplicados propiciam a descoberta de constantes que se diferenciam segundo o tipo de problema: sintonia para o caso de perturbação e sintonia para o caso de mudança da referência do controlador. No caso de robôs industriais, cujos graus de liberdade interajam dinamicamente, em movimento estarão colocados os dois tipos de problema.

Tais dificuldades ampliam-se pelo fato de que a interação dinâmica entre os graus de liberdade de um robô articulado varia sensivelmente em função do movimento generalizado a que este possa ser submetido. Para a sintonia do controlador do robô de pintura simulado, cuja estrutura foi apresentada na figura 3.2, principiouse pela seleção do ganho proporcional do controlador de cada grau de liberdade, simulando-se o comportamento dinâmico de cada atuador isoladamente, omitindo-se destarte os fenômenos de interação dinâmica entre os seis graus de liberdade. Adotou-se aproximadamente a metade do ganho limiar a partir do qual aparecem oscilações, procedimento este amparado na prática usual de automação industrial e repetido para cada um dos atuadores.

Alguns ajustes foram feitos em virtude de simulações posteriores com movimentos generalizados sinérgicos, simulações estas às quais incorporaram-se tentativas de sintonia dos ganhos integrais e derivativos. Realizadas como se os ganhos de interesse estivessem sendo ajustados por meio de potenciômetros num painel, tais tentativas revelaram a complexidade de ajuste cooperativo dos ganhos no controlador de um robô industrial. Como tais simulações demandam, num computador de grande porte, razoável tempo de processamento, a pesquisa de ganhos otimizados — e virtualmente de critérios de sintonia que melhor atendam as especificidades da robótica, — fica como sugestão para trabalhos futuros. Dentre os resultados apresentados neste trabalho alguns deles foram obtidos através do simulador TESE5.FOR — que simula tão somente a evolução dinâmica do robô, — enquanto os demais foram alcançados por intermédio do simulador TESE6.FOR — que simula dinamicamente o robô e o processo de pintura.

Para que fosse possível quantificar os resultados das estimativas de deposição de tinta — como apoio matemático ao apelo gráfi-

co, — empregou-se os seguintes parâmetros estatísticos (4) (46):

Em - espessura média de tinta depositada na placa retangular;

VQM - valor quadrático médio dos valores celulares;

σ_x^2 - variância; e

RMS⁽¹⁸⁾ - raiz quadrada positiva de VQM.

Com o intuito de propiciar condições didáticas de confrontação entrecruzada dos resultados a seguir apresentados, todos eles foram obtidos com uma situação comum, qual seja a pintura de uma placa retangular verticalmente disposta cujos vértices são $P_1(-0.1875; 2.2; 0.6)$, $P_2(0.1875; 2.2; 0.6)$, $P_3(0.1875; 2.2; 2.1)$ e $P_4(-0.1875; 2.2; 2.1)$ — coordenadas cartesianas referentes à base $B_0(O_0; x_0; y_0; z_0)$, conforme a figura 2.1, — por meio de um jato cônico, cujo ângulo entre o eixo do cone e a geratriz iguala trinta graus, proveniente de uma pistola cuja extremidade deve mover-se do ponto $(0; 1.7; 0.6)$ ao ponto $(0; 1.7; 2.1)$, preservando-se a orientação caracterizada pelos ângulos de Bryant $(0; 0; 0)$ e supondo-se que o início e o fim da aspensão de tinta coincidam com o início e o fim do movimento robótico. A única simulação que constitui-se em exceção a tal situação terá sua excepcionalidade relevada no trecho oportuno.

Alguns limites foram supostos e respeitados nas simulações:

- (a) a frequência 'FRQP' deve ser menor do que ou igual a 'FRQC' porquanto não faria sentido atualizar intermediariamente o vetor de referência num interregno não perscrutado pelo controlador; e
- (b) supondo-se que o segmento de reta atinente à trajetória operacional artificial seja discretizado com 'NP' pontos pode-se escrever

(18) "Root mean square" na língua inglesa.

$$l = \frac{L}{(NP-1)} \quad (4.9)$$

sendo 'L' a distância entre os pontos extremos do segmento e 'l' a distância entre dois pontos interpolados consecutivos quaisquer. Sendo ' Δt ' o intervalo de tempo consumido pelo robô no cumprimento do movimento operacional então

$$v_m = \frac{L}{\Delta t} = \frac{(NP-1) l}{\Delta t} \quad (4.10)$$

sendo ' v_m ' a velocidade média da extremidade da pistola de pintura. Como é desejável que o robô siga muito de perto o conjunto de referências que lhe é sugerido com a frequência 'FRQP', supõe-se imprescindível que

$$FRQP \approx \frac{NP-1}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Conjugando-se a expressão (4.11) e o item (a) obtém-se

$$NP \leq FRQC \cdot \Delta t + 1 \quad (4.12)$$

restrição esta mais crítica para velocidades médias elevadas, conseqüentemente. A inequação (4.12) revela, portanto, que por vezes o número de pontos interpolados pode não estar limitado pela capacidade de memória do sistema mas sim pela composição de ' v_m ' máxima exigida e de 'FRQC'. Assim, como na situação comum às simulações tem-se

$$L = 1,5 \text{ m}, \quad (4.13)$$

supondo-se que a máxima velocidade média seja

$$v_m = 1.5 \text{ m/s} \quad (4.14)$$

resulta um intervalo ' Δt ' mínimo de 1s. Para uma frequência supostamente exequível pela arquitetura eletrônica imaginada

$$\text{FRQC} = 200 \text{ Hz} \quad (4.15)$$

ter-se-ia

$$NP \leq 201 \quad (4.16)$$

$$l \geq 7.5 \text{ mm} \quad (4.17)$$

devendo-se observar que ' ' é significativamente maior que a resolução suposta, conforme comentários precedentes à tabela 2.1, o que pode sugerir incompatibilidade de sistemas se 'FRQC' estiver, por exemplo, limitada por algo em torno do valor expresso em (4.15).

4.2.1 Influência da Frequência 'FRQP' na Velocidade de Movimento da Pistola de Pintura

É comum nos sistemas robóticos que o programador dos mesmos possa especificar o percentual da velocidade nominal que deseja para um dado movimento. Como na arquitetura global imaginada supusera-se ser possível alterar ' v_m ' através da variação de 'FRQP', investigou-se a influência em epígrafe por meio de simulações cujos resultados estão condensados na tabela 4.1. A figura 4.3 ilustra a relação entre 'FRQP' e o tempo consumido no movimento, supondo-se

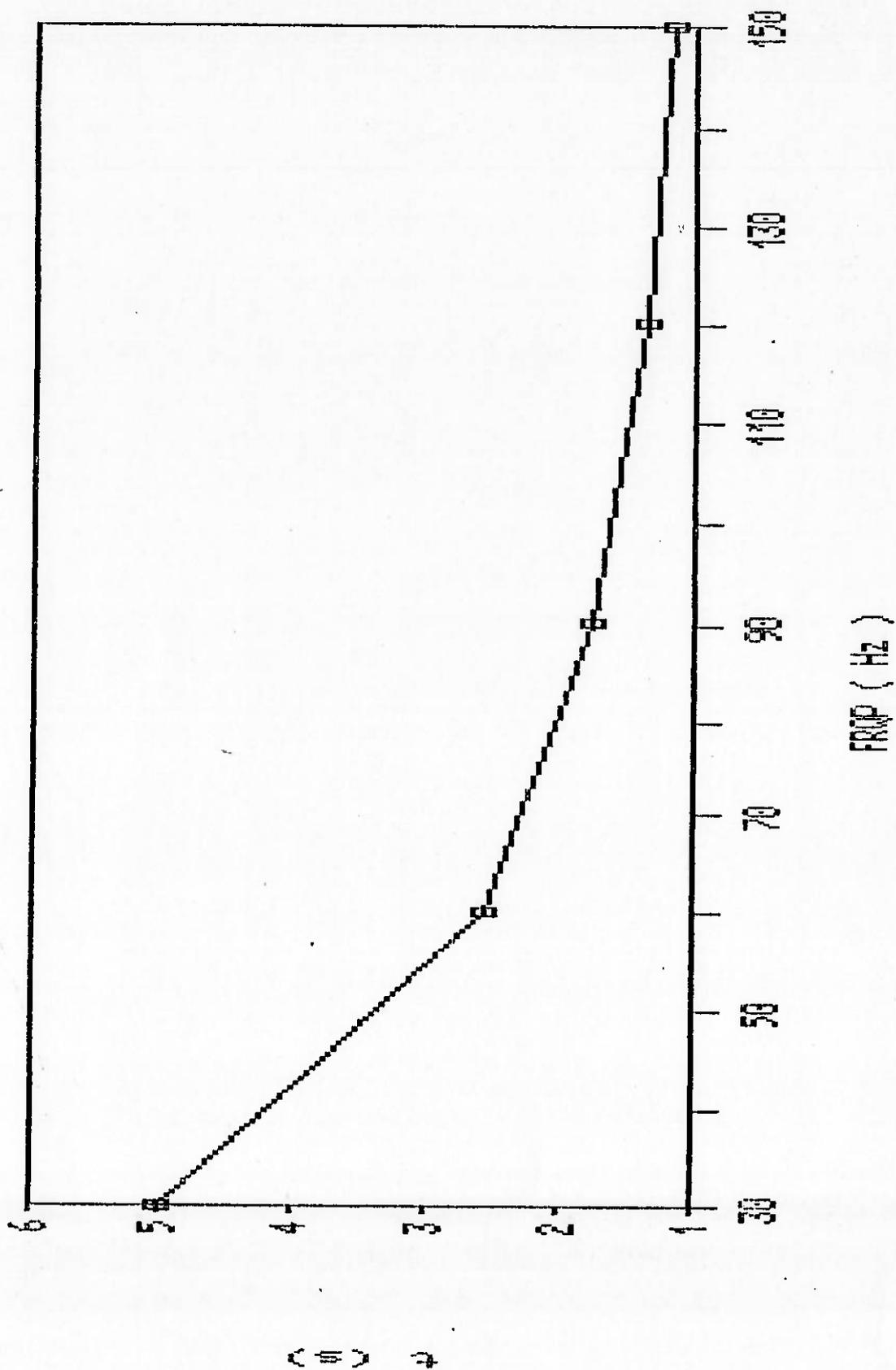


Figura 4.3 Relação entre 'FRQP' e o tempo consumido no movimento;
 (NP = 150; p = 70 bar; FRQC = 200 Hz).

CASO	SIMULADO			ERROS MÁXIMOS		E_m	VOK	$\sqrt{x_2}$	RMS
	FRQP (Hz)	t (s)	V_m (m/s)	POSICAO (mm)	ANGULAR (graus)	(μm)	(μm^2)	(μm^2)	(μm)
(a)	30	5.05	0.2970	5.71	0.6818	11.731	206.508	68.88	14.370
(b)	60	2.59	0.5792	11.87	1.0893				
(c)	90	1.78	0.8427	20.15	2.1088				
(d)	120	1.37	1.0949	28.53	3.4837				
(e)	150	1.165	1.2876	33.39	2.5861	12.072	209.604	63.87	14.478

Tabela 4.1 Influência de 'FRQP' sobre ' v_m ';

(NP=150; p=70 bar; FRQC = 200 Hz).

a mesma trajetória operacional. O aspecto da deposição de tinta na placa retangular plana para o caso (e) da tabela 4.1 está representado na figura 4.4.

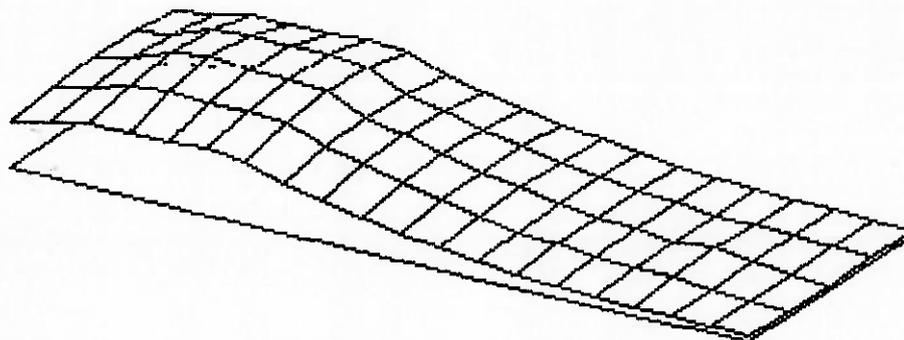


Figura 4.4 Aspecto da deposição de tinta na placa; (Tabela 4.1 - caso (e)).

Pode-se observar uma deposição excessiva de tinta numa dada região da placa — região esta próxima do ponto de partida da extremidade da pistola de pintura, — cuja razão de existência vincula-se à difícil superação do transiente de partida, com erros de posição e de orientação substancialmente maiores no início de operação do que no restante do intervalo de tempo consumido no movimento operacional, conforme as figuras 4.5 e 4.6, correspondentes ao caso (e) da tabela 4.1.

Os resultados apresentados na tabela 4.1 indicam a tendência de

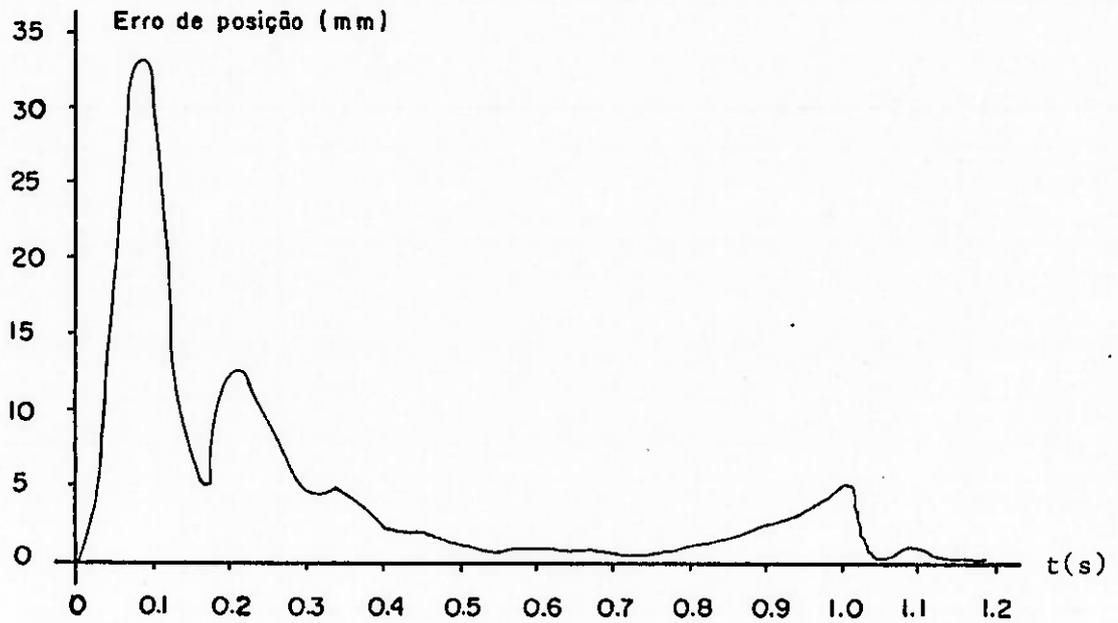


Figura 4.5 Erro de posição da extremidade da pistola de pintura durante o movimento operacional (Tabela 4.1 - caso (e)).

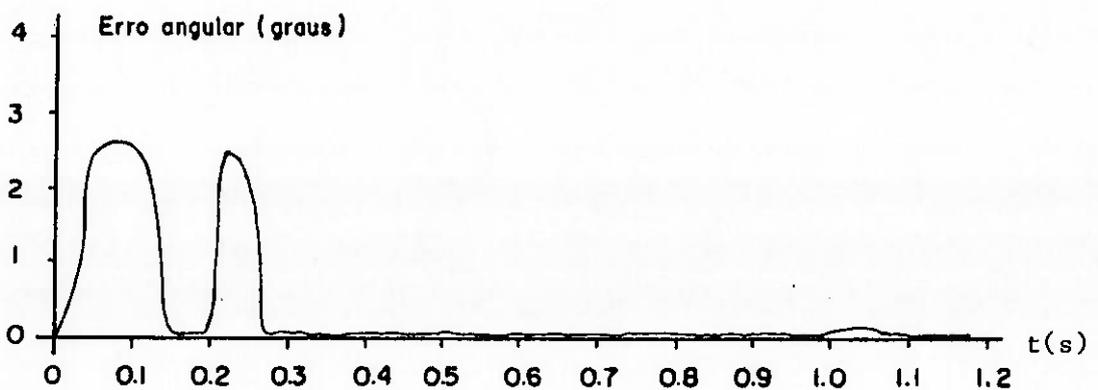


Figura 4.6 Erro de orientação da pistola de pintura durante o movimento operacional (Tabela 4.1 - caso (e)).

diminuição dos erros máximos de posição e de orientação à medida que, ceteris paribus, aumenta-se o tempo de execução do movimento diminuindo-se 'FRQP'. Apesar, contudo, de tal tendência, o resultado no que diz respeito à pintura permanece ruim, como bem atestam os parâmetros estatísticos pertinentes ao caso (a) da tabela 4.1, uma vez que os erros máximos diminuíram mas os erros nos demais trechos mantiveram-se, em compensação, em níveis mais elevados que no caso (e).

4.2.2 Influência da Força Virtualmente Proveniente do Acionamento da Pistola

A aspersão de tinta num processo de pintura suscita forças de reação na pistola, cuja influência no desempenho cinemático do robô revelou-se pequena na investigação promovida para alguns valores de tal força, colinearizada com o eixo ' y_6 ', conforme a figura 2.1, cujos resultados encontram-se na tabela 4.2.

CASO	FORÇA EM ' y_6 ' (N)	SIMULADO		ERROS MÁXIMOS	
		t(s)	V _m (m/s)	POSICAO (mm)	ANGULAR (graus)
(a)	0	1.370	1.0949	28.53	3.4837
(b)	-20	1.375	1.0909	28.80	3.7012
(c)	-40	1.375	1.0909	29.05	3.8954
(d)	-100	1.380	1.0870	30.09	4.8562

Tabela 4.2 Influência da força de reação na pistola;
(NP=150; p=70 bar; FRQP = 120 Hz; FRQC = 200 Hz).

Deve-se ressaltar que os valores supostos da força de reação nos casos (b), (c) e (d) suplantam — enquanto valores absolutos, — os valores reais em situações similares (59).

4.2.3 Influência da Pressão da Unidade Hidráulica

Parâmetro escolhido no projeto de um robô servo-hidráulico, com influência decisiva no dimensionamento dos equipamentos hidráulicos empregados, desejava-se examinar a pressão de suprimento através de seus efeitos no desempenho do movimento operacional, na expectativa mesmo de um comportamento monotônico.

As simulações — vide tabela 4.3, — não confirmaram tal expectativa mas revelaram a necessidade de estudos mais aprofundados com entrecruzamento de parâmetros, na medida em que a influência analisada pode apresentar-se modificada em movimentos operacionais diferentes, sob condições gerais diversas, o que aliás também é válido na interpretação de quase todas as simulações realizadas no presente trabalho.

CASO	SIMULADO			ERROS MAXIMOS	
	p (bar)	t(s)	V _m (m/s)	POSICAO (mm)	ANGULAR (graus)
(a)	50	1.185	1.2658	44.12	4.497
(b)	70	1.165	1.2876	33.39	2.5861
(c)	90	1.135	1.3216	34.58	6.1045
(d)	110	1.115	1.3453	31.75	6.1961
(e)	130	1.135	1.3216	29.84	6.9397

Tabela 4.3 Influência da pressão da unidade hidráulica; (NP=150; FRQP = 150 Hz; FRQC = 200 Hz).

4.2.4 Influência do Número de Pontos de Interpolação do Segmento de Reta

Respeitado o limite suposto na expressão (4.12) o número de pontos 'NP' constitui-se numa variável de fácil manipulação, seja pela alteração da frequência de amostragem nos processos de programa

ção por aprendizado seja pelo refinamento da discretização do segmento de reta — ou uma curva qualquer cuja função seja conhecida, — num imaginário processo de programação de pintura por meio de uma linguagem de alto nível. Dada tal característica seria interessante descobrir uma relação entre distância entre pontos interpolados e qualidade da deposição de tinta — analisada sob o ponto de vista dos parâmetros estatísticos empregados, tão somente. Realizadas de tal forma que em todas elas se obtivesse velocidades médias da extremidade da pistola semelhantes, as simulações resumidas na tabela 4.4 não apresentaram nenhuma contribuição significativa na direção da melhoria da qualidade de pintura.

CASO	SIMULADO			ERROS MAXIMOS		DISTANCIA	Em	VOM	$\nabla \times 2$	RMS
	NP (= FRQP)	t(s)	V_m (m/s)	POSICAO (mm)	ANGULAR (graus)	PONTOS (mm)	(μm)	(μm^2)	(μm^2)	(μm)
(a)	25	1.155	1.2987	55.72	11.6919	62.5	10.477	145.498	35.73	12.062
(b)	50	1.150	1.3043	45.54	8.8772	30.6	11.142	174.769	50.62	13.220
(c)	75	1.160	1.2931	43.05	7.8491	20.3	11.319	181.714	53.59	13.480
(d)	100	1.155	1.2987	39.60	6.2386	15.2	11.588	192.040	57.76	13.858
(e)	125	1.155	1.2987	40.50	6.6287	12.1	11.509	182.469	50.01	13.508
(f)	150	1.165	1.2876	33.39	2.5861	10.1	12.072	209.604	63.87	14.478

Tabela 4.4 Influência do número de pontos 'NP' ;
(p = 70 bar; FRQC = 200 Hz).

Se apresentados na forma gráfica os resultados dos casos (a) a (f), relativos à deposição de tinta na placa, assemelhar-se-iam em aspecto à figura 4.4, com uma característica comum: em todos eles o início do movimento é marcado por um comportamento similar ao ilustrado nas figuras 4.5 e 4.6.

4.2.5 Influência da Frequência de Controle

Ainda que seu aumento esteja limitado pelo processador e pela arquitetura eletrônica adotados — supondo-se que os algoritmos

computacionais tenham sido otimizados, dentro da realidade circunstante, com o objetivo de minimizar os tempos inerentes de processamento, — investigou-se a frequência 'FRQC' de controle enquanto variável que pudesse melhorar a distribuição da deposição de tinta na peça suposta. Nos casos simulados, contudo, uma vez mais o início do movimento mostrou-se ineficiente e a deposição estatisticamente pobre, conforme os resultados apresentados na tabela 4.5,

CASO	SIMULADO		ERROS MÁXIMOS			E_m	VOM	$\sqrt{x^2}$	RMS
	FRQC (Hz)	t(s)	Vm(m/s)	POSICAO (mm)	ANGULAR (graus)	(μm)	(μm^2)	(μm^2)	(μm)
(a)	75	1.3067	1.14793	43.82	7.7192	11.674	188.963	52.68	13.746
(b)	150	1.16	1.29310	41.60	7.5742	11.365	183.545	54.38	13.548
(c)	225	1.1467	1.30810	41.95	6.9327	11.458	186.840	55.55	13.669
(d)	300	1.1233	1.33535	43.35	8.1101	11.242	179.587	53.20	13.401

Tabela 4.5 Influência na frequência de controle;
(NP = 75; p = 70 bar; FRQP = 75 Hz).

muito embora não se deva desconsiderar que se os ganhos do controlador PID forem selecionados segundo critério melhor adaptado ao problema específico talvez se obtenha melhores resultados, preservando-se todas as hipóteses assumidas.

Ainda que os resultados tenham quase que unanimemente sugerido a necessidade de aperfeiçoamento da resposta do robô ao transiente correspondente ao início do movimento operacional, deve-se considerar que numa situação real tal comportamento talvez não traga maiores problemas ao processo porquanto o programador possui recursos de edição desconsiderados nas simulações. Em todas estas supôs-se sempre que a aspersão começa com o início do movimento do robô, mantém-se constante ao longo deste e cessa simultaneamente com a paralisação do robô. O ligar/desligar da pistola de pintura em sucessivas reedições durante a programação, segundo as conveniências do processo, pode corrigir pelo menos parcialmente os problemas detec

tados — desde que o robô, naturalmente, possua boa repetibilidade comportamental para uma mesma tarefa programada. Aduza-se aos recursos de edição acima mencionados a possibilidade concreta de emprego de outros bicos de aspersão cujos jatos ocasionem distribuições de partículas mais convenientes, cuja descoberta exige algum trabalho experimental.

Conquanto se disponha na prática de alguns recursos, elaborou-se uma relação de alternativas — que se diferenciam pela estratégia empregada, — para eliminação dos problemas analisados, a seguir comentadas:

- (a) se as dimensões da peça permitirem, pode-se programar o robô de tal maneira que no momento de iniciar-se a liberação de tinta o robô já se encontre em movimento e já tenha superado o transiente inicial, ou mesmo impor ao robô um movimento — com aspersão do início ao fim deste, — ao qual corresponda uma distância percorrida, pela extremidade da pistola, superior àquela aparentemente necessária. A última hipótese foi examinada na pintura de uma placa retangular plana menor que a anterior, também verticalmente disposta, cujos vértices são $P_1(-0.1875; 2.2; 1.1)$, $P_2(0.1875; 2.2; 1.1)$, $P_3(0.1875; 2.2; 1.9)$ e $P_4(-0.1875; 2.2; 1.9)$, mantendo-se a trajetória operacional e o jato de tinta idênticos aos utilizados nas simulações anteriores. A figura 4.7 apresenta o aspecto da deposição de tinta resultante, cujos parâmetros estatísticos são:

$$E_m = 19.455 \mu m$$

$$VQM = 406.228 \mu m^2$$

$$\sigma_x^2 = 27.73 \mu m^2$$

$$RMS = 20.155 \mu m$$

números estes que denotam significativa melhoria no processo;

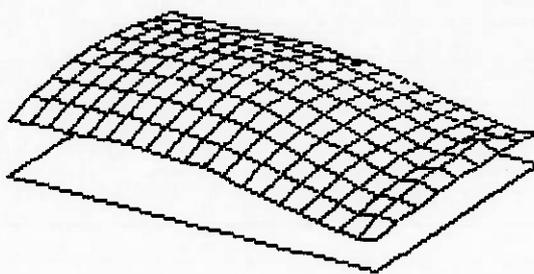


Figura 4.7 Aspecto da deposição de tinta numa placa menor com a mesma trajetória operacional;
(NP = 150; p = 70 bar; FRQC = 300 Hz; FRQP = 150 Hz).

- (b) pode-se impedir a atualização do conjunto de referências para os controladores se o erro em algum grau de liberdade su plantar um limite pré-fixado, voltando a permiti-la tão somente após a adequada diminuição do erro em questão. Esta alternativa foi computacionalmente implementada, após o que algumas simulações foram realizadas: os resultados foram pouco atraentes na medida em que os parâmetros estatísticos cor respondentes foram pobres — ainda que se tenha obtido efetiva diminuição dos erros máximos de posição e de orientação o movimento delonga-se excessivamente em sua fase inicial, com demasiada deposição de tinta no trecho correspondente. Acredita-se, contudo, que os resultados possam melhorar se o controlador for sintonizado de acordo com esta estratégia, procedimento este não executado; e
- (c) pode-se planejar rampas de aceleração e desaceleração que e xijam o equipamento no limiar dinâmico do mesmo — dadas as suas características construtivas, — visando-se uma superação mais breve do transiente inicial. Imagina-se que seja possível obter tal efeito por três meios: variando-se 'FRQP' de zero a um valor de patamar na fase de aceleração e invertendo-se o procedimento na fase de desaceleração, aumentando-se a densidade de pontos interpolados, de maneira conve-

niente, nos extremos da trajetória operacional ou adotando-se ganhos diferenciados para o controlador PID nas fases de aceleração e desaceleração.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

A construção de um simulador dinâmico de um robô industrial requer o conhecimento detalhado e o modelamento de seus subsistemas, não raro razoavelmente complexos. Na medida em que apresenta a simulação dinâmica tanto de um robô de pintura, servo-hidráulico, quanto de um processo específico em que este atua, o presente trabalho contribuiu na elucidação de uma estrutura global necessária para tal simulação. Alguns dos módulos de tal estrutura, sob o ponto de vista metodológico, são transportáveis para outros tipos de robôs.

O simulador implementado apresentou resultados consistentes, no aspecto geral, e coerentes com o esperado em inúmeros casos particulares a que foi submetido.

O tempo de processamento consumido pelo simulador exigiu que se o instalasse num computador de grande porte. Mesmo neste, contudo, o referido tempo mostrou-se elevado, o que sugere a necessidade de futuras simplificações em alguns dos modelos matemáticos — sobretudo os dinâmicos, — como a única forma de viabilizar as exaustivas investigações indispensáveis para o estudo mais aprofundado do comportamento dinâmico de um robô e das variáveis que influenciam este mais diretamente.

Com arquitetura modular, o simulador pode sofrer alterações locais sem maiores dificuldades, o que facilita o rápido estudo de novas estratégias, desde a da simulação em si até a de controle.

O desempenho da estrutura proposta para o controle de um robô servo-hidráulico de pintura, baseada num controlador PID digital para cada grau de liberdade, mostrou-se apenas razoável — com vir

- para a seleção de uma delas;
- (b) pode-se investigar a aplicabilidade de válvulas proporcionais no lugar das servoválvulas, normalmente muito caras, ainda que para movimentos operacionais mais lentos e menos precisos;
 - (c) seria muito interessante estudar o equacionamento de movimentos operacionais a partir das exigências de deposição de tinta num processo de pintura de superfícies quaisquer, considerando-se recursos de edição automatizados, bem como a possibilidade de sucessivas demãos numa mesma superfície. Abrir-se-ia desta forma a real possibilidade de autoprogramação de robôs de pintura. Pode-se empreender tal estudo utilizando-se o simulador construído ou mesmo não o fazendo, desde que se suponha que qualquer que seja o movimento operacional proposto este será seguido fidedignamente pelo robô;
 - (d) pode-se construir um protótipo de um robô de pintura cujo desempenho experimentalmente medido seria confrontado com a simulação correspondente, de tal forma a validar o simulador ou aperfeiçoá-lo na medida exata da necessidade observada;
 - (e) pode-se explorar a influência da interação dinâmica entre os graus de liberdade no comportamento de cada um deles, vinculando-se os resultados ao desempenho particular do controlador suposto;
 - (f) pode-se trabalhar na elaboração de critérios de sintonia de controladores que melhor atendam as peculiaridades da robótica e, por que não?, de cada tipo particular de robô;
 - (g) deve-se prosseguir as simulações com o controlador PID digital suposto, buscando-se a melhor seleção dos seus ganhos inerentes, persistindo no estudo da influência de determina

dos parâmetros no comportamento do robô — como as resoluções dos transdutores supostos, dentre outros, podendo-se investigar inclusive o efeito da substituição do transdutor de posição angular colocado no par cinemático pertinente ao movimento do antebraço por um transdutor de posição linear, colinearizado com o atuador hidráulico correspondente;

- (h) após a simplificação dos modelos dinâmicos envolvidos — com criteriosa avaliação das conseqüências desta, — poder-se-ia incorporar a simulação dinâmica do robô de pintura e do próprio processo de pintura a uma estação gráfica, com adequado modelamento complementar, a ponto de se poder observar visualmente o comportamento de ambos para um dado movimento operacional, considerando-se o ligar/desligar da pistola de pintura; e
- (i) seria também interessante promover ligeiras alterações no simulador, na forma de acréscimos praticamente, para que fosse possível simular a pintura de peças em movimento, como na situação em que estas encontram-se vinculadas a um transportador aéreo com pulsos de esteira de sincronização.

Como decorrência natural de alguns dos trabalhos sugeridos e de outros tantos que a estes agregar-se-iam, pode-se supor que seja possível construir uma metodologia de projeto de um robô de pintura, automatizando-se-a num momento seguinte, o que possibilitaria o rápido projeto de uma família de robôs, cada um deles dedicado a uma necessidade específica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) BASILE, A.C.S., CALDAS, L., TIMÓTEO, J.P.A.F. e RILLO, A.H.R.C. Algoritmo para controle digital. FEI, São Bernardo do Campo, 1985 (Trabalho apresentado na disciplina ELE753 - Projetos de sistemas digitais para automação industrial).
- 2) BAZERGI, A., GOLDENBERG, A.A. and APKARIAN, J. An exact kinematic model of PUMA 600 manipulator. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-14, Nº 3, May/June 1984, p. 483-487.
- 3) BENATI, M., MORASSO, P. and TAGLIASCO, V. The inverse kinematic problem for anthropomorphic manipulator arms. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 104, March 1982, p. 110-113.
- 4) BENDAT, J.S. and PIERSOL, A.G. Random data. Analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons, 1986.
- 5) CADZOW, J.A. and MARTENS, H.R. Discrete-time and computer control systems. Prentice-Hall Inc., 1970.
- 6) CASTRO, W.J.O. Sintonia de controladores por microcomputador. Controle e Instrumentação, Setembro 1987, p. 36-41.
- 7) CHATFIELD, H.W. The science of surface coatings. Ernest Benn Limited, 1962.
- 8) COIFFET, P. Robot technology. Modelling and control. Prentice-Hall Inc., 1983.
- 9) COLSON, J.C. and PERREIRA, N.D. Kinematic arrangements used in industrial robots. Proceedings of the 13th International Symposium on Industrial Robots, 1983, p. 20.1-20.18.
- 10) Controle e Instrumentação. Processo de pintura automática por computador, Abril 1987, p. 26-30.
- 11) CORRIPIO, A.B., SMITH, C.L. and MURRILL, P.W. Evaluating digi-

- tal PI and PID controller performance. Instruments and Control Systems, July, 1973, p. 55-57.
- 12) CRITCHLOW, A.J. Introduction to robotics. Macmillan Publishing Company, 1985.
 - 13) DENAVIT, J. and HARTENBERG, R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. Journal of Applied Mechanics, June 1965, p. 215-221.
 - 14) EBERHARD, J. Recycling work on spray cabins. Industrial & Production Engineering, January 1987, p. 44-46.
 - 15) GAVIOLI, V.E. Modelo geométrico inverso do robô RS-PT-01. Servus Tecnologia e Informática, São Bernardo do Campo, 1987 (Relatório interno).
 - 16) GAVIOLI, V.E. e SILVA, J.B.T. Desenvolvimento de um robô de pintura: os modelos matemáticos como ferramenta de projeto. Anais do Simpósio sobre Robótica, SOBRACON, 1987.
 - 17) GERRY, J.P. Find out how good that PID tuning really is. Control Engineering, July 1987, p. 69-71.
 - 18) GOLDENBERG, A.A., BENHABIB, B. and FENTON, R.G. A complete generalized solution to the inverse kinematics of robots. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1, Nº 1, March 1985, p. 14-20.
 - 19) GOLDENBERG, A.A. and LAWRENCE, D.L. A generalized solution to the inverse kinematics of robotic manipulators. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 107, March 1985, p. 103-106.
 - 20) GORLA, B. et RENAUD, M. Modèles des robots manipulateurs. Application à leur commande. Cepadues - Éditions, 1984.
 - 21) GRANDOU, P. et PASTOUR, P. Peintures et vernis. Hermann, 1969.
 - 22) HANAFUSA, H. and WANG, Z. Pressure feedback compensation for hydraulic servomechanisms which drive articulated robots. Pro-

- ceedings of Multinational Instrumentation Conference, Shanghai, 1983, p. 909-916.
- 23) HOLLERBACH, J.M. A recursive lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-10, No 11, November 1980, p. 730-736.
- 24) I.S.O.: Manipulating industrial robots - Performance criteria and related testing methods - Part 1: Performance criteria. ISO/TC 184/SC 2/WG 2 N6, Revision 4, 1986.
- 25) J.I.R.A.: The specifications and applications of industrial robots in Japan. Japan Industrial Robot Association Publishers, 1982.
- 26) JARVIS, J.F. Robotics. Computer, October 1984, p. 283-292.
- 27) KAYA, A. and SCHEIB, T.J. Tuning of PID controls of different structures. Control Engineering, July 1988, p. 62-65.
- 28) KIENZT, L. Notions fondamentales sur les vernis et peintures. Gauthier-Villars, 1952.
- 29) KUO, B.C. Digital control systems. Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980.
- 30) KUO, B.C. Discrete-data control systems. Prentice-Hall Inc., 1970.
- 31) LATHROP, R.H. Parallelism in manipulator dynamics. The International Journal of Robotics Research, Vol. 4, No 2, Summer 1985, p. 80-102.
- 32) LEE, C.S.G. Robot arm kinematics, dynamics and control. Computer, December 1982, p. 62-80.
- 33) LEE, C.S.G., LEE, B.H. and NIGAM, R. Development of the generalized d'Alembert equations of motion for mechanical manipulators, Proceedings of the 22nd Conference on Decision and Control, December 1983.

- 34) LOPEZ, A.M. et al. Tuning controllers with error-integral criteria. Instrumentation Technology, November 1967, p. 57-62.
- 35) LUH, J., WALKER, M. and PAUL, R. On-line computational scheme for mechanical manipulators. Proceedings of the 2nd IFAC/IFIP Symposium Information Control Problems, Manufacturing Technology, October 1979.
- 36) LUMELSKY, V.J. Iterative coordinate transformation procedure for one class of robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-14, Nº 3, May-June 1984, p.500-505.
- 37) MARTINS, F.P.R. Aspectos fundamentais do projeto mecânico de um robô 6R. Dissertação de mestrado, EPUSP, 1986.
- 38) McCLOY, D. and MARTIN, H.R. Control of fluid power: analysis and design. Ellis Horwood Limited, 1980.
- 39) McMILLAN, G.K. Tuning and control loop performance. Instrument Society of America, 1983.
- 40) MERIAM, J.L. Dinâmica. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1976.
- 41) MERRITT, H.E. Hydraulic control systems. John Wiley & Sons Inc., 1967.
- 42) MULLER, C. and Van LANDINGHAM, H.F. A nonlinear position feedback controller for an electro-hydraulic robot arm. Proceedings of the 1985 American Control Conference, June 1985, p. 737-740.
- 43) OGATA, K. Engenharia de controle moderno. Prentice-Hall do Brasil, 1982.
- 44) ORIN, D.E. and McGHEE, R.B. Dynamic computer simulation of robotic mechanisms. Proceedings of the Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Warsaw, September 1981, p. 522-531.
- 45) ORTLIEB, K. und THOMER, K.W. Anforderungsprofil für den einsatz

- von beschichtungs - automaten beim spritzlackieren. IPA, Stuttgart, 1984.
- 46) PARADINE, C.G. e RIVETT, B.H.P. Métodos estatísticos para tecnólogos. Editora da Universidade de São Paulo / Polígono, 1974.
- 47) PAUL, R.P. Robot manipulators: mathematics, programming, and control. MIT Press, 1983.
- 48) PAUL, R.P., RENAUD, M. and STEVENSON, C.N. A systematic approach for obtaining the kinematics of recursive manipulators based on homogeneous transformations. Proceedings of the 1st I.S.R.R., Bretton-Woods, 1983.
- 49) PAUL, R.P., SHIMANO, B. and MAYER, G.E. Kinematic control equations for simple manipulators. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-11, Nº 6, June 1981, p.449-455.
- 50) PHILLIPS, C.L. and PARR, J.M. Robust design of a digital PID predictor controller. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-31, Nº 4, November 1984, p.328-332.
- 51) SANDERSON, R.J., CAMPBELL, J.A. and MEYER, J.D. Industrial robots: a summary and forecast for manufacturing managers. TechTran Corporation, Illinois, 1982.
- 52) SEERING, W.P. and SCHEINMAN, V. Mechanical design of an industrial robot. Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, 1987.
- 53) SILVA, J.B.T. Modelos matemáticos cinemáticos de robôs com seis graus de liberdade do tipo RRRRRR. EPUSP, São Paulo, 1985 (Trabalho apresentado na disciplina PMC 700 - Seminário de Engenharia Mecânica).
- 54) SILVA, J.B.T. Modelo geométrico direto do robô RS-PT-01. Servus Tecnologia e Informática, São Bernardo do Campo, 1986 (Relatório interno).

- 55) SILVA, J.B.T. Modelo dinâmico inverso do robô RS-PT-01. Servus Tecnologia e Informática, São Bernardo do Campo, 1987 (Relatório interno).
- 56) SILVA, J.B.T. Modelo matemático para cálculo de tensões no robô RS-PT-01. Servus Tecnologia e Informática, São Bernardo do Campo, 1987 (Relatório interno).
- 57) SILVA, J.B.T. Fundamentos de controle de robôs industriais. São Paulo, 1988 (Apostila do curso "Seleção e Implantação de Robôs Industriais", ORT/SOBRACON).
- 58) SILVER, W.M. On the equivalence of Lagrangian and Newton-Euler dynamics for manipulators. Proceedings of the 1981 Joint Automatic Control Conference, Vol. 1, June 1981, p.TA-2A/1-6.
- 59) SPRAYING SYSTEMS CO. Spray nozzles and applications. Illinois, 1985 (Bulletin nº 233).
- 60) STRINGER, J.D. Hydraulic system analysis. An introduction. The Mac Millan Press Ltd., 1976.
- 61) TAKANO, M., YASHIMA, K. and YADA, S. Development of computer simulation system for kinematics and dynamics of robot. Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, Vol. XXXVI, 1982, p. 677-711.
- 62) TECNOMATIX ROBCAD - Conception, simulation et programmation off-line de cellules robotisées. Bélgica, 1986 (Prospecto técnico).
- 63) VUKOBRATOVIC, M. and POTKONJAK, V. Applied dynamics and CAD of manipulation robots. Springer Verlag, 1985.
- 64) WADA, H. Some ideas about automation. Technocrat, Vol. 15, Nº 6, June 1982, p. 30-34.
- 65) WOODSON, W.E. et CONOVER, D.W. Guide d'ergonomie. Les Éditions d'Organisation, 1978.
- 66) YANG, A.T. and FREUDENSTEIN, F. Application of dual number

quaternion algebra to the analysis of spatial mechanisms.

Journal of Applied Mechanics, June 1964, p. 300-308.

- 67) YOSHIKAWA, T. Manipulability of robotic mechanisms. The International Journal of Robotics Research, Vol. 4, No 2, Summer 1985, p. 3-9.