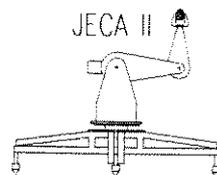




**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.**

Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos
LSMR - DSCE - FEEC - UNICAMP



**ANÁLISE E PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ
MANIPULADOR UTILIZANDO A ESTRUTURA DO
PARALELOGRAMO.**

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigido
para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

por

Autor : Eng. Valmir Tadeu Fernandes

Prof. Dr. Marconi Kolm Madrid

Orientador - DSCE/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Álvaro Geraldo Badan Palhares

Co-orientador - DSCE/FEEC/UNICAMP

05 Junho de 1997

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Valmir Tadeu Fernandes
e aprovada pela Comissão
Julgada em 05 / 06 / 1997
Marconi Kolm
Orientador

F391a

32228/BC

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

592194

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	F391a
V. Ex.	
TOMBO BC/	32228
PROC.	281157
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	25/11/97
N.º CPD	

CM-00103008-4

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F391a

Fernandes, Valmir Tadeu

Análise e proposta de desenvolvimento de um robô manipulador utilizando a estrutura do paralelogramo / Valmir Tadeu Fernandes.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientadores: Marconi Kolm Madrid, Álvaro Geraldo Badan Palhares.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Robótica. 2. Robôs industriais. 3. Robôs - Projetos. 4. Modelos matemáticos. 5. Energia - Transmissão. 6. Mecanização. 7. Sistemas de controle ajustável. I. Madrid, Marconi Kolm. II. Palhares, Álvaro Geraldo Badan. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

ANÁLISE E PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ
MANIPULADOR UTILIZANDO A ESTRUTURA DO PARALELOGRAMO.

Autor : Valmir Tadeu Fernandes

Orientador : Prof. Dr. Marconi Kolm Madrid

Co-orientador : Prof. Dr. Álvaro Geraldo Badan Palhares

Aprovada por :

Prof. Dr. Marconi Kolm Madrid - Presidente

Prof. Dr. João Maurício Rosário

Prof. Dr. Alberto Cliquet Junior

Campinas, 05 Junho de 1997

Agradecimentos

Manifesto meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições:

Ao Professor Dr. Marconi Kolm Madrid, professor e amigo a qual teve participação para que este trabalho fosse realizado. Durante o trabalho me ensinou muitas coisas importantes.

Ao Professor Dr. Álvaro Geraldo Badan Palhares, pela brilhante e dedicada orientação ao longo de todo este trabalho. Além da ajuda durante este trabalho foi um colega e amigo que me ensinou muitas coisas importantes. Foi uma pessoa que depositou uma enorme confiança em mim dando oportunidade para que este trabalho chega-se a este ponto, abrindo-me caminhos e perspectiva para a realização de futuros trabalhos.

À toda minha família, pelos incentivos e por terem suportado e compreendido todo meu sacrifício para atingir este objetivo, em especial à minha esposa Sílvia e a meus filhos Ana Carolina e Diego Augusto, os quais simbolizam a razão do meu viver como homem.

Um profundo agradecimento aos meus pais Eliseu e Yolanda, meu irmão Edilson, por tudo que me proporcionaram na vida e por sempre acreditarem e confiarem em mim.

Ao professor Dr. João Maurício Rosário pelos valiosos comentários e sugestões, sem os quais este trabalho não seria aperfeiçoado;

Ao técnico Mecânico Eduardo Gavira Bonani, pelos trabalhos e discussões

Aos colegas (Reinaldo, Comim, Caixeta, Alessandro, Ricardo, Renato, Eduardo, Paulo, Jes, Nilton) do departamento DSCE da Faculdade de Engenharia Elétrica pelos inúmeros favores que me prestaram quando necessitei de suas ajudas.

Ao RHAÉ e CNPq, possibilitaram a realização deste trabalho com auxílio financeiro através de bolsa de estudos.

Aos professores e funcionários do Departamento de DSCE da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP todo o apoio e incentivo demonstrado;

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta. contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim aquele ao qual devemos agradecer e ser gratos por toda a força e as coisas que conseguimos nesta batalha, ao senhor Deus Todo Poderoso e Pai Eterno.

“Na grande e próspera Siracusa, antiga cidade grega na Sicília, o sábio Arquimedes cria as bases de uma incrível revolução científica. Desenvolve a matemática e descobre como utilizar as leis da física em benefício da cidadania. Constrói delicados brinquedos e máquinas de guerra que protegem seu povo contra a invasão das tropas inimigas.”

Arquimedes

“A máquina pensante: quem a imaginou primeiro? O francês Pascal, cientista, escritor e filósofo, surpreende os homens de seu tempo ao construir a primeira calculadora mecânica e ao enxergar, no distante futuro, a revolução dos computadores. Gênio de múltiplas habilidades.”

Resumo

Análise e Proposta de Desenvolvimento de um Robô Manipulador Utilizando a Estrutura do Paralelogramo.

Este trabalho objetiva a análise das principais características de um robô industrial. Para início fazemos algumas considerações gerais da aplicação do robô industrial, viabilidade da implantação na indústria, principais características dadas pelos fabricantes, e a definição de alguns componentes básicos dos robôs. Diferenças básicas entre as diversas categorias de projeto de robôs. Além das categorias analisadas fizemos um estudo detalhado do mecanismo do paralelogramo, elaboramos um projeto de uma estrutura que está sendo proposta neste trabalho. Através do modelo matemático (dinâmico), implementado no computador utilizando o software Matlab (Simulink), analisamos algumas características importantes desta estrutura. O estudo de componentes de tecnologia, transmissões e acionamentos utilizados em robôs industriais foram estudados para que possa ser implementado na construção de uma estrutura com estas características. No estudo realizado sobre controladores verificamos que existem muitas formas de se controlar um sistema dinâmico robótico, basta empregarmos as leis da engenharia de controle, que são muito amplas do que as especificamente utilizadas neste trabalho, com maior aprofundamento o sistema proposto irá ser construído e poderá gerar novas linhas de pesquisa.

Palavras Chaves : Robótica, Dinâmica, Mecanização, Mecanismos , Sistemas de Controle, Modelo matemático, Simulação, Transmissões e Acionamento.

Abstract

Analysis and Proposal of Development of a Robot Manipulator Using The Structure of The Parallelogram

This work has the analysis of the main characteristics of an industrial robot as objective. Initially we make some general considerations on the applications of industrial robots, viability for implanting these machines in the industry, main characteristics offered by the makers, definition of some basic robot components, and the basic differences between some robot project categories. Besides the analyzed categories we studied the mechanism of the parallelogram and elaborated a project of a structure with this configuration. Through the mathematical dynamic model, programmed and simulated in the digital computer using the Matlab (Simulink) software, we analyze some of its important characteristics. Components employing advanced technology, transmissions and drivers, used in the industrial robots, are studied so that they could be implemented in the construction of a structure like this, offering good technical characteristics. We in the study of controllers verify that there is many forms to control a robotic dynamic system, coarse that we use of the control engineering the rules, that are much more wide that the specifically used in this work, being that with more depth in the studies, the proposed structure will be constructed and certainly will generate new lines of research.

Key Words: Robotics, dynamics, mechanization, mechanisms, control systems, mathematical modeling, simulation, transmissions, drivers.

Conteúdo

PREFÁCIO - INTRODUÇÃO GERAL :	1
Objetivos :	2
Importância do Trabalho :	3
Conteúdo do Trabalho :	4
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS DA APLICAÇÃO DE ROBÔS :	6
1.1 - INTRODUÇÃO:	6
1.2 - OS IMPACTOS DA AUTOMAÇÃO NA PRODUÇÃO INDUSTRIAL :	9
1.3 - IMPLANTAÇÃO DE ROBÔS NA INDUSTRIA :	9
1.4 - INTRODUÇÃO E CONSIDERAÇÕES DO PRODUTO:	11
1.5 - TIPOS DE ROBÔS - VISÃO GERAL:	11
1.6 - ESPECIFICAÇÕES DOS FABRICANTES :	13
1.7 - COMPONENTES BÁSICOS DO ROBÔ INDUSTRIAL:	17
1.7.1 - Definição - Robô:	17
1.7.2 - Definição - Automação Industrial:	18
1.7.3 - Robô Industrial :	20
1.7.4 - Terminologia e Classificação dos Robôs:	23
1.7.5 - Anatomia do Robô:	23
1.7.6 - Definição de Junta :	24
1.7.7 - Definição de Elo :	24
1.7.8 - Volume de Trabalho :	25
1.8 - SISTEMAS DE SENSORIAMENTO:	26
1.8.1 - Sistemas de Acionamento do Robô:	27
1.8.2 - Capacidade de Carga :	29
1.9 - ANÁLISE E ESTRATÉGIA DE CONTROLE :	30

1.9.1 - Introdução:	30
1.9.2 - Tipos de Controle :	31
1.9.3 - Projeto de Controladores :	32
CAPÍTULO 2 - FORÇAS EM MANIPULADORES (DINÂMICA) :	37
2.1 - INTRODUÇÃO:	37
2.2 - ESTRUTURA DE COORDENADAS CARTESIANAS :	38
2.2.1 - Dinâmica :	39
2.2.2 - Comentários :	41
2.3 - ESTRUTURA DE COORDENADAS POLAR OU CILÍNDRICA :	42
2.3.1 -Dinâmica :	42
2.3.2 - Comentários :	47
2.4 - ESTRUTURA ARTICULADA :	49
2.4.1 - Dinâmica :	51
2.4.2 -Comentários :	54
2.5 - ESTRUTURA DO PARALELOGRAMO :	56
2.5.1 - Dinâmica :	57
2.5.2 - Comentários :	62
2.6 - ANÁLISE EM MECANISMOS :	63
2.6.1 - Introdução à Síntese :	63
2.6.2 - O Que é um 4 Barras:	66
2.6.3 - Energia de Rotação :	70
2.6.4 - Elos :	70
2.6.5 - Equação da Energia Cinética Total:	71
2.6.6 - Equação da Energia Potencial Total:	71
2.6.7 - Lagrange :	71
2.6.8 - Torque no Motor 1 :	72

2.6.9 - Torque No Motor 2 :	72
2.6.10 - Equação da Energia Cinética Total:	74
2.6.11 - Equação da Energia Potencial Total:	74
2.6.12 - Torque no Motor 1 :	75
2.6.13 - Torque no Motor 2 :	75
2.6.14 - Condição para o Desacoplamento Dinâmico :	75
2.7 - OBSERVAÇÕES GERAIS NA ANÁLISE DINÂMICA DAS ESTRUTURAS DE ROBÔS :	76
CAPITULO 3 - SIMULAÇÃO :	78
3.1 - Introdução:	78
3.2 - Modelo de Simulação e Gráficos :	78
3.3 - Conclusões :	88
CAPÍTULO 4 - TRANSMISSÕES E ACIONAMENTOS UTILIZADOS EM ROBÔS :	89
4.1 - INTRODUÇÃO:	89
4.2 - TRANSMISSÕES ROTACIONAIS:	91
4.2.1 - Transmissões por Engrenagem Planas:	91
4.2.2 - Sistema Excêntrico de Ajustamento de Folga no Cartucho :	92
4.2.3 - Transmissões Robóticas de Engrenagens Anti-Folga :	94
4.2.4 - Engrenagem de Torque Baixo e Anti-Folga :	94
4.2.5 - Transmissão s/ Folga com Engrenagem Flexível Pré-Carregada :	94
4.3 - UTILIZAÇÃO DE FUSOS PARA AUMENTAR A VELOCIDADE :	95
4.4 - REDUTORES :	96
4.5 - SERVOMOTORES PARA ROBÔS :	100
4.5.1 - Motores de Torque DC :	100
4.5.2 - Atuadores de Acionamento Direto :	102
4.5.3 - Motores de Torque DC X AC :	102

4.5.5 - Motor Acionamento Direto (Megatorque) :	104
4.5.6 - Servo Motores Tipo CC :	104
4.5.7 - Motores Corrente Contínua sem Escovas, "Brushless" :	105
4.5.8 - Simodrive (Acionamento em Corrente Alternada) :	106
4.5.9 - Servo Posicionador (Esférico) :	106
4.5.10 - Motores Passo :	107
4.5.11 - Motores Lineares :	107
4.6 - COMPONENTES UTILIZADOS EM ROBÔS DE TECNOLOGIA DE PONTA :	108
4.6.1 - Freios Dinâmicos :	108
4.6.2 - Acionadores Harmônicos :	108
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS :	110
5.1 - INTRODUÇÃO :	110
5.2 - ANÁLISE DA PARTE TEÓRICA	101
5.3 - PLANO PARA A CONTINUAÇÃO DA PESQUISA :	111
5.4 - CONCLUSÕES :	112
ANEXO 1 - DADOS DOS MOTORES UTILIZADOS :	115
Introdução:	115
BIBLIOGRAFIA:	118

Prefácio

INTRODUÇÃO GERAL :

O nome robô deriva do substantivo Eslavo “Robota”, que significa trabalho em Russo e faxina em Tcheco [28]. Ele foi utilizado pela primeira vez nos anos 20 pelo dramaturgo Tcheco Karel Capec, na sua obra The Rossum’s Universal Robot. A partir daí este nome foi vulgarizado pela ficção científica, designando humanóides ou máquinas com características antropomórficas, dotados de capacidades até mesmo superiores às do homem.

A robótica hoje tem desdobramentos num espectro de aplicações muito amplo; contudo o seu traço dominante continua a ser o tratamento dos problemas colocados pelo desenvolvimento estrutural e funcional, de máquinas como as seguintes :

- Robôs manipuladores, com estrutura antropomórfica ou não, capazes de pegar objetos e deslocá-los, ou de atuar sobre objetos com ferramentas específicas.
- Robôs móveis, que se deslocam sobre rodas, patas ou lagartas.
- Robôs de supervisão, que verificam e selecionam objetos.

A robótica é fortemente multi-disciplinar, fazendo convergir interesses da mecânica, da informática, da eletrônica, das teorias de otimização e controle de métodos matemáticos. Além do interesse científico e tecnológico, a gama de outros interesses que a robótica desperta é muito diversificada, inclusive por estar na moda. Os robôs atuais estão muito aquém da expectativa do leigo, sendo a robótica um domínio científico e tecnológico, onde a difusão e a vulgarização estão muito avançados em relação ao estado

real dos conhecimentos teóricos e práticos na área. O domínio das aplicações da robótica é hoje muito amplo : industrial, médica, espacial, submarina, etc...

A robótica como disciplina extrapola largamente o objetivo de desenvolver o seu elemento originário : o robô. Na verdade, a robótica integra as disciplinas necessárias ao desenvolvimento de máquinas evoluídas, segundo os mais diversos aspectos, na maioria dos casos imitando, especializando ou substituindo algumas funções humanas. Assim, a robótica procura dotar as máquinas das seguintes funções :

- Comunicação (homem, outras máquinas) [56].
- Percepção sensorial (visão, tato...) [28] [64] [84].
- "Inteligência (decisão, controle....) [56] [84]
- Manipulação, deslocamento autônomo e possibilidade de ações mecânicas diversas sobre o ambiente. [12] [28] [79].

A robótica é considerada hoje a mola mestra de uma nova mutação dos meios de produção, isto devido à sua versatilidade. Os robôs, graças ao seu sistema lógico ou informático, podem ser reprogramados e utilizados em uma variedade de tarefas. Mas verificamos que este requisito é um fator a mais na importante versatilidade desejada, a adaptação às variações no seu ambiente de trabalho, mediante um sistema adequado de percepção e tratamento de informação, permite ao robô uma adaptação bastante fácil.

OBJETIVOS :

O objetivo da presente dissertação é apresentar os diferentes conceitos relativos a projeto de estruturas de robôs, assim como avaliar suas características através da modelagem dinâmica, as quais podem ser usadas para modelar, analisar e controlar sistemas dinâmicos. Sugerimos neste

trabalho a construção de uma estrutura mecânica de um manipulador mecânico com dois graus de liberdade de configuração do tipo paralelogramo, com sistema de controle hierárquico a multiprocessadores, pesquisar formas de controle, acionamentos, transmissões, projeto de construção e emprego de novas tecnologias disponíveis no mercado nacional e internacional.

IMPORTÂNCIA DO TRABALHO :

O desenvolvimento de sistema robóticos automatizados a partir da integração de máquinas ferramentas e centros de usinagem controlados por atrás é algo muito desejado na atualidade, e sem dúvida a será no futuro tanto a curto como a longo prazo. A tendência atual da globalização dos meios de produção e principalmente da economia, está exigindo que os processos sejam aprimorados em tempos muito reduzidos, sendo que os produtos gerados por tais processos são submetidos cada vez mais à controles de qualidade muito rigorosos. Tudo isso exige o uso de máquinas que executem tarefas com grande domínio sobre os métodos de construção mecânica de estruturas que têm movimentos relativos entre seus componentes, e por conseqüência das equações matemáticas que regem a dinâmica destes movimentos. Neste contexto os sistemas microprocessados são de enorme valia, porque permitem a realização do controle de sistemas complexos através da programação e podem ser gerados em função do fluxo de informações inerentes a cadeia tipo específico de processo. No caso dos robôs é conhecido que as equações matemáticas que descrevem suas dinâmicas são muito complexas, mesmo para as estruturas mais simples, como aquelas dos robôs com graus de liberdade não redundantes , e de cadeia cinemática serial. Quando exige-se que as velocidades e acelerações de trabalho de tais máquinas sejam elevadas, as forças e torques que surgem devido as interações entre os movimentos relativos dos elementos das estruturas, não podem ser desconsiderados no modelamento matemático, sob pena do sistema de controle, que fará os cálculos destas equações para conduzir os movimentos, não conseguir atingir desempenhos satisfatórios. Por exemplo, as

forças de coriolis, as forças centrípetas, a força de gravidade, e as forças de atrito, tanto seco como viscoso, são forças que podem agir de maneira altamente não linear tornando este tipo de controle uma tarefa extremamente complicada.

Neste trabalho ao estarmos propondo a construção de um robô cujos elos são formados por cadeias cinemáticas fechadas, do tipo paralelogramo, estamos intencionando justamente diminuir, ou mesmo eliminar, os efeitos provocados por estas forças interativas e dependentes diretamente da sua configuração estrutural. Com uso de cadeias cinemáticas deste tipo é possível, principalmente, manter um bom balanceamento estrutural dentro de todo o volume de trabalho do robô, fato este de enorme importância do ponto de vista da diminuição da complexidade dinâmica destas máquinas, podendo conduzir a um modelamento matemático bastante mais simplificado. Também sob o ponto de vista do controle de trajetória em tempo real de estruturas robóticas com cadeia cinemáticas fechadas e baseadas na geometria do paralelogramo, conforme a proposição deste trabalho, conseguimos obter uma grande simplificação matemática. No equacionamento necessário, quando intencionamos aplicar técnicas de busca heurística neste tipo de controle, frente a estruturas com cadeias cinemáticas seriais que envolvam graus de liberdade com movimentos coplanares [12] [56].

CONTEÚDO DO TRABALHO :

No capítulo 1 temos por objetivo discutir e esclarecer alguns aspectos macroscópicos entre os mais polêmicos da robótica, principalmente da robótica industrial, tais como: Caracterização dos robôs no universo das máquinas automáticas, a situação da robótica no contexto da produção industrial, suas principais aplicações, as tendências, as conseqüências ou implicações técnicas e sócio-econômicas da adoção de sistemas robotizados, as tendências na produção atual de robôs industriais, as estratégias ou as políticas de gestão do desenvolvimento da robótica e do seu uso.

No capítulo 2 são apresentadas as categorias utilizadas para a construção de robôs, características dinâmicas e comentários sobre as respectivas modelagens, assim como a modelagem da estrutura do tipo paralelogramo de cadeia fechada que estamos propondo, suas propriedades e técnicas de análise.

No capítulo 3 apresentamos resultados de simulação da equação dinâmica da estrutura do paralelogramo, verificando suas principais características, utilizando motores com características adequadas para o bom desempenho da estrutura, com diferentes controladores para que o modelo dinâmico possa ser melhor avaliado em função do tipo de controle utilizado.

O capítulo 4 apresenta os diversos sistemas de transmissões e acionamentos que podem ser utilizados na construção do robô, com uma descrição rápida sobre os tipos de controladores que podem ser implementados para conseguir-se bons desempenhos da estrutura.

Finalmente reservamos o capítulo 5 para as conclusões e as recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

Capítulo 1

1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS DA APLICAÇÃO DE ROBÔS :

1.1 - Introdução:

O uso de robôs em sistemas de automação industrial está tendo um crescimento geométrico no país, depois de 10 anos em que as indústrias preferiram não arriscar em inovação tecnológica.

Agora esta situação tende a se modificar pois um dos maiores fornecedores de robôs no Brasil a (ABB - Asea Brown Boveri), dobrou o número de robôs vendidos no país. Ainda concentrados nas montadoras de veículos e nos fabricantes de autopeças, os robôs começam a entrar também nas linhas de montagem das indústrias de eletro-eletrônica, metal-mecânica e de plásticos, onde o aumento da produtividade e a busca da competitividade internacional justificam a opção pela robotização. Além do preço - em 1990 os robôs custavam em média U\$ 200 mil contra U\$ 50 mil atualmente -, a acirrada competição entre as montadoras de veículos instaladas no Brasil também contribui para disseminá-los mais nas fábricas brasileiras. Alguns pesquisadores [41] [64], acreditam que, em breve, os robôs estarão também em indústrias de processamento de alimentos, de produtos de higiene e dos chamados produtos de linha branca (refrigeradores, Tvs, etc.). Assim como acreditam que o mercado da robótica deve crescer em taxas anuais de 30% durante os próximos cinco anos.

Devemos considerar também que o empresário brasileiro é muito conservador e temeroso ao realizar investimentos que podem não trazer o retorno esperado em curto prazo. As constantes mudanças econômicas, por exemplo com medidas de restrição ao crédito, levam a uma queda de produção, dificultam um planejamento de médio prazo, e atrasam ou impedem a adoção de tecnologias de ponta nas fábricas. Com a retomada dos investimentos no setor produtivo e a abertura da economia brasileira às empresas estrangeiras, aliada a busca de mercados externos por parte das companhias nacionais, o aumento da demanda por sistemas de automação industrial é eminente, e vem resultando na elaboração e concretização de novos projetos. Devemos destacar que a homogeneidade e conformidade dos produtos com rígidos padrões internacionais (como exemplo as normas ISO 9000), em muitos casos, somente são possíveis com a utilização dos robôs, e lembrar também dos ambientes hostís ao trabalho humano, como nos setores de sistemas robóticos de pintura e soldagem das montadoras de veículos. Nestes locais, os robôs podem realizar as tarefas em menos tempo do que os operários, e repetir as operações indefinidas vezes com as mesmas quantidades de tinta e com as mesmas espessuras. Assim pode-se aumentar a eficiência dos processos, com economia de matéria-prima e conseguir-se mesmos padrões de qualidade por lotes de produção.

“Ao contrário do que possa parecer à primeira vista, os robôs geram empregos ao invés de tirá-los do homem” [41]. Algumas pesquisas indicam que o mercado de automação industrial já começa a se ressentir da falta de mão-de-obra especializada em robótica para serviços de manutenção e suporte [70]. Ainda que o parque instalado no Brasil de 550 robôs seja pequeno se comparado a outros países [70]. Por outro lado, quando consideramos a

condição atual da economia nacional, a indústria robótica pode ser muito bem nosso melhor passo para o futuro.

Muitas indústrias foram eliminadas ou estão em concordata, devido a competição internacional de mercado e a baixa produtividade. Por exemplo, os Estados Unidos está consideravelmente prejudicado no negócio de fabricação de câmeras de vídeo, tem perdido muitos negócios na área de eletrônicos, está padecendo grandemente nas áreas de utilização do aço e, praticamente um entre cada três carros vendidos em seu território é feito no Japão. Enquanto algumas indústrias ainda não encontraram meios adequados para manterem-se competitivas, outras como a General Motors tem decidido tomar ações inovadoras e responder vigorosamente frente as necessidades do mercado. A parte formidável da estratégia está sendo a aplicação da robótica como impulsora da produção para aumentar a produtividade, assegurar qualidade consistente aos produtos, e ajudar a manter os custos baixos para oferecê-los no mercado com preços competitivos. É bastante pretencioso imaginar que os robôs são a completa resposta para esses desafios, mas eles podem ser uma parte importante da solução. Uma das razões pelas quais estão sendo aceitos agora, tanto pelos setores de gerências das empresas como em geral (incluindo a classe operária), é que as pessoas têm compreendido que eles são essenciais para o planejamento de um futuro melhor para a humanidade, são produtivos, flexíveis, podem ser reprogramados para atuarem com grande versatilidade e são econômicos. Em resumo, eles são indispensáveis aliados neste tipo de competição.

É porisso que podemos dizer que a indústria robótica pode ser nosso melhor passo para o futuro. Neste sentido devemos concentrar esforços para desenvolver tecnologias abrangendo muitos campos de aplicações nas

engenharias, principalmente de "Hardware" e "Software" e assim, ampliarmos nossas vantagens tecnológicas tanto entre os países da América Latina, como entre os outros continentes.

1.2 - Os Impactos da Automação na Produção Industrial :

Profundas transformações começaram a ocorrer na área da produção industrial, em virtude do advento das novas ferramentas Inteligentes e flexíveis. E como consequência temos que esperar por uma conjugação entre as tendências para aplicação da tecnologia externa, e uma melhor definição do perfil político interno sobre o assunto. Como exemplo podemos citar a região hoje conhecida como "Automation Valley", entre Detroit e Ann Arbor em Michigan - USA, a qual passou por uma transformação nestes últimos anos superando uma profunda depressão tecnológica, que foi fundamental para o desenvolvimento da região que chegou a ser chamada de vale da ferrugem. Com uma política voltada para o desenvolvimento da região, iniciou-se uma revolução industrial onde novos centros de pesquisas foram abertos, 2000 indústrias instaladas, e com isso houve um aquecimento nos negócios em torno de 18 bilhões de Dólares, por ano, somente em peças de alta precisão, maiores informações encontramos na referência [42].

1.3 - Implantação de Robôs na Industria :

A maior parte das dificuldades enfrentadas na utilização de robôs pelas indústrias é causada pelo pouco conhecimento da terminologia usada na literatura técnica sobre computadores e robótica, que descreve as funções dos

sistemas de controle, e dos diversos parâmetros operacionais dos equipamentos. Atualmente, em nosso país, a tecnologia da robótica é pouco conhecida entre a grande parte da população. Esta situação cultural impõe alguns obstáculos na implantação de robôs. Na realidade, mesmo os robôs mais simples, imaginados pelos escritores de ficção científica, possuem características e capacidades bastante sofisticadas, e até mesmo impossíveis de serem conseguidas com as mais avançadas tecnologias disponíveis na atualidade para a construção de robôs [18] [28] [61] [74] [76].

Desta forma podemos dizer que os robôs utilizados para trabalhar nas indústrias seriam uma grande decepção para uma pessoa leiga no assunto, pois seria muito difícil explicar que aquela máquina, totalmente diferente da imagem de um homem mecânico, é o chamado robô industrial. Certamente esta pessoa o acharia incapaz e desajeitado.

Apesar de algumas limitações atuais dos robôs, eles desempenham um papel de extrema importância nos processos industriais realizando trabalhos de soldagem, pintura e serviços de montagem mecânica.

A indústria nacional a cada momento verifica (sente) a necessidade de adoção de processos e sistemas automatizados de manufatura (produção) isso é considerado essencial para manter um bom relacionamento entre a parte administrativa e os empregados. Neste sentido as pessoas devem conhecer melhor qual o papel do robô industrial.

O verdadeiro papel a ser desempenhado pelos robôs nas próximas décadas é de auxiliar o homem, liberando-o de trabalhos que não são próprios para serem realizados por humanos, seja devido a periculosidade das tarefas ou pelas limitações dos seres humanos para executá-las, ou seja devido a falta de atributos necessários para torná-lo interessante para a mente humana.

1.4 - Introdução e Considerações do Produto:

A estratégia mais efetiva da produção da engenharia para o processo de planejamento robótico é o sistema de aproximação. Em outras palavras, devemos olhar para todas as peculiaridades do produto : seus dados, as ferramentas a utilizar, o processo, o volume necessários, e em função disto estabelecer uma estratégia completa e efetiva para sua produção. Podemos constatar a aplicação com sucesso deste sistema na indústria automobilística, e obter maiores detalhes na referência [61].

1.5 - Tipos de Robôs - Visão Geral:

Para os engenheiros de processos planejarem sistemas robóticos, devem ter conhecimento aprofundado da cinemática e da geometria mecânica básica dos tipos específicos de robôs a serem usados. Abaixo estão 4 categorias gerais que incluem diferentes tipos de geometria básica. Elas estão incluídas para dar ao leitor um conhecimento geral das respectivas cadeias cinemáticas envolvidas. Robôs típicos de estrutura coordenada retilinearmente movem-se em linhas retas, acima e abaixo, para dentro e para fora. Estes robôs são simples, por isso normalmente seus sistemas de controle são projetados com circuitos de controle lógico de baixa complexidade, para comandar eixos coordenados. Ou seja, cada eixo é comandado até parar, seguido por outro que assume o comando, e assim por diante, de modo seqüencial, até a finalização da tarefa em execução. Existe uma segunda categoria de robôs construídos sobre coluna, e que operam em superfícies

com envoltórias cilíndricas, e algumas vezes é chamada de categoria dos robôs tipo coluna. Uma terceira categoria engloba os robôs com geometria esférica, a qual é típica de alguns modelos, os robôs pertencentes a esta categoria também são chamados de sistemas de estrutura polar ou prismáticos. A quarta categoria é a que engloba os braços articulados, tipicamente utilizada nos robôs industriais "Cincinnati Milacron", "ASEA" e em alguns da "GMF". Os robôs de braços articulados compartilham vários atributos das outras 3 categorias anteriores, os quais podem ser configurados de várias formas através da programação dos seus sistemas de controle, e assim trabalharem usando sistemas coordenados diferentes. Todas essas características são embutidas na programação. Para alguns robôs, é possível desenvolver rotinas de controle para vários sistemas coordenados, que durante a execução podem ser cambiados, permitindo ao engenheiro tirar vantagens da eficiência inerente a cada um desses sistemas, relativa ao tipo de tarefa a executar. De modo inverso, é muito difícil programar robôs sofisticados de modo manual, conseqüentemente, ao escolher ou projetar um sistema robótico, o engenheiro de processos deve decidir qual tipo de estrutura resulta nas melhores cadeias cinemática e dinâmica para sua aplicação, levando em consideração os requisitos impostos pelas tarefas a executar, e sob o ponto de vista da maior simplicidade possível do sistema de controle para otimizar a relação custo/benefício através da sua utilização. A estrutura resultante pode ser, por exemplo, o resultado da combinação de características das quatro categorias apresentadas, e que de fato são compartilhadas por vários projetos robóticos [3] [4] [8] [44] [46] [61] [70] [74] [76] [84].

1.6 - Especificações dos Fabricantes :

Os fabricantes de robôs fornecem uma abundância de informações, tais como movimento e diagramas de percurso, tolerâncias de repetibilidade, cargas máximas de operação, máximas cargas suportadas nos eixos, e velocidades máximas para algumas aplicações. Características estas que podem ser encontradas em catálogos ou revistas especializadas. Como um exemplo típico das informações fornecidas pelos fabricantes de robôs veja nas figuras 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4 e tabelas 1.1, 1.2 e 1.3.

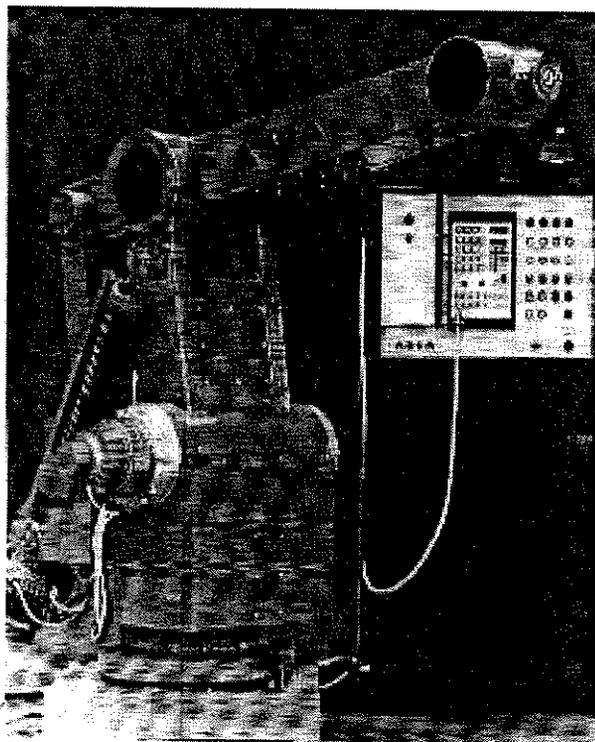


Figura 1.1 - Robô ASEA IRb-60 e IRb-60/2.

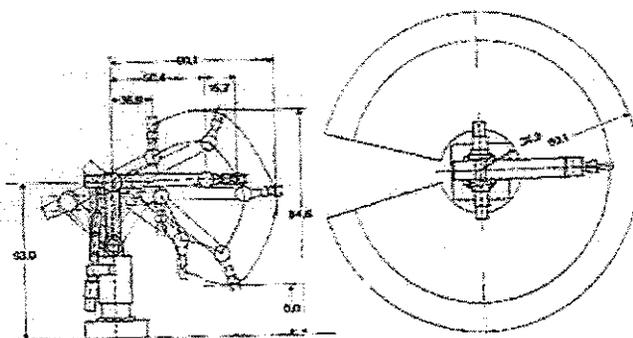


Figura 1.2 - Volume de trabalho do robô ASEA IRb-60 e IRb-60/2.

Robô ASEA MHU Senior

Fabricante	ASEA Incorporated 1176 E. Big Beaver Road - Troy, MI 48084 F: (313) 528-3630
Distribuidor	Dave deMunnik 7100 Knott Avenue, Suite 205 - Buena Park, CA 90620 F: (714) 522-8550
Classificação	Trajatória Controlada (Ponto-à-Ponto)
Faixa de Preço	\$88,000 a \$120,000
Acionamento	Elétrico Servo CC
Capacidade de Carga	3360 Kg
Repetibilidade	±0,4 mm (incremento mínimo 0,18 mm)
Alcance	2,3 m
Configuração	Juntas Rotacionais
Sistema de Coordenadas	Juntas
Graus de Liberdade	5
Elemento Terminal	Garra pneumática padrão
Requisitos de Potência	380/440/480/etc VAC; 3φ;50/60 Hz; 7000 W
Controlador	Tipo: Baseado em Microprocessador (Controlador S1) Método de Programação : Teach - Box (opcional) Capacidade de Memória : 8Kbytes Armazenamento Externo : Diskettes (opcional) Interfaces de E/S : 16 entradas/16 saídas
Dimensões e Peso Aproximados	Robô: 0,8 x 0,8 m. - Base; 135 Kg Unidade de Controle: 0,72 m - largura; 1,67 m - altura; 0,76 m - profundidade 500 Kg
Condições Ambientais para Trabalho	0 a 88° C Humidade Relativa de 5 a 90%.
Opções	Teach Box (facil intercâmbio entre controladores). Memória de armazenamento tipo tape cassette. Movimento 'wrist' adicional 96 graus de liberdade. ferramental de garra individualizado.

Tabela 1.1 - Características fornecidas pelo fabricante do robô ASEA IRb-60 e IRb-60/2.



Figura 1.3 - Robô GCA DKP 500.

Robô GCA DKP 550

Fabricante	GCA Corporation Industrial Systems Group, One Energy Center, Naperville, IL 60566, (312) 369-2110.
Classificação	Trajétoria Controlada (ponto-B-ponto)
Faixa de Preço	
Acionamento	Elétrico Servo CC
Capacidade de Carga	7 Kg
Repetibilidade	± 0,008 in
Alcance	40 in
Configuração	Juntas Rotacionais
Sistema de Coordenadas	Cartesiano
Graus de Liberdade	5
Elemento Terminal	Garra pneumática
Requisitos de Potência	200/220 VAC; 3φ; 50/60 Hz; 2500 W
Controlador	Tipo : Baseado em Microprocessador (DBK 200, DKF 200, DKF 300, CIMROC). Método de Programação: Teach - Box e teclado.
Dimensões e Peso Aproximados	Robô: 22 in x 26,4 in - Base; 200 Kg Unidade de Controle: 23 in - largura; 69 in - altura; 21 in - profundidade 250 Kg
Condições Ambientais para Trabalho	0 a 80 °C
Opções	4 controladores para diferentes aplicações. Projetos especiais para aplicações específicas. Suporte de software

Tabela 1.2 - Características fornecidas pelo fabricante do robô GCA DKP 500.

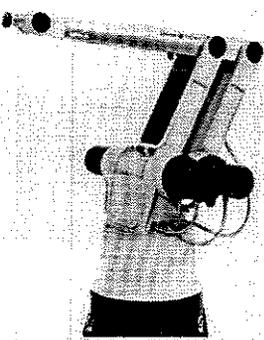


Figura 1.4 - Robô GE P5(1) e P50(2).

Robô GE P5 e P50

Fabricante	General Electric Company Automation Systems, 1285 Boston Avenue, Bridgeport, CT 06602, (203) 382-2876
Distribuidor	General Electric Company Automation Systems, 55 Hawthorne Street, San Francisco, CA 94105, (415) 546-4230
Classificação	Trajatória Controlada
Faixa de Preço	(1) \$40,000 a \$50,000 (2) \$50,000 a \$65,000
Acionamento	Elétrico Servo CC
Capacidade de Carga	10 Kg
Repetibilidade	± 0,008 in
Alcance	49 in
Configuração	Juntas Rotacionais
Sistema de Coordenadas	Juntas, Linhas retas (Cartesiano)
Graus de Liberdade	5
Elemento Terminal	Varia com a aplicação.
Requisitos de Potência	230/460 VAC; 3 φ; 60 Hz; 4000 W
Controlador	Tipo: Baseado em Microprocessador (Controlador S-1) Método de Programação: Teach - Box (opcional)
Dimensões e Peso Aproximados	Robô: 19,7 x 19,7 in - Base; (1) 230 Kg (2) 350 Kg Unidade de Controle : (1) 27,6 in - largura; 74,8 in - altura; 23,6 in - profundidade - 500 Kg (2) 20,7 in - largura; 41,3 in - altura; 25,6 in - profundidade - 150 Kg
Condições Ambientais para Trabalho	0 a 72 °C Humidade Relativa de 20 a 90%
Opções	(1) e (2) tem o mesmo robô, mas (2) tem um sistema de controle que executa programas de mais alto nível. Sistema de sensores para grande variedade de aplicações.

Tabela 1.3 - Características fornecidas pelo fabricante do robô GE P5(1) e P50(2).

1.7 - Componentes Básicos do Robô Industrial:

Todos os robôs industriais possuem elementos básicos que permitem a programabilidade e que dão versatilidade ao equipamento. Da mesma forma como em todas as máquinas complexas, os robôs possuem elementos básicos comuns. Dependendo dos universos de aplicação para os quais foram construídos, eles podem diferir enormemente segundo o tipo de acionamento, sensoreamento, cinemática, dinâmica e respectivos sistemas de controle .

As principais características a serem observadas para a construção e aquisição de um robô são :

- Condições ambientais de trabalho
- Configuração das máquinas
- Espaço disponível
- Volume de trabalho desejado
- Controle de qualidade
- Confiabilidade requerida
- Ferramentas necessárias
- Meios de segurança do trabalho
- Características das peças a manusear, usar.

1.7.1 - Definição - Robô:

A definição formal de robô de acordo com o RIA "Robot Institute of América" é a seguinte : "Manipulador multifuncional reprogramável, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais, através de movimentos variados programados para executar uma variedade de tarefas " [80].

1.7.2 - Definição - Automação Industrial:

Uma maneira de expressar resumidamente o conceito de automação industrial pode ser : "O uso de tecnologia capaz de se incumbir da realização de uma seqüência de tarefas, para a produção de uma peça ou equipamento, sem a interferência do homem em determinadas etapas do trabalho". Esta tecnologia consiste de sistemas eletro-mecânicos, eletro-hidráulicos ou pneumáticos, controlados por computadores que coordenam a seqüência de tarefas pré-programadas a serem executadas.

Como exemplo citamos :

- Linhas de produção.
- Máquinas de montagem mecanizadas.
- Sistemas com realimentação de saída.
- Máquinas de comando numérico.
- Manipuladores mecânicos programáveis.

A automação industrial pode ser classificada em três grupos:

1 - Fixa: Para confecção de um único tipo de peça.

- Muito eficiente com elevada taxa de produção.
- Requer equipamentos especialmente projetado para processar o produto.
- Só se justifica para grandes volumes de produção e para produtos de longa vida comercial no mercado.

2 - Programável: Pode ser programada para vários tipos de peças.

- O equipamento de produção é adaptável às variações dos produtos.
- É usada para o caso onde o volume de produção é relativamente baixo, e existe uma variedade de produtos a serem executados com o mesmo equipamento.

3 - Flexível (Sistema Flexível de Manufatura SFM):

Também chamados sistemas integrados de manufatura *SIM* ou células flexíveis de manufatura. São usados desde os últimos 15 anos, e são programados com diferentes configurações para diferentes produtos, aparecendo em menor variedade do que no caso da automação programável, e existindo um maior grau de integração entre seus componentes [81].

Um computador central controla as diversas atividades, tais como :

- Estabelece o roteiro das peças de uma estação para a outra, controla as operações programadas de uma estação de trabalho, etc...

Podemos verificar isto na figura [1.2] onde temos uma relação entre os três tipos de automação empregados, de acordo com o número de peças produzidas, versus o número de peças diferentes que se podem produzir.

No caso dos sistemas *SIM*, diferentes produtos podem ser fabricados ao mesmo tempo, sendo que na automação programável, os produtos são feitos em lotes, e quando cada lote é terminado, o equipamento é reprogramado para o próximo. Num sistema *SIM* pode-se fazer automação fixa desde que se queira produzir uma grande quantidade de peças iguais, ou pode-se fazer automação programável, programando-se apenas um lote de uma determinada peça por vez. A maior vantagem dos sistemas *SIM* é poder-se produzir diversos produtos diferentes ao mesmo tempo, com uma única limitação :

- A capacidade computacional.

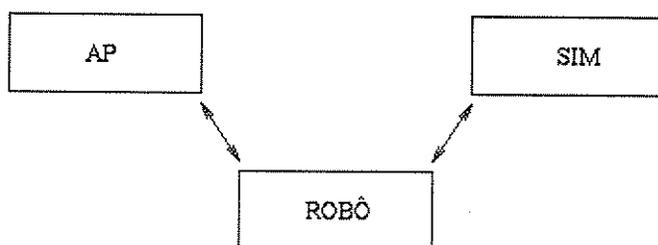


Figura 1.5 - Relação do robô com a automação industrial.

1.7.3 - Robô Industrial :

Ferramenta programável para diversas funções, com algumas características antropomórficas.

Pela definição do *RIA* ele deve ser capaz de :

- Mover ou manipular peças ou matéria prima.
- Manipular ou posicionar ferramentas ou dispositivos.
- Realizar tarefas previamente programadas.

É construído com forma de braço, com punho, mão ou (garra), e fixado a uma base. O braço tem a função de posicionar a mão. O punho tem a função de orientar a mão, a mão tem a função de prender ou manipular objetos.

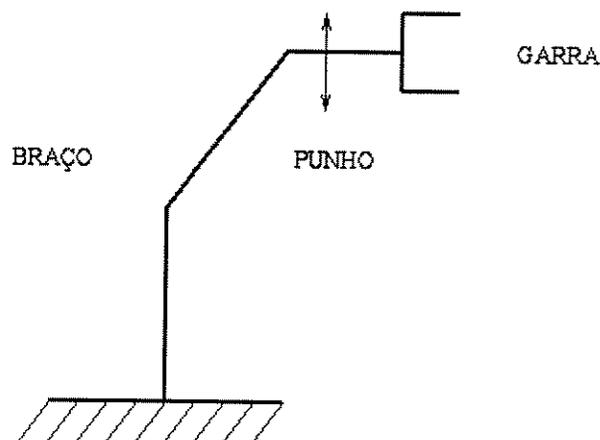


Figura 1.6 - Principais componentes que geralmente compõem os robôs

A terminologia usada em robótica é:

- Braço : Manipulador ou braço mecânico.
- Punho : Elemento de orientação.
- Mão : Pinça, garra, efetuator, ferramenta, elemento terminal.

No lugar da garra, pode-se usar uma ferramenta com função específica, tal como:

- Eletrodos para solda à arco.
- Furadeira.
- Pistola para pintura.
- Chaves fixas e outras ferramentas.

Associada a esta estrutura ainda temos o sistema de controle com computador, e a fonte de alimentação.

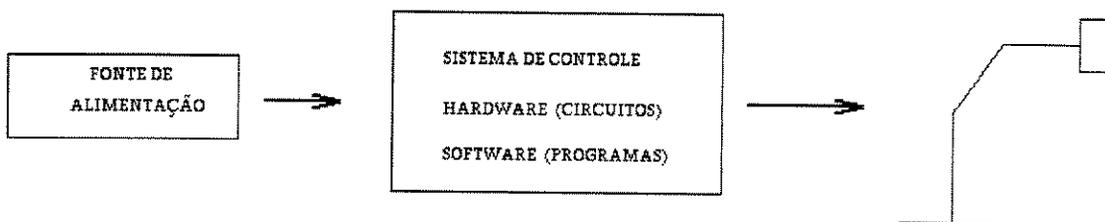


Figura 1.7 - O robô associado com um sistema de controle e uma fonte de alimentação

Através do sistema de controle pode-se inserir programas de diversos tipos para o controle dos movimentos do braço, punho e mão, e assim conseguir-se uma grande variedade de movimentos, e conseqüentemente realizar uma grande quantidade de tarefas, incluindo as mencionadas na definição do *RIA*.

1.7.4 - Terminologia e Classificação dos Robôs:

Muitos termos utilizados na robótica são definidos a seguir para facilitar a compreensão dos conceitos que são usados posteriormente. Eles são :

- Anatomia do robô (classificação).
- Volume de trabalho.
- Modelo dinâmico.
- Modelo cinemático.
- Sistema de controle.
- Precisão dos movimentos.
- Órgão terminal.
- Sensores (posição, velocidade, proximidade, esforços, visão, etc...)
- Programação.
- Controle da célula de trabalho.
- Aplicações.

1.7.5 - Anatomia do Robô:

Conforme dito anteriormente, um robô é constituído de corpo, braço, punho e mão, seu corpo é em geral fixado a uma base (chão). Cada um destes componentes é constituído por juntas e elos os quais são definidos abaixo:

1.7.6 - Definição de Junta :

As juntas proporcionam os movimentos relativos entre os elos.

Tipos de juntas:

- Rotativas (R) ou rotacional.
- Torcionais (T).
- Lineares (L) ou translacionais
- Revolventes (V).

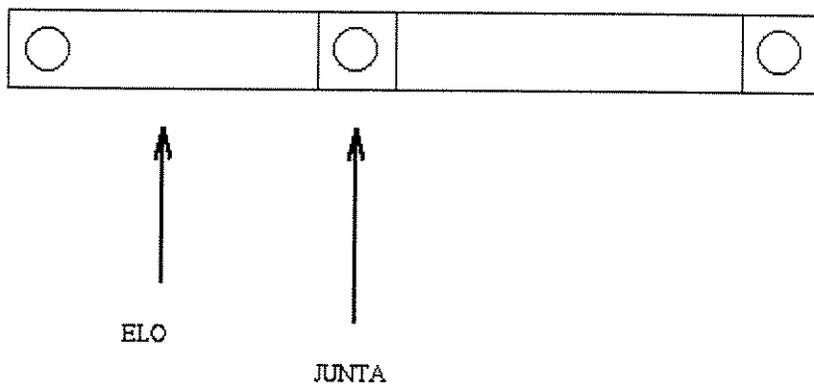


Figura 1.8 - Componentes importantes do robô (Elo, Junta).

1.7.7 - Definição de Elo :

Elo é o nome dado a cada elemento da estrutura de um robô, que une uma junta a sua consecutiva da cadeia cinemática. Eles fazem as ligações entre as diversas juntas.

Tipos de elos de cadeias de elos, ou cadeias cinemáticas :

CADEIA SERIAL : Uma cadeia cinemática serial de robô é definida como uma sequência de elos e juntas na qual entre cada junta da estrutura sempre existe a distância de um elo.

CADEIA FECHADA : Este tipo de cadeia cinemática é definida como uma sequência de elos e juntas o qual torna a estrutura composta por mecanismo de ligação.

CADEIA ARBORECENTE : É um produto da cadeia serial, onde ainda são objetos de pesquisas. [28].

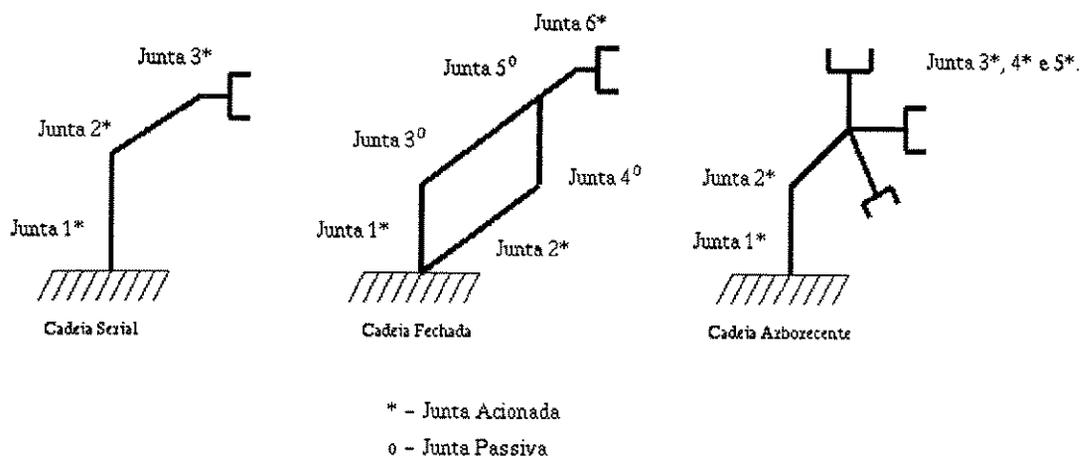


Figura 1.9 - Robô de cadeia cinemática simples, fechada e arborecente

1.7.8 - Volume de Trabalho :

O volume de trabalho é o termo que se refere ao espaço dentro do qual o robô pode mover a extremidade de seu punho. A convenção de usar a extremidade do punho para definir o volume de trabalho do robô é adotada para evitar a complicação de diferentes tamanhos de elementos terminais que possam ser fixadas ao punho do robô. O elemento terminal constitui um

opcional ao robô básico e não deve ser contado como parte do volume de trabalho. Um elemento terminal comprido montado no punho aumentaria significativamente a extensão do robô em comparação com um elemento terminal menor. Por outro lado, o elemento terminal ligado ao punho pode não ser capaz de alcançar determinados pontos dentro do volume de trabalho normal do robô, por causa da combinação particular dos limites físicos das juntas. Assim, o volume de trabalho é determinado levando-se em consideração três aspectos : A configuração física do robô, os tamanhos dos componentes do corpo, braço e punho, e os limites dos movimentos de cada junta que forma sua cadeia cinemática.[28] [83].

1.8 - Sistemas de Sensoriamento:

Os sistemas de sensoriamento para robôs são formados por circuitos eletrônicos e dispositivos de conversão de grandezas que associam grandezas físicas, normalmente não compatíveis na sua forma natural com o processamento digital de sinais, com grandezas facilmente tratáveis pelos computadores digitais que formam o sistema de controle dos sistemas robóticos. Os principais sensores utilizados em robótica podem ser classificados pelas suas funções segundo as seguintes doze classes [28] [33] [64].

- **Sensores Binários de Contato** : Interruptores mecânicos, interruptores magnéticos.

- Sensores de Posição : Potênciômetros, transformadores diferenciais, sincros, resolvers, inductosins, codificadores ópticos incrementais e absolutos.
- Sensores de Velocidade : estimação a partir de medidas de posição, tacomogeneradores de corrente contínua, tacômetros síncronos, tacômetros assíncronos, tacômetros digitais.
- Sensores de Tato : Contato binário, deslizante, pele artificial.
- Sensores de Esforços : Uso de acionadores (corrente elétrica), uso de estimação, uso de compliância
- Sensores de Proximidade : Acústicos, ópticos, Magnéticos, pneumáticos, eletroestáticos.
- Sensores de Trilha : Por contato, ópticos, interferômetros.
- Sensores de Visão : Câmeras Vidicom e CCD, laser.
- Sensores de Cor : Câmeras, ultra-violeta, infra-vermelho, foto-díodos + filtros.
- Sensores de Sincronização : Chaves limite, interuptores de pressão, dispositivos opto-eletrônicos.
- Sensores de Segurança : barreiras luminosas, dispositivos anti-colisão, fins de curso, sistemas de visão, ultra-sons.

1.8.1 - Sistemas de Acionamento do Robô:

O acionamento de um robô compreende em geral de duas partes distintas : o sistema de potência, ou elemento de acionamento propriamente dito e os elementos de transmissão. Os elementos de transmissão servem

para deslocar os pontos de aplicação das forças e torques, adaptando-se às características mecânicas do robô : Ex. redutores de velocidade, roldanas, cabos, etc...

Sistema de potência é responsável pela amplificação dos sinais de controle das juntas, que são gerados pelo sistema de controle eletrônico do robô, e pode ser implementado segundo as três formas abaixo :

1 - Hidráulico: Proporciona grandes forças e é normalmente usado em robôs de grande porte. Seu custo é elevado e pode ser desvantajoso para robôs pequenos porque seu custo não é linearmente proporcional à potência que consome. Esta forma de acionamento é adequada para o controle de deslocamentos lentos e contínuos que necessitam grandes esforços, ela é pouco sensível ao atrito seco, e tem elevado poder de aceleração, mas é bastante limitada quanto a precisão dos movimentos, principalmente devido as não linearidades inerentes aos acionadores hidráulicos, que dificultam a síntese de controladores - funções de transferência de terceira ordem ou superior [12] [13]. Em muitos ambientes industriais, como o caso dos setores de pintura, o acionamento hidráulico tem preferência, principalmente porque os motores elétricos ao produzirem centelhamentos podem causar explosões.

2 - Elétrico: Usado para robôs de pequeno e médio porte, sua utilização é adequada para o controle de movimentos precisos e rápidos, porém numa faixa limitada de potência. Devido a velocidade nominal dos motores elétricos ser em geral elevada é quase sempre necessário usar elementos de transmissão com reduções elevadas de velocidade dificultando assim a síntese de controladores eficientes devido a inserção de não linearidades.

Este tipo, de acionamento pode ser implementado com diversos tipos de motores, de acordo com a aplicação e a eficiência desejada.

- Motores de passo: Para controle de baixas potências.
- Servomotores CC: Mais eficientes e controle mais sofisticado.
- Servomotores CA: Tendência atual devido ao baixo custo.
- CC "Brushless" e Motor de Torque (Acionamento direto) : Eliminação dos sistemas de amplificação de torque e do "backlash" nas transmissões.

3 - Pneumáticos: Utilizados para robôs de médio e grande porte, onde as tarefas não exigem grandes precisões. Para juntas translacionais e operação carga e descarga. São de baixo custo e de implementação mais simples em comparação aos anteriores. Sua principal desvantagem é devida a compressibilidade do ar, que faz com que a posição da parte móvel do acionador dependa fortemente da carga, imobilizando qualquer outro tipo de controle em malha aberta que não o de fim-de-curso ou "on-off". Mesmo em malha fechada a síntese de controladores eficientes é muito complicada por motivos semelhantes ao comentado no acionamento hidráulico. Uma vantagem deste tipo de acionamento é que ele age como amortecedor de cargas elevadas, devido a estas características o acionamento pneumático torna-se competitivo para utilização em robôs que trabalham com movimentos simples e de sequência fixa.

1.8.2 - Capacidade de Carga :

Capacidade que a estrutura tem de mover uma determinada quantidade de massa . Ela é definida em função de alguns ítems característicos dos robôs, tais como :

- Configuração ou geometria do robô.
- Tamanho da estrutura.
- Tipo de construção.
- Sistema de acionamento.

1.9 - Análise e Estratégia de Controle :

1.9.1 - Introdução:

O estudo da dinâmica que será realizado no capítulo 2, vamos encontrar as equações necessárias para fazermos as simulações. Com estas equações podemos definir o tipo de controlador necessário para encontrarmos os torques para acionamento dos motores das junta.

Assim sendo pretendemos, neste capítulo, estudar, através das equações dinâmica do robô, definir o tipo de controlador a ser utilizado, voltando a atenção para o robô de configuração do tipo paralelogramo.

As características de um sistema de controle são representadas pelas respostas transitória e estacionária do sistema quando alguns sinais de teste são aplicados. Dependendo dos objetivos do projeto, estes sinais de teste são geralmente da forma função degrau. Para uma função de entrada do tipo degrau , a porcentagem de sobre sinal, tempo de subida e tempo de acomodação são freqüentemente usados para medir o desempenho do sistema. Qualitativamente a taxa de amortecimento e a freqüência natural não amortecida podem ser utilizadas para a estabilidade relativa do sistema

Estas grandezas são estritamente definidas apenas para sistemas de 2ª ordem. para sistemas de ordem maior estes parâmetros são significativos apenas se os correspondente par de autovalores da função de transferência

de malha fechada são dominantes na resposta dinâmica do sistema. Em geral, a dinâmica de um sistema linear controlado pode ser representado figura 4.1.

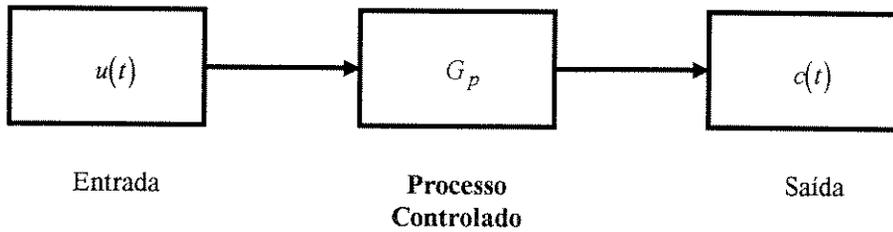


Figura 1.10 - Sistema de um Processo Controlado

O objetivo do projeto é ter as variáveis controladas, comportando-se de maneira desejada. Essencialmente, o problema envolve a determinação do sinal de controle $u(t)$ num intervalo de tempo fixado de tal forma que os objetivos do projeto sejam todos satisfeitos.

A maioria dos métodos existentes de projeto de sistema de controle baseiam-se no chamado projeto de configuração fixa no qual a projetista no início decide a composição básica de todo sistema e o local onde o controlador deve ser colocado em relação aos componentes do processo controlado.

1.9.2 - Tipos de Controle :

- Seqüência fixa: A programação é feita por meio de chaves limites ou batentes mecânicos.
- Repetição : É feito através de uma unidade de controle com memória, classificam-se em dois tipos:

1 - Ponto-a-Ponto: Movem-se de um ponto ao outro conforme programação prévia, sem controle de trajetória entre os mesmos.

2 - Trajetória Contínua: A partir de um ponto inicial e de uma trajetória bem definida, um algoritmo de geração e controle da trajetória, gera

referências para os servo-mecanismos das juntas rastream de modo coordenado.

3 - Controle Inteligente: Além de poder repetir um ciclo de movimento programado em trajetórias contínuas, ou ponto-a-ponto, podem interagir com o volume de trabalho no sentido de redirecionar a trajetória em função, por exemplo, de obstáculos detectados. [56] [84].

1.9.3 - Projeto de Controladores :

Apresentamos agora os efeitos de operações básicas de controladores, desde uma simples multiplicação por uma constante, como exemplo podemos citar o caso de um amplificador. Este tipo de ação de controle é formalmente conhecido como “controle proporcional”, já que o sinal atuante na saída do controlador é simplesmente relacionado à entrada do controlador por uma constante proporcional. Quando analisamos do ponto de vista matemático, um controlador linear de dados contínuos deveria ser capaz de tomar a derivada no tempo ou a integral no tempo do sinal de entrada além da operação proporcional e outras operações algébricas simples, como a adição e a subtração. Portanto, podemos descrever simplesmente um controlador linear de dados contínuos como um dispositivo contendo componentes como somadores (mais ou menos) amplificadores, atenuadores, diferenciadores e integradores. A tarefa do projetista é determinar quais desses componentes deveriam ser usados, quais os valores de seus parâmetros e como eles deveriam ser conectados. Por exemplo, um dos controladores mais conhecidos na prática é o controlador PID, onde PID significa Proporcional-Integral-Derivativo. A função de transferência de um controlador PID pode ser escrita como :

$$G_c(s) = K_P + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (1.1)$$

e como o problema do projeto é determinar os valores constantes de K_P , K_D e K_I tal que o desempenho do sistema seja conforme o desejado.

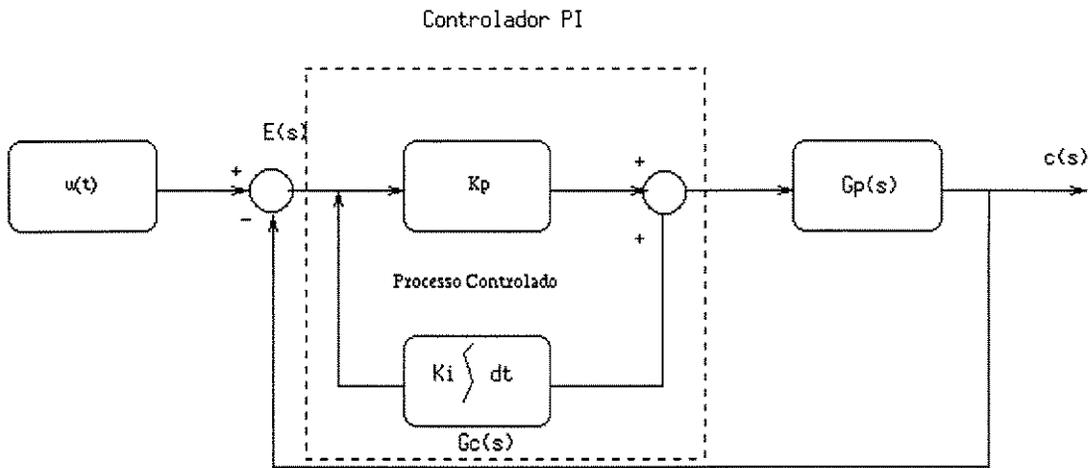


Figura 1.11 - Sistema de controle a realimentação com controle proporcional-integral

Na maioria dos robôs são utilizados controlador do tipo [PID], os quais atuam no posicionamento do robô, onde este está em função da trajetória imposta, dependendo assim da leitura dos transdutores.

Como em um sistema robótico as variáveis sofrem mudanças de posição, velocidade e carga do robô, isto torna-se um inconveniente para o controlador se adaptar.

Temos outros tipos de controlador, um é o tipo proporcional [P] que tem a função de relacionar a saída do controlador ao sinal do erro atuante.

Este é constituído essencialmente de um amplificador com ganho ajustável. Podemos também utilizar o controlador [PD] o qual sofre a ação de controle derivativa, onde a magnitude de saída do controlador é proporcional a taxa de variação do sinal do erro atuante. Uma desvantagem é que ele pode amplificar os sinais de ruído e causar um efeito de saturação no atuador.

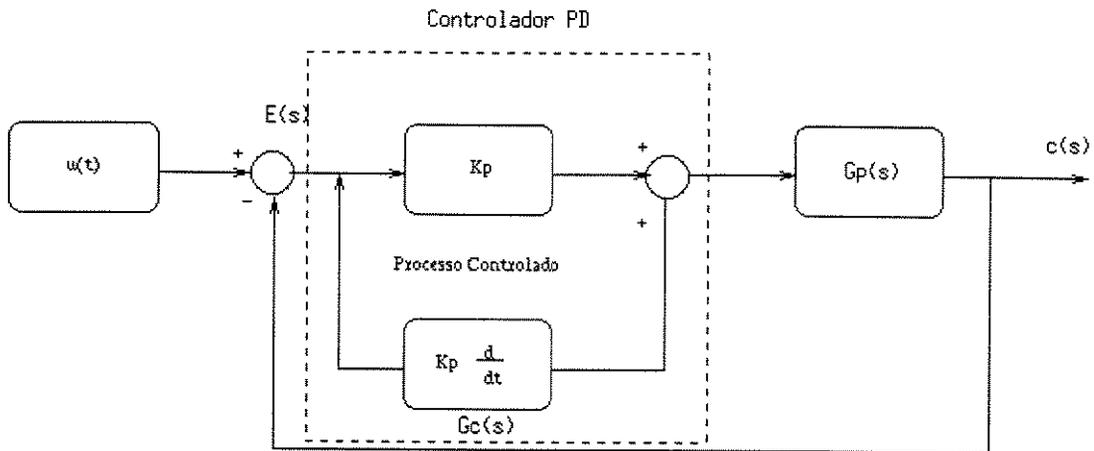


Figura 1.12 - Sistema de controle a realimentação com controle proporcional-derivativo

Quando falamos em controle devemos primeiramente exigir que o sistema de controle seja estável. Isto é fundamental.

Para que o sistema seja estável a velocidade de resposta deve ser razoavelmente rápida, além do que possuir um amortecimento satisfatório.

Assim sendo quando falamos de controle em um sistema, ele deve ser capaz de reduzir possíveis erros a valor zero ou talvez um valor tolerável que permita o sistema.

A atuação de um controlador em um sistema dinâmico de um robô envolve a determinação das entradas, ou seja os torques ou tensões para seus respectivos atuadores em cada junta, para que estes possam desenvolver o movimento de seus elos para determinadas posições com velocidades desejadas.

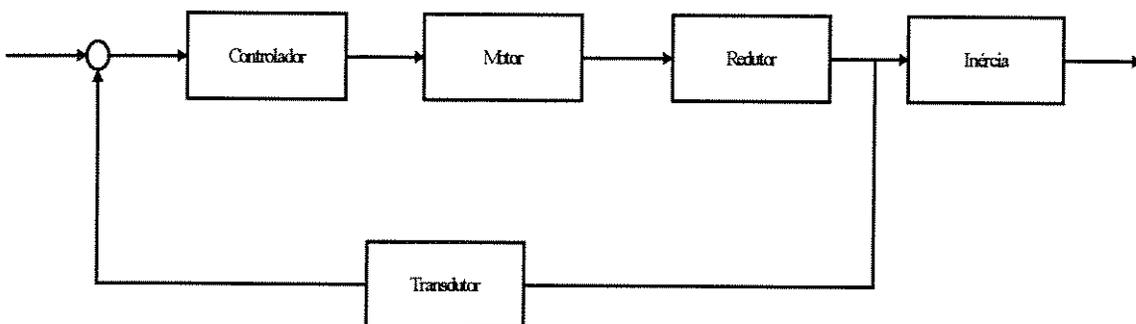


Figura 1.13 - Sistema genérico para controle de uma junta robótica.

Para complicar ainda mais a atuação do controle em um sistema robótico temos que as condições de operações mudam constantemente.

Assim sendo a função do controlador em uma junta é fazer a comparação entre uma dada trajetória especificada ao controlador e compará-la a saída atual com a entrada de referência e assim enviar o sinal de controle ao atuador onde este terá a função de reduzir o erro.

No estudo de uma estrutura robótica encontramos muitas variáveis que influenciam no sistema, e conforme a atuação e o comportamento destas variáveis o controle pode encontrar algumas dificuldades para fazer com que o sistema tenha uma resposta aceitável.

Para simularmos nosso sistema utilizamos um controlador do tipo (P, PD, PID).

Controle do motor em vazio; o qual constitui de um sistema simples onde é feito o controle de duas posições, este sistema é relativamente simples e barato e desta forma pode ser muito utilizado em sistemas industriais.

Um robô com configuração do tipo paralelogramo de dois graus de liberdade com este tipo de motor que estamos utilizando no projeto possui as características de um motor que pode ser diretamente acoplado a junta do robô o que permite desenvolver um alto torque.

Desde que o robô não contém mecanismos de transmissão entre os motores e suas cargas, o sistema de acionamento não tem movimentos violentos, backlash, pequeno atrito e alta inflexibilidade mecânica, os quais são desejáveis para robôs versáteis, rápidos e de precisão.

Aqui discutiremos a realimentação de velocidade, quando aumentamos o fator de amortecimento das juntas neste tipo de motor que está sendo utilizado. No caso de uma junta com este tipo de acionamento, a velocidade é normalmente medida no mancal de um motor antes que a velocidade, seja reduzida pelas engrenagens. Entretanto, isto é mais difícil fazer assim em uma junta com acoplamento direto, por que a velocidade do motor é tão lenta quanto o movimento da ligação (Link).

O emprego de encoders nos mancais com alta resolução permite uma melhor atuação do controlador e desta forma podemos desenvolver circuitos elétricos para medir o movimento da baixa velocidade da junta.

Utilizando a realimentação de velocidade usando os encoders, podemos avaliar o desempenho através de experimentos. Quando o ganho de realimentação da velocidade K_a é aumentado as características de amortecimento são melhoradas. Entretanto, se o ganho é extremamente grande, ele amplifica o erro tão bem quanto o sinal. Quando a junta gira perto da velocidade mínima detectável, o sinal de velocidade varia freqüentemente.

Esta variação do sinal de velocidade tem grande flutuação de controle de torque e diminui a precisão do controle.

Desta forma com o estudo realizado sobre controladores verificamos que existe muitas formas de se controlar um sistema dinâmico robótico, basta empregarmos as leis da engenharia de controle que é muito mais ampla do que especificamente utilizamos em nosso trabalho, com um aprofundamento maior temos a certeza de que o sistema proposto pode nos trazer grandes trabalhos a serem desenvolvidos.

Capítulo 2

2 - FORÇAS EM MANIPULADORES (DINÂMICA) :

2.1 - Introdução:

O projeto mecânico de estruturas e máquinas equivale a criar-se configurações de várias partes ou componentes, bem como selecionar materiais apropriados, planos de desenvolvimento e verificar as dimensões destes componentes, de modo que haja concordância nas especificações. Uma execução adequada de ambas as seções permite uma definição clara das forças que estão agindo no sistema, sendo este desenvolvido dependente das variáveis envolvidas e dos valores numéricos das forças, momentos e torques. As forças que atuam num sistema determinam quais devem ser suas resistências estruturais, qual será a durabilidade e outras dependências, tais como precisão e estabilidade durante os movimentos, sendo que os sistemas mecânicos dos robôs não são exceções sob este aspecto, por isso a análise do perfil específico de cada estrutura de robô tem uma grande importância, principalmente devido as forças : estáticas (gravidade, atrito e interações durante as operações) e dinâmicas (inércia, centrípeta, coriolis, vibrações), diferem muito em localização e intensidade de robô para robô. A consideração das forças de atrito é importante, apesar de muitas vezes serem consideradas forças secundárias de origem estática ou dinâmica, e desprezadas na etapa da modelagem matemática dos robôs.

Um entendimento claro da importância relativa forças e dos fatores que influenciam suas grandezas, permite ao projetista propor técnicas para minimizar os efeitos de algumas forças indesejáveis; por ex: forças causadas por acoplamentos interaxiais no robô, ou determinar como deve ser seu balanceamento total ou parcial; por exemplo, o peso de balanceamento das forças de gravidade, e o desacoplamento em estruturas com arquitetura em paralelogramo. A análise das forças em robôs que se movimentam no espaço

R^3 , é muito problemática, e mais ainda para robôs com estruturas que permitam movimentos redundantes.

Entretanto um entendimento dos fatores que influenciam nestas forças assim como das grandezas relativas de vários fatores de força, podem ser alcançados através de um estudo analítico de manipuladores planares. Podem ser analisadas as forças principais atuantes em diversos tipos de manipuladores planares, por exemplo : Cartesiano, Polar que é o equivalente de uma estrutura Cilíndrica ou Esférica, e Paralelogramo.

A validade da análise bi-dimensional é bastante mais restrita, mas também, muito mais elementar que uma análise tri-dimensional da estrutura da junta.

Se as forças estáticas são essencialmente as mesmas, com ou sem considerar as deformações elásticas na estrutura do manipulador, as forças dinâmicas podem criar diferentes efeitos em um manipulador, portanto podem ocorrer deformações nos seus componentes devido estas forças atuantes serem inevitáveis. Uma vez que podem ocorrer movimentos oscilatórios causados pelas características flexibilidade provocados pela velocidade efetiva, precisão e repetição dos movimentos realizados por manipuladores de estrutura rígida ou flexíveis, nós os consideraremos neste capítulo.

A seguinte análise considera somente a estrutura de um manipulador desenvolvendo movimentos por regiões. Os dispositivos de orientação e acionamento (punhos e a parte responsável pela contração da braço) são consideradas como inércias rígidas. Em todas as estruturas dos manipuladores a serem considerados, as forças da gravidade são importantes somente se o manipulador está se movendo em planos verticais ou inclinado. Se ele está se movimentando no planos horizontais como os robôs SCARA que têm estruturas de união ou os robôs com estrutura do tipo cilíndrica, as forças de gravidade podem ser desprezadas.

2.2 - Estrutura de Coordenadas Cartesianas :

Um manipulador projetado para operarn um sistema de coordenadas cartesianas é mostrado na figura 2.1. Ele pode posicionar o bloco com um

carregamento m_0 num espaço horizontal com dois movimentos translacionais com juntas prismáticas 1 e 2 ao longo dos eixos (x) e (y) respectivamente.

As ligações móveis tem massas m_1 e m_0 onde suas massas estão concentradas em seus centros de gravidade (cg).

Quando o movimento não rotacional é desenvolvido os valores das massas e os momentos de inércia não são considerados solicitados (requeridos).

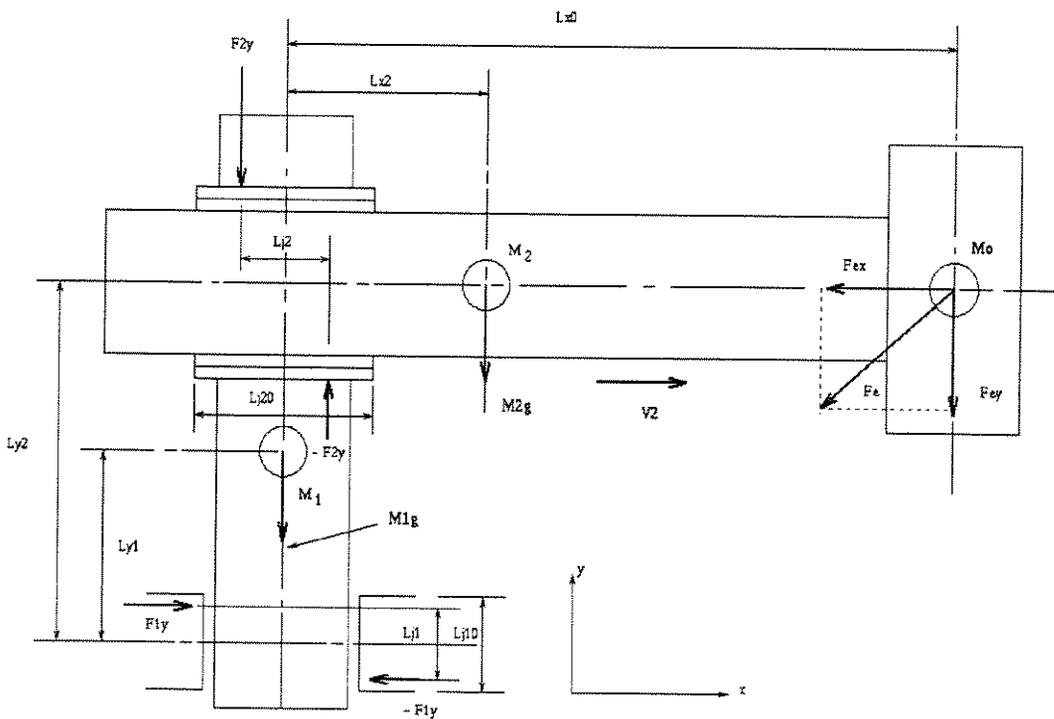


Figura 2.1 - Manipulador para operar no sistema de coordenadas cartesianas

2.2.1 - Dinâmica :

As equações dinâmicas permitem calcular as acelerações, velocidades e posições dos elos, quando as forças nas juntas são conhecidas (problema inverso), ou quando o cálculo das forças generalizadas é necessário para

movimentar as extremidades do braço com acelerações, velocidades e posições (problema direto).

Quando derivamos as equações dinâmicas, num primeiro estágio a gravidade não é considerada. É claro que todos os resultados da seção anterior são válidos quando os elos são móveis, por causa disso as forças estáticas podem ser superpostas nas equações dinâmicas.

Desde que a gravidade não seja considerada a equação LANGRANGIANA (L) é igual Energia Cinética (K). Para o caso ilustrado na figura, se a velocidade na junta 1 é V_1 e a velocidade na junta 2 é V_2 , então a massa m_1 está se movendo com V_1 e as massas m_2 e m_0 estão se movendo com $V_1 + V_2$ (soma vetorial). As expressões da energia cinética para os elos 1 e 2, são:

$$K_1 = m_1 \frac{V_1^2}{2} \quad (2.1)$$

$$K_2 = (m_2 + m_0) \frac{(\vec{V}_1 + \vec{V}_2)^2}{2} = (m_2 + m_0) \frac{V_1^2 + V_2^2}{2} \quad (2.2)$$

As coordenadas x e y podem ser chamadas como coordenadas generalizadas, com:

$$\begin{aligned} V_1 &= \dot{x} \\ V_2 &= \dot{y} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Consequentemente, as equações dinâmicas que fornecem as forças das juntas F_1 e F_2 são:

$$F_1 = \frac{d}{dt} = \frac{\partial(K_1 + K_2)}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial(K_1 + K_2)}{\partial x} \quad (2.4)$$

$$F_2 = \frac{d}{dt} = \frac{\partial(K_1 + K_2)}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial(K_1 + K_2)}{\partial y} \quad (2.5)$$

$$F_1 = (m_1 + m_2 + m_0)\dot{x} \quad (2.6)$$

$$F_2 = (m_2 + m_0)\dot{y} \quad (2.7)$$

Estas duas equações são lineares e independentes, a equação (2.6) contém somente a variável x e a equação (2.7) só a variável y . Assim sendo as duas variáveis são consideradas coordenadas desacopladas. Entretanto, alguns acoplamentos interaxiais são criados devido ao atrito. A ação da força de inércia $(m_2 + m_0)\ddot{x}$ na direção x criaria na junta 2 uma força de atrito $f_2(m_2 + m_0)\dot{x}$ com duas forças de atrito idênticas

$$f_2 \frac{m_0 \ddot{x} L_{y,0} + m_2 \ddot{x} L_{y,2}}{L_{j,2}} \quad (2.8)$$

causadas pelas reações da junta 2, induzida por momentos de força de inércia das massas m_0 e m_2 . As forças de atrito estão agindo na direção y , assim a força total a ser desenvolvida pelo motor nas juntas :

$$F_2 = (m_2 + m_0)\dot{y} + f_2 \left[m_2 + m_0 + 2 \frac{m_2 L_{y,2} + m_0 L_{y,0}}{L_{j,2}} \right] \dot{x} \quad (2.9)$$

Analogamente:

$$F_1 = \left[m_1 + m_2 + m_0 + 2 f_1 \frac{m_2 L_{y,2} + m_0 L_{y,0}}{L_{j,1}} \right] \dot{x} + (m_2 + m_0) f_1 \dot{y} \quad (2.10)$$

2.2.2 - Comentários :

- Este tipo de manipulador permite o posicionamento de sua massa num espaço horizontal, com dois movimentos translacionais, utilizando juntas prismáticas ao longo de seus eixos (x) e (y).
- Suas massas estão concentradas nos centros de gravidade de cada elo.

- Os projetos atuais são caracterizados pela influência do atrito nas juntas, provocando folgas mecânicas inevitáveis, e causando deslocamentos angulares e deformações indesejáveis.

2.3 - Estrutura de Coordenadas Polar ou Cilíndrica :

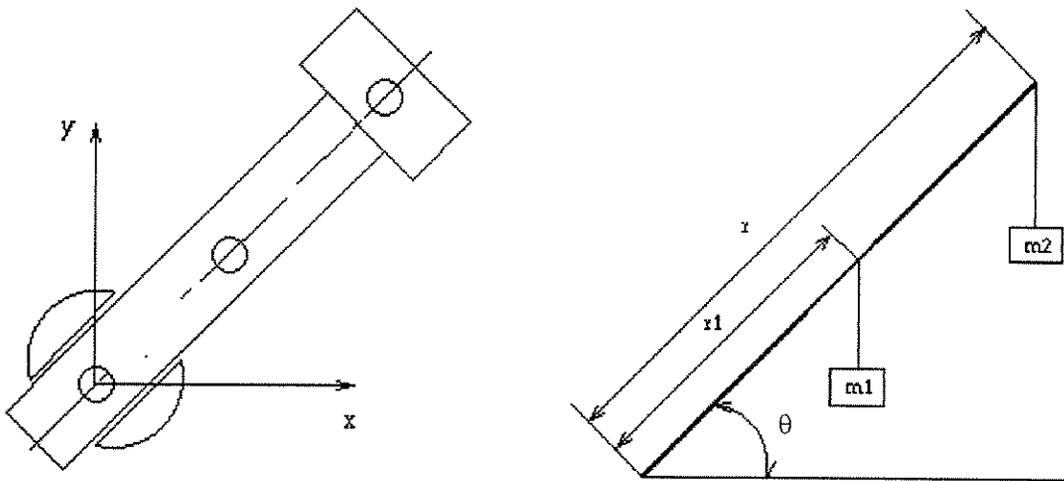


Figura 2.2 - Manipulador de sistema polar, e o esquema de representação das massas envolvidas no sistema.

A figura 2.2 mostra um manipulador de estrutura polar (cilíndrica ou $\theta - r$) onde são consideradas as cargas do robô, a massa m_1 esta no centro de gravidade, com distância r_1 constante em relação ao centro de rotação, a junta 2 é radial de massa m_2 e distância r .

2.3.1 -Dinâmica :

O sistema mecânico é definido aplicando-se o Lagrangeano que é definido por :

$$L = K - P \tag{2.11}$$

Onde K é a energia cinética e P é a energia potencial total do sistema.

Para uma junta rotacional de variável θ , podemos calcular o torque desenvolvido pelo atuador aplicando :

$$T = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} \quad (2.12)$$

Da mesma forma podemos calcular quando consideramos uma junta prismática, assim a força aplicada é dada por :

$$F_x = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} \quad (2.13)$$

A posição e a velocidade do braço é dada por :

Posição :

$$\begin{aligned} x_1 &= r_1 \cos \theta \\ y_1 &= r_1 \sin \theta \end{aligned} \quad (2.14)$$

Diferenciando as equações acima temos :

Velocidade :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -r_1 \sin \theta \dot{\theta} \\ \dot{y}_1 &= r_1 \cos \theta \dot{\theta} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Podemos então determinar τ e F , que são respectivamente, o torque na junta 1 e a força na junta 2 através da aplicação das equações de Lagrange. A energia potencial (V) é função das forças da gravidade; assim sendo (V) é dada por :

$$\begin{aligned}
 V_1^2 &= (\dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_1)^2 \\
 V_1^2 &= r_1^2 \sin^2 \theta \dot{\theta}^2 + r_1^2 \cos^2 \theta \dot{\theta}^2 \\
 &= r_1^2 \dot{\theta}^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \\
 V_1^2 &= r_1^2 \dot{\theta}^2
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Considerando a massa (m) se movimentando a uma velocidade V^2 a energia cinética é dada por :

$$K = \frac{1}{2} m V^2 \tag{2.17}$$

Desta forma :

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 (r_1^2 \dot{\theta}^2) \tag{2.18}$$

Fazendo as requeridas derivadas para K_2 , e considerando que r é não constante temos que as equações da posição e velocidade para a junta 2 :

Posição :

$$\begin{aligned}
 x_2 &= r \cos \theta \\
 y_2 &= r \sin \theta
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Velocidade :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_2 &= \dot{r} \cos \theta - r \dot{\theta} \sin \theta \\
 \dot{y}_2 &= \dot{r} \sin \theta + r \dot{\theta} \cos \theta
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

$$V_2^2 = (\dot{r} \cos \theta - r \dot{\theta} \sin \theta)^2 + (\dot{r} \sin \theta + r \dot{\theta} \cos \theta)^2 \tag{2.21}$$

Simplificando temos que :

$$V_2^2 = \dot{r}_2 + r^2 \dot{\theta}^2 \quad (2.22)$$

Desta forma :

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 [\dot{r}_2 + r^2 \dot{\theta}^2] \quad (2.23)$$

Podemos achar a energia potencial do sistema usando :

$$P = mgh \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= m_1 g r_1 \sin \theta \\ P_2 &= m_2 g r \sin \theta \end{aligned} \quad (2.25)$$

Calculando a energia cinética total do sistema :

$$K = K_1 + K_2 = \frac{1}{2} m_1 r_1^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{r}^2 + \frac{1}{2} m_2 r^2 \dot{\theta}^2 \quad (2.26)$$

$$P = m_1 g r_1 \sin \theta + m_2 g r \sin \theta \quad (2.27)$$

$$L = \frac{1}{2} m_1 r_1^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{r}^2 + \frac{1}{2} m_2 r^2 \dot{\theta}^2 - m_1 g r_1 \sin \theta - m_2 g r \sin \theta \quad (2.28)$$

Fazendo a derivadas parciais necessárias para achar o torque desenvolvido pelo motor na junta 1, achamos :

$$T_\theta = m_1 r_1^2 \ddot{\theta} + m_2 r^2 \ddot{\theta} + 2m_2 r \dot{r} \dot{\theta} + g \cos \theta (m_1 r_1 + m_2 r) \quad (2.29)$$

Calculando a força realizada pelo atuador linear temos :

$$F_r = m_2 \ddot{r} - m_2 r \dot{\theta}^2 + m_2 g \sin \theta \quad (2.30)$$

Sendo que F e τ são a força e o torque a serem desenvolvidas pelos respectivos motores das juntas, produzindo assim as acelerações, velocidades e posições necessárias para r e \dot{r} . Para calcular F e τ é necessário saber os parâmetros do braço, sendo que alguns desses parâmetros dependem da configuração do robô. Para uma análise mais conveniente reescrevemos as equações da seguinte forma :

$$\begin{aligned}
 T_{\theta} = & D_{11}\ddot{\theta} + D_{12}\ddot{r} \\
 & + D_{111}\dot{\theta}^2 + D_{122}\dot{r}^2 \\
 & + D_{112}\dot{\theta}\dot{r} + D_{121}\dot{\theta}\dot{r} \\
 & + D_1
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

D_{11} e D_{12} são os Termos de Inércia.

D_{111} e D_{122} são os Termos das Forças Centrípetas.

D_{112} e D_{121} são os Termos das Forças Coriolis.

D_1 são os Termos da Gravidade.

As equações (2.28) são não lineares onde elas contém produtos de r e \dot{r} com $\ddot{\theta}$ tanto quanto $\dot{r}\dot{\theta}$, $r\dot{\theta}$, $\dot{\theta}^2$, $\sin \theta$ e $\cos \theta$.

Os termos com produtos de primeira derivada são chamados "termos de Coriolis" D_{112} e D_{122} e termos com segunda derivada são chamados "termos da Centrípeta".

A não linearidade das equações acarreta problema de controle (isto é a geração de F e τ tem um movimento especificado) onde temos um cálculo difícil, os efeitos da não linearidade são variados, os quais o resultado final causa uma perturbação na trajetória do movimento. As perturbações podem ser reduzidas usando-se realimentações apropriadas com sensores fornecendo os erros contidos. Entretanto, os termos de acoplamento D_{112} e D_{122} podem ser eliminados (junto com D_1) quando balancearmos o braço. A eliminação do acoplamento pode ser reconhecida somente por balanceamento da massa. É claro que o balanceamento para uma estrutura polar tem um sistema adaptativo que continuamente troca a configuração (posição) das massas

balanceadas de acordo com as mudanças em r que são causadas por movimentos radiais do braço. O atrito causado pelo acoplamento interaxial é responsável por provocar forças adicionais.

Podemos verificar que o balanceamento eliminaria dois termos correspondente ao atrito, num total de três. A presença de produtos das derivadas nas equações significa que durante a execução de uma determinada trajetória programada poderia ocorrer uma troca de sinais nestes termos os quais exigiriam variações rápidas em F e τ levando uma maior exigência de desempenho do sistema de acionamento.

Consequentemente, os motores responderiam a estas variações ao seguirem a trajetória programada, somente se seus tempos de resposta fossem pequenos. Uma vez que o custo dos motores depende diretamente de suas características de desempenho, exigir que sejam usados motores de alto desempenho pode significar encarecimento do projeto e até mesmo sua inviabilização, portanto, um dado importante de projeto é fazer com que haja uma minimização de F e τ . A criação de uma melhor estrutura requer o entendimento de vários termos. Para maior detalhamento da importância dos termos analisados, sugerimos o estudo os dois últimos graus de liberdade do manipulador Stanford [28] [33] [41] [76] [83].

2.3.2 - Comentários :

- Na análise desta estrutura algumas equações dinâmicas facilitam o cálculo preciso dos atritos envolvidos, onde através destes podemos analisar detalhes importantes.
- Forças generalizadas desenvolvidas pelos motores de acionamento produzem Torques e Forças, e pode ser um bom procedimento caracterizá-las como grandezas distribuídas ao longo das diferentes trajetórias percorridas pelo robô, com máximas acelerações .
- As forças da gravidade normalmente são dominantes na determinação de grandezas como torque e força.

- As forças de atrito influenciam no aumento da força.
- Com o balanceamento das massas, as forças de gravidade têm uma redução substancial e uniforme, podendo desconsiderar que não irão aparecer forças ou torques com grandes variações de devido a sua ação enquanto que o robô se movimenta, portanto fazendo menores exigências aos motores de acionamento especialmente de torque.; Embora reduzindo-se o peso e melhorando a resposta dos motores possa ajudar, o balanceamento adequado permite também a redução, ou até a eliminação dos acoplamentos entre forças e torques.
- A redução da massa do braço e do momento de inércia reduz algumas componentes de torque e força.
- A importância relativa da redução da inércia e o balanceamento dependem de algumas variáveis envolvidas, está dependência vinculada diretamente aos movimentos estruturais exigidos, desde movimentos lentos e/ou níveis baixos de aceleração até movimentos rápidos e/ou níveis altos de aceleração. Evidentemente a redução da massa do braço e do seu momento de inércia tanto quanto possível produz efeitos significativos proporcionais e benéficos principalmente do ponto de vista do sistema de controle.
- Outras técnicas de balanceamento podem ser empregadas, requerendo-se com isto um estudo mais aprofundado do comportamento das variáveis envolvidas para cada caso particular de aplicação.

2.4 - Estrutura Articulada :

Em manipuladores com juntas articuladas os motores das junta desenvolvem torques com tempos sincronizados nos movimentos de suas ligações, e desta maneira definem as posições, velocidades e acelerações da extremidade do braço necessárias para conduzir os rastreamentos das trajetórias impostas pelas tarefas as quais eles são submetidos, normalmente oferecendo maior destreza de movimentos em relação a manipuladores com estrutura cartesiana e polar, porém exigindo maior capacidade por parte do respectivo sistema de controle. Estas estruturas de robôs atualmente são as que mais se aproximam das características antropomórficas de um braço. Na figura 2.3 apresentamos um desenho em vista frontal do robô Jeca II que têm estrutura articulada e que foi projetado e construído por nossa equipe na Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP.

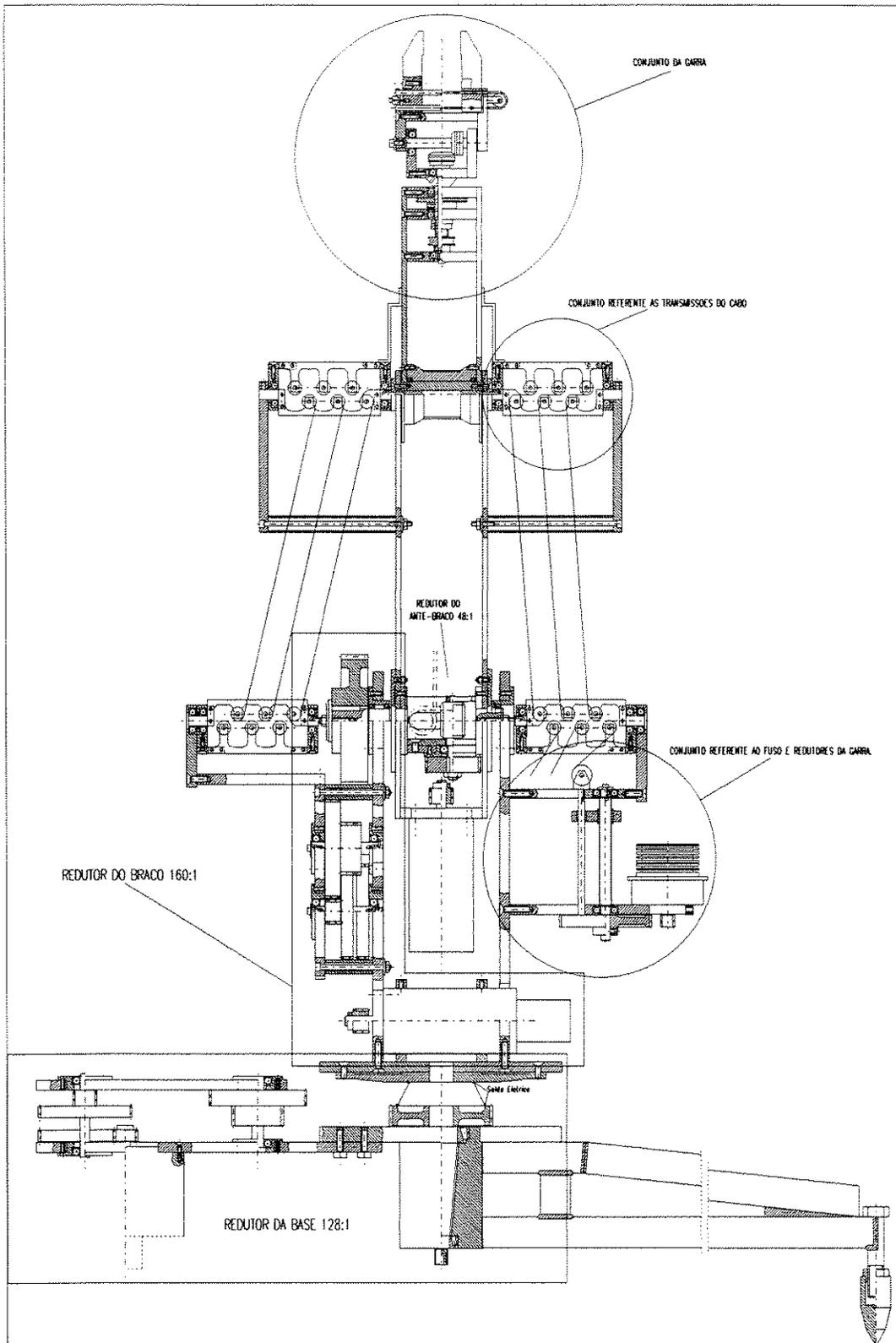


Figura 2.3 - Robô de estrutura articulada (Jeca II)

2.4.1 - Dinâmica :

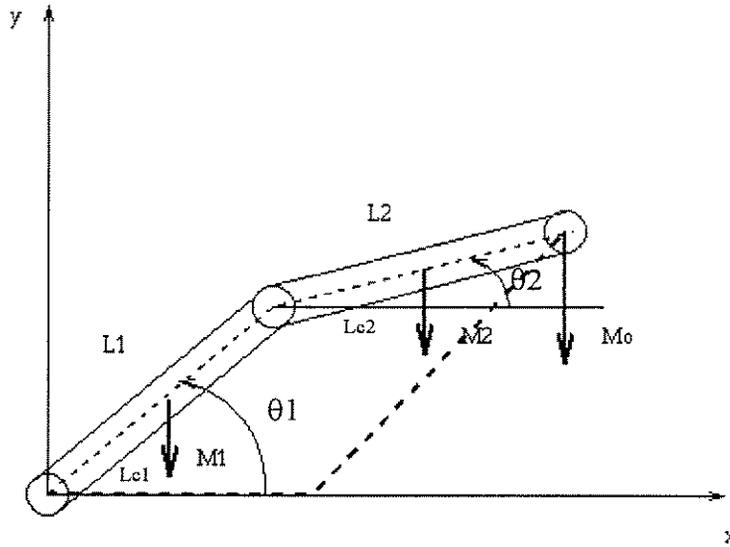


Figura 2.4 - Manipulador planar de 2 graus de liberdade com cadeia serial.

Para explicarmos como é feita a obtenção do modelo dinâmico de um manipulador com estrutura articulada por maior simplicidade utilizamos a estrutura de 2 graus de liberdade conforme mostrado esquematicamente na figura 2.4.

Para este manipulador as expressões da energia potencial e cinética para o primeiro elo são :

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{1}{2} M_1 L_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \\
 V_1 &= M_1 g L_{c1} \text{sen } \theta_1
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Para o elo 2, tem-se as seguintes componentes de posição e velocidade e do centro de gravidade :

Posição :

$$\begin{aligned}x_{2c} &= L_1 \cos \theta_1 + L_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\y_{2c} &= L_1 \sin \theta_1 + L_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)\end{aligned}\quad (2.33)$$

Velocidade :

$$\begin{aligned}\dot{x}_{2c} &= -L_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - L_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_{2c} &= L_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + L_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2)\end{aligned}\quad (2.34)$$

A velocidade angular do elo 2 é igual :

$$\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2$$

consequentemente a energia cinética do elo 2 é dada por :

$$\begin{aligned}K_2 &= \frac{1}{2} M_2 (\dot{x}_{c2}^2 + \dot{y}_{c2}^2) + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ &= \frac{1}{2} M_2 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} M_2 L_{c2}^2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ &\quad + M_2 L_1 L_{c2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\end{aligned}\quad (2.35)$$

E sua energia potencial é dada por :

$$V_2 = M_2 g [L_1 \sin \theta_1 + L_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (2.36)$$

Similarmente, as energias cinética e potencial para a carga podem ser expressas como :

$$\begin{aligned}
 K_0 &= \frac{1}{2} M_0 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} M_0 L_2^2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
 &\quad + M_0 L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\
 V_0 &= M_0 g [L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)]
 \end{aligned}
 \tag{2.37}$$

Das equações 2.23, 2.26, 2.27 e 2.28 o Lagrangeano $L = K - V$ vale

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{2} M_1 L_{c1}^1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} M_2 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} M_2 L_{c2}^2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
 &\quad + M_2 L_1 L_{c2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
 &\quad + \frac{1}{2} M_0 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} M_0 L_2^2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
 &\quad + M_0 L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\
 &\quad + M_0 g [L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \\
 &\quad - M_2 g [L_1 \sin \theta_1 + L_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)] \\
 &\quad - M_1 g L_{c1} \sin \theta_1
 \end{aligned}
 \tag{2.38}$$

Como ambas as juntas são rotacionais para obter as equações do torques em cada uma precisamos determinar as equações lagrangeanas :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} + \frac{df_i}{dq_i} = \tau_i \quad \text{para } i = 1, 2
 \tag{2.39}$$

Após o cálculo das derivadas parciais envolvidas e de simples manipulação algébricas encontramos :

$$\begin{aligned}
 \tau_1 = & \left[M_1 L_{c1}^2 + I_1 + M_2 L_1^2 + M_2 L_{c2}^2 + I_2 + M_0 L_1^2 + M_0 L_2^2 + 2L_1(M_2 L_{c2} + M_0 L_2) \cos \theta_2 \right] \ddot{\theta}_1 \\
 & + \left[M_2 L_{c2}^2 + I_2 + M_0 L_2^2 + L_1(M_2 L_{c2} + M_0 L_2) \cos \theta_2 \right] \ddot{\theta}_2 \\
 & - 2L_1(M_2 L_{c2} + M_0 L_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\
 & - L_1(M_2 L_{c2} + M_0 L_2) \dot{\theta}_2^2 g \sin \theta_2 \\
 & + (M_1 L_{c1} + M_2 L + M_0 L_1) g \cos \theta_1 \\
 & + (M_2 L_{c2} + M_0 L_2) g \cos(\theta_1 + \theta_2)
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_2 = & \left[M_1 L_{c2}^2 + I_2 + M_0 L_2^2 + L_1(M_2 L_{c2} + M_0 L_2) \cos \theta_2 \right] \ddot{\theta}_1 \\
 & + (M_2 L_{c2}^2 + I_2 + M_0 L_2^2) \ddot{\theta}_2 \\
 & + L_1(M_2 L_{c2} + M_0 L_2) \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \\
 & + (M_2 L_{c2} + M_0 L_2) g \cos(\theta_1 + \theta_2)
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

Reescrevendo estas equações :

$$\tau_1 = D_{11} \ddot{\theta}_1 + D_{12} \ddot{\theta}_2 + D_{111} \dot{\theta}_1^2 + D_{122} \dot{\theta}_2^2 + D_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D_{121} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D_1 \tag{2.42}$$

$$\tau_2 = D_{12} \ddot{\theta}_1 + D_{22} \ddot{\theta}_2 + D_{211} \dot{\theta}_1^2 + D_{222} \dot{\theta}_2^2 + D_{212} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D_{221} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + D_2 \tag{2.43}$$

D_{ii} = Inércia efetiva do elo *i*.

D_{ij} = Inércia de acoplamento.

D_{ijj} = Força centrípeta na junta *i* devido à rotação da junta *j*.

D_{iij} = Força de Coriolis na junta *i* devido à velocidade da junta *i*.

D_{iji} = Força de Coriolis na junta *i* devido a velocidade da junta *j*.

D_i = Força de gravidade na junta *i*.

2.4.2 -Comentários :

- As equações dinâmicas neste tipo de estrutura mostram um elevado grau de não linearidade caracterizada principalmente por produtos envolvendo senos e cossenos, e fortes acoplamento inter-axiais, gerando termos matemáticos complexos de torque. Estes podem ser os responsáveis pelo aparecimento de forças e torques indesejáveis na estrutura.

- O grau de acoplamento pode ser reduzido através de uma análise prévia das equações dinâmicas e de um dimensionamento estrutural adequado a cada caso. Com a redução no grau de acoplamento podemos simplificar a projeto execução do sistema de controle devido a redução proporcional da quantidade de espaço computacional necessário durante o controle dos movimentos.
- Uma forma direta e efetiva de fazer uma redução nos torques para proporcionar um melhor desempenho do manipulador é, sempre que possível, reduzir a influência dos acoplamentos e das não linearidades, causadas pelas inércias dos motores. Para reduzirmos estes efeitos negativos, também devemos reduzir ao máximo possível as massas e os momentos de inércia das ligações.
- Os termos não lineares e de acoplamento contendo funções seno e coseno podem ser substancialmente reduzidos ou em alguns casos totalmente eliminados, se o comprimento dos centros de gravidade dos elos for zero ou próximo de zero em relação aos seus respectivos eixos de movimento. Isto pode ser feito através de uma redistribuição de massas e de um balanceamento adequado nos elos.
- Se um robô é utilizado para segurar um número limitado de peças seu balanceamento pode ser ajustado de acordo com o desenho do projeto, e desta forma podemos conseguir minimizar os efeitos indesejáveis devido às variações de carga.
- A adaptação de algumas peças pode ser feita de acordo com a variação do produto M_2L_{c2} e M_1L_{c1} isso pode proporcionar, em alguns casos específicos, uma performance mais eficiente na execução de tarefas.
- Uma condição importante que devemos considerar para o balanceamento estático é que $M_2L_{c2} + M_0L_2 = 0$, desta forma conseguimos eliminar

todas as forças centrípetas e de coriolis juntas, podemos também eliminar algumas forças de gravidade e não linearidade nos termos de inércia.

- Se for feito o balanceamento das forças de gravidade usando-se cilindros hidráulicos ou pneumáticos, pode-se conseguir uma redução ou eliminação de alguns termos do equacionamento dinâmico que são dependentes da configuração estrutural do manipulador conforme discutido. Somente fazendo-se as modificações de projeto juntamente com os devidos balanceamentos das massas permitiria isto pode-se conseguir com que tal equacionamento dinâmico fique mais simplificado.
- Quanto menores os diâmetros dos eixos das juntas rotacionais, menores serão os torques de atrito nelas induzidos sendo que se forem adequadamente dimensionados, tais torques poderão ser desprezados nas equações dinâmicas.

2.5 - Estrutura do Paralelogramo :

Um robô com estrutura de paralelogramo está mostrado na figura 2.

Assim como na estrutura articulada apresentada anteriormente, este robô possui dois motores de revolução os quais desenvolvem os torques de acionamento. Entretanto, ambos os motores são coaxiais e apesar de estarem acionando diferentes ligações (1 e 2 na figura 2.5). Devido a geometria estrutural, a rotação do motor 1 causaria somente movimento translacional (sem deslocamento angular) do elo 4, enquanto a rotação do motor 2 causa somente movimento angular (sem deslocamentos paralelos) deste elo 4. Em alguns projetos, um ou ambos os motores podem ser substituídos por atuadores translacionais, normalmente fusos de esferas. Os manipuladores com estrutura do tipo paralelogramo assim como os mais gerais construídos de 5 ligações [6] [7] [8] [34] [40] [47] [64] [76] [89] têm sido desenvolvidos com um propósito inicial de eliminar a necessidade de utilização da motores pesados, os quais acarretam inércias maiores nas ligações que produzem os movimentos.

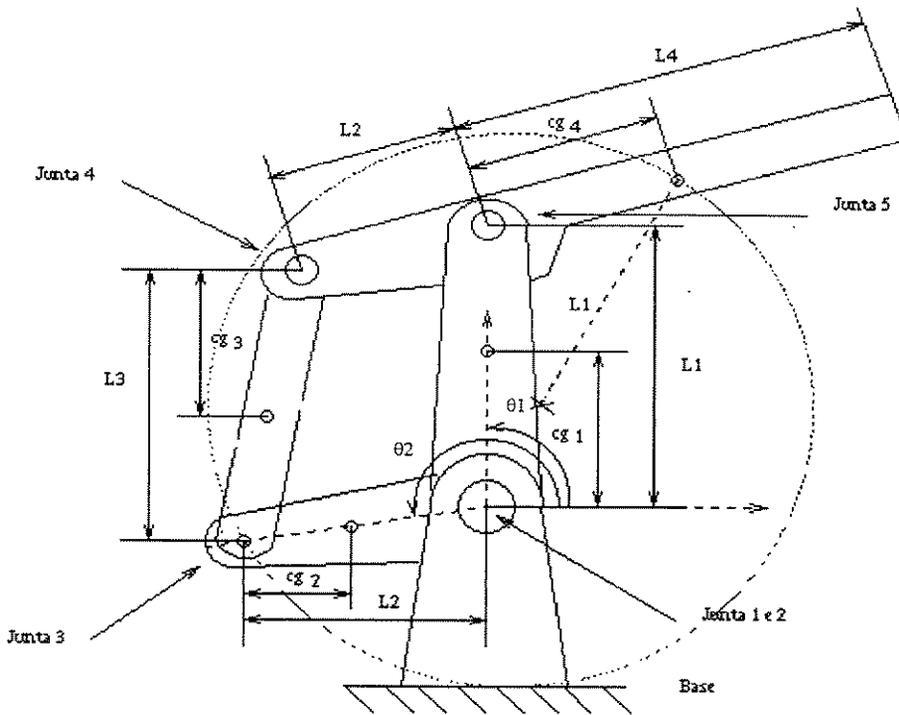


Figura 2.5 - Robô de estrutura do tipo Paralelogramo (4 barras)

2.5.1 - Dinâmica :

Para deduzirmos as equações do movimento usando as equações de LAGRANGE, devemos obter, para cada ligação, as expressões da energia cinética e potencial. As ligações 1 e 2 (figura 2.4) participam com movimentos de revolução associados aos motores 1 e 2, ou ângulos θ_1 e θ_2 respectivamente. Para descrevermos os movimentos das ligações 2 e 4, seus movimentos parciais associados com cada coordenada θ_1 e θ_2 podemos calculá-los separadamente, e as velocidades resultantes são :

LINK 1 -

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 (L_{1c} \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.44)$$

$$V_1 = m_1 g L_{1c} \cos \theta_1$$

LINK 2 -

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 (L_{2c} \dot{\Theta}_2)^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\Theta}_2^2 \quad (2.45)$$

$$V_2 = m_2 g L_{2c} \cos \Theta_2$$

LINK 2 -

(a) - quando o LINK 2 está estacionário ($\Theta_2 = 0$), então temos:

$$\omega_3 = \omega_1 = \dot{\Theta}_1$$

$$V_{cg3} = L_{3c} \dot{\Theta}_1 \quad (2.46)$$

$$(V_{cg3})_x = -V_{cg3} \cos \Theta_1 = -L_{3c} \dot{\Theta}_1 \cos \Theta_1$$

$$(V_{cg3})_y = -V_{cg3} \sin \Theta_1 = -L_{3c} \dot{\Theta}_1 \sin \Theta_1$$

(b) - quando o LINK 1 está estacionário ($\dot{\Theta}_1 = 0$), então $\omega_3 = \omega_1 = 0$

$$V_{cg3} = V_{o3} = L_2 \dot{\Theta}_2 \quad (2.47)$$

$$(V_{cg3})_x = -L_2 \dot{\Theta}_2 \cos \Theta_2$$

$$(V_{cg3})_y = -L_2 \dot{\Theta}_2 \sin \Theta_2$$

A velocidade resultante é:

$$V_{cg3} = \left(-L_{3c} \dot{\Theta}_1 \cos \Theta_1 - L_2 \dot{\Theta}_2 \cos \Theta_2 \right)^2$$

$$+ \left(-L_{3c} \dot{\Theta}_1 \sin \Theta_1 - L_2 \dot{\Theta}_2 \sin \Theta_2 \right)^2 =$$

$$= L_2^2 \dot{\Theta}_2^2 + L_{3c}^2 \dot{\Theta}_1^2 + 2 L_2 L_{3c} \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2) \quad (2.48)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 \left[L_{3c}^2 \dot{\Theta}_1^2 + L_2^2 \dot{\Theta}_2^2 + 2 L_2 L_{3c} \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2) \right] + \frac{1}{2} I_3 \dot{\Theta}_1^2$$

Para derivar a expressão da energia potencial (V), a posição do cg_2 deve ser determinada:

A coordenada (y) do cg_3 é dada por:

$$y_{cg_3} = y_{o_3} + L_{3c} \cos\Theta_1 = L_2 \cos\Theta_2 + L_{3c} \cos\Theta_1 \quad (2.49)$$

$$V_3 = m_3 g (L_{3c} \cos\Theta_1 + L_2 \cos\Theta_2) \quad (2.50)$$

LINK 4 -

(a) - quando o LINK 2 está estacionário ($\Theta_2 = 0$), então temos:

$$\begin{aligned} \omega_4 &= \omega_2 = 0 \\ V_{cg_4} &= V_{o_2} = L_1 \dot{\Theta}_1 \\ (V_{cg_4})_x &= -L_1 \dot{\Theta}_1 \cos\Theta_1 \\ (V_{cg_4})_y &= -L_1 \dot{\Theta}_1 \sin\Theta_1 \end{aligned} \quad (2.51)$$

(b) - quando o LINK 1 está estacionário ($\dot{\Theta}_1 = 0$), então temos:

$$\begin{aligned} \omega_4 &= \omega_2 = \dot{\Theta}_2 \\ V_{cg_4} &= L_{4c} \dot{\Theta}_2 \\ (V_{cg_4})_x &= L_{4c} \dot{\Theta}_2 \cos\Theta_2 \\ (V_{cg_4})_y &= L_{4c} \dot{\Theta}_2 \sin\Theta_2 \end{aligned} \quad (2.52)$$

A velocidade resultante é :

$$\begin{aligned} V_{cg_4}^2 &= \left(-L_1 \dot{\Theta}_1 \cos\Theta_1 + L_{4c} \dot{\Theta}_2 \cos\Theta_2 \right)^2 \\ &\quad + \left(-L_1 \dot{\Theta}_1 \sin\Theta_1 + L_{4c} \dot{\Theta}_2 \sin\Theta_2 \right)^2 \\ &= L_1^2 \dot{\Theta}_1^2 + L_{4c}^2 \dot{\Theta}_2^2 - 2L_1 L_{4c} \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2) \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned}
 K_4 = & \frac{1}{2} m_4 \left[L_1^2 \dot{\Theta}_1^2 + L_{4c}^2 \dot{\Theta}_2^2 - 2L_1 L_2 \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2) \right] \\
 & + \frac{1}{2} I_4 \dot{\Theta}_2^2
 \end{aligned} \tag{2.54}$$

A posição do centro de gravidade (cg_4) e a energia potêncial (V_4) são expressas a seguir:

A coordenada (\mathbf{y}) do cg_4 é dada por:

$$y = y_{o2} - L_{4c} \cos\Theta_2 = L_1 \cos\Theta_1 - L_{4c} \cos\Theta_2 \tag{2.55}$$

$$V_4 = m_4 g (L_1 \cos\Theta_1 - L_{4c} \cos\Theta_2) \tag{2.56}$$

Para a carga, K_0 e V_0 são similares a K_4 e V_4 , substituindo-se m_4 e L_{4c} por m_0 e L_4 , respectivamente :

$$\begin{aligned}
 K_0 = & \frac{1}{2} m_0 \left[L_1^2 \dot{\Theta}_1^2 + L_4^2 \dot{\Theta}_2^2 - 2L_1 L_4 \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2) \right] \\
 & + \frac{1}{2} I_0 \dot{\Theta}_2^2
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

$$V_0 = m_0 g (L_1 \cos\Theta_1 - L_4 \cos\Theta_2) \tag{2.58}$$

Desta forma, a energia cinética e potêncial para a estrutura do manipulador do tipo paralelogramo será a seguinte:

$$\begin{aligned}
 V = & m_1 g L_{1c} \cos\Theta_1 + m_2 g L_{2c} \cos\Theta_2 \\
 & + m_3 g (L_{3c} \cos\Theta_1 + L_2 \cos\Theta_2) \\
 & + m_4 g (L_1 \cos\Theta_1 - L_{4c} \cos\Theta_2) \\
 & + m_0 g (L_1 \cos\Theta_1 - L_4 \cos\Theta_2)
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

$$\begin{aligned}
 K = & \frac{1}{2} (m_1 L_{1c}^2 + I_1) \dot{\Theta}_1^2 \\
 & + \frac{1}{2} (m_2 L_{2c}^2 + I_2) \dot{\Theta}_2^2 \\
 & + \frac{1}{2} m_3 [L_{3c} \dot{\Theta}_1^2 + L_2^2 \dot{\Theta}_2^2 + 2L_2 L_{3c} \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2)] \\
 & + \frac{1}{2} I_3 \dot{\Theta}_1^2 \\
 & + \frac{1}{2} m_4 [L_1^2 \dot{\Theta}_1^2 + L_{4c}^2 \dot{\Theta}_2^2 - 2L_1 L_{4c} \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2)] \quad (2.60) \\
 & + \frac{1}{2} I_4 \dot{\Theta}_2^2 \\
 & + \frac{1}{2} m_0 [L_1^2 \dot{\Theta}_1^2 + L_4^2 \dot{\Theta}_2^2 - 2L_1 L_4 \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_1 - \Theta_2)] \\
 & + \frac{1}{2} I_0 \dot{\Theta}_2^2
 \end{aligned}$$

Calculando as derivadas parciais do Lagrangeano $L = K - V$, e fazendo as devidas manipulações algébricas. Temos:

$$\begin{aligned}
 \tau_1 = & (m_1 L_{1c}^2 + I_1 + m_3 L_{3c}^2 + I_3 + m_4 L_1^2 + m_0 L_1^2) \ddot{\Theta}_1 + \\
 & (m_3 L_2 L_{3c} - m_4 L_1 L_{4c} - m_0 L_1 L_4) \cos(\Theta_2 - \Theta_1) \ddot{\Theta}_2 + \\
 & (m_3 L_2 L_{3c} - m_4 L_1 L_{4c} - m_0 L_1 L_4) \text{sen}(\Theta_2 - \Theta_1) \dot{\Theta}_2^2 + \quad (2.61) \\
 & (m_1 L_{1c} + m_3 L_{3c} + m_4 L_1 + m_0 L_1) g \cos \Theta_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_2 = & (m_3 L_2 L_{3c} - m_4 L_1 L_{4c} - m_0 L_1 L_4) \cos(\Theta_2 - \Theta_1) \ddot{\Theta}_1 + \\
 & (m_2 L_{2c}^2 + I_2 + m_3 L_2^2 + m_4 L_{4c}^2 + I_4 + m_0 L_4^2 + I_0) \ddot{\Theta}_2 - \\
 & (m_3 L_2 L_{3c} - m_4 L_1 L_{4c} - m_0 L_1 L_4) \text{sen}(\Theta_2 - \Theta_1) \dot{\Theta}_1^2 + \quad (2.62) \\
 & (m_2 L_{2c} + m_3 L_2 - m_4 L_{4c} - m_0 L_4) g \cos \Theta_2
 \end{aligned}$$

Estas equações podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= D_{11}\ddot{\Theta}_1 + D_{12}\ddot{\Theta}_2 + D_{111}\dot{\Theta}_1^2 + D_{122}\dot{\Theta}_2^2 + D_{112}\dot{\Theta}_1\dot{\Theta}_2 \\
 &\quad + D_{121}\dot{\Theta}_2\dot{\Theta}_1 + D_1 \\
 D_{111} &= D_{112} = D_{121} = 0 \\
 \tau_2 &= D_{12}\ddot{\Theta}_1 + D_{22}\ddot{\Theta}_2 + D_{211}\dot{\Theta}_1^2 + D_{222}\dot{\Theta}_2^2 + D_{212}\dot{\Theta}_1\dot{\Theta}_2 \\
 &\quad + D_{221}\dot{\Theta}_2\dot{\Theta}_1 + D_2 \\
 D_{222} &= D_{212} = D_{221} = 0
 \end{aligned} \tag{2.63}$$

2.5.2 - Comentários :

Diversas conclusões importantes para o projeto do robô podem ser feitas depois de uma análise das equações apresentadas anteriormente :

- O número de termos na equação do movimento para a estrutura do tipo paralelogramo é substancialmente menor que para um sistema articulado. Em particular os termos de Coriolis não estão presentes.

- Condição de projeto:

$$m_3L_2L_{3c} - m_4L_1L_{4c} - m_0L_1L_4 = 0 \tag{2.64}$$

- Caso a condição imposta na equação (2.64) seja satisfeita, todo acoplamento entre as juntas no sistema do paralelogramo seria eliminado. Seriam também eliminados os termos não lineares (excluindo termos da Gravidade) se a carga não é considerada ($m_0 \ll m_4$) teremos:

$$m_3L_2L_{3c} = m_4L_1L_{4c} \tag{2.65}$$

a qual pode ser satisfeita estritamente por aproximações de projeto, não precisando fazer se o balanceamento.

- Se, além disso, forem usados contrapesos para as forças gravitacionais, todos os elementos não lineares podem ser eliminados.
- Os termos de inércia são menores que em outros manipuladores, visto que as massas dos motores de acionamento são estacionárias.
- O espaço de trabalho do manipulador fica limitado devido às interferências entre os links.

2.6 - Análise em Mecanismos :

2.6.1 - Introdução à Síntese :

Quando introduzimos este capítulo sobre o estudo dos mecanismos, verificamos que dadas as dimensões de uma articulação, temos um problema básico, o qual consiste em analisarmos o movimento produzido por esta articulação. Para realizarmos um determinado movimento tomamos um outro procedimento. Este processo é conhecido na bibliografia como a síntese dos mecanismos.

A aplicação deste processo em um projeto, pode ser dividida em três etapas:

- a - Optar pelo tipo do mecanismo a ser utilizado.
- b - Determinar o número de articulações e conexões necessárias para produzir o movimento desejado.
- c - Encontrar as dimensões ou comprimentos apropriados das ligações necessárias.

Ao longo dos anos os projetistas têm aumentado o interesse pela síntese, o grande motivo para tal interesse ocorreu devido ao desenvolvimento

de sistemas de computação, pois com esta ferramenta foi possível resolver funções diversas controladas eletronicamente por meios mecânicos. Hoje verificamos que com o desenvolvimento da síntese, muitos mecanismos foram desenvolvidos para gerar uma dada função, mas muitas vezes os projetistas recorrem à síntese para resolver problemas de forma mais otimizada.

Para o nosso caso a aplicação da síntese é de fundamental importância, pois o desenvolvimento do projeto de um robô pode exigir que constantemente seja adaptado, pois principalmente a precisão e a repetibilidade exigidas do mecanismo são fundamentais para medir seu desempenho. Muitas vezes o projetista pode satisfazer-se com uma dada função aproximada, pois a relação entre as funções desejadas e a funções as quais o mecanismo projetado pode resolver são conhecidas como erros estruturais. Além destas duas possibilidades, existem erros que podem ocorrer devido a construção do mecanismo, esses erros resultantes das tolerâncias de comprimentos, e das folgas nas articulações, são conhecidos como erros mecânicos. Algumas formas de calcular estes erros estão apresentadas na referência [27].

Com o desenvolvimento tecnológico as indústrias passaram a desenvolver novos projetos de instrumentos, controles automáticos, robôs e equipamentos automatizados, neste momento verificou-se que os mecanismos tornaram-se peças importantes para o desenvolvimento de novos projetos destes equipamentos citados. Desta forma podemos definir um mecanismo como sendo a parte do projeto de máquinas relacionadas com o projeto cinemático de sistemas articulados, engrenagens e cames. Quando falamos no projeto cinemático devemos nos basear nos requisitos relativos ao movimento, desta forma estaremos diferindo do projeto baseado em requisitos de

resistência, o qual é um assunto de extrema importância para uma futura análise.

No capítulo 4 comentamos sobre as transmissões mecânicas mais utilizadas para o acionamento de robôs, antecipando um pouco abordamos agora sobre as engrenagens as quais têm esta função e são utilizadas para a transmissão de movimentos entre eixos com uma razão de velocidade angular.

Em alguns casos, a redução desejada da velocidade angular é muito grande, nestes casos devemos acoplar as engrenagens umas as outras, o que faz com que sejam formados trens de engrenagens. Como falamos em alguns dispositivos tais como instrumentos e controles automáticos, a obtenção dos seus movimentos corretos é de suma importância. A potência transmitidas pelos elementos pode ser pequena, chegando mesmo a ser desprezível, o que permite que os componentes sejam dimensionados inicialmente apenas por seu aspecto cinemático. Existem algumas máquinas, nas quais a respectiva análise cinemática é somente uma fase do projeto.

Depois de determinadas, as diversas peças da máquina, no caso do robô atuando no sentido de realizar o trabalho desejado. As forças que agem nessas peças devem ser analisadas para em seguida ser feito o dimensionamento dos seus elementos. Os diagramas apresentados na figura 2.5 fornecem as condições básicas para definirmos os pontos fundamentais de projeto e para analisarmos qualquer tipo de mecanismo. No nosso caso, nos dedicamos aos mecanismos de barras paralelas tipo paralelogramos ou estruturas de quatro barras.

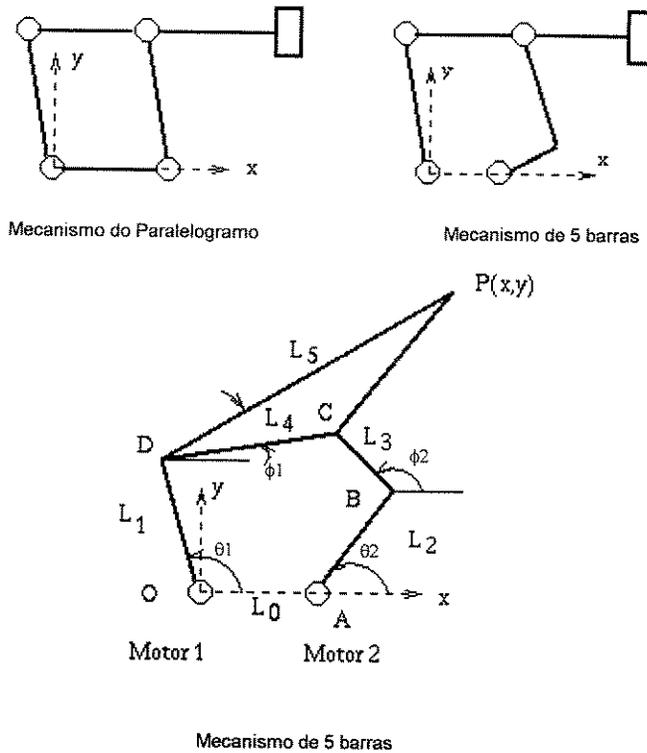


Figura 2.5 - Configurações possíveis para o mecanismo.

2.6.2 - O Que é um 4 Barras:

Toda articulação do tipo quatro barras relaciona ligações e mecanismos (volumes) pois são amplamente versáteis e muito usados para o desenvolvimento de movimentos complexos. Este nome implica que o mecanismo consiste de 4 barras (ou elos) ligados juntamente com quatro pivos (articulações) onde duas destas ligações podem estar fixadas.

Desta forma uma rotação do elo de entrada, aciona um movimento crítico de dois elos em várias posições. Tipicamente o elo de saída posterior fica para fora enquanto o outro é acoplado (ou flutua, oscila) embora estes elos móveis tenham um movimento complexo. A performance da articulação de 4 barras possui três mecanismos de trabalho: trajetória, função e geração do movimento.

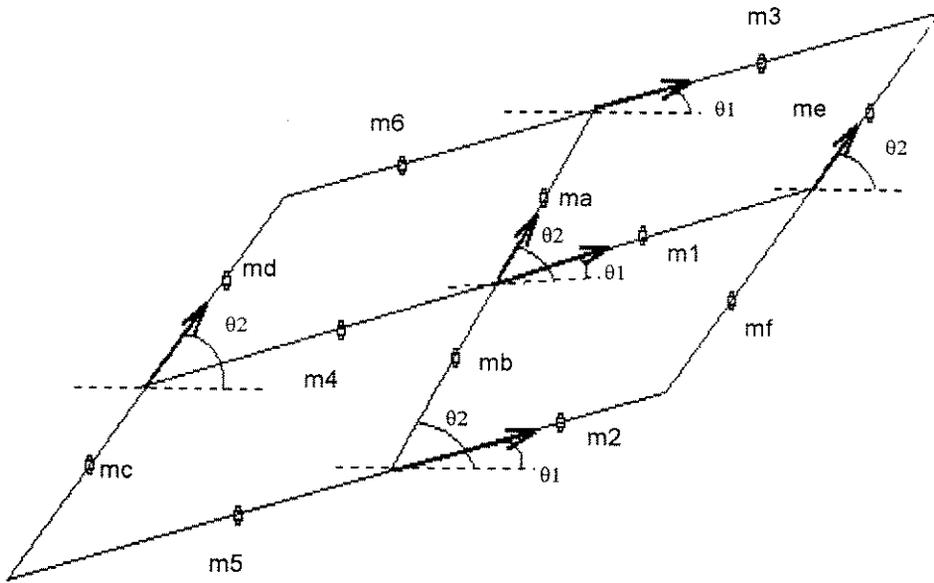
A trajetória gerada, neste movimento traçamos um ponto sobre o elo acoplador que diz respeito ao primeiro. Em muitos casos a sincronização destas trajetórias traçadas pelas posições podem ser correlacionadas com a rotação do elo de entrada. Gerador de função é uma articulação que diz

respeito a um movimento relativo entre os elos, com uma parte pinada (fixa) ou corrediça sobre um elo fixo para aumentar a performance de trabalho.

Exemplo e aplicações deste mecanismo podem ser verificados nas referências [1] [17] [20] [41] [47] [84] [89] [91].

Desta forma verificamos que na análise gráfica dos mecanismos são necessários desenhos mostrando os pontos aos quais o mecanismo deve atingir de acordo com a sua configuração. Existem diversas formas que podem ser utilizadas para que possa ser realizada esta verificação é :

- Construímos uma maquete o qual pode permitir a verificação de todas as configurações e especificações.
- Método analítico onde as equações resultantes devem ser resolvidas para cada ponto de interesse.
- Uma solução vetorial em alguns casos torna-se proibitiva.
- A solução pôr coordenadas generalizadas é especialmente útil em muitos casos mas é muito difícil chegar-se as equações finais.



Mecanismo do tipo Paralelogramo com configuração opcional

Figura 2.6 - Mecanismo do tipo paralelogramo de configuração opcional

Matrizes desenvolvidas em relação a figura (2.6):

θ_1 e θ_2 são independentes.

Aplicando a convenção de Denavit e hartenberg [24] podemos determinar as seguintes matrizes de transformação homogêneas entre os elos do mecanismo apresentado esquematicamente na figura 2.6.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

$${}^aT = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & L_a C\theta_2 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & L_a S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & -L_a C\theta_2 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & -L_a S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$${}^0_eT = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & L_1 C\theta_1 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & L_1 S\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

$${}^0_dT = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & -L_1 C\theta_1 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & -L_1 S\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

por simplificação adotamos que C = coseno e S = seno.

Considerando que as barras tenham um só centro de massa no lado positivo do eixo "x" fixado em cada barra.

$${}^0x_1 = \begin{Bmatrix} d_1 C\theta_1 \\ d_1 S\theta_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}^0\dot{x}_1 = \begin{Bmatrix} -d_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1 \\ d_1 \dot{\theta}_1 C\theta_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.72)$$

$${}^0x_d = \begin{Bmatrix} d_d C\theta_2 - L_1 C\theta_1 \\ d_d S\theta_2 - L_1 S\theta_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}^0\dot{x}_d = \begin{Bmatrix} -d_d \dot{\theta}_2 S\theta_2 + L_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1 \\ d_d \dot{\theta}_2 C\theta_2 - L_1 \dot{\theta}_1 C\theta_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.73)$$

Calculando as energias envolvidas, considerando o módulo das velocidades de translação do C.G. :

$$|{}^0\dot{x}_1|^2 = (-d_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1)^2 + (d_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1)^2 = (d_1 \dot{\theta}_1)^2 \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} |{}^0\dot{x}_e|^2 &= (-d_e \dot{\theta}_2 S\theta_2 + L_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1)^2 + (d_e \dot{\theta}_2 C\theta_2 - L_1 \dot{\theta}_1 C\theta_1)^2 = \\ &= (-d_e \dot{\theta}_2 S\theta_2)^2 - 2d_e \dot{\theta}_2 S\theta_2 L_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1 + (-L_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1)^2 + \\ &= (d_e \dot{\theta}_2 C\theta_2)^2 - 2d_e \dot{\theta}_2 C\theta_2 L_1 \dot{\theta}_1 C\theta_1 + (L_1 \dot{\theta}_1 C\theta_1)^2 = \\ &= (d_e \dot{\theta}_2)^2 - 2d_e L_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 C(\theta_2 - \theta_1) + (L_1 \dot{\theta}_1)^2 \end{aligned} \quad (2.75)$$

2.6.3 - Energia de Rotação :

Barras : 1, 2 e 2 rodam em função dos movimentos de θ_1

Barras : a, e, e d rodam em função dos movimentos de θ_2

2.6.4 - Elos :

- Link 1 - $\frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.76)$

Da mesmo forma tiramos para os outros elos.

2.6.5 - Equação da Energia Cinética Total:

$$\begin{aligned}
 K = & \frac{1}{2}m_1(d_1\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2}m_2\left[(d_2\dot{\theta}_1)^2 - 2d_2L'_a\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C(\dot{\theta}_1 - \theta_2) + (L'_a\dot{\theta}_2)^2\right] + \\
 & \frac{1}{2}m_a(d_a\dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2}m_3\left[(d_3\dot{\theta}_1)^2 - 2d_3L'_a\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C(\dot{\theta}_1 - \theta_2) + (L'_a\dot{\theta}_2)^2\right] + \\
 & \frac{1}{2}m_d\left[(d_d\dot{\theta}_2)^2 - 2d_dL_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C(\dot{\theta}_2 - \theta_1) + (L_1\dot{\theta}_2)^2\right] + \\
 & \frac{1}{2}m_e\left[(d_e\dot{\theta}_2)^2 + 2d_eL_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C(\dot{\theta}_2 - \theta_1) + (L_1\dot{\theta}_2)^2\right] + \\
 & \frac{1}{2}\left[(I_1 + I_2 + I_3)\dot{\theta}_1^2 + (I_a + I_e + I_d)\dot{\theta}_2^2\right] +
 \end{aligned} \tag{2.77}$$

2.6.6 - Equação da Energia Potencial Total:

$$\begin{aligned}
 P = & P_1d_1S\theta_1 + P_2(d_2S\theta_1 - L'_aS\theta_2) + P_3(d_3S\theta_1 + L'_aS\theta_2) + \\
 & + P_a d_a S\theta_2 + P_e(L_1S\theta_1 + d_eS\theta_2) + P_d(d_dS\theta_2 - L_1S\theta_1)
 \end{aligned} \tag{2.78}$$

2.6.7 - Lagrange :

Se o lagrangeano (L) do sistema for definido como $L = K - P$ então as forças em cada junta podem ser calculadas através da equação 2.79.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = \tau \tag{2.79}$$

para

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \theta_1 \\
 q_2 &= \theta_2
 \end{aligned} \tag{2.80}$$

Lembre que trigonometricamente podemos dizer que :

$$\begin{aligned} C(\theta_1 - \theta_2) &= C(\theta_2 - \theta_1) \\ S(\theta_1 - \theta_2) &= -S(\theta_2 - \theta_1) \end{aligned} \quad (2.81)$$

2.6.8 - Torque no Motor 1 :

Resolvendo a equação 2.82 para $i=1$, encontramos :

$$\begin{aligned} \tau_1 &= (m_1 d_1^2 + m_2 d_2^2 + m_3 d_3^2 + m_d L_1^2 + m_e L_1^2 + I_1 + I_2 + I_3) \ddot{\theta}_1 + \\ &+ (-m_2 d_2 L_a + m_3 d_3 L_a - m_d d_d L_1 + m_e d_e L_1) \ddot{\theta}_2 C(\theta_1 - \theta_2) + \\ &+ (-m_2 d_2 L_a + m_3 d_3 L_a - m_d d_d L_1 + m_e d_e L_1) \dot{\theta}_2^2 S(\theta_1 - \theta_2) + \\ &+ (P_1 d_1 + P_2 d_2 + P_3 d_3 + P_e L_1 - P_d L_1) C \theta_1 \end{aligned} \quad (2.82)$$

2.6.9 - Torque No Motor 2 :

Resolvendo a equação 2.82 para $i=2$, encontramos :

$$\begin{aligned} \tau_2 &= (m_2 L_a^2 + m_d d_d^2 + m_3 L_a^2 + m_e d_e^2 + I_a + I_e + I_d) \ddot{\theta}_2 + \\ &+ (-m_2 d_2 L_a + m_3 d_3 L_a - m_d d_d L_1 + m_e d_e L_1) \ddot{\theta}_1 C(\theta_1 - \theta_2) + \\ &+ (-m_2 d_2 L_a + m_3 d_3 L_a - m_d d_d L_1 + m_e d_e L_1) \dot{\theta}_1^2 S(\theta_1 - \theta_2) + \\ &+ (-P_2 L_a + P_3 L_a + P_d d_d + P_e d_e - P_a d_a) C \theta_2 \end{aligned} \quad (2.83)$$

Esta estrutura possibilita o desacoplamento dinâmico das equações matemáticas. Isto é conseguido se os termos que representam as forças centrípetas e coriolis não estiverem presentes nas equações dos torques. Além disso é possível tornar a estrutura invariante em relação a força da gravitacional, isto é válido para qualquer configuração da estrutura no plano.

Desacoplamento :

Se for respeitado que :

$$m_2 d_2 L'_a + m_a d_d L'_1 = m_3 d_3 L_a + m_e d_e L_1 \quad (2.84)$$

então

$$\begin{aligned} P_2 L'_a &= P_3 L_a + P_a d_a + P_e d_e + P_d d_d \\ P_a L'_1 &= P_1 d_1 + P_2 d_2 + P_3 d_3 + P_e L_1 \end{aligned} \quad (2.85)$$

Forças Centrifugas, Coriolis e Gravidade

Estas condições são suficientes para promover o desacoplamento. Através da manipulação destas equações pode-se verificar que os eixos de acionamento das juntas 1 e 2 devem estar contidos no CG. da estrutura.

Dividindo cada Barra em duas partes :

Temos agora dois centros de gravidade por barra já obtivemos o equacionamento de um destes CGs para cada barra, então vamos encontrar o equacionamento para os CGs que faltam. Após a obtenção destes CGS faltantes, juntaremos as duas partes para o equacionamento final.

Obs : Nossa intenção é fazer com que os eixos de acionamento θ_1 e θ_2 localizem-se no CG da estrutura. Podemos finalmente encontrar as transformações :

$${}^0x_4 = \begin{Bmatrix} -d_4 C\theta_1 \\ -d_4 S\theta_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}^0\dot{x}_4 = \begin{Bmatrix} d_4 \dot{\theta}_1 S\theta_1 \\ -d_4 \dot{\theta}_1 C\theta_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.86)$$

$${}^0x_f = \begin{Bmatrix} -L_1 C\theta_1 - d_f C\theta_2 \\ -L_1 S\theta_1 - d_f S\theta_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}^0\dot{x}_f = \begin{Bmatrix} L_1 \dot{\theta}_1 S\theta_1 + d_f \dot{\theta}_2 S\theta_2 \\ -L_1 \dot{\theta}_1 C\theta_1 - d_f \dot{\theta}_2 C\theta_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.87)$$

Calculando os módulos das velocidades dadas pelas equações 2.88 e 2.89 ao quadrado obtemos:

$$|{}^0\dot{X}_4|^2 = d_4^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.88)$$

$$\begin{aligned} |{}^0\dot{x}_f|^2 &= (d_f \dot{\theta}_2 S \dot{\theta}_2 - L_1 \dot{\theta}_1 S \dot{\theta}_1)^2 + (-d_f \dot{\theta}_2 C \dot{\theta}_2 - L_1 \dot{\theta}_1 C \dot{\theta}_1)^2 = \\ &= (-d_f \dot{\theta}_2 S \dot{\theta}_{21})^2 - 2d_f \dot{\theta}_2 S \dot{\theta}_2 L_1 \dot{\theta}_1 S \dot{\theta}_1 + (-L_1 \dot{\theta}_1 S \dot{\theta}_1)^2 + \\ &+ (d_f \dot{\theta}_2 C \dot{\theta}_2)^2 - 2d_f \dot{\theta}_1 C \dot{\theta}_1 L_1 \dot{\theta}_2 C \dot{\theta}_2 + (L_1 \dot{\theta}_1 C \dot{\theta}_1)^2 = \\ &= (d_f \dot{\theta}_2)^2 - 2d_f L_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 C(\theta_1 - \theta_2) + (L_1 \dot{\theta}_2)^2 \end{aligned} \quad (2.89)$$

2.6.10 - Equação da Energia Cinética Total:

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} m_4 (d_1 \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} m_b (d_1 \dot{\theta}_1)^2 + \\ &+ \left[(d_2 \dot{\theta}_1)^2 - 2d_2 L_a \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 C(\theta_1 - \theta_2) + (L_a \dot{\theta}_2)^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{2} m_a (d_a \dot{\theta}_2)^2 \\ &+ \frac{1}{2} m_3 \left[(d_3 \dot{\theta}_1)^2 - 2d_3 L_a \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 C(\theta_1 - \theta_2) + (L_a \dot{\theta}_2)^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{2} m_d \left[(d_d \dot{\theta}_2)^2 - 2d_d L_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 C(\theta_{21} - \theta_1) + (L_1 \dot{\theta}_2)^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{2} m_e \left[(d_e \dot{\theta}_2)^2 + 2d_e L_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 C(\theta_2 - \theta_1) + (L_1 \dot{\theta}_2)^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{2} \left[(I_1 + I_2 + I_3) \dot{\theta}_1^2 + (I_a + I_e + I_d) \dot{\theta}_2^2 \right] + \end{aligned} \quad (2.90)$$

2.6.11 - Equação da Energia Potencial Total:

$$\begin{aligned}
 P = & -P_4 d_4 S \theta_1 - P_b d_b S \theta_2 + P_5 (d_5 S \theta_1 - L_a S \theta_2) \\
 & + P_6 (-d_6 S \theta_1 + L_a S \theta_2) + \\
 & + P_f (L_1 S \theta_1 - d_f S \theta_2) - P_c (d_c S \theta_2 + L_1 S \theta_1)
 \end{aligned} \tag{2.91}$$

2.6.12 - Torque no Motor 1 :

Logo a equação (2.72) fica para $i=1$, fica agora :

$$\begin{aligned}
 \tau_1 = & \left(m_4 d_4^2 + m_5 d_5^2 + m_6 d_6^2 + m_c L_1^2 + m_f L_1^2 + I_4 + I_5 + I_6 \right) \ddot{\theta}_1 \\
 & + \left(m_5 d_5 L_a - m_6 d_6 L_a + m_c d_c L_1 - m_f d_f L_1 \right) \ddot{\theta}_2 C(\theta_2 - \theta_1) \\
 & + \left(m_5 d_5 L_a - m_6 d_6 L_a + m_c d_c L_1 - m_f d_f L_1 \right) \dot{\theta}_2^2 S(\theta_1 - \theta_2) \\
 & + \left(-P_4 d_4 - P_5 d_5 - P_6 d_6 + P_f L_1 - P_c L_1 \right) C \theta_1
 \end{aligned} \tag{2.92}$$

2.6.13 - Torque no Motor 2 :

Logo a equação (2.72) fica para $i=2$, fica agora :

$$\begin{aligned}
 \tau_2 = & \left(m_4 d_4^2 + m_5 d_5^2 + m_6 d_6^2 + m_c L_1^2 + m_f L_1^2 + I_4 + I_5 + I_6 \right) \ddot{\theta}_1 \\
 & + \left(m_5 d_5 L_a - m_6 d_6 L_a + m_c d_c L_1 - m_f d_f L_1 \right) \ddot{\theta}_2 C(\theta_2 - \theta_1) \\
 & + \left(m_5 d_5 L_a - m_6 d_6 L_a + m_c d_c L_1 - m_f d_f L_1 \right) \dot{\theta}_2^2 S(\theta_1 - \theta_2) \\
 & + \left(-P_4 d_4 - P_5 d_5 - P_6 d_6 + P_f L_1 - P_c L_1 \right) C \theta_1
 \end{aligned} \tag{2.93}$$

2.6.14 - Condição para o Desacoplamento Dinâmico :

Para que o desacoplamento dinâmico possa ser realizado com sucesso, o acionamento de cada junta deve estar no centro de massa do mecanismo, e deve existir sempre uma simetria característica em torno do centro de gravidade.

2.7 - Observações Gerais na Análise Dinâmica das Estruturas de Robôs :

A análise dinâmica de robôs manipuladores é necessária quando:

1. Os torques máximos a serem desenvolvidos pelos motores de juntas devem ser determinados em função das velocidades, acelerações e características de carga específicas para cada caso, maiores generalizações quase sempre implicam no encarecimento do projeto global dos robôs.
 2. Altas velocidades e/ou movimentos contínuos com acelerações elevadas devem ser consideradas na programação, assim em muitos casos, um ou mais sinais de realimentação devem ser utilizados para influenciarem na geração dos sinais de controle dos motores objetivando conseguir-se manter bons desempenhos durante a realização das tarefas.
 3. Erros no modelamento dinâmico podem causar desvios nas trajetórias programadas, principalmente devido a problemas na concordância estrutural, e devem ser reavaliados, especialmente para aqueles sistemas projetados para atuar em altas velocidades e/ou altas acelerações.
 4. As sobre elevações devido aos efeitos dinâmicos podem provocar altas desacelerações nas operações ponto-à-ponto, devendo serem estimadas com alto grau de precisão para que o projeto possa ser implementado com recursos que viabilizem sua redução ou eliminação.
- Nos casos 1 e 2 a estrutura do robô pode ser considerada na maior parte dos casos como rígida. As equações de LAGRANGE podem ser escritas em função das coordenadas generalizadas, as quais fornecem as relações entre as acelerações, as velocidades e os torques no motores, ou forças no caso de movimentos retilíneos.
 - As expressões resultantes dos torques dos motores podem auxiliar na programação dos movimentos apesar de conterem muitos acoplamentos.

Em alguns casos estes acoplamentos estão relacionados com termos de gravidade, e são altamente não lineares, mas seu uso torna-se fundamental quando quer-se aumentar as velocidades de trabalho dos robôs, e existem intervalos de movimentos onde ocorrem grandes variações de aceleração estrutural.

- A redução dos termos não lineares e de acoplamento, juntamente com alguns valores de torque, pode ser conhecida através de um balanceamento das massas de cada ligação, e com a utilização de mecanismos especiais de transmissão entre as ligações de movimento e de cada motor.
- - Nos casos 2 e 4 a estrutura robótica tem que ser analisada considerando as concordâncias existentes. Cada coordenada pode estar presente como uma soma de uma coordenada generalizada e um deslocamento crescente por causa das concordâncias.
- A expressão da energia potencial é obtida considerando-se as deformações associadas com as concordâncias estruturais. E na obtenção da expressão da energia cinética pode-se supor a omissão dos produtos de mais de duas coordenadas crescentes e/ou suas derivadas podem ser omitidas.

Capítulo 3

3 - SIMULAÇÃO :

3.1 - Introdução:

A seguir mostramos apresentamos as simulações de um sistema robótico com 2 graus de liberdade com a estrutura do tipo planar e da estrutura do paralelogramo. Para tais simulações utilizamos o *software* chamado MATLAB (SIMULINK), o qual possibilitou fazermos um estudo detalhado do sistema e forneceu subsídios para obtermos algumas conclusões importantes. As características dos motores utilizamos estão no anexo 1.

3.2 - Modelo de Simulação e Gráficos :

Para mostrarmos as características dos manipuladores de dois graus de liberdade de estrutura planar e do paralelogramo, modelados no capítulo 2 apresentados nas figuras 2.4 e 2.5, utilizamos o diagrama de blocos apresentado na figura 3.1.

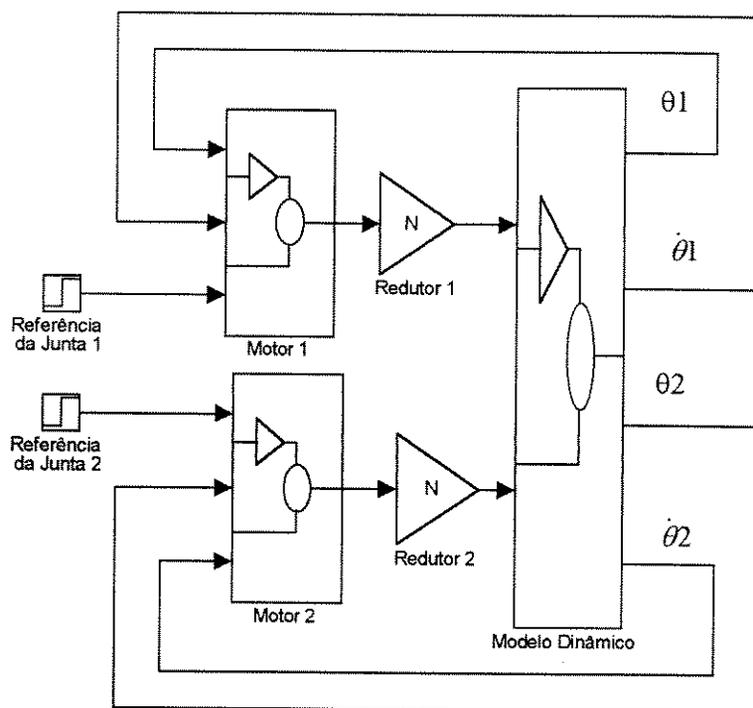


Figura 3.1 - diagrama de blocos do sistema simulado.

Para mostrarmos as características e as vantagens do uso de um manipulador com estrutura do paralelogramo frente a um manipulador de cadeia serial planar. Primeiramente apresentamos resultados de simulações considerando o modelo dinâmico de um manipulador planar, o qual possui as mesmas medidas dos lados não paralelos de um manipulador com estrutura paralelogramo. Veja figura 3.2.

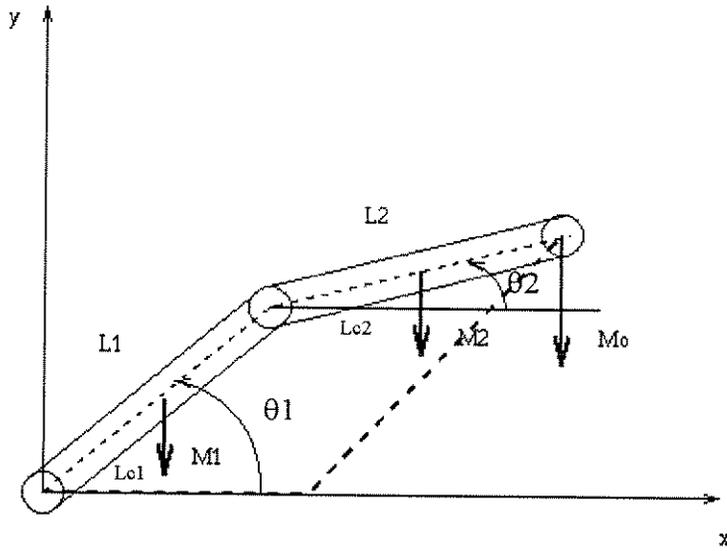


Figura 3.2 - Manipulador planar de 2 graus de liberdade com cadeia serial.

Nas simulações com o manipulador da figura 3.2, usamos os dados apresentados na tabela 3.1.

DADOS DO ROBÔ PLANAR				
DIMENSÕES E PROPRIEDADES DAS MASSAS E ELOS				
ELOS	EXTENSÃO (L)	MASSA (M)	INÉRCIA (I)	DISTÂNCIA DO CG (Lc).
1	0,432	15,9100	0,24700	0,21600
2	0,432	11,3600	0,17700	0,21600
Massa da Carga (Mo)		20,00		
fi - 2		2,45	a	b
fi - 1		107,9784	83,4408	24,5376
d11		5,93641	1/d11	0,168452079
d12		1,76704		
d21		1,76704		
d22		0,19716	1/d22	5,072141268
c111		0,00000		
c121=c211		-1,06002		
c221		1,06002		
c112=c212		0,00000		
c222		0,00000		

Tabela 3.1 - Dados para a simulação do robô planar de 2 graus de liberdade com cadeia serial.

Supondo inicialmente $\theta_1 = \theta_2 = \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$ e que o manipulador deva ser reposicionado em $\theta_1 = \theta_2 = 1 \text{ rad}$ com $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$. Precedendo a simulação com a utilização de controladores PID a nível de juntas, ou seja $\mu_i = P_i + \frac{I_i}{s} + D_i s$ para $i = 1, 2$. Onde :

P_1	80.1254
I_1	80.523
D_1	6
P_2	80.1254
I_2	80.523
D_2	6

obtivemos as respostas de posições e velocidades para cada junta i conforme apresentado nas figuras 3.5 e 3.6.

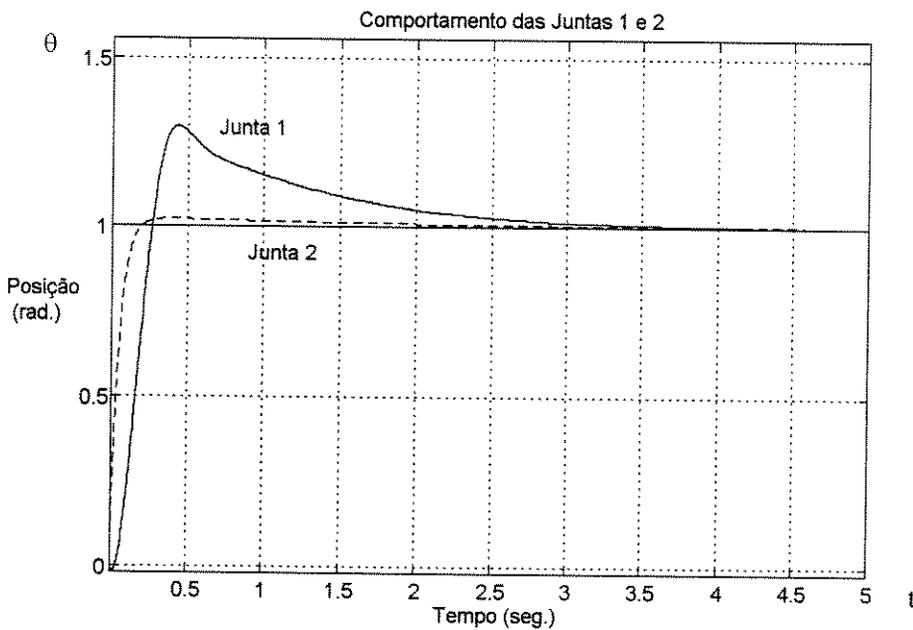


Figura 3.3 - Resposta de posição das juntas 1 e 2.

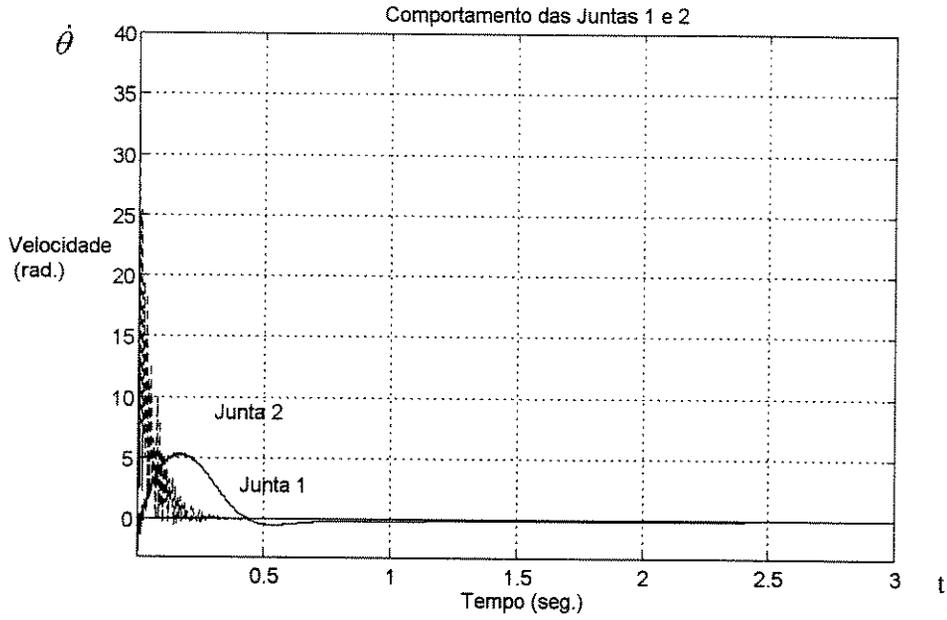


Figura 3.4 - Resposta de Velocidade das juntas 1 e 2.

Para obtermos estes resultados, o bloco chamado modelo dinâmico na figura 3.1 foi montado a partir das equações (40) (41) do capítulo 2. Cujo diagrama pode ser visto na figura 3.5.

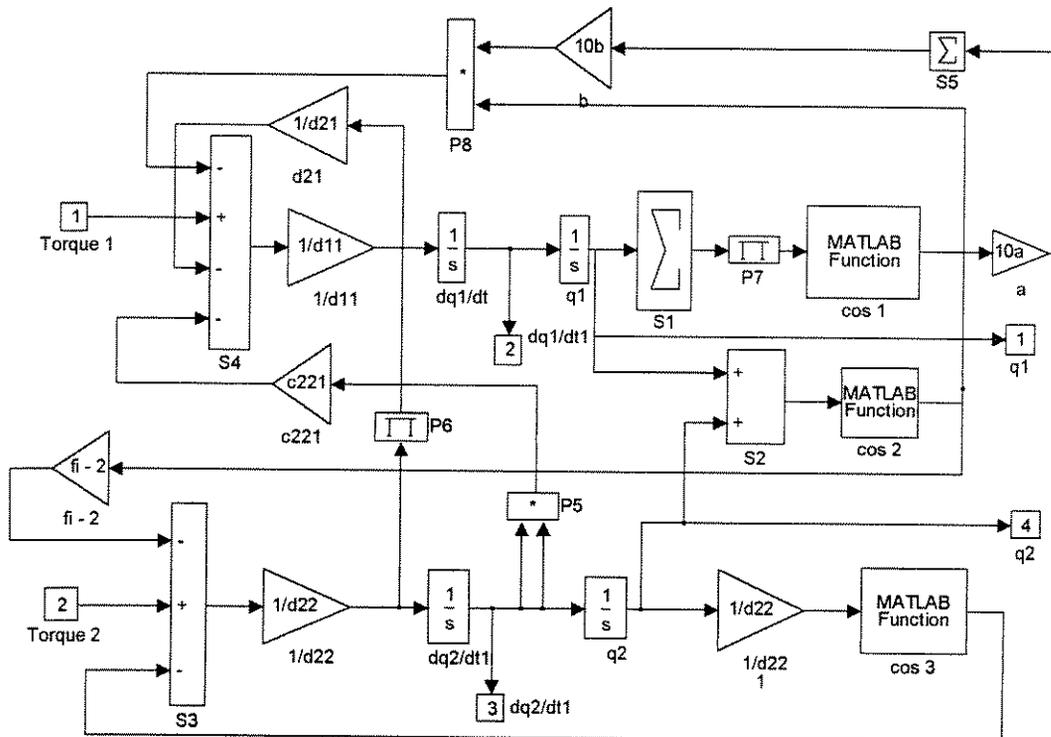


Figura 3.5 - Modelo dinâmico do robô planar de 2 graus de liberdade.

Para os blocos dos motores 1 e 2 na figura 3.1, utilizamos o diagrama mostrado na figura 3.6. Sendo que para o motor 1 e 2.

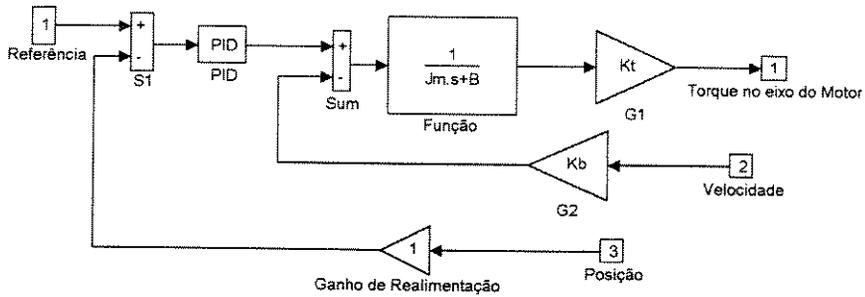


Figura 3.6 - Modelo do motor

Apresentamos agora os resultados de simulações considerando o modelo dinâmico de um manipulador paralelogramo. Veja figura 3.9.

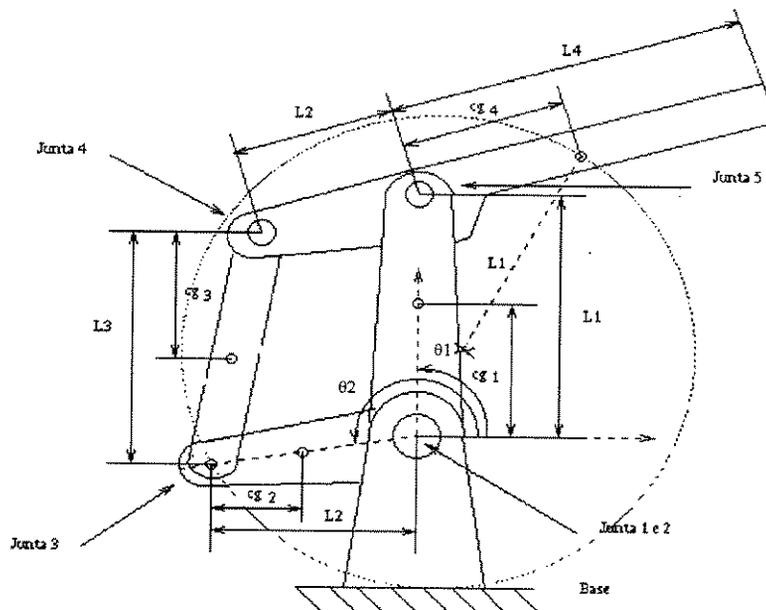


Figura 3.7 - Manipulador do tipo paralelogramo de 2 graus de liberdade com cadeia fechada

Nas simulações com o manipulador da figura 3.7, usamos os dados apresentados na tabela 3.2.

DADOS DO ROBÔ PARALELOGRAMO				
DIMENSÕES E PROPRIEDADES DAS MASSAS E ELOS				
ELOS	EXTENSÃO (L)	MASSA (M)	INÉRCIA (I)	DISTÂNCIA DO CG (Lc).
1	0,400	5,03700	0,14405	0,13850
2	0,250	1,04980	0,01371	0,11180
3	0,400	1,02670	0,02748	0,23450
4	0,650	7,57000	0,41420	0,08730
				0,88231
Massa da Carga (Mo)		20,00		
d11		4,73581		0,211157143
d12		9,88789		0,101133774
d21		-5,40415		
d22		-5,40415		
d122		0,11834		
d211		0,11834		
a		11,96639		119,6638565
b		-13,28681		-132,8681836

Tabela 3.2 - Dados para a simulação do robô do tipo paralelogramo de 2 graus de liberdade com cadeia fechada.

Supondo inicialmente $\theta_1 = \theta_2 = \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$ e que o manipulador deva ser reposicionado em $\theta_1 = \theta_2 = 1 \text{ rad}$ com $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$. Precedendo a simulação com a utilização de controladores PID a nível de juntas, ou seja $\mu_i = P_i + \frac{I_i}{s} + D_i s$ para $i = 1, 2$. Onde :

P_1	80.1254
I_1	80.523
D_1	6
P_2	80.1254
I_2	80.523
D_2	6

obtivemos as respostas de posições e velocidades para cada junta i conforme apresentado nas figuras 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11.

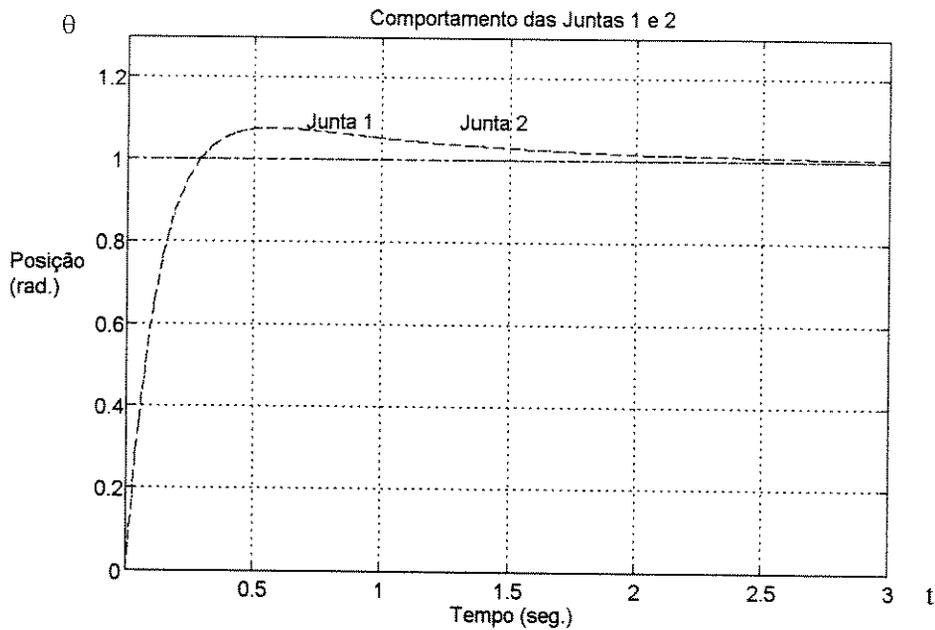


Figura 3.8 - Resposta de posição das juntas 1 e 2.

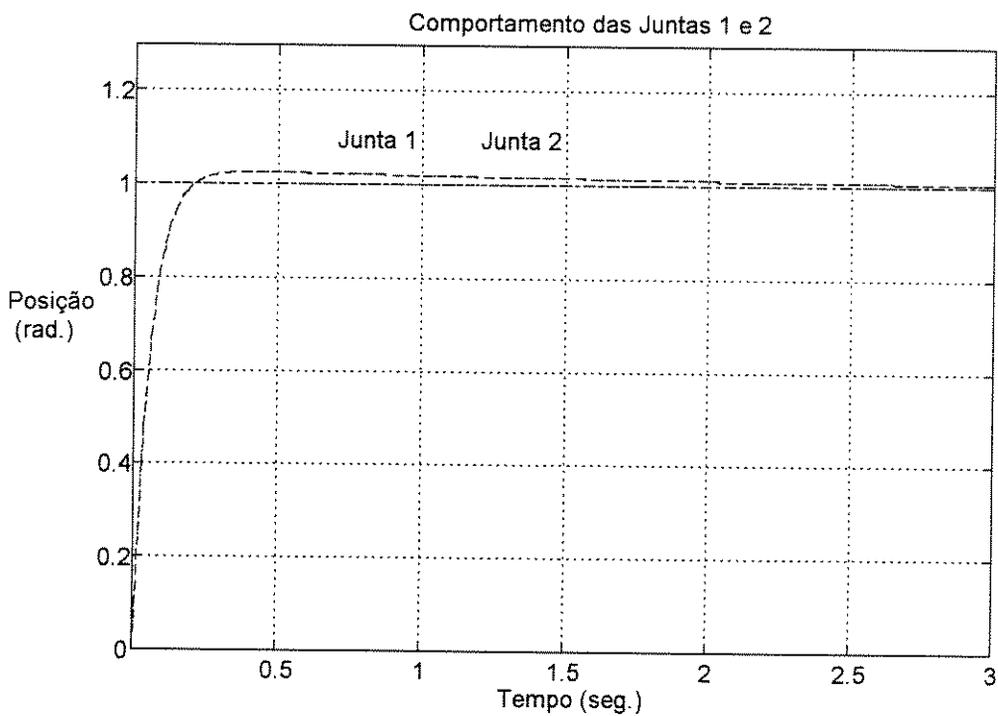


Figura 3.9 - Resposta de posição das juntas 1 e 2.

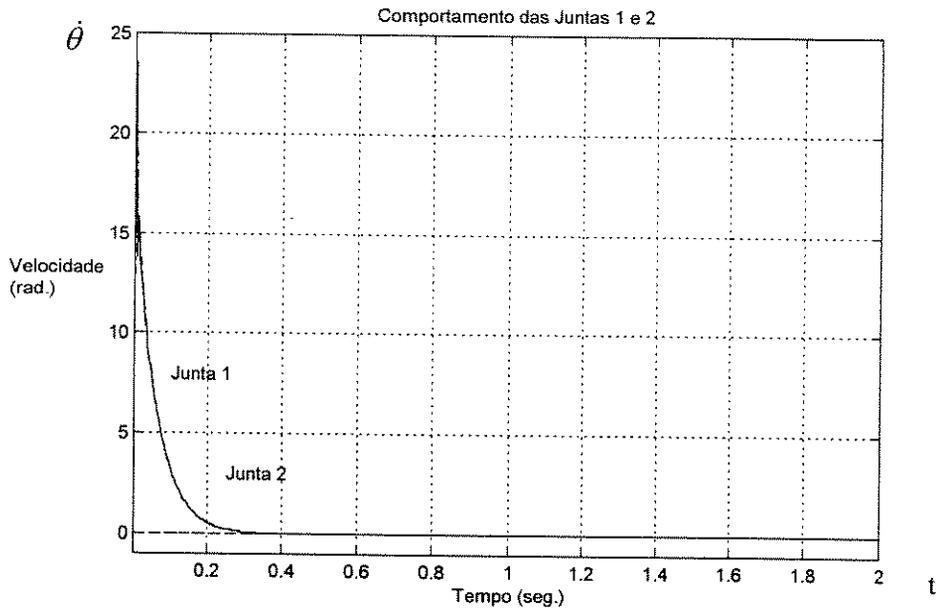


Figura 3.10 - Resposta de Velocidade das juntas 1 e 2.

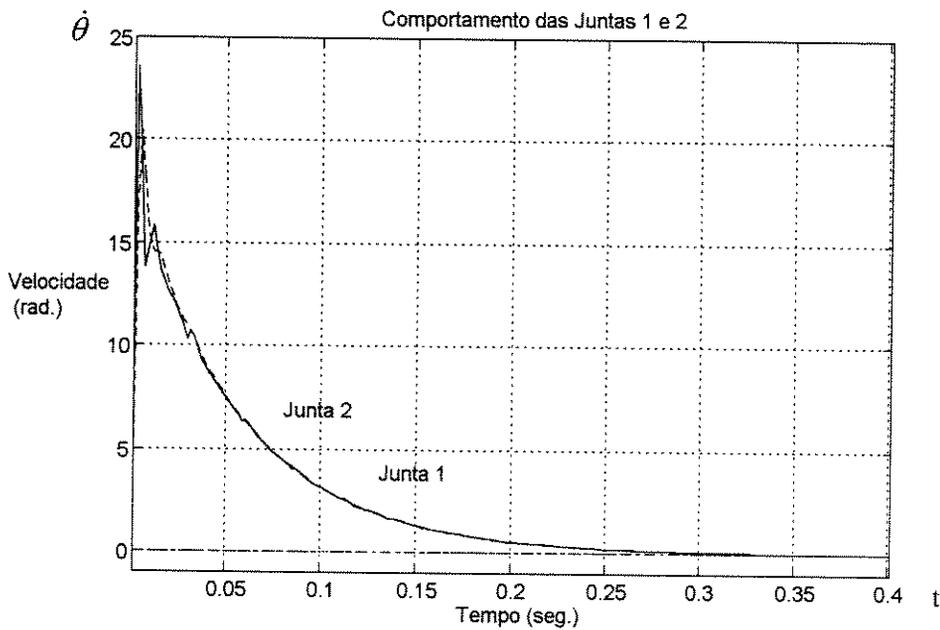


Figura 3.11 - Resposta de Velocidade das juntas 1 e 2.

Para obtermos estes resultados, o bloco chamado modelo dinâmico na figura 3.1 foi montado a partir das equações (60) (61). Colocar as equações cap2. Cujo diagrama pode ser visto na figura 3.12.

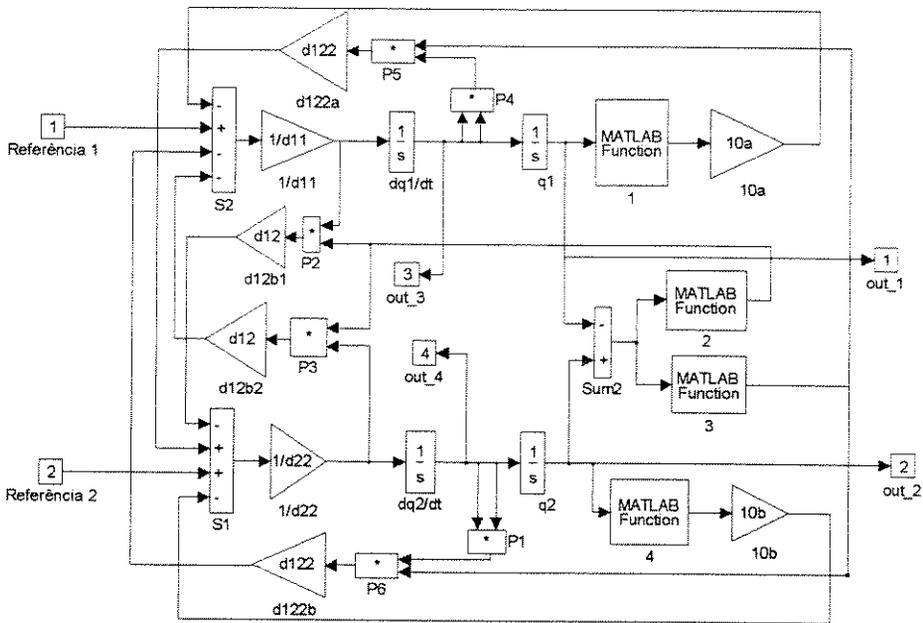


Figura 3.12 - Modelo dinâmico do robô paralelogramo de 2 graus de liberdade.

Para os blocos dos motores 1 e 2 na figura 3.1, utilizamos o diagrama mostrado na figura 3.13. Sendo que para o motor 1 e 2.

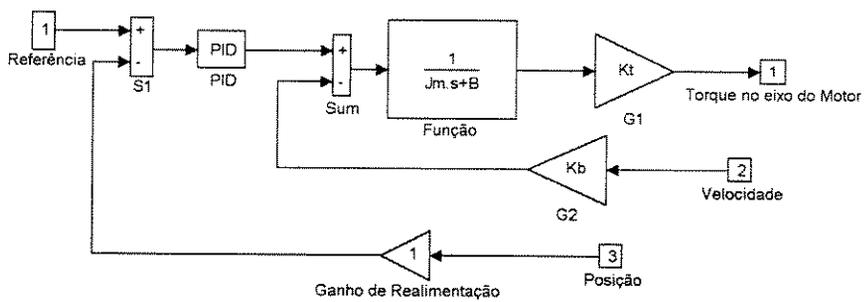


Figura 3.14 - Modelo dos Motores 1 e 2.

3.3 - Conclusões :

Neste capítulo fizemos as simulações das equações dinâmicas dos robôs de estrutura articulada e do paralelogramo apresentando os resultados. O objetivo desta implementação foi de avaliar a diferença de comportamento destas duas estruturas em relação a um sinal de entrada no sistema e verificar sua performance em termos de posição e velocidade.

A primeira análise que podemos tirar da análise dos gráficos, é aquilo que comentamos no capítulo 2 em relação a estas estruturas. Pois quando foi feita a análise das equações matemáticas dos manipuladores verificamos as vantagens do manipulador da estrutura do paralelogramo em relação ao de estrutura articulada.

Capítulo 4

4 - TRANSMISSÕES E ACIONAMENTOS UTILIZADOS EM ROBÔS :

4.1 - Introdução:

A função das transmissões mecânicas em robôs é para a realização ou transformação de movimentos, onde estes podem ser localizados ou dirigidos a alguma região específica. Para ambos os tipos de movimentos devemos considerar como característica principal as velocidades necessárias para as juntas do robô. Em um sistema robótico estas velocidades não podem ser muito altas, podemos fazer uma comparação em relação a outros sistemas mecânicos mais avançados, nos quais os torques e as forças especificadas para o atuador podem ser muito elevadas. Assim sendo quando dimensionamos um motor elétrico devemos considerar se suas dimensões estão de acordo com o torque necessário para executar uma dada função específica, ou seja para uma dada potência. Em motores de alta velocidade temos um baixo torque, seu custo é menor e com baixa inércia em relação ao motor de alto torque e baixa velocidade. A utilização das transmissões mecânicas no desenvolvimento de torque oferecem uma performance muito boa quando solicitadas, da mesma forma atuam na transformação de velocidades em unidades relativamente menores.

A alta tecnologia tem permitido o desenvolvimento de motores elétricos com elevado torque, conhecidos na literatura como motores de acionamento direto [3] [31] [92]. Estes motores possuem características muito superiores em relação aos motores convencionais, onde na sua construção são utilizados ímãs permanentes de terras-raras. Entretanto alguns autores fazem restrições para sua utilização uma dessas restrições está com relação a seu peso, considerados ainda bastante significativos, possuindo um elevado custo de produção e tendo uma baixa eficiência, em torno de 60%. Num estudo anterior

verificamos que outras vantagens do motor de acionamento direto é a de oferecer meios de se eliminar possíveis folgas existentes entre as ligações de acionamento, bem como eliminar as vibrações provocadas pelas forças ativas, as quais produzem erros inevitáveis, onde estes são freqüentemente encontrados nas transmissões mecânicas. No entanto as mais recentes publicações falam muito de uma possível folga existente, provocada pelos efeitos elétricos do motor de acionamento direto. Mas estas imperfeições não são muito significativas se levarmos em conta que o fator mais importante para o bom desempenho do motor é manter seu torque constante durante sua rotação. Outro fator importante que devemos analisar é que estes motores são muito sensíveis à mudança de carga. Esta sensibilidade pode ser verificada quando estudamos as equações do movimento, onde através destas podemos achar o melhor tipo de acionamento a ser aplicado ao sistema robótico. Este sistema é caracterizado pelas freqüente mudanças de cargas.

Geralmente motores elétricos tem melhores características de desempenho se forem utilizados para o desenvolvimento de movimento rotacional. Em alguns casos um sistema robótica necessita de atuadores para o desenvolvimento de movimento translacional. Para a transformação do movimento rotacional em movimento translacional podemos utilizar as diversas transmissões mecânicas existentes. Quando falamos em transmissões mecânicas devemos tomar o cuidado da sua aplicação, em nosso caso específico a utilização das transmissões mecânicas podem ser facilmente adaptadas para a execução e transformação de movimentos. Em estruturas robóticas as transmissões necessitam de um conjunto de especificações especiais. Assim sendo temos as que as principais exigências requeridas para um sistema de transmissão de energia dos robôs são :

- Tamanho reduzido.
- Baixo peso.
- Baixo momento de inércia.
- Coeficiente de transmissão preciso e permanente.
- Eliminação de folgas.
- Rigidez efetiva elevada.

- Baixa perda de energia.
- Baixa fricção para uma melhor receptividade do sistema de controle.

Uma característica muito importante da maioria das aplicações das transmissões em robôs é quanto ao limitado alcance do deslocamento angular ou translacional do efetuator terminal. Muitas vezes esta característica importante é esquecida pelo projetista ao selecionar o tipo de transmissão mecânica a ser utilizada. Atualmente os tipos de transmissões mecânicas mais utilizadas em robôs de tecnologia de ponta são as transmissões por engrenagem, correias sincronizadas, fusos de esferas, etc.... Outros tipos de transmissões parecem ter se desenvolvido muito durante estes anos, tais como o acionamento por tração e a utilização de juntas flexíveis.

Para juntas rotacionais as transmissões mecânicas mais utilizadas são:

- Transmissões por Engrenagens.
- Acionamentos Harmônicos.
- Acionamentos Planetários.
- Acionamentos Planetários Cicloidais.
- Acionamentos por Correias.
- Acionamentos por Correntes.
- Acionamentos por tração e Fricção.
- Acionamentos por Cabos de Aço.
- Acionamentos por Fitas de Aço.

4.2 - Transmissões Rotacionais:

4.2.1 - Transmissões por Engrenagem Planas:

As transmissões por engrenagem são as de uso geral mais comuns.

Elas são também extensivamente usadas para robôs mas com alguns projetos específicos. Uma característica geral é que a tendência para usar engrenagem reta a fim de reduzir as exigências requeridas pelos mancais é

colocada devido a eliminação das forças axiais. Recentemente entretanto, engrenagem helicoidal com força axial (espinha de peixe) compensada ganhou aceitação. Elas são mais caras porém mais compactas. Transmissão por engrenagens (exceto alguns sistemas de folga livre) não requerem, normalmente a aplicação de grandes forças externas como são solicitadas no acionamento por tração, acionamento por correias, etc, todos estes tipos de acionamento provocam carga extras nos mancais. Transmissões por engrenagens são caracterizadas pela geração de forças radiais proporcionais à carga útil transmitida. Todos esses sistemas são sensíveis à precisão da distância do centro. Ainda, os sistemas mais recentes parecem ser os promissores para que sejam utilizados nas transmissões robóticas. Uma vez que as transmissões robóticas estão usualmente engajadas em sistema de controle de circuito fechado, o efeito da folga no desempenho do sistema de controle deve ser considerado. As posições relativas do par de engrenagens de engate dependem da direção do torque transmitido, então a folga introduz uma não linearidade substancial no sistema de controle. Para somarmos a tudo isto temos a incerteza da posição dada ao acionamento da engrenagem, a folga pode dar origem a oscilações e instabilidades no sistema de controle [18]. Em engrenagens de transmissão de forças convencionais, a folga deve ser introduzida com a função para acomodar a expansão térmica dos dentes, bem como tolerância de usinagem e montagem (perfil, erro de "pitch", círculos "pitch", eixo e canaletas de suporte para ambas as engrenagens, tolerância da distância do centro, etc). Conseqüentemente em engrenagens convencionais, a redução ou eliminação da folga deve ser acompanhada pela intensificação da precisão das engrenagens e outros componentes de acionamento ou pela introdução de componentes resistentes compensatórios. O princípio da redução da folga mais correto é pelo ajuste das posições de engrenagem, de acordo com as dimensões atuais das engrenagens e componentes similares, incluindo mudanças dimensionais causadas pelo uso.

4.2.2 - Sistema Excêntrico de Ajustamento de Folga no Cartucho :

Este sistema pode ser verificado sua eficiência na referência [71] [74].

Os sistemas de ajustamento da folga podem ser usados somente para reduzir, mas não para eliminar a folga. O mínimo nível de folga é determinado pelo par de erros da engrenagem e pela expansão térmica dos dentes (a qual é aumentada com a folga reduzida devido a mais atrito e taxa reduzida de extração de calor) . O valor da folga muito pequeno para o padrão de precisão dado leva ao aumento das perdas provocadas pelo atrito, não levando em consideração a uniformidade relativamente grande em relação a distância, provocando assim o atrito durante a rotação da engrenagem e, finalmente, ao perigoso travamento (emperramento) da engrenagem.

Entretanto, se a precisão de todos os elementos de transmissão (engrenagem, suportes, usinagem dos mancais) é suficientemente elevada, a deformação estrutural sempre presente deve ser adequada para compensar a variação da folga em tais sistemas (sem folga nestas transmissão), algumas referências bibliográficas tem provados serem possíveis. Um exemplo são as (máquinas operatrizes pesadas) é descrito em [74]; existem alguns sistemas robóticos empregando aproximação similar .

Para reduzir as exigências de precisão da engrenagem , a flexibilidade do conjunto de engrenagem pode ser artificialmente intensificada. Uma incorporação de tal aproximação é a transmissão de duas ramificações como uma ramificação elástica; a transmissão é internamente pré-carregada. Tal sistema é usado em robôs Puma (Unimation Div. of Westinghouse Corp.). Há 3 conseqüências principais disto :

1 - A folga é eliminada.

2 - A carga em cada engrenagem é aumentada desde que, mesmo sem carga útil ambas as derivações são carregadas com força da pré-carga

3 - O tamanho da transmissão é aumentado devido a adição do pré-carregamento derivado e do mais elevado carregamento das engrenagens.

Como resultado, tais sistemas são usados somente nas juntas onde a eliminação da folga é criticamente importante devido ao acionamento das inércias muito grande, como acionamentos de coluna (cinturão).

4.2.3 - Transmissões Robóticas de Engrenagens Anti-Folga :

a) Acionamento de coluna (cinturão) do Puma 50 (fonte: Unimation, Inc.).

b) Acionamento de coluna para robô Cincinnati Milacron 646

Para engrenagens menores, é implementado um princípio similar chamado como "engrenagem dividida", [18] na qual 2 pinhões estreitos com os mesmos parâmetros de dentes estão engajados com a mesma engrenagem, enquanto a mola pressiona os dentes de cada pinhão, então eles estão engajados com perfis opostos da engrenagem.

4.2.4 - Engrenagem de Torque Baixo e Anti-Folga :

O conceito de engrenagem dividida também pode ser usado para ajustamento da folga (versus compensação da folga realizada no sistema). O projeto da engrenagem elástica de compensação de folga pode ser simplificado se, ao invés de usar o projeto de engrenagem dividida com mola especial, uma engrenagem é feita elástica. Tal projeto é mostrado na referência [40] [46] [74].

4.2.5 - Transmissão sem Folga com Engrenagem Flexível Pré-Carregada:

Um conceito um tanto similar é sugerido em [74] a aplicação para engrenagens conforme (Wildhaber-Novikov). Nesse projeto, sua extremidade é rígida mas a conexão entre a extremidade e o cubo é flexível. Desta forma é estabelecido em [18], que as engrenagens são muito melhores adaptadas para uso em condição de carga variável (flexível), desde que uma força muito menor de carga útil seja solicitada para assegurar o completo engrenamento dos dentes para um dado torque. Outra meta para o projeto da engrenagem em geral, é a eliminação da folga em particular está agora sob estudo de Wayne State University. Ele constitui de um revestimento, da engrenagem o

qual possui camadas ou laminados elastoméricos finos (borracha), como mostra a referência [76].

4.3 - Utilização de Fusos para Aumentar a Velocidade :

Altas velocidades, elevada rigidez e grande precisão, estas são algumas das maiores exigências feitas, hoje as máquinas - ferramentas, robôs e sistemas automatizados. Componentes importantes desses sistemas, os fusos podem ter sua rotação aumentada através da seleção e da disposição dos seus rolamentos. A qualidade de um robô, máquina ferramenta ou outro tipo de sistema é determinada pela precisão e pela sua capacidade de atuação. Na análise destes critérios devemos verificar como manter as tolerâncias aceitáveis e qual a capacidade de desenvolvimento do trabalho, além do que a concepção geral do sistema com a utilização do mancal do fuso. Apesar destes sistemas ser apenas um elo, alias muito importante, o projeto requer que o sistema fuso/mancal deve ser cuidadosamente balanceado. A seguir mostramos um quadro comparativo, onde podemos verificar os parâmetros necessários para a precisão de trabalho de um robô, com um sistema de fuso, como utilizado no robô Jeca II.

Por mais de 20 anos, os rolamentos de rolos cilíndricos de duas carreiras, combinados com rolamentos axiais de contato angular de esferas de dupla escora, tem comprovado a sua eficiência. O mesmo pode se dizer com relação aos rolamentos de rolo cônicos, se bem que menos utilizados. Ambos são mancais padrões, adequados para máquinas industriais robustas. Porisso uma folga demasiada prejudica a rigidez radial do fuso, uma folga pequena demais pode conduzir a uma tensão axial prejudicial através da dilatação térmica do fuso, ou seja isto ocorre primeiro na direção radial e posteriormente em direção axial. Quando utilizamos rolamentos, parafusos e mancais devemos verificar que alguns parâmetros são essenciais para que determinadas rotações atingíveis de rolamentos em fusos de máquinas ferramentas , robôs sistemas de posicionamento, etc; são o tamanho, tipo, execução e a disposição dos rolamentos, precisão e lubrificação que vem a ser um dos itens mais importantes. Para concluirmos verificamos que os rolamentos para fusos devem ser adequados à função e aos requisitos das

máquinas, para atender as exigências de altas velocidades, elevada rigidez e grande precisão. Assim sendo quando a qualidade e a confiabilidade dos componentes adjacentes a uma cuidadosa montagem exercem grande influência sobre o número de rotações possíveis, a precisão de giro e a duração dos rolamentos. Desta forma podemos aumentar a rotação dos fusos mediante a seleção e a disposição dos rolamentos adequados ao sistema de lubrificação. Assim sendo verificamos que os rolamentos constantemente são melhorados e permitem a elevação cada vez maior das velocidades.

Atualmente estão sendo desenvolvidos rolamentos para fusos com esferas de cerâmica, cujo preço atualmente ainda é muito elevado.

Como alternativa econômica é dada, além dos rolamentos para fusos em execução de altíssima precisão, por rolamentos com esferas menores. mesmo com uma capacidade de carga menor, a vida destes rolamentos ainda é suficientemente boa [51][74], [61], [64].

4.4 - Redutores :

Os redutores são dispositivos mecânicos , que permitem reduzir a velocidade do motor para a carga, amplificando desta forma na mesma proporção o torque aplicado. Em alguns casos não é possível encontrar atuadores com características exatas de velocidade - força ou velocidade - torque para que determinadas funções sejam executadas, assim sendo entram alguns dispositivos para que possam ser realizadas estas tarefas que é o caso dos redutores ou também conhecidas as transmissões de potência. Este tipo de dispositivo permite que sejam realizadas duas funções, ou seja transmitem potência a distância e podem atuar como um transformador de potência. Existem diversas formas de realizar a transmissão mecânica de potência que são através de polias e correias, correntes e rodas dentadas, engrenagens, eixos de transmissão , redutores harmônicos e parafusos [51][74], [61], [64].

A seguir fazemos um comentário dos principais sistema de potência utilizados em robôs.

Polias e correias são muito utilizados para a transmissão de força de acionamentos geralmente estão localizados na base do robô.

Engrenagens, este tipo de transmissão de potência também muito utilizado em robôs tem se desenvolvido muito ao longo dos tempos, através desta pode-se transmitir um movimento rotativo entre eixos, esta transferência pode ser entre eixos paralelos, perpendiculares ou outros eixos. Segundo a bibliografia pesquisada este tipo de transmissão de potência é utilizada para todos as transmissões do robô PUMA 560. Parafusos de acionamento são utilizados em robótica para a transformação de movimento rotativo em movimento linear, alguns de seus parâmetros tem as mesmas características em relação a uma engrenagem, ou seja o passo da rosca que geralmente pode ser chamado de avanço. Acionamentos através de correntes operam numa relação constante, devido haver uma interação entre a corrente e a roda dentada.

Acionadores harmônicos podem ser utilizados como redutores ou multiplicadores de velocidade, dos sistemas de acionamentos verificados este é o que permite uma melhor performance para um sistema robótico, pois devido a sua construção física ele pode ser diretamente montado na face de um motor com o eixo de saída. Pode-se utilizar qualquer tipo de relação de redução, requer pouca manutenção, opera sem desgaste e com longa vida útil. Alguns destes sistemas de transmissão de potência oferecem certo tipo de efeito indesejável que pode ser a folga mecânica ou a flexibilidade maior do que possa se desejar, estes efeitos indesejáveis oferecem ao sistema de controle um trabalho maior do que aquele permitido, assim sendo devemos sempre tentar escolher o melhor tipo de transmissão de potência para que este não prejudique o sistema de controle e que o robô não tenha estas imperfeições que são geralmente indesejáveis para seu bom desempenho.

As principais razões pelas quais as transmissões mecânicas são usadas em robôs são:

(1) - Enquanto as juntas dos robôs industriais não podem desenvolver velocidades muito elevadas, se comparadas com outros sistemas mecânicos avançados, o torque e a força especificados para a junta do atuador pode ser muito significativa. Entretanto, as dimensões dos motores elétricos são determinadas por seus torques então, para uma mesma potência, o motor de alta velocidade e baixo torque é muito menor, mais barato e tem menos inércia

(e, conseqüentemente, menor constante tempo) que o motor de baixa velocidade e alto torque. Transmissões mecânicas são extremamente úteis para desenvolvimento de torque e também para as transformações de velocidade em unidades relativamente menores e com eficiência muito alta.

Motores hidráulicos e pneumáticos, ao contrário, permitem o desenvolvimento de pequenas unidades de torques e forças muito altas, usualmente, não precisam de transformação de velocidade e torque (mas podem precisar da transmissão para redução de concordância).

Recentemente, os motores elétricos desenvolvidos de alto torque (também conhecidos como motores de "acionamento direto") são baseados na aplicação de ímãs permanentes de terras raras, dos quais possuem características melhores que os motores de corrente contínua, passo, etc...

Entretanto, seus pesos ainda são muito significativos, seus custos ainda são muito altos e possuem baixa eficiência (menos que 60%).

Pretendia-se, inicialmente, que os motores de acionamento direto tivessem as vantagens de conexão direta sem folga com o elo a ser acionado, bem como sem vibração de forças ativas causadas pelos erros inevitáveis que estão sempre presentes em transmissões mecânicas. Entretanto as mais recentes publicações revelam a presença folga como os efeitos elétricos nos acionamentos diretos. Embora as perigosas são as variações da constante de torque do motor durante sua rotação (aproximadamente 50% para sistemas de circuito aberto e 5 a 10% para os de circuito fechado). Essas variações ocorrem numa frequência de 150 a 180 por rotação, podem provocar excitar modos naturais elevados da ligação com subseqüentes perdas de efeitos no desempenho.

(2) - Motores de acionamento direto (elétrico e hidráulico-pneumático) são muito sensíveis às mudanças da carga. Como os acionamentos robóticos estão caracterizados pelas mudanças de cargas especialmente rápidas e intensivas, mesmo quando um percurso programado relativamente suave é executado.

(3) - Se os atuadores das juntas não possuem a característica de auto frenagem, cada atuador deve ser equipado com freio para prevenir o colapso da estrutura em caso da interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Algumas vezes, freios mecânicos também são usados para aumentar o desempenho.

Quando o coeficiente de transmissão $i > 1$, o freio do eixo do motor deveria manobrar o torque, o qual é muito menor que o torque máximo atuando na ligação. Desta maneira, o freio deve ter tamanho e peso pequenos. Por outro lado, com o coeficiente (i) baixo ou com motores de acionamento direto, o tamanho do freio deve tornar-se insuportavelmente grande. O uso da frenagem dinâmica (elétrica), como sugerido em [74] [76], deveria fornecer alguma ajuda mas, a eficácia dessa técnica é reduzida se o fornecimento da energia é interrompido, desde que a força especial seja solicitada. Em adição, a eficácia da frenagem dinâmica diminui com a velocidade reduzida. É óbvio que para motores de acionamento direto, a velocidade do eixo é relativamente baixa.

(4) - Motores elétricos possuem melhores características de desempenho se forem empregados em movimento rotacional. Ao mesmo tempo, muitas estruturas robóticas requerem atuadores de movimento translacional. A transformação do movimento rotacional/translacional pode ser facilmente atingida pelas transmissões mecânicas. Motores hidráulicos e pneumáticos podem ser designados mais facilmente para cada modo de movimento e, então, são freqüentemente usados sem transmissões do tipo mecânica.

(5) - A transmissão mecânica pode, facilmente, executar transformações direcionais de movimentos mecânicos (entre eixos inclinados, paralelos, etc...). Estruturas robóticas necessitam de um conjunto de especificações especiais para recursos de energia e transmissões, uma vez que as mais recentes [1] são freqüentemente instaladas no movimento das ligações e [3] sirvam como unidades de realimentação de sistemas de controle com realimentação direta. Consequentemente as principais exigências para sistemas de transmissão de energia dos robôs são :

Tamanho pequeno

Baixo peso e momento de inércia

Eliminação da folga

Rigidez efetiva elevada

Coeficiente de transmissão preciso e permanente

Baixa perda de energia e Atrito para melhor receptividade do sistema de controle.

Estas características são relevantes para sistemas rotacionais e translacionais. Uma característica muito importante da maioria das aplicações da transmissão em robôs é com relação ao alcance limitado do deslocamento angular ou translacional do (efetuador terminal) do punho ou ferramenta. Esta característica é freqüentemente esquecida quando o projeto do tipo da transmissão é selecionado.

4.5 - Servomotores para Robôs :

Quando se trata do estudo e aplicação de motores elétricos em servo posicionamento de robôs, pode-se encontrar uma ampla variedade de técnicas de construção de motores, cada uma com características peculiares.

Entre as técnicas conhecidas deste estudo pode-se citar os Motores de Corrente Contínua a Escovas tradicionalmente empregados na robótica, os recentes Motores de Corrente Contínua sem Escovas ou "Brushless", Motores de Corrente Alternadas do tipo "Simodrive", Motores de Acionamento Direto, Motores de Passo, e mais recentemente a expectativa do desenvolvimento dos Servo-Posicionadores esféricos que se encontram em fase de desenvolvimento. Neste relato citamos referências de alguns destes servomotores utilizados atualmente em sistemas robóticos [3], [4] [9] [10] [19] [26] [41] [49] [69] [77] [91] [94].

4.5.1 - Motores de Torque DC :

A maior parte dos componentes rotativos avaliados em um projeto de sistemas de controle é o tipo de motor empregado, no nosso caso estamos analisando o motor de acionamento direto. Estes elementos permitem uma melhor versatilidade para o controle onde suas características como o tipo de

permeabilidade magnética encontrada, a excitação na armadura, o motor com uma rotação contínua com uma série de aspectos especiais para um servo sistema e com atuantes aplicações.

- Não possui mecanismos com engrenagem.
- Alto torque e baixa velocidade.
- Acionamento acoplado diretamente ao eixo do motor.
- Baixa potência.
- Torque linear para velocidades características.
- Constante de tempo elétrica pequena.
- Construção simples e rígida.
- Suave operação.

Estas características permitem ao projetista a possibilidade da construção planejada para cada sistema conforme suas características.

Alguns projetos podem utilizar este tipo de acionamento, no caso da construção de um robô, sua utilização permite uma melhora acentuada em seu desempenho, pois algumas características especiais desenvolvidas por este tipo de acionamento são essenciais para um sistema robótico, tais como:

- Alto acoplamento rígido.
- Resposta rápida.
- Alto acompanhamento e exatidão no posicionamento.
- Excelente estabilidade.
- Baixa potência de entrada.
- Suave e silenciosa operação.
- Linha de montagem compacta.
- Melhor confiabilidade ao sistema.

Os motores são amplamente usados para acionamento de plataformas, balanceamento de mecanismos de força, tapes e acionamento de câmeras, acionamento de antenas, atuadores de válvulas e acionamento de indicadores. Projetos inimagináveis são continuamente desenvolvidos para novas

aplicações deste tipo de motores que tem se mostrado muito versátil [3], [4] [9] [10] [19].

4.5.2 - Atuadores de Acionamento Direto :

O motor de torque DC é equivalente ao servo motor convencional existindo algumas exceções onde podemos encontrar motores com características de respostas melhores. Por algumas razões a entrada é refletida e o torque no sistema varia diretamente com a redução do mecanismo, a qual reflete todas as variáveis de inércia de saída com uma redução ao quadrado, o torque de inércia é elevado de forma que o sistema não utiliza engrenagem e não necessita do fator de redução para o acionamento. O torque de acionamento do motor desprovido de engrenagem portanto é ideal para aplicações onde necessita-se rápidas paradas e partidas (alta aceleração). A boa performance deste tipo de motor para acionamentos possibilita que sejam eliminados os erros ocasionados por fricções, backlash (folga mecânica) e outros tipos de perturbações que possam desestabilizar o sistema de acionamento, desta forma o melhor desempenho, a sensibilidade mínima no posicionamento do sistema propicia que possamos ter um pleno controle do sistema de acionamento. Para que haja o posicionamento correto do sistema devemos considerar primeiramente o erro detectado pelos transdutores, onde este é acoplado diretamente a carga., o sistema de acionamento direto possui características e aspectos macios e finos, assim sendo o grau de liberdade causado pelas engrenagem, a resistência dos dentes das engrenagem são fatores similares a distúrbios.(perturbações). As não linearidades residuais são fatores que influenciam na performance de um servo mecanismo convencional [3], [4] [9] [10] [19].

4.5.3 - Motores de Torque DC X AC :

O motor de acionamento direto DC na sua maior parte é considerado como um servo atuador linear. Parâmetros comuns do motor como torque e velocidade são aplicadas a funções lineares. As características similares de

torque e velocidade são colocadas numa linha paralela que mostra o fator de amortecimento na baixa tensão, esta é uma característica do servo motor AC. Para o motor de torque DC, o amortecimento é constante, no servo motor AC o amortecimento varia com a velocidade e a tensão de controle, isto quer dizer que quando tivermos um mínimo de velocidade zero a tensão de controle será zero. Esta é uma região crítica para a estabilidade para o posicionamento do sistema. A performance do motor de torque DC no servo sistema pode ser calculada de forma bem precisa utilizando uma convenção assumida pelo servo sistema linear. A constante de tempo mecânica é medida em milímetros por segundo embora possamos verificar estes valores em catálogos, principalmente para pequenos motores AC. Assim sendo a influência da constante de tempo nos motores AC é pequena na baixa velocidade para o posicionamento do sistema, este tempo pode variar de 2 a 5 segundos (catálogos) e assim para valores altos a influência passa a ser um fator determinante na estabilidade de um sistema estável.

Com relação a constante de tempo elétrica do motor de torque DC seus valores são bem pequenos, com baixa fricção. Em um segundo momento como o sistema possui uma resposta compatível, a constante de tempo elétrica permite limitar a margem de ganho, permitindo que o sistema se estabilize. Embora com estas características o motor de torque DC de acionamento direto é recomendado para sistema onde a velocidade tenha um perfeito equilíbrio, ou seja permita um tempo de resposta adequado para o sistema dinâmico. Esta resposta esta em torno de 10 tempos para um servo motor convencional AC. Por exemplo o motor de torque possui uma velocidade de resposta de 0.1 a 600 rad./seg. com uma tolerância de 10.1 %.

Outras unidades são bem pequenas melhorando desta forma o desempenho do sistema, podendo chegar a 0.001 rad./seg. para uma tolerância de 0.5 %. O motor de torque DC utilizado para muitas aplicações possuem uma carcaça protetora em forma de placa, isto é eles são axialmente finos comparados a com seu diâmetro. Todavia é aplicada uma tecnologia especializada em materiais, onde o material magnético permite que sejam projetados motores axialmente longos comparados ao diâmetro.

Emprega-se uma técnica para sua montagem onde este é constituído de uma caixa onde aloja-se o estator, a coluna (eixo) do rotor e os rolamentos, e

desta forma eles podem ser montados diretamente em torno do acionamento da carga. Isto permite uma flexibilidade no empacotamento principal para um sistema compacto, e assim podemos reduzir o número de componentes rotativos e ligações [3], [4] [9] [10] [19] [71].

4.5.5 - Motor Acionamento Direto (Megatorque) :

Um dos maiores problemas com os robôs comerciais é que em certas velocidades (usualmente, mas agora nem sempre), ressonâncias mecânicas são excessivas e resultam movimentos grossos excessivos. Todavia algumas destas complicações podem ser traçadas para a estrutura do manipulador.

Uma das causas primárias para que atue este pobre movimento são os dispositivos mecânicos usados para acoplar o movimento do atuador com a saída para cada mecanismo de junta. Na década de 80 um novo motor foi desenvolvido, permitindo o um projeto prático de construção de um robô empregando o acionamento direto. Este novo acionador chamado Megatorque produziu torques de 35 a 1000 [ft-lb] à velocidade angular de até 30 rpm sem a necessidade de redutores de velocidades. Juntamente com ele foi desenvolvido o projeto de um sensor de posição que permitisse a resolução para velocidades daquele robô melhor que aquelas empregadas nos sensores tradicionais ("encoders" ópticos). Num estudo realizado através, de algumas bibliografias encontradas verificamos que foi realizado um trabalho de construção de um manipulador com motores de "Acionamento Direto" este tipo de motor fornece algumas características importantes para o bom desempenho de um robô" [9] [71].

4.5.6 - Servo Motores Tipo CC :

Os motores a CC são largamente empregados em automação como servo motores, uma vez que tem um bom desempenho oferecendo facilidades para controle de velocidade, apresentando um torque razoável para estas aplicações.

Nos robôs atuados eletricamente, as falhas nas escovas dos servo motores CC usados na juntas contribuem para a maior fonte de falhas. Estes dispositivos como visto inicialmente, desgastam a resistência terminal efetiva da armadura reduzindo a eficiência do servo, tendo como conseqüência o aumento do aquecimento e redução do torque. As não linearidades provenientes dos efeitos produzidos pela comutação imperfeita e seus aspectos estudados nos itens anteriores juntamente com o problema do faiscamento inviabiliza o emprego destes robôs para atuarem em ambientes explosivos ou inflamáveis. Finalmente, a interferência eletromagnética produzida em certa faixa elétrica pode também criar problemas de confiabilidade para certos dispositivos eletrônicos operando nas vizinhanças do robô. [9] [26] [48] [71].

4.5.7 - Motores Corrente Contínua sem Escovas, "Brushless" :

Atualmente, os motores de corrente contínua têm sido aprimorados para evitar o aparecimento de problemas atribuídos às escovas dos servomotores convencionais. Os motores sem escovas "Brushless", podem ser vistos, de forma bem simplificada, como outra versão de servomotor de corrente contínua construído como um motor de corrente alternada e controlado através da inversão de corrente contínua, com comutação através de dispositivos de acionamento splido, antes de ser aplicada convenientemente na armadura. Diferentemente dos servos de corrente contínua tradicionais, os "Brushless" possuem o enrolamento de campo, ou campo a ímãs-permanentes, localizados no rotor, e o enrolamento de armadura no estator, portanto, não existe comutação mecânica, e conseqüentemente os problemas relacionados com a escovas e barras de cobres que compõem os servos a CC tradicionais. Todavia, é esperado uma demanda de corrente acréscimo na performance de manipuladores, além da redução do custo dos dispositivos eletrônicos. Então mais e mais fabricantes empregarão os motores de CC sem escovas nas subseqüentes gerações de robôs industriais [9] [26] [48] [71].

4.5.8 - Simodrive (Acionamento em Corrente Alternada) :

Os Motores do tipo Simodrive, são motores de Corrente Alternada, aplicados em máquinas ferramentas, dispositivos de carga e robôs.

Entre as características principais pode-se dizer que o rotor é constituído de barras magnéticas justapostas superficialmente e que apresentam um baixo momento de inércia em decorrência da forma do rotor e disposição dos materiais no mesmo. O enrolamento de armadura que é responsável pela produção de calor está localizado no estator, tornando mais fácil a dispersão de calor no motor. Outra característica importante a ser considerada é que este motor não utiliza escovas o que possibilita que o motor trabalhe praticamente sem manutenção. Deve ser considerado também que o "Simodrive" tem um peso reduzido cerca de 50% em relação aos motores de corrente contínua tradicionais para cargas equivalentes. O baixo momento de inércia associado ao emprego de material magnético a base de Samarium Cobalto (Ímãs permanentes de materiais de terras raras), proporcionam uma substancial melhora na dinâmica do motor. Ao contrario do servomotor de CC comum, o rotor do servomotor de CA "Simodrive", é praticamente vazio, de forma que seu momento de inércia é 25% menor de um motor de CC, porém, o tempo gasto para atingir um determinado torque no servomotor de CA é um terço do tempo exigido pelos motores de CC tradicionais. Alguns dados do desempenho técnico do "simodrive" para acionamento de robôs analisados mostram sua eficiência [9] [26] [48] [71].

4.5.9 - Servo Posicionador (Esférico) :

O que apresenta-se aqui é um novo princípio talvez desconhecido, que é modelado e simulado, de um denominado motor esférico capaz de girar em torno de um centro, orientando em todas as direções. Construtivamente o motor esférico trata-se de uma esfera de material puramente magnético, ou ferro magnético, envolto por um enrolamento capaz de induzir fluxo magnético, o qual atravessa esta esfera numa direção definida pelas correntes aplicadas nos enrolamentos, determinando um campo unidirecional. circulando por uma

casca esférica do mesmo material do núcleo, concêntrica, e contendo três espiras que formam um triedro triortogonal concêntrico, cuja função é produzir um campo, cuja intensidade e direção resultante são funções da intensidade e distribuição de corrente nas três espiras. A construção prática de um dispositivo com estas características seria de grande utilidade no campo da robótica, uma vez que através dele se poderia eliminar a presença de vários motores cilíndricos e dispositivos de acoplamentos para permitir realizar o posicionamento da garra. Quanto às aplicações deste motor na robótica, deve-se salientar que possibilitar um movimento tridimensional de orientação devido ao movimento relativo entre as duas peças vinculadas por uma junta magnética, simplificando sobre maneira a construção mecânica. uma vez que a articulação se transforma no próprio elemento do motor, evitando-se acoplamentos mecânicos e suportes adicionais [63].

4.5.10 - Motores Passo :

Os motores de passo são outro grupo de motores que são controlados em direção passo a passo, e que também podem ser aplicados ao acionamento de robôs. Fica aqui somente uma citação, mas o advento das novas técnicas de construção de ímãs de materiais especiais, deve permitir que este grupo de motores, também desenvolva torques suficientes para aplicações em acionamento direto, que é um assunto tratado em alguns "papers" que não foram ainda estudados [48].

4.5.11 - Motores Lineares :

Os motores Lineares são outra opção que pode ser desenvolvida e aplicada ao acionamento direto na robótica. principalmente em juntas translacionais, tem-se encontrado alguns modelos deste tipo de equipamentos em algumas bibliografias e são merecedoras de um estudo mais profundo sobre a utilização dos mesmos [48] [71].

4.6 - Componentes Utilizados em Robôs de Tecnologia de Ponta :

4.6.1 - Freios Dinâmicos :

No controle de movimentos a utilização de freios automáticos permite que o sistema ofereça uma segurança no desenvolvimento dos trabalhos.

Geralmente os atuadores utilizados em juntas robóticas não possuem características de auto frenagem, para isto estes atuadores devem possuir um freio automático, para evitar algum tipo de colapso da estrutura em caso de interrupção da energia elétrica. Este tipo de sistema permite um melhor desempenho do sistema de controle. Quando utilizamos um coeficiente de transmissão muito maior que 1, o freio do eixo do motor tem a função de controlar o torque, onde na maioria das vezes este é muito pequeno em relação ao torque máximo atuante na ligação. Desta forma devemos considerar que os freios automáticos deveriam ter tamanhos reduzidos e pouco peso. Devemos tomar cuidado no dimensionamento do coeficiente de transmissão, pois se este for muito pequeno o freio a ser utilizado tornar-se a insuportavelmente grande encarecendo desta forma sua utilização. Além da possibilidade da utilização de freios automáticos existe outra técnica utilizada que é frenagem dinâmica (elétrica), onde muitos autores sugerem sua utilização. Outra característica importante que devemos analisar é que a eficácia da frenagem dinâmica diminui com a redução da velocidade.

4.6.2 - Acionadores Harmônicos :

Servomecânicos usados para o controle de posição em robôs, máquinas ferramentas e outros sistemas. Tipicamente, os sinais dos mecanismos de controle são identificados por sensores que fornecem o posicionamento e a velocidade para possibilitar correções para os servomotores. Muitos servosistemas também incluem mecanismos para multiplicação do torque de direção. Infelizmente os mecanismos algumas vezes colocam limitações no desempenho do servomecanismo. Por exemplo temos o "backlash" (folga em mecânica) geralmente encontrado em

alguns mecanismos onde ocorrem desestabilização dos sistemas de controle com realimentação. Muitos Servomecanismos sofrem oscilações, quando a folga mecânica é excessiva. Todos os mecanismos convencionais, mesmo as versões de alta precisão devem ter uma certa quantidade de backlash para suportar uma ação. O backlash (folga mecânica) permite variações na tolerância, geralmente em montagens, na espessura da película de um lubrificante e na operação de alguns mecanismos que trabalham em alta temperatura. Quando isto ocorre temos uma perda momentânea no acoplamento positivo entre um servomotor e a carga ou quando a rotação do motor , reversa. Tal movimento pode confundir um sistema de controle ocasionando correções extras de posição e mesmo oscilações. O backlash pode ser minimizado através de um controle próximo a tolerância de manufaturas tais como componentes de caixa de engrenagens e acoplamento seletivo de pares de mecanismos. Se tais medidas provam que são inadequadas então as tais engrenagens especiais, anti - backlash podem ser usadas como conjuntos de engrenagens anti - backlash, que incluem uma fenda ou dupla, outras engrenagens possuem molas conectadas entre suas metades. Os conjuntos de engrenagens são montados pré - carregadas, as partes da engrenagem são separadas, giradas relativas uma à outra e engatadas como um componente casado. Isto permite que as engrenagens possuam anti - backlash para manter constante o contato dos dentes no engate, mesmo através de rotações reversas. Algumas vezes outra solução para o backlash em Servomecanismos é a completa eliminação dos sistemas de engrenagens convencionais. Engrenagens com características harmônicas geralmente são utilizadas para combinar servomotores para fazer algumas tarefas do tipo carregamento de cargas. Os direcionadores harmônicos são redutores de velocidade do tipo engrenagem de precisão que operam com backlash zero.

Devido a sua alta eficiência, estes direcionadores também podem ser usados como aumentadores de velocidade em certas aplicações.

Desenvolvidos 35 anos atrás, os direcionadores harmônicos foram usados primeiramente em aplicações aeroespaciais onde o tamanho compacto, o baixo peso e a alta viabilidade são de importância primordial [19] [25] [73].

Capítulo 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS :

5.1 - Introdução :

Este capítulo finaliza o trabalho, as conclusões parciais que levaram à conclusão final além de apresentar os principais problemas encontrados e explicar como podem ser resolvidos em futuros trabalhos a serem desenvolvidos no LSMR (Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP.

5.2 - Análise da Parte Teórica

O desenvolvimento teórico contido no presente trabalho enfocou basicamente os seguintes pontos.

- Modelagem dinâmica de algumas categorias de estruturas utilizadas para a construção de robôs.
- Tipos de transmissões utilizadas para acionamento das juntas dos robôs.
- Simulação do modelo dinâmico das estruturas serial e paralelogramo.

Os objetivos deste estudo visou dar condições para o entendimento das noções elementares de robótica, e as diversas diferenças entre as categorias de estruturas as quais podem ser utilizadas para a sua construção. Basicamente os resultados deste estudo foram :

1. Estudo da dinâmica de robôs : dedução das equações de movimento pelo método de Lagrange.
2. Modelagem dinâmica e estudo do robô que utiliza a estrutura do paralelogramo.
3. Modelagem dinâmica e estudo de uma estrutura, que utiliza a mesma técnica, como forma opcional para uma possível construção de um robô.
4. Simulação do modelo dinâmico de um robô manipulador com a estrutura do paralelogramo.
5. Introdução sobre tipos de controladores os quais podem ser utilizados na estrutura.
6. Estudo de transmissões e acionamentos que podem fazer com que a estrutura do robô tenha um melhor desempenho.
7. Aplicações possíveis para a utilização do robô.

5.3 - Plano para a Continuação da Pesquisa :

Nas próximas etapas do projeto a ênfase será dada para a construção do robô afim de desenvolvermos novas pesquisas e colocarmos em prática tudo de mais importante deste trabalho. Para a seqüência da pesquisa iremos propor a elaboração de um projeto de construção da estrutura, bem como desenvolver uma metodologia que permita classificar a melhor estratégia para o projeto, definindo aplicações possíveis para desenvolvimento de novas técnicas de sistemas controle tradicionais, como também sistemas adaptativos, robustos que permitam a criação de novos trabalhos. Deverá se levar em conta que a estratégia a ser adotada para estas aplicações deve atender todos os requisitos de desempenho especificados, ao mesmo tempo deve ser a de menor custo de implementação, tanto no que diz respeito a desenvolvimentos

de algoritmos, como no *hardware* eletrônico e na estrutura. Assim sendo, pretende-se que o robô seja capaz de abranger a grande maioria das aplicações vistas neste trabalho :

- Desenvolvimento de um módulo de controle
- *Hardware*
- *Software*
- Desenvolvimento dos módulos de acionamento
- Metodologia

5.4 - Conclusões :

A robotização abre uma nova e decisiva etapa no atual processo de mecanização e automatização.

O robô industrial nasce da junção de uma estrutura mecânica e sistema eletrônico de comando, controlado por um computador. Este por sua vez tornou-se um dispositivo polivalente, apto para diversos trabalhos e tarefas, de acordo com um programa previamente executado. A capacidade do robô industrial está aliada à versatilidade e as variedades de seus elementos, de fácil adaptabilidade permitindo maior agilidade e evolução dos processos de produção de algumas empresas.

Como escrevemos no capítulo 1, para que nossos produtos tenham melhor aceitação no mercado internacional; devemos desenvolver novos sistemas ligados a automação, onde qualidade, versatilidade e eficiência da indústria brasileira possam acompanhar o desenvolvimento dos países desenvolvidos. Novos projetos de desenvolvimento tecnológico são necessários, pois deve ocorrer o aprimoramento de pessoal devidamente qualificado em novos equipamentos que estão sendo desenvolvidos, isto faz com que a realização de novas pesquisas sejam um fator importante para o nosso desenvolvimento. A avaliação de novos modelos mecânicos existentes é de fundamental importância, dado que o acoplamento entre as juntas depende da maneira como a estrutura é concebida, e portanto a estratégia de controle pode ser simplificada na medida em que possamos obter modelos matemáticos mais simples, conforme a estrutura proposta neste trabalho.

Com os estudos realizados verificamos que a robótica é compreendida por um campo de atuação muito além do que imaginávamos, isto faz com que tenhamos uma perspectiva muito grande em relação ao trabalho que esta sendo realizado pelo grupo interdisciplinar do Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos (LSMR) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP.

O objetivo principal deste trabalho foi analisar e propor o projeto de um robô utilizando a estrutura do paralelogramo e verificar o comportamento dinâmico da estrutura, assim como utilizar informações da literatura para dimensionar a estrutura e escolher os motores adequados para o movimento do robô.

No desenvolvimento do trabalho verificamos que a estrutura do paralelogramo é uma estrutura eficiente para a construção de robôs, e que as principais empresas fabricantes de robôs utilizam este mecanismo. Além da estrutura convencional do paralelogramo analisamos outras configurações que têm o mesmo princípio. Outras estruturas também foram analisadas e retiradas algumas conclusões importantes, além do que podemos fazer algumas comparações com relação a estrutura do paralelogramo. Desta forma fizemos uma análise dinâmica do comportamento da estrutura utilizando a formulação de LAGRANGE onde através destas equações podemos verificar o comportamento dinâmico da estrutura. A modelagem dinâmica de um robô é realizada para obter-se uma solução simbólica que represente os elementos do robô; especificamente do efetuador terminal (garra), em função dos torques pelos esforços aplicados.

Reciprocamente permitira se obter os esforços/ torques necessários para que os elementos do robô se movimentem com velocidades e acelerações especificadas, obedecendo uma dada trajetória.

Como verificamos neste trabalho o modelo dinâmico fornece algumas informações importantes para que um projetista possa desenvolver um robô de forma compacta, com elevada precisão, sistemas de acionamento compatíveis com sua tarefa, permitir que sejam projetados sistemas de controle adequados para o comportamento do sistema, etc...

Uma observação importante que devemos fazer é que a utilização direta do modelo dinâmico é difícil. Mas seu conhecimento é fundamental pois

permitirá analisar e desenvolver mecanismos de controle mais adequados [1] [9] [76].

O Lagrangeano nos fornece uma forma simbólica fechada, ou seja possibilita a análise simbólica de cada um dos termos do modelo dinâmico. Através destes métodos podemos analisar e verificar com simulações o comportamento dos diversos tipos de estruturas de robôs e tirar muitas conclusões importantes para novos estudos. Para finalizar verificamos que a condição para que os termos invariantes e as condições de desacoplamento sejam satisfeitas é necessário fazer um rearranjos na distribuição de massas, isto pode ser realizado quando se esta projetando a estrutura.

Anexo 1

DADOS DOS MOTORES UTILIZADOS :

Introdução:

A seguir mostramos apresentamos as principais características dos motores utilizados nas simulações de um sistema robótico com 2 graus de liberdade que possui a estrutura do paralelogramo. Para tais simulações utilizamos o *software* chamado MATLAB (SIMULINK), o qual possibilitou fazermos um estudo detalhado do sistema e forneceu subsídios para obtermos algumas conclusões importantes, inclusive sobre a utilização do motores CC de acionamento direto. Dados retirados da referência [58].

MOTOR DA JUNTA 1 :

Torque (T_p) - 850 Nm \cong 6.0029 oz.in

Potência (P_p) - 221 W

Velocidade (sem carga) - 34 rad./seg

Torque de Frenagem - (T_f) - 0.1554 Nm \cong 22 oz.in

Peso (P) - 2.0659 Kg \cong 73 oz

Torque de Ripple (T_r) - 6%

Freqüência de Ripple (F_r) - 55 ciclos/revolução

Taxa de Temperatura - 1.2 °C/W.

Temperatura de Enrolamento máxima permitida - 155 °C.

Momento de inércia (J_M) - 8.4738 10^{-4} Kg m^2 \cong 0.12 oz.in/seg 2 .

Fator de Amortecimento (F_o) - 0.172 Nm/rad./seg \cong 24.4 oz.in/rad./seg

Constante de Tempo Elétrica (τ_e) - 0.003 seg

Constante de Tempo Mecânica (τ_m) - 0.005 seg

Constante do motor - $0.403 \text{ Nm}/\sqrt{\text{Watts}} \cong 57.1 \text{ oz.in}/\sqrt{\text{Watts}}$

Aceleração Elétrica máxima - (α_m) - 7100 rad./seg

Taxa de Potência Máxima (P) - $42.369 \cdot 10^5 \text{ Nm}/\text{seg}^2 \cong 6 \cdot 10^6 \text{ oz.in}/\text{seg}^2$

CONSTANTES DO MOTOR : Modelo (010).

Parâmetros	Símbolo	Tolerância	Unidade
Resistência	R_M	$\pm 12,5$	2,5
Tensão At.	V_P	ref.	23,4 V
Corrente At.	I_P	ref.	9,4 A
Torque Sen.	K_t	$\pm 10\%$	0.640 Nm/A
F. C. M.	K_a	$\pm 10\%$	0,6 V/rad./s
Indutância	L_M	$\pm 30\%$	$7,7 \cdot 10^{-3}$

MOTOR DA JUNTA 2 :

Torque (T_p) - 100 Nm \cong 14.400 oz.in

Potência (P_p) - 1132 W

Velocidade (sem carga) - 11.3 rad./seg

Torque de Frenagem - (T_f) - 2.3303 Nm \cong 330 oz.in

Peso (P) - 20.416 Kg \cong 720 oz

Torque de Ripple (T_R) - 5%

Frequência de Ripple (F_R) - 51 ciclos/revolução

Taxa de Temperatura - $0.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$.

Temperatura Máxima Permitida no Enrolamento - $155 \text{ }^\circ\text{C}$.

Momento de Inércia (J_M) - $7.2733 \cdot 10^{-2} \text{ Kgm}^2 \cong 10.3 \text{ oz.in}/\text{seg}^2$.

Fator de Amortecimento (F_o) - $8.996 \text{ Nm}/\text{rad.}/\text{seg} \cong 1274 \text{ oz.in}/\text{rad.}/\text{seg}$

Constante de Tempo Elétrica (τ_e) - 0.013 seg

Constante de Tempo Mecânica (τ_m) - 0.008 seg

Constante do Motor - $3.022 \text{ Nm}/\sqrt{\text{Watts}} \cong 428 \text{ oz.in}/\sqrt{\text{Watts}}$.

Aceleração Teórica máxima - (α_m) - 1400 rad./seg

Taxa de Potência Máxima (P) - $1.4123 \cdot 10^5 \text{ Nm}/\text{seg}^2 \cong 20 \cdot 10^6 \text{ oz.in}/\text{seg}^2$.

CONSTANTES DO MOTOR: Modelo (010).

Parâmetros	Símbolo	Tolerância	Unidade
Resistência	R_M	$\pm 12,5$	0.95
Tensão At	V_p	ref.	32.8V
Corrente At.	I_p	ref.	34.5A
Torque Sen.	K_t	$\pm 10\%$	2.9446 Nm/A
F. C. M.	K_a	$\pm 10\%$	2.9 V/rad./s
Indutância	L_M	$\pm 30\%$	$13 \cdot 10^{-3}$

BIBLIOGRAFIA

[1] Abdel-Rahman T. M.; and Elbestawi M. A.; 1991, "Synthesis and Dynamics of Statically Balanced Direct-Drive manipulators With Decoupled Inertia Tensors"; *Mech. Mach. Theory*; Vol. 26 ; N° 4; pp. 389 - 402.

[2] Abrate S.; 1992, " Vibrations of Belts and Belt Drives " *Theory of Machines & Mechanisms* ; Vol. 27 ; N° 6; pp. 645 - 659

[3] Asada. H, Youcef-Toumi K., 1985, "Design and Control of Direct Drive Arms", *Proc. of 1985 American Control Conference, IEEE*, pp. 696 - 702.

[4] Asada, H.; Kanade T., and Tskeyama I.; 1983, "Control of a Direct-Drive Arm"; *ASME; J. of Dynam. Syst., Meas and Control*, vol 105; N° 3; pp. 136-142.

[5] Asada H.; Kanade T.; 1983, "Design of Direct-Drive Mechanical Arms"; *ASME; J. of Vibr., Acoust., Stress, and Reliab. in Design*; vol.105 ; N° 3; pp. 312-316.

[6] Asada H., Youcef-Toumi K., and Ramirez R., 1985, " Design of MIT Direct-Drive Arm", in H. Yoshikawa (ed.), *Design and Synthesis*, Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland), pp. 325 - 332.

[7] **Asada H.; and Ro, I.H.;** 1985, "A Linkage Design for Direct-Drive Robot Arms"; ASME ; J. of Mech. Trans.,an Aut. in Design; vol. 107; N° 4; pp. 536-540.

[8] **Asada H., Youceft Toumi K.;** 1984, "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm With a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism"; ASME ; J. of Dynam. Syst., Meas. and Control, vol. 106; N° 3, pp 225- 230.

[9] **Asada. H., Youcef-Toumi K.,** " Direct Drive Robots", Theory and Practice, Cambridge, MA, MIT Press.

[10] **Badan, A. G. P.;** 1991, Analisis of Brushless DC Motor Performance When Fauts Occurence. E.P.E., FIRENZE.

[11] **Badan, A. G. P ,** 1992, "Controle por Chaveamento" DSCE/FEE UNICAMP- Apostila Curso IA622.

[12] **Badan, A. G. P., ,** 1980, "Controle por realimentação de Estado e Modulação de Largura de Pulso de um Servoposicionados Eletrohidráulico : Análise das Oscilações Instáveis" Tese de Doutorado, Campinas, Brasil.

[13] **Badan, A. G. P., Bottura, C. P., Burian Jr, Y.,**1978, "Eletrohydraulic System with State Feedback and Pulse with Modulated Control", Joint Automatic Control Conference, Philadelphia, P. A, oct. Vol. 1.

[14] Bhat S.P. and Miu D. K.; 1991, "Solutions to Point-to-Point Control Problems Using Laplace Transform Technique" ; ASME J. of Dynamic Systems, M. and Control ; Vol. 113 ; September.

[15] Brat S. P.; Tanaka M. and Miu D. K.; 1991, "Experiments on Point-to-Point Position Control of a Flexible Beam Using Laplace Transform Technique - Part. I and II." ASME J. of Dynamic Systems , M. and Control ; vol 113 , September.

[16] Cerqueira, J. J. F., 1996, " Análise de uma Classe de Neurônios Artificiais para Aplicações em Sistemas Robóticos", Tese de Mestrado, DSCE - FEEC - UNICAMP, Campinas, Brasil.

[17] Chen C. C., Yeh M. K, , And Sung C. K.; 1993, " Dynamic Analysis and Determination of Joint Characteristics of Parallel-Drive Robot Manipulators "; Journal of Robotic Systems, vol 10, N^o 6, pp. 791 809.

[18] Critchlow, A. J., 1985, "Introduction to Robotics" ; Macmillan Publishing Co., NY., USA.

[19] Carlson J. H.; 1985, "Harmonic Drives for Servomechanisms"; Machine Design ; January.

[20] Chung W. K, Cho H. S., Lee C. W., and Warnecke H. J., 1984, " Performance of Robotic Manipulators with an Automatic Balancing

Mechanism", in Computer - Integrated manufacturing and robotics, ASME PED-13, pp. 11 - 121

[21] Chou H. C., 1993, "Optimal Location of Robot Trajectories for Minimization of Actuator Torque" ; Mech. Mach. Theory ; vol. 28 ; N° 1 ; pp. 145 - 158 .

[22] Curran R. and Mayer G., 1985, "The Architecture of the Adept One Direct-Drive Robot", Proc. of 1985 American Control Conference, Boston, June 19 - 21, , pp. 716 - 721.

[23] Dentsoras A. J. ; and Aspragathos N. A., 1991, "Modelling the Dynamic Characteristics of a Robot Arm Joint" ; Robotics & Computer-Integrated Manufacturing ; vol. 8 ; N° 3

[24] Denavit J., Hartenberg R. S., and Evanston I.; 1955, "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices ", Journal of Applied Mechanics, June.

[25] Doebeln, E. O., 1966, "Measurement Systems, Application on Design" ; Mc. Graw-Hill ; NY, USA

[26] Electro Craft, 1980, "DC Motors, Speed Control, Servo Systems", Engineering Handbook by Electro Craft Corporation, Minn., Fifth ed.

[27] Freudenstein F., Longman R. W. ; and Chen C. K., 1984
"Kinematic Analysis of Robotic Bevel-Gear Trains" ; ASME J. of Mechanisms,
Trans., and Autom. and Design ; vol. 106 ; September

[28] Ferreira, E. P. ,1987 " Robótica Básica" , Versão Preliminar
Publicada para a V Escola Brasileiro - Argentina de Informática.

[29] Fenton R. G. ; Benhabib B. and Goldenberg A. A. ; 1986,
"Optimal Point-to-Point Motion Control of Robots With Redundant Degrees of
Freedom ; ASME J. of Engineering for Industry ; Vol. 108 ; March.

[30] Fujisawa Y., Fukuda T., Arai F., Muro E.; Hoshino H., Miyazaki
T., Otsubo K., and Uehara K., 1993, "Mechanism and Control of. Man-Robot
Cooperative-Work-Type Manipulator"; JSME International Journal ; Vol. 36; N°
4.

[31] Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G., 1988. Robotics - Control,
Senzing, Vision and Intelligence. McGraw-Hill International Editions.

[32] Geiras, J.; "Control of Actuadores in Robotic Mecanisms ", Brusless
Motors, e Direct-drive Actuator, Cap 4. Gieras, J. F.; Two-Fase Rotary-Linear
Induction Motor For Propulsion of Robotic end-Efector.

[33] Graig R. R., 1981," Structural Dynamics " , John Wiley, New york.

[34] Goldstein, H., 1981, "Classical Mechanisc", Addison-Wesley,

[35] Good M. C.; Sweet L. M.; and Strobel K. L.; 1985, "Dynamic Models for Control Design of Integrated Robot and Drive Systems"; ASME; J. of Dynam. Syst., Meas and Control, Vol. 107; March; pp.53-59.

[36] Huang Y., and Lee C. S. G.; 1988, " Generalization of Newton-Euler Formulation of Dynamic Equations to Nonrigid Manipulators" , Journal of Dy. Sys., Meas. and Control, Vol. 110, September.

[37] Ono Y. and Kuwahara H.; 1986, "The New Design of Motor, Position Sensor, and Position Control System for Direct Drive Manipulators", in Robotics: Theory and Applications, ASME DSC- N° 3, pp. 123 - 128.

[38] Hewit J. R.; 1989, "Twin Active force Control for Robots with Flexible Transmissions" ; Robotics & Computer integrated manufacturing ; vol. 5 ; pp. 119 - 122.

[39] Hollerbach J. M.; 1980, "A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity" ; IEEE Transactions on Systems, Man , and Cybernetics , Vol. 10 ; N° 11 ; November.

[40] Hoeltzel D. A.; and Chieng W. H., 1989, "Designing Mechanisms with Expert Systems" ; Machine Design ; September

[41] Jon H. and Emily B., 1990, " Robot Applications Design Manual " ;
John Wiley & Sons, Inc .

[42] Kaneko K.; 1989; "A Spherical DC Servo Motor With Three Degrees of Freedom"; Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Setembro de, Vol.111, pp. 398 - 402.

[43] Klafter R. D., Chmielewski T. A., Negin M., 1989, " Robotic Engineering na Integrated Approach", Prentice-Hall

[44] Kynocha and Papadimitriou I.; 1991, "Simulation of the Dynamic Behavior of Robots in an Extreme Environment ; Robotics & Computer integrated manufacturing; Vol. 8 ; pp. 163 - 169.

[45] Khorasani K.; 1992, "Adaptive Control of Flexible joint Robots"; IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8 ; Nº 2 ; April

[46] Komada, S.; 1991, " Disturbance Observer-Based Motion Control of Direct Drive Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 6, Nº 3, September.

[47] Konishi Y. ; Aoyama T. and Inasaki I.; 1988, "Trajectory Generation and Control of Five-Bar-Link Parallel Direct-Drive Robot" ; Robotics & Computer integrated manufacturing; Vol. 4 ; pp. 395 - 402.

[48] Kuo, B. C.; 1980, "Theory and Application of Step Motor".

[49] Lakota N. A., 1982, "Investigation of Mechanical Transmissions for Industrial Robot Modules ", Soviet Engineering Research, Vol. 2, N^o 10, pp. 5 - 7.

[50] Lenarcic J. and Umek A., 1991, "A Pascal Program for Automatic Generation of Robot Kinematic Equations" ; Robotics & Computer integrated manufacturing ; vol. 3 ; pp. 149 - 155.

[51] Leão, L. M., 1989, "Os Impactos da Automação na Produção Industrial", Máquinas e Metais, Julho.

[52] Lind H. C., 1990, "Spur Gears for High Loads and Precision" ; Machine Design ; N^o 23 ; August.

[53] Luh J. Y. S., Walker M. W., and Paul R. P. C.; 1980, "Online Computational Scheme for Mechanical Manipulators " ; Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 102, pp. 69-76, June.

[54] Low K. H. and Vidyasagar M. V. ; 1988, "A Lagrangian Formulation of the Dynamic Model for Flexible Manipulator Systems " ; Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.110, pp. 175-181, June.

[55] Madrid, M. K.; 1988 " Robô Manipulador Mecânico para Posicionamento Espacial com Controle Hierarquico a Microprocessadores, Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas, Brasil.

[56] Madrid, M. K.; 1994," Controle de Trajetórias Contínuas por Seccionamento em sub-Trajetórias usando Inteligência Artificial num Robô Multi-Tarefas" , Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

[57] Madrid, M. K., Badan, A G. P.; 1990," Controle de Posição e Velocidades de Robôs Manipuladores - Desempenho com Juntas em malha Aberta e Malha Fechada", 8º Congresso Brasileiro de Automática, Vol. 1.

[58] Magnetic Technology, "Direct Drive", Engineering Handbook by the Engineering Staff of Magnetic Technology Vol. 1 e Vol. 2.

[59] Mahil S. S.; 1982, " On the Application of Lagrange's Method to the Description of Dynamic Systems" ; IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics; Vol. 12 ; Nº 6 ; November/December.

[60] Maravec H. P., 1994, "O Robô"; Revista SIEMENS, vol. 2, pp. 34-39.

[61] Mota, J. C., 1992," Robôs com periférias padronizadas Simplificam Operações de Soldagem" , Soldagem & Materiais, Nº 4 (1), Jan./Mar.

[62] Mitsi S., and Bouzakis K. D.; 1993, " Simulation of Redundant Manipulators for Collision Avoidance in Manufacturing and Assembly Environments " ; Mech. Mach. Theory, Vol. 28 , N° 1, pp. 13 - 21.

[63] Neto, L. M.; Andrade, D. A.,"Motor Esférico - Um Servo Posicionador", 8 CBA - UFPa - Belém - Pa. pp. 918 a 923.

[64] Nof S. Y.; 1984 " Handbook of Industrial Robotics".

[65] Neuman C. P. and Murry J. J., 1987, " Symbolically Efficient Formulations for Computational Robot Dynamics " ; Journal of Robotic Systems, vol. 4, N° 6, pp. 743-769.

[66] Neuman C. P., Murray J. J., 1987, " Customized Computational Robot Dynamics " ; Journal of Robotic Systems, N° 4 (4), 503-526

[67] Neuman C. P. and Murray J. J.; 1987, "The Complete Dynamic Model and Customized Algorithms of the PUMA Robot " ; IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-17, N° 4, pp. 635-644, July/August.

[68] Octrue M., 1990 ;"Novo método para o dimensionamento de engrenagens"; Máquinas e Metais ; Julho.

[69] Oliveira A. M.; et al. Protótipo de um "Brushless DC Motor" Para propulsão Naval. COPESP - Coordenadoria para Projetos Especiais. São Paulo - SP.

[70] Papadopoulos E., Abu-Abed A., 1996, "On Design of Zero Reaction Manipulators", ASME J. of Mechanical Design, Vol. 118, pp. 372 - 376.

[71] Potkonjak V.; 1989, "Thermal Analysis and Dynamic Capabilities of DC Motor in Industrial Robotic Systems" ; Robotics & Computer integrated manufacturing ; Vol. 5 ; pp. 137 - 143.

[72] Regla P. A., 1985, "The Use of Friction Drive Technology in Motion Picture Special Effects Photography", Proc. of Robot 9 conference, SME, pp. 3.53 - 3.62.

[73] Rivin E. I., , 1982, "New Designs of Power Transmission Gearing and Gear Couplings", Proc.of the National Conference on Power Transmission, vol. 9, IIT, Chicago.

[74] Rivin E. I., , 1980, "Compilation and Compression of Mathematical Model for a Mechine Transmission", ASME Paper 80 - DET - 104, ASME.

[75] - Rivin E. I., 1986, "Design and Application Criteria for Connecting Couplings", ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, vol. 108, N° 1, pp. 96 - 105.

[76] Rivin E. I., 1988, "Mechanical Design of Robots", Mc Graw Hill, St Louis.

[77] Rosário, J. M., 1990, "Etude de Faisabilité d'une Commande de Type Non-Lineaire pour un Robot Manipulateurs", PHD Thesis, Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Paris, France.

[78] Rosário, J. M. "Estudo e Concepção de um controlador não Linear para Aplicação em Robôs Industriais, XI COBEM, São Paulo.

[79] Rosário, J. M., 1995, "Tópicos em Mecânica Aplicada", Notas de Aula, DPM, FEM, UNICAM.

[80] Rosheim M. E., 1985, "A New Pitch-Jaw-Roll Mechanical Robot Wrist Actuator", Proc. of Robots 9 Conference, SME, pp. 15.20 - 15.42.

[81] Schumacher P.; Schumacher D. and Pavelic V. ; 1975, "Design of a Robot manipulator" ; 4TH OSU Applied Mechanisms Conference ; November

[82] Symon, K. R.; 1985, " Mecânica. Editora Campus; Rio de Janeiro.

[83] Spong, M. W., Vidyasagar, M., 1989, " Robot Dynamics and Control, John Wiley.

[84] Takita, K.; 1995, " Sistema de Sensoriamento de um Robô Industrial : Espaço de Juntas e Espaço Cartesiano " , Tese de Doutorado, DSCE - FEE - UNICAMP, Campinas, Brasil.

[85] Tachiya H., Tsujimura Y., Ebata Y., Chatani A.; 1995, "Characteristic Evaluation and Comparison of robotic Mechanisms; JSME International Journal ; Vol. 38; Nº 2.

[86] Tourassis V. D., Neuman C. P.; 1985, " The Inercial Characteristics of Dynamic Robot Models " ; Mech. Mach. Theory, Vol. 20, Nº 1, pp. 41-52.

[87] Tourassis V. D. and Neuman C. P.; 1985, " Properties and Structure of Dynamic Robot Models for Control Engineering Applications " , Mechanism and Machine Theory, Vol 20, Nº 1, pp. 27 - 40.

[88] Ting K. L., 1992, "Gross Motion and Classification of manipulators with Closed-loop, Four-Bar Chains"; The International Journal of Robotics Research; Vol. 11; Nº 3, June.

[89] Vieira, L. A. ; 1996, " Desenvolvimento e Implementação de Controle de Trajetória em Robô Industrial de Alto Desempenho " , Tese de Doutorado, DSCE - FEEC - UNICAMP, Campinas, Brasil.

[90] Youcef Toumi K.; 1992; "Analysis and Design of Manipulators With Decoupled and Configuration-Invariant Inertia Tensors Using Remote Actuation"; ASME; J. of Dynam. Syst., Meas and Control, Vol. 114; June; pp. 204-212.

[91] Youcef Toumi K., and Kuo A. T. Y.; 1993; "High-Speed Trajectory Control of Direct-Drive Analysis Manipulator"; *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9 ; N° 1 ; February.

[92] Youcef Toumi K. and Ro P. I.; 1986; "A Dual-Drive Design concept for Enhancing the Micro Manipulation of Direc-Drive Arms", in *Robotics: Theory and Applications*, ASME DSC - N° 3; pp. 115 - 122.

[93] Walker M. W. and Orin D. E.; 1982 " Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms " ; *Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, Vol. 104, pp. 205-211.

[94] Wang J.; and Sas P.; 1990, "A Method for Identifying Parameters of Mechanical Joints"; ASME; J. of Applied Mechanics; vol. 57; June; pp. 337-342.