Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 08/10/03
Ass.:

MODELAGEM E CONTROLE DE UMA GARRA ANTROPOMÓRFICA DE ROBÔ

André Ribeiro Lins de Albuquerque

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula Caurin

DEDALUS - Acervo - EESC
31100044230
EESC-USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

São Carlos
2003

ysno 1349825

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

A345m

Albuquerque, André Ribeiro Lins de
Modelagem e controle de uma garra antropomórfica de robô / André Ribeiro Lins de Albuquerque. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área : Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula Caurin.

1. Garras antropomórficas. 2. Simulação. 3. Modelagem. 4. MBS. 5. Controle de posição. 6. Controle de força. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDRÉ RIBEIRO LINS DE ALBUQUERQUE**

Dissertação defendida e julgada em 07-07-2003 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Dr. **GLAUCO AUGUSTO DE PAULA CAURIN (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado.

Prof. Assoc. **PAULO SERGIO VAROTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **MARCO ANTÔNIO FUMAGALLI**
(Universidade de Mogi das Cruzes/UMC)

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Vice-Presidente em exercício da Comissão de Pós-Graduação

Á minha querida família, pai, mãe, irmã que sempre me incentivaram e torceram por mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Glauco, pela oportunidade, orientação e paciência neste trabalho.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade de São Paulo, seus funcionário e docentes que colaboram de forma expressiva e eficiente com o desenvolvimento de pesquisas e de novas tecnologias no país.

Aos amigos, Marcio, Danilo, Alexandre, Paulo, Wisner, Leopoldo e Mariano pela grata oportunidade de convivência, trabalho e descontração.

À Luciana, pelo seu companheirismo e cumplicidade neste período.

"O conhecimento amplia a vida. Conhecer é viver uma realidade que a ignorância impede desfrutar".

Carlos Bernardes Gonzáles Pecoche

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS i
LISTA DE TABELAS ii
LISTA DE ABREVIATURAS iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS iv
LISTA DE SÍMBULOS v
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA 1
1.1 GARRAS ANTROPOMÔRFICAS 1
1.2 MOTIVAÇÃO 2
1.3 CONTROLE DE FORÇA E POSIÇÃO 2
1.4 OBJETIVO 3
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 3
2 PROJETO DA GARRA 5
2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA GARRA 5
3 ANÁLISE CINEMÁTICA 10
4 MODELAGEM DA GARRA 15
4.1 INTRODUÇÃO 15
4.2 FORMALISMO MATEMÁTICO 16
4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL 18
4.4 INTEGRADOR 19
4.5 MODELAGEM DOS ELEMENTOS ELÁSTICOS 22
5 CONTROLE DE POSIÇÃO 25
5.1 INTRODUÇÃO 25
5.2 CONTROLADOR PID 25
5.3 PROJETO DE UM CONTROLADOR PID ADAPTATIVO 26
5.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL EM MALHA FECHADA 29
5.5 CRIAÇÃO DO ALGORITMO 32
5.6 ANÁLISE DE RESULTADOS DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL 34
5.7 RESULTADOS DO CONTROLADOR PID ADAPTATIVO 37
6 CONTROLE DE FORÇA 43
6.1 INTRODUÇÃO 43
6.2 TEORIA HELICOIDAL 44
6.3 EQUILÍBRIO DE FORÇAS 46
6.4 APROXIMAÇÃO ALGÉBRICA 47
6.5 ANÁLISE DE FORÇA E VELOCIDADE - MATRIZ G 50
6.6 ANÁLISES DE FORÇAS EXTERNAS E INTERNAS 52
6.7 ANÁLISES DE VELOCIDADES 53
6.8 CONTROLE 55
6.9 RESULTADOS DO CONTROLE 57

7 CONCLUSÕES 59
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: 61
APÊNDICE 1 - SISTEMA DE CONTROLE LINEAR
APÊNDICE 2 - MODELOS DA GAUSP DESENVOLVIDO NO ADAMS

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1.1 - FOTO DA GARRA (1° VERSÃO) 07
FIGURA 2.1.2 - FOTO DA GARRA (2° VERSÃO) 07
FIGURA 2.1.3 - DISPOSIÇÃO DOS CABOS EM UM DOS DEDOS DA GARRA 07
FIGURA 2.1.4 - VISTA EXPLODIDA DO DEDO 08
FIGURA 2.1.5 - VISTA DO DEDO DA GARRA EM 3D 09
FIGURA 3.1 - POSICIONAMENTO E ORIENTAÇÃO DO DEDO 10
FIGURA 4.4.1 - FIGURA ILUSTRATIVA DA RIGIDEZ E AMORTECIMENTO NO CABO DE UMA ARTICULAÇÃO DA GARRA 23
FIGURA 4.4.2 - FOTO DO EXPERIMENTO PARA SE ESTIMAR OS VALORES DE RIGIDEZ E AMORTECIMENTO DOS CABOS 24
FIGURA 4.4.3 - RESULTADO DO MÉTODO DE AJUSTE DE CURVA APLICADO A UMA ARTICULAÇÃO 24
FIGURA 5.3.1 - MODELO DE UM DOS DEDOS DA GARRA 27
FIGURA 5.3.2 - MODELO DO DEDO EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TRABALHO 27
FIGURA 5.3.3 - ESQUEMA DE CO-SIMULAÇÃO ENTRE O ADAMS E O MATLAB/SIMULINK 28
FIGURA 5.4.1 - RESPOSTA DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NA ARTICULAÇÃO 1 PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TRABALHO 30
FIGURA 5.4.2 - RESPOSTA DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NA ARTICULAÇÃO 2 PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TRABALHO 30
FIGURA 5.4.3 - RESPOSTA DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NA ARTICULAÇÃO 3 PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TRABALHO 31
FIGURA 5.6.1 - RESPOSTA DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL DA FREQUÊNCIA NA ARTICULAÇÃO 1 34
FIGURA 5.6.2 - RESPOSTA DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL DA FREQUÊNCIA NA ARTICULAÇÃO 2 35
FIGURA 5.6.3 - RESPOSTA DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL DA FREQUÊNCIA NA ARTICULAÇÃO 3 35
FIGURA 5.6.4 - RESPOSTA DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL DO GANHO NA ARTICULAÇÃO 1 36
FIGURA 5.6.5 - RESPOSTA DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL DO GANHO NA ARTICULAÇÃO 2 36
FIGURA 5.6.6 - RESPOSTA DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL DO GANHO NA ARTICULAÇÃO 3 37
FIGURA 5.7.1 - RESPOSTA DA POSIÇÃO ANGULAR NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 1 38
FIGURA 5.7.2 - RESPOSTA DA POSIÇÃO ANGULAR NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 2 38
FIGURA 5.7.3 - RESPOSTA DA POSIÇÃO ANGULAR NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 3 39
FIGURA 5.7.4 - RESPOSTA DA VELOCIDADE ANGULAR NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 1 39
FIGURA 5.7.5 - RESPOSTA DA VELOCIDADE ANGULAR NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 2 40

FIGURA 5.7.6- RESPOSTA DA VELOCIDADE ANGULAR NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 3 40
FIGURA 5.7.7- RESPOSTA DO TORQUE NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 1 41
FIGURA 5.7.8- RESPOSTA DO TORQUE NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 2 41
FIGURA 5.7.9- RESPOSTA DO TORQUE NO CONTROLE PID PARA UMA ENTRADA DEGRAU NA ARTICULAÇÃO 3 42
FIGURA 6.2.1- CONTADO PONTUAL COM ATRITO 45
FIGURA 6.2.2- CONTADO SUAVE COM ATRITO 45
FIGURA 6.4.1- FORÇAS APLICADAS AO OBJETO POR 3 DEDOS 48
FIGURA 6.8.1- CONTROLE DE FORÇA DA GAUSP 55
FIGURA 6.9.1- DESLOCAMENTO E VELOCIDADE DE UM OBJETO SENDO LEVANDADO DE UMA BANCADA PELA GAUP 57
FIGURA 6.9.2- DESLOCAMENTO DA PONTAS DOS DEDOS DA GAUSP NAS DIREÇÕES X, Y E Z 57
FIGURA 6.9.3- MEDIÇÕES DE FORÇAS EM UM DOS DEDOS DA GARRA 58
FIGURA A1.1- SISTEMA DE CONTROLE SEGUIDOR III
FIGURA A1.2- RESPOSTA DOS DESLOCAMENTOS ANGULARES DAS ARTICULAÇÕES DO DEDO PARA ENTRADAS DO TIPO DEGRAU VII
FIGURA A1.3- RESPOSTA DO DESLOCAMENTOS DA PONTA DO DEDO PARA ENTRADAS DO TIPO DEGRAU VII
FIGURA A2.1- MODELO DE UM DEDO DA GARRA IX
FIGURA A2.2- MODELO DA GARRA XIII

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 PRINCIPAIS DADOS REFERENTES AOS DEDOS DA GARRA.....08
TABELA 5.3.1 GANHOS DO COMPENSADOR PID.....29
TABELA 5.4.1 VALORES DOS PARÂMETROS PARA CADA CONFIGURAÇÃO DE TRABALHO 31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GAUSP	Garra Antropomórfica da USP
FFT	Fast Fourier Transform (do inglês: Transformada Rápida de Fourier)
PID	Proporcional, integral derivativo
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos

1 RESUMO

ALBUQUERQUE, A.R.L., (2003). *Modelagem e Controle de uma Garra Antropomórfica de Robô.* São Carlos, 2003. 64p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

É apresentado o projeto completo de uma garra antropomórfica de robô de três dedos, com nove graus de liberdade e acionamento por cabos de aço, no qual são aplicados técnicas de modelagem computacional, simulações, controle de posição e controle de força com intuito de fornecer características de confiabilidade e destreza na manipulação com objetos. Realizando análises dinâmicas experimentais na garra, os valores de rigidez e amortecimento nas articulações de seus dedos são obtidos de forma aproximada. O modelo dinâmico do sistema é desenvolvido utilizando técnicas de sistemas multicorpos através de um software de modelagem de sistemas mecânicos. Esta abordagem possibilita analisar o comportamento da garra através de simulações em diversas condições de trabalho. Para o desenvolvimento e testes dos controladores aplicou-se a técnica de co-simulação para se unir o ambiente de modelagem e simulaçao ao ambiente de controle. No controle da interação das pontas dos dedos da garra com um objeto, é apresentada e implementada uma ferramenta baseada na Teoria Helicoidal juntamente com um controle PID em uma aplicação onde a tarefa é suspender um objeto de uma bancada mantendo as forças internas constantes.

ABSTRACT

ALBUQUERQUE, A.R.L., (2003). Antropomorphic Gripper Model and Control. São Carlos, 2003. 64p. Dissertation (Master Degree) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

A complete design of an antrophomorfic gripper is presented. The gripper has three fingers, each of them with three degrees-of-freedom. The system uses transmission by cables in order to reduce the gripper's weight. Modelling techniques are applied to simulate and control the position and force of the fingers gripper in order to obtain dexterity and reliability features in objects manipulation. Specials features of the gripper are included in this model e.g. the stiffness and damping characteristics of the transmition cables were estimated using multi body systems methods along with experimental techniques. This approach makes possible to analyze the behavior of the gripper through simulations in several working conditions. The co-simulation techniques are applied to develop and test the controls by the connection between modeling and control enviroment. It is presented and implemented a tool based in the Screw Theory together with a PID control to control the gripper´s finger interaction with an object.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 Garras Antropomórficas

Filósofos antigos como Anaxágoras (500?-428 AC) e Aristóteles (384-322 AC) já debatiam a respeito da relação entre a mão e a mente humana, pois tanto uma como outra fornecem características ao ser humano que o diferencia dos outros animais. As pautas dos debates eram principalmente filosofar se foi por causa da habilidade de manipulação da mão que o ser humano se tornou inteligente, ou ao contrário. Paleontologistas mais recentemente, mostraram que a destreza mecânica da mão humana foi o maior fator que permitiu ao homo sapiens desenvolver um cérebro superior (BICCHI, 2000).

Quando os seres humanos capturam um objeto, parte do procedimento adotado é preestabelecido e parte do procedimento é otimizado instantaneamente. Os dedos posicionam-se de forma coerente e forças são aplicadas de modo a não permitir que o objeto caia ou deslize. Muitos autores (VALERO, 2000 e IBERALL, 1997) afirmam ser a mão humana, uma das partes mais evoluídas do corpo humano, capaz de interagir de forma versátil com o meio ambiente através de movimentos, de sensações de contato, de controle de forças e muitas outras habilidades que muitos pesquisadores nesta área gostariam de emular em garras robóticas (STANFORD/JPL HAND, 2002) e próteses de mão humana (SOUTHAMPTON ARTIFICIAL HAND, 2002).

Mãos artificiais podem ser mais fortes e mais rápidas que a mão humana, mas considerando uma grande gama de tarefas a serem realizadas, com diferentes características, a mão humana ainda é muito mais eficiente devido a sua grande capacidade de fixação e manipulação. Isto se deve em parte à suas ricas características

anatômicas e das complexas atividades cognitivas do cérebro, que definem o tipo de fixação a ser utilizada e as forças a serem aplicadas.

1.2 Motivação

As garras comerciais hoje existentes atendem somente a certas tarefas específicas. Isto explica suas aplicações em ambientes estruturados com operações repetitivas. Nestas situações, elas funcionam mais como uma ferramenta do que como uma mão. Porém, algumas tarefas já exigem uma certa inteligência das garras, como trabalhos em ambientes não-estruturados ou mesmo em ambientes hostis. Para isto, estão sendo pesquisadas garras de múltiplos dedos para serem aplicadas em usinas nucleares, em micro cirurgias (RAMS, 2002), em operações no fundo do mar (AMADEUS, 2002), no espaço (DLR, 2002) e no ramo das próteses (LUND UNIVERSITY, 2002), onde elas devem assumir uma postura mais próxima de uma mão humana e não apenas de uma ferramenta.

Embora as garras antropomórficas sejam ainda pouco utilizadas comercialmente, existe uma tendência natural de que elas ganhem espaço mesmo em áreas estruturadas como nas indústrias. Seria o mesmo caminho seguido pelos robôs, que no início eram aplicados apenas em operações especiais e hoje estão espalhados pelas mais diversas fábricas. Isto ocorreu porque flexibilidade e eficiência são requisitos importantes em qualquer ramo da automação (VALENTE, 1999). Estes requisitos aumentam a importância das garras de múltiplos dedos, que poderiam aperfeiçoar os processos de fixação, manipulação e montagem.

1.3 Controle de Força e Posição na Robótica

Pesquisas sobre controle de força na robótica surgiram nas últimas duas décadas (DE SCHUTTER, 1998 e WHITNEY, 1987). O aumento do interesse foi motivado pelo desejo de prover sistemas robóticos com o aumento de sua capacidade sensorial. Em

operações autônomas em ambientes não estruturados, são esperados que os sistemas robóticos possuam realimentação de força, de tato, de distância e realimentação visual.

Não é surpresa na área de robótica que, se a interação de um robô (a garra pode ser considerada um conjunto de vários robôs operando de forma cooperativa) com o ambiente for adotado uma estratégia puramente de controle de posição, as respostas poderão ser inadequadas, pois, a indisponibilidade de modelar erros e incertezas podem causar um aumento das forças de contato definitivamente ligado a um comportamento instável durante a interação.

A execução com sucesso de uma tarefa precisa de interação com o ambiente utilizando um controle simples de posição, somente poderia ser possível se a tarefa fosse meticulosamente planejada. Para tanto, seria necessário um modelo exato da garra antropomôrfica (cinemático e dinâmico) e do ambiente (geométrico e características mecânicas). O modelo da garra pode até ser conhecido com uma certa precisão, mas a descrição detalhada do ambiente é difícil de obter.

O problema de controle de força tem sido tratado na área da robótica (SICILIANO & VILLANI, 1999) como uma evolução natural do problema de controle de posição, onde a realimentação de forças de contato provenientes de sensores de força e torque é usada para gerenciar a interação dos dedos da garra com ambientes pouco estruturados.

Controlar a interação entre o robô manipulador e o ambiente é crucial para a execução de tarefas onde o end effector do robô ou, a ponta de um dedo da garra tem que manipular um objeto ou mesmo desempenhar alguma operação na superfície, como polir, lixar, montar, etc. Durante a interação, o ambiente gera algumas restrições geométricas que devem ser seguidas pela ponta do dedo. Esta situação é referenciada como restrições de movimentos.

1.4 Objetivo

As garras antropomórficas ainda são consideradas sistemas complexos e difíceis de controlar devido à necessidade de um grande esforço computacional. O desafio do presente trabalho é aplicar técnicas de modelagem, simulações, controle de posição e controle de força no projeto da GAUSP "*Garra Antropomôrfica da USP*" com intuito de fornecer características como confiabilidade e destreza na manipulação com objetos.

1.5 Organização do Trabalho

A partir de trabalhos desenvolvidos anteriormente dentro do Laboratório de Mecatrônica (VALENTE, 1999), onde foram utilizadas técnicas de captura e processamento de imagem, juntamente com aplicações em redes neurais artificiais, é possível apresentar o seguinte cenário inicial:

1) Dado um objeto qualquer, sabe-se a localização dos pontos onde os dedos da garra devem entrar em contato para efetuar uma captura adequada.
2) A massa deste objeto é conhecida.

Partindo deste cenário, o projeto da GAUSP "Garra Antropomórfica da USP", é apresentado no capítulo 1, mostrando as suas características construtivas e conceituais, como: acionamentos, design, graus de liberdade e materiais. A partir daí, no capítulo 2, desenvolve-se um modelo cinemático do sistema, onde se relacionam, a velocidade das pontas dos dedos da garra com as velocidades de suas articulações e, vice e versa, sendo estas relações denominadas respectivamente por cinemática direta e cinemática inversa. No capítulo 3, desenvolve-se o modelo dinâmico do sistema, onde se determina o movimento dos dedos da garra para um determinado conjunto de torques nas articulações (dinâmica direta). Este modelo (vide APÊNDICE 2) foi formalizado e posteriormente desenvolvido dentro de um ambiente de modelagem de sistemas mecânicos denominado ADAMS que utiliza métodos numéricos para gerar e resolver as equações de movimento

do sistema. Para determinar parametros do modelo, no capítulo 4 foram aplicadas técnicas de ajustes de curva nas funções de resposta em freqüência das articulações de um dos dedos da garra, obtidas através de testes experimentais, medindo-se forças de entrada e as acelerações de saída, para se extrair de forma aproximada os valores de rigidez e amortecimento das articulações do sistema. No capítulo 5 analisa-se o comportamento dinâmico em malha fechada do modelo de um dos dedos da GAUSP em diferentes configurações de trabalho (ALBUQUERQUE, 2003). Propoe-se em seguida um algoritmo que descreve a variação do comportamento dinâmico em função da configuração de trabalho do dedo. Este algoritmo foi utilizado para implementar um controlador de posição do tipo PID adaptativo. Ainda nesta parte, é apresentado no APÊNDICE 1 o desenvolvimento e implementação de um controle multivariável linear de posição. No capitulo 6, optou-se por utilizar a Teoria Helicoidal para controlar a interação entre os dedos da garra e o ambiente. Um controle de força é aplicado em uma tarefa onde a garra captura um objeto e o eleva acima de uma bancada, simulando um processo industrial. No sétimo e último capítulo se encontram as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2. PROJETO DA GARRA

2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA GARRA

A garra apresentada neste trabalho faz parte da segunda versão das garras antropomórficas desenvolvidas no Laboratório de Mecatrônica do Departamento de Mecanica da Escola de Engenharia de São Carlos. A garra considerada na primeira versão (FIGURA 2.1.1) foi projetada numa configuração de três dedos com dois graus de liberdade cada um. O acionamento é feito por motores DC através de cabos de aço. A segunda versão de garras (FIGURA 2.1.2) foi desenvolvida, utilizando como base, o projeto de uma garra desenvolvida por SALISBURY (1980), na Universidade de Stanford, conhecida como "*Stanford/JPL Hand*". Retirou-se desse trabalho inúmeros conceitos importantes de projeto de uma garra antropomórfica afim de que se possa realizar um estudo mais confiável de controle de posição e força dos dedos desta garra.

O modelo desenvolvido possui três dedos dispostos 120 graus uns dos outros, utilizando para cada um dos dedos o princípio de atuação por cabos, o que possibilita uma redução do peso próprio da garra. Os cabos são dispostos internamente, passando por polias localizadas no seu interior, evitando assim o acúmulo de fios e cabos no meio onde os dedos se movimentam.

Para que a garra desenvolvida ofereça multiplicidade de soluções na manipulação e fixação de objetos, o sistema conta com seis cabos por dedo, totalizando dezoito cabos na garra. Com esses dezoito cabos, os dedos da garra têm os seus controles independentes uns dos outros.

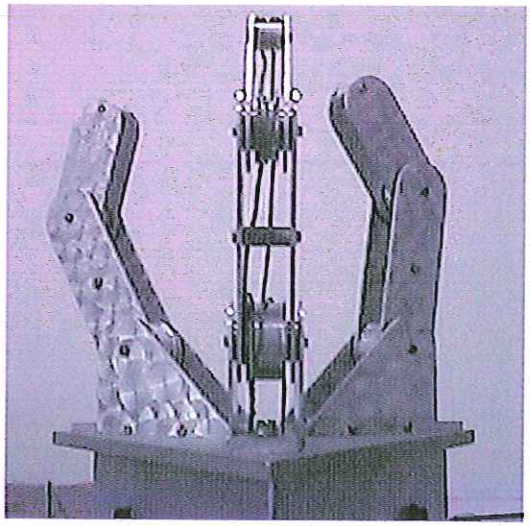


FIGURA 2.1.1 – Foto da Garra (1° Versão)

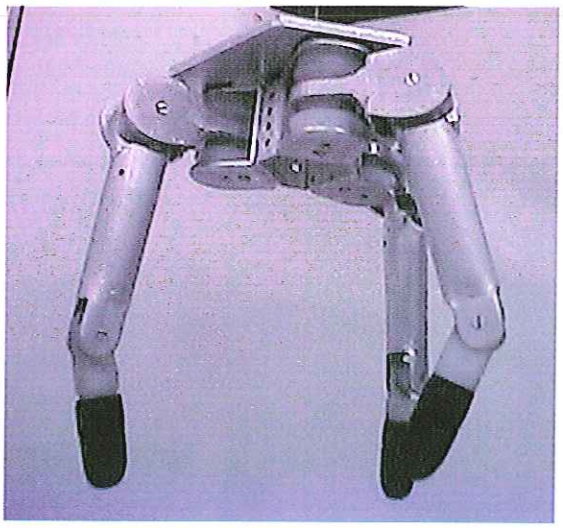


FIGURA 2.1.2 – Foto da Garra (2° Versão)

A FIGURA 2.1.3 apresenta a disposição dos cabos. Por combinações apropriadas das tensões nos cabos, torques arbitrários são exercidos sobre os eixos Z_1, Z_2 e Z_3. Os cabos T_1 e T_4 (verdes) exercem um torque no eixo Z_2, e os cabos tensos T_2 e T_3 (roxos), passam pelos eixos Z_1, Z_2 e agem no eixo Z_3. Existem ainda outros dois cabos T_5 e T_6 responsáveis por gerar um torque arbitrário no eixo Z_1, que movimenta o dedo lateralmente.

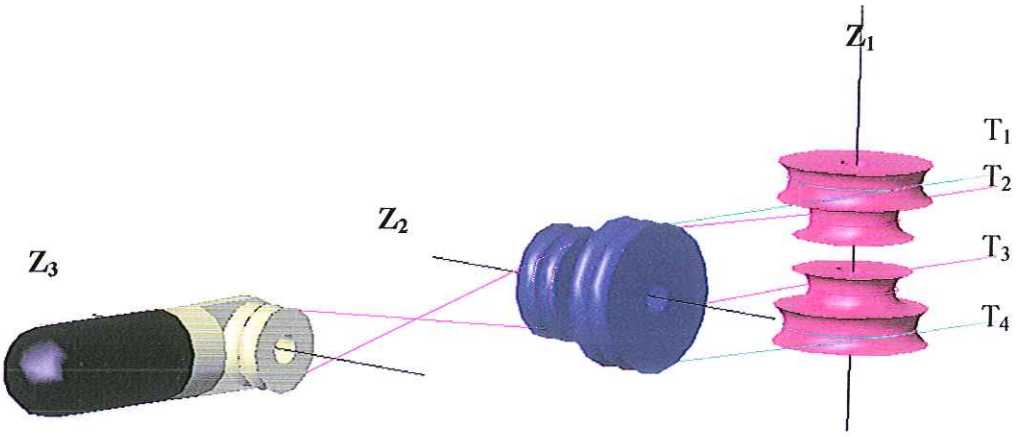


FIGURA 2.1.3 – Disposição dos cabos em um dos dedos

Para o melhor entendimento da construção do dedo são apresentadas nas FIGURAS 2.1.4 e 2.1.5 uma vista explodida e um vista completa em 3 D de um dedo da garra. Alguns dados como comprimento, material e massa das principais partes de todos os dedos da garra são apresentados na TABELA 2.1.

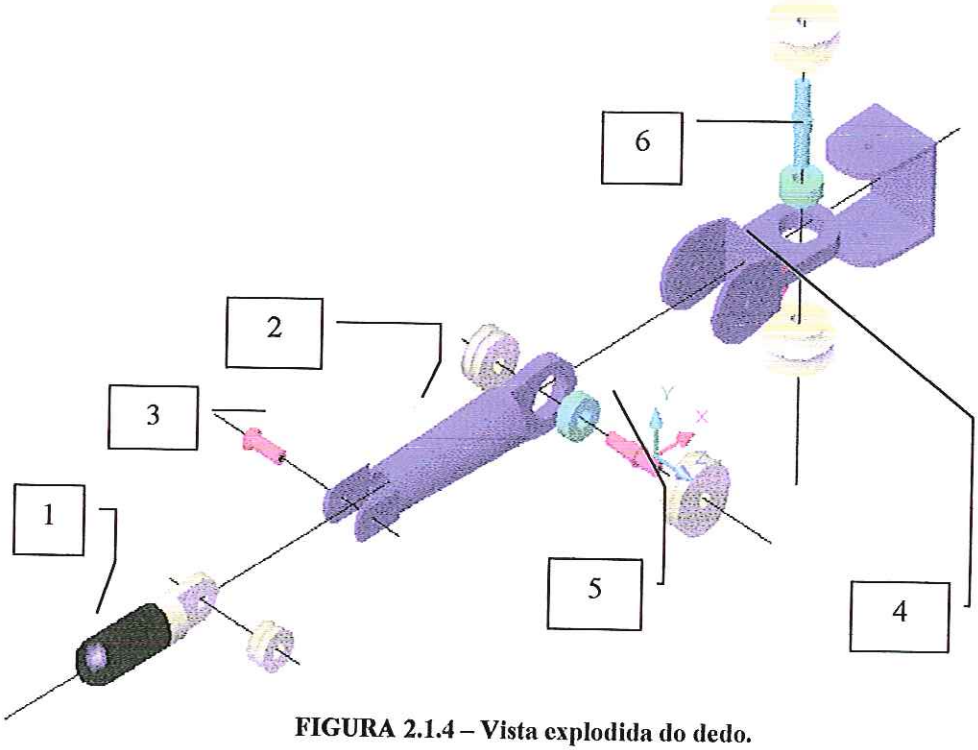


FIGURA 2.1.4 – Vista explodida do dedo.

TABELA 2.1 – Principais Dados dos Dedos da Garra

	Dedo Completo	Material	Massa(kg)	Comprimento (mm)
1	Ponta do Dedo	Nylon	0,01945	66
2	Primeiro Corpo	Alumínio	0,07093	100
3	Pino do Primeiro Corpo	Aço 1020		
4	Segundo Corpo	Alumínio	0,06490	40
5	Pino do Segundo Corpo	Aço 1020		
6	Pino Fixo	Aço 1020	0,04222	-

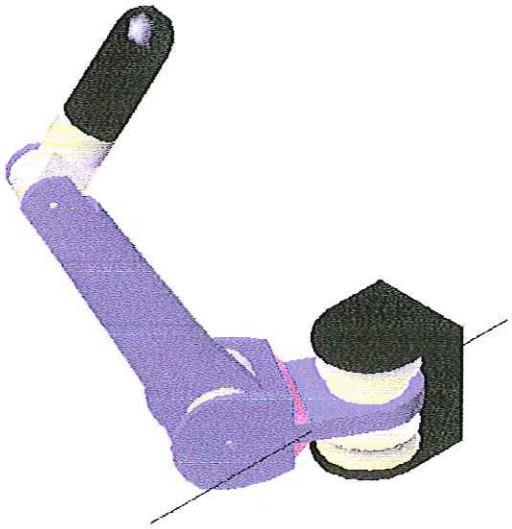


FIGURA 2.1.5 – Vista do dedo da Garra em 3D com seus ângulos deslocados.

3. *ANÁLISE CINEMÁTICA*

Cada dedo da Gausp "*Garra Antropomórfica da USP*" é formado de corpos rígidos unidos por juntas de revolução. A posição e orientação da ponta de cada dedo da garra é uma função da posição angular de cada uma de suas juntas, o mesmo ocorrendo com a velocidade e a aceleração da ponta do dedo, sendo as mesmas, uma função respectivamente, da velocidade e da aceleração de suas juntas.

Foi utilizada uma abordagem matricial para descrever a transformação de coordenadas de uma referência inercial até a ponta do dedo da garra (CRAIG, 1989). É apresentada na FIGURA 3.1 uma representação simplificada do dedo fixo a um sistema referencial de origem. Os pontos A, B e C representam as articulações, os vetores L1, L2 e L3 os corpos que compõem um dedo antropomórfico e ponto D a ponta do dedo da garra.

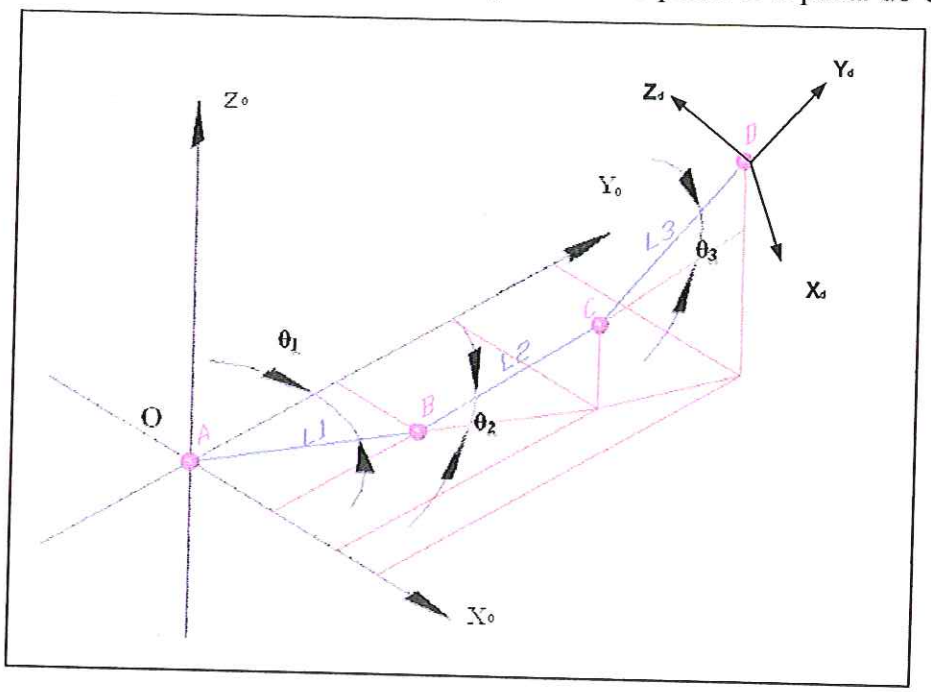


FIGURA 3.1 – Posicionamento e orientação do dedo

Sabe-se que a projeção e a orientação da ponta do dedo da garra no sistema de coordenadas de referência (X_0, Y_0, Z_0) é uma função dos deslocamentos angulares θ_1, θ_2 e θ_3, conforme descrito nas EQUAÇÕES 3.1 e 3.2.

$$\begin{bmatrix} PX \\ PY \\ PZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1.s(\theta_1) + L_2.c(\theta_2).\text{sen}(\theta_1) + L_3.c(\theta_2 + \theta_3).s(\theta_1) \\ L_1.c(\theta_1) + L_2.c(\theta_2).c(\theta_1) + L_3.c(\theta_2 + \theta_3).c(\theta_1) \\ L_2.s(\theta_2) + L_3.s(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
R_{11} &= c\theta_1 \\
R_{12} &= -s(\theta_1).c(\theta_2).c(\theta_3) + s(\theta_1).s(\theta_2).s(\theta_3) \\
R_{13} &= s(\theta_1).c(\theta_2).s(\theta_3) + s(\theta_1).s(\theta_2).c(\theta_3) \\
R_{21} &= s(\theta_1) \\
R_{22} &= c(\theta_1).c(\theta_2).c(\theta_3) - c(\theta_1).s(\theta_2).s(\theta_3) \\
R_{23} &= -c(\theta_1).c(\theta_2).s(\theta_3) - c(\theta_1).s(\theta_2).c(\theta_3) \\
R_{31} &= 0 \\
R_{32} &= s(\theta_2).c(\theta_3) + c(\theta_2).s(\theta_3) \\
R_{33} &= -s(\theta_2).s(\theta_3) + c(\theta_2).c(\theta_3)
\end{aligned}$$

Sendo:

PX, PY, PZ = Projeção da ponta do dedo no sistema de coordenadas de referência

R = Matriz de rotação do dedo

$s(\theta_i)$ = seno de θ_i

$c(\theta_{i,j})$ = co-seno de θ_i

A matriz de transformação do sistema da coordenadas *d* para o sistema de coordenadas *0* é:

$$ {}^{0}_{d}T = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & PX \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & PY \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & PZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.3} $$

O modelo cinemático diferencial relaciona as velocidades nas articulações com as velocidades na ponta do dedo da garra através da matriz Jacobiana. Esta matriz é uma forma derivativa multidimensional com seis funções e cada uma delas com três variáveis independentes para este caso.

$$ \begin{aligned} x &= f(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ y &= f(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ z &= f(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ \alpha &= f(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ \beta &= f(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ \gamma &= f(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \end{aligned} \tag{3.4} $$

Sendo:

α = ângulo que se forma entre os eixos X_0 e X_d

β = ângulo que se forma entre os eixos Y_0 e Y_d

γ = ângulo que se forma entre os eixos Z_0 e Z_d

Na forma vetorial (EQUAÇÃO 3.4) tem-se que:

$$ X = f(\theta) \tag{3.5} $$

Para se calcular o diferencial de θ_i como função do diferencial de X_i, utiliza-se a regra da cadeia de forma simplificada.

$$
\begin{aligned}
\delta x &= \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1}\delta\theta_1 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2}\delta\theta_2 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3}\delta\theta_3 \\
\delta y &= \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1}\delta\theta_1 + \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2}\delta\theta_2 + \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3}\delta\theta_3 \\
\delta z &= \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1}\delta\theta_1 + \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2}\delta\theta_2 + \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3}\delta\theta_3 \\
\delta \alpha &= \frac{\partial f_4}{\partial \theta_1}\delta\theta_1 + \frac{\partial f_4}{\partial \theta_2}\delta\theta_2 + \frac{\partial f_4}{\partial \theta_3}\delta\theta_3 \\
\delta \beta &= \frac{\partial f_5}{\partial \theta_1}\delta\theta_1 + \frac{\partial f_5}{\partial \theta_2}\delta\theta_2 + \frac{\partial f_5}{\partial \theta_3}\delta\theta_3 \\
\delta \gamma &= \frac{\partial f_6}{\partial \theta_1}\delta\theta_1 + \frac{\partial f_6}{\partial \theta_2}\delta\theta_2 + \frac{\partial f_6}{\partial \theta_3}\delta\theta_3
\end{aligned}
\tag{3.6}
$$

Podendo ser escrito também:

$$\delta X = \frac{\partial f}{\partial \theta}\delta\theta \tag{3.7}$$

A matriz de dimensão 6x3 das derivadas parciais representadas na EQUAÇÃO 3.7 é a matriz Jacobiana (J). Podendo ser escrita da seguinte forma:

$$\delta X = J(\theta)\delta\theta \tag{3.8}$$

Dividindo ambos os lados da EQUAÇÃO 3.8 pelo elemento diferencial de tempo, tem-se:

$$\dot{X} = J_1(\theta).\dot{\theta} \tag{3.9}$$

A Jacobiana é uma forma matricial de se representar os coeficientes das velocidades generalizadas, que expressam neste caso, seis funções, cada qual com três

variáveis independentes. Utilizando a Jacobiana a relação entre velocidades e acelerações podem ser expressas:

$$\dot{X}_i = J_i.\dot{\theta}_{i.j} \tag{3.10}$$

$$\ddot{X}_i = J_i.\ddot{\theta}_{i.j} + \dot{J}_i.\dot{\theta}_{i.j} \tag{3.11}$$

As EQUAÇÕES 3.10 e 3.11 representam a cinemática direta de um dos dedos da garra, onde as entradas são as velocidades ou acelerações angulares das articulações e a saída a velocidade ou aceleração da ponta do dedo da garra. Já as EQUAÇÕES 3.12 e 3.13 representam a cinemática inversa, tendo como entrada a velocidade ou aceleração na ponta do dedo da garra, as saídas são velocidades ou acelerações nas articulações.

$$\dot{\theta}_{i.j} = J_i^{-1}.\dot{X}_i \tag{3.12}$$

$$\ddot{\theta}_{i.j} = J_i^{-1}.\left(\ddot{X}_i - \dot{J}_i.\dot{X}_i\right) \tag{3.13}$$

As matrizes Jacobianas para os outros dois dedos da garra são calculadas da mesma forma como descrito para um dos dedos, sendo então a Jacobiana de todo o sistema expressa por:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

4. MODELAGEM DA GARRA

4.1 INTRODUÇÃO

Um Sistema Multicorpos (MBS) é definido como um sistema mecânico que possui dois ou mais corpos com vários graus de liberdade. Os movimentos de um MBS são governados por expressões matemáticas chamadas de equações dinâmicas. Estas equações são compostas por um conjunto de equações diferencias, eventualmente acrescido de algumas equações algébricas. As equações diferenciais são expressões das leis físicas (leis de movimento de Newton) que descrevem os movimentos dos corpos rígidos e as equações algébricas levam em consideração restrições impostas pela geometria do sistema ou de seus movimentos, tais como a ligação de dois corpos por juntas, ou mesmo características peculiares de contato entre dois corpos.

A obtenção das equações dinâmicas para sistemas mecânicos era realizada manualmente no passado. Entretanto, devido ao aumento da complexidade com o qual se deseja estudar os novos sistemas, este processo tornou-se trabalhoso e passível de erros. Pode ser particularmente difícil acomodar modificações de projeto, ou mesmo pequenas variações no modelo. Atualmente conta-se com programas para geração automática das equações de movimento de MBS.

O modelo para a simulação (ALBUQUERQUE, 2003) deste trabalho foi obtido usando-se um programa MBS numérico chamado ADAMS que possui rotinas para a geração das equações e para a solução do sistema (ADAMS/Solver). Este programa possui aplicativos de pré e pós-processamento (ADAMS/View). Estas ferramentas facilitam a criação do modelo da garra e a posterior simulação com análise e apresentação gráfica dos resultados.

4.2 FORMALISMO MATEMÁTICO

A modelagem dinâmica da GAUSP consiste em encontrar a relação entre forças exercidas nos dedos da garra e as posições, velocidades e acelerações das articulações. O modelo dinâmico pode ser derivado usando a formulação de Lagrange. Uma vez que as variáveis q_i constituem um conjunto de coordenadas generalizadas de um dos dedos da garra, as equações de movimento segundo Lagrange (PHAM, 1999) podem ser escritas como:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = T_i, \qquad i = 1,2,3 \tag{4.1}$$

onde

$$L = K - U \tag{4.2}$$

é o Lagrangeano dado pela diferença entre a energia cinética e energia potencial, e T_i é a força generalizada na articulação i; no caso de juntas de revolução o que se têm são torques.

A energia cinética está na forma quadrática das velocidades das articulações:

$$K = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} \tag{4.3}$$

onde a matriz $M(q)$ é a matriz de inércia dos dedos da garra, sendo simétrica, positiva e quadrada. Substituindo a equação 4.3 na 4.2 e obtendo as derivadas necessárias por 4.1 conduz a equação de movimento (BONITZ, 2002 e PHAM, 1999):

$$T = M(q)\ddot{q} + V_i(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) \tag{4.4}$$

onde T neste caso é o vetor de torque das articulações, $g(q)$ é o vetor de torques gravitacionais:

$$g_i(q) = \frac{\partial U}{\partial q_i}, \tag{4.5}$$

e

$$V(q,\dot{q})\dot{q} = \dot{M}(q,\dot{q})\dot{q} - \frac{1}{2}\left(\frac{\partial}{\partial q}\left(\dot{q}^T M(q)\dot{q}\right)\right)^T \tag{4.6}$$

é o vetor de torque de Coriolis e Centrípeta.

Com respeito ao torque nas articulações, cada articulação é acionada por um atuador; em geral, as seguintes contribuições do torque aparecem:

$$T_i = \tau_i - \tau_{fi} - \tau_{ei} \tag{4.7}$$

onde τ_i é o torque de acionamento da articulação, τ_{fi} é o torque devido ao atrito na articulação, e τ_{ei} é o torque causado pelas forças externas das pontas dos dedos da garra.

Adotou-se um modelo de atrito simplificado, considerando somente os efeitos de viscosidade:

$$\tau_f = C\dot{q} \tag{4.8}$$

onde C é uma matriz diagonal positiva dos coeficientes de atrito viscoso da articulação. Modelos mais complexos podem incluir fenômenos não lineares como atrito de Coulomb e efeitos de folga.

Adotando F como um vetor de força gerado pela ponta do dedo da garra e aplicando o princípio dos trabalhos virtuais, tem-se:

$$\tau_e = J^T(q)F \tag{4.9}$$

onde J é a matriz Jacobiana definida em EQUAÇÃO 3.2

Utilizando 4.7, 4.8 e 4.9, o modelo dinâmico pode se escrito da seguinte forma:

$$M(q)\ddot{q} + V_i(q,\dot{q})\dot{q} + C\dot{q} + g(q) = \tau - J^T(q)F \tag{4.10}$$

4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A estratégica adotada para desenvolver as equações pode ser resumida pelas seguintes etapas:

A. Corpos Rígidos
   a. Uso de seis coordenadas para descrever o posicionamento de cada corpo rígido.
   b. Representação dos termos inerciais em função de 6 deslocamentos, 6 velocidades e 3 quantidades de movimento angulares.

B. Restrições de Configuração
   a. Adição de equações para cada tipo de restrição.
   b. Atualização das equações de equilíbrio de forças com forças de restrições (forças generalizadas).

C. Forças
   a. Definição de equações auxiliares para cada tipo de força extema aplicada.
   b. Atualização das equações de equilíbrio de forças com as forças externas aplicadas.

As equações de movimento obtidas são equações diferenciais não-lineares de segunda ordem, cuja variável independente é o tempo. Para resolvê-las adota-se um integrador numérico denominado GSTIFF, do qual é o mais utilizado e testado integrador do ADAMS. O GSTIFF é um integrador de ordem e passo variado e, muti-passos com

ordem máxima de integração igual a seis, com o intervalo de integração h variável e limitado ao inverso da mais alta freqüência ativa do mecanismo.

4.4 INTEGRADOR

Existem dois tipos de integradores no ADAMS para resolver as equações de movimento e de restrições dos sistemas modelados, os rígidos (stiff) e os não rígidos (non-stiff). Um integrador rígido é aquele que pode manipular numericamente sistemas de corpos rígidos. Já o integrador não rígido é mais eficiente para a manipulação numérica de corpos flexíveis.

Para integradores rígidos como é o caso do GSTIFF, usado no presente trabalho, o passo de integração é limitado ao inverso da maior freqüência ativa do sistema. Para os não rígidos o passo de integração é limitado ao inverso da maior freqüência, ativa ou não do sistema.

Devido ao fato de muitos sistemas mecânicos serem considerados corpos rígidos, o integrador padrão do ADAMS é GSTIFF, um integrador rígido que é baseado no trabalho de GEAR, D, W (1971). Todos os integradores rígidos do ADAMS são baseados no BDF "*Backward Difference Formulate*" e integradores multi-passos. A solução para estes integradores ocorre em duas fases: uma predição seguida de uma correção.

A solução para as equações dinâmicas geradas é obtida através de algoritmos que utilizam a técnica conhecida como Predictor-Corrector. Esta técnica prediz a solução em um ponto futuro no tempo através de funções polinomiais que utilizam soluções já computadas de pontos anteriores no tempo e realizam a extrapolação. A solução é uma aproximação e geralmente deve ser melhorada ou corrigida de modo a satisfazer uma especificação desejada de tolerância.

O Predictor é um processo explícito no qual somente valores passados são considerados e, é baseado na premissa de que os valores passados são bons indicadores para que valores correntes sejam computados. Não há garantia que o valor previsto satisfaça as equações de movimento e de restrições. É simplesmente um valor sugerido para se iniciar a correção, do qual se garante que as equações governantes sejam satisfeitas.

As fórmulas do corretor (Corrector) são um ajuste implícito de relações de diferença (BDFs), isso relaciona a derivada dos estados no momento atual com os valores de seus estados. Esta relação transforma as equações diferenciais não lineares em um ajuste não linear, algébrico de equações de diferença dos estados do sistema. O integrador de Euler é um exemplo de um BDF de primeira-ordem. Dada as equações diferencias ordinárias da forma $\frac{dy}{dt} = f(y,t)$, o integrador de Euler utiliza a relação de diferença:

$$y_{n+1} = y_n + h\dot{y}_{n+1} \tag{4.11}$$

Onde:

y_n é a solução calculada em $t = t_n$

h é a tamanho do passo sendo utilizado

y_{n+1} é a solução em t_{n+1}, da qual está sendo computada

Note que $n+1$ está em ambos os lados da EQUAÇÃO 4.11. Isto é um método implícito.

O ADAMS utiliza um algoritmo iterativo de Newton-Raphson para resolver as equações de diferença e obter os valores de variáveis de estado. Este algoritmo assegura que os estados do sistemas satisfaçam as equações de movimento e restrição. As iterações de Newton-Raphson requerem uma matriz de derivadas parciais das equações que são resolvidas com relação às variáveis de solução. Esta matriz, conhecida como matriz Jacobiana é utilizada a cada iteração para calcular as correções dos estados.

Assume-se que as equações de movimento têm agora a seguinte forma:

$$F(y,\dot{y},t) = 0 \tag{4.12}$$

Onde y representa todos os estados do sistema.

A linearização da EQUAÇÃO 4.12 sobre um operacional $y = y^k$ e $\dot{y} = \dot{y}^k$ dado:

$$F(y,\dot{y},t) = F(y^k,\dot{y}^y,t) + \left.\frac{\partial F}{\partial y}\right|_{y^k,\dot{y}^k}\left(y - y^k\right) + \left.\frac{\partial F}{\partial \dot{y}}\right|_{y^k,\dot{y}^k}\left(\dot{y} - \dot{y}^k\right) = 0$$

substituindo $y - y^k$ com Δy, se obtém:

$$F\left(y^k,\dot{y}^k,t\right) + \left.\frac{\partial F}{\partial y}\right|_{y^k,\dot{y}^k}\left(\Delta y\right) + \left.\frac{\partial F}{\partial \dot{y}}\right|_{y^k,\dot{y}^k}\left(\Delta \dot{y}\right) = 0 \tag{4.13}$$

Da equação BDF de primeira ordem (EQUAÇÃO 4.11), pode-se obter a seguinte relação:

$$\Delta \dot{y} = \frac{1}{h}\Delta y \tag{4.14}$$

Substituindo a equação 4.14 na EQUAÇÃO 4.13, se obtém:

$$\left[\left.\frac{\partial F}{\partial y}\right|_{y^k,\dot{y}^k} + \frac{1}{h}\left.\frac{\partial F}{\partial \dot{y}}\right|_{y^k,\dot{y}^k}\right]\Delta y = -F\left(y^k,\dot{y}^k,t\right) \tag{4.15}$$

Uma generalização da EQUAÇÃO 4.15 para BDFs de ordem maior, é dado por:

$$\left[\left.\frac{\partial F}{\partial y}\right|_{y^k,\dot{y}^k} + \frac{1}{h\beta_0}\left.\frac{\partial F}{\partial \dot{y}}\right|_{y^k,\dot{y}^k}\right]\Delta y = -F\left(y^k,\dot{y}^k,t\right) \tag{4.16}$$

Onde:

β_0 é uma função de ordem de integração

A matriz do lado esquerdo da equação 4.16 é a matriz Jacobiana de F

Δy são as correções

F é o resíduo das equações

A convergência do corretor ocorre quando o resíduo F e as correções Δy vão se tornando cadê vez menores.

Depois que o corretor tenha convergido para uma solução, o integrador estima o erro de integração local na solução. Este é normalmente uma função da diferença entre o valor previsto e o valor corrigido, o tamanho do passo, e a ordem do integrador. Se o erro calculado é maior que o erro de integração especificado, o integrador rejeita a solução e dá um passo de tempo menor. Se o erro calculado é menor que o erro de integração local especificado, o integrador aceita a solução e dá um passo de tempo novo. O integrador repete o processo estimação Prediction/Correction do erro até alcançar o tempo especificado dentro do comando de simulação imposto pelo usuário.

A premissa para o uso do Predictor como uma suposição inicial para o Corrector é violada severamente quando descontinuidades acontecem ou quando grandes forças forem impostas ao modelo. Exemplos destes fenômenos são: contatos, atrito e estados de transição. Nestes casos, é necessária uma certa experiência do usuário para minimizar os erros de integração alterando a ordem e o passo de integração referente à ordem do polinômio usado para a solução.

4.4 MODELAGEM DOS ELEMENTOS ELÁSTICOS

Neste trabalho, os elementos elásticos do sistema foram atribuídos através das deformações nos cabos de aço, sendo desprezada qualquer outra eventual deformação que possa haver nas articulações ou mesmo nas pontas dos dedos da garra.

Os elementos elásticos formam modelados como uma função da diferença entre os deslocamentos angulares dos eixos dos motores e as articulações dos dedos da garra e, da taxa de variação destes mesmos deslocamentos. A EQUAÇÃO 4.17 apresenta o modelo matemático que representa o torque nas articulações como função da rigidez e do amortecimento dos elementos elástico:

$$T = K(\theta_m - \theta) + C(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}) \tag{4.17}$$

Sendo:

T_i = Vetor de torques nas articulações

K_i = Vetor de Rigidez

C = Vetor de coeficientes de amortecimento

θ = Vetor dos ângulos das articulações

θ_m = Vetor dos ângulos dos motores

Deduzindo os parâmetros de rigidez e amortecimento da EQUAÇÃO 4.17, tem-se que:

$$F = kx + c\dot{x} \tag{4.18}$$

Substituindo x por $\theta.R$, tem-se que:

$$F = k\theta R + c\dot{\theta}R \tag{4.19}$$

Multiplicando todos os termos por R, fica:

$$T = k\theta R^2 + c\dot{\theta}R^2 \tag{4.20}$$

Substituindo kR^2 por K, e $c\dot{\theta}R^2$ por C tem-se que:

$$T = K\theta + C\dot{\theta} \tag{4.21}$$

Para uma melhor interpretação das equações acima, é apresentada uma figura ilustrativa (FIGURA 4.4.1) de uma articulação de um dedo da garra.

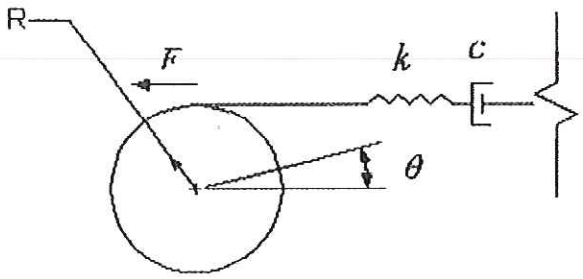


FIGURA 4.4.1 – Figura ilustrativa da rigidez e amortecimento no cabo de uma articulação da garra

Sendo k e c respectivamente a rigidez o amortecimento do cabo e, K e C os parâmetros da função da EQUAÇÃO 4.21.

Os valores da rigidez e do amortecimento foram estimados através de testes experimentais (FIGURA 4.4.2), realizados em cada junta em separado aplicando restrições às outras. Tais testes foram realizados introduzindo forças em cada um dos elementos que compõem o dedo através de um excitador eletrodinâmicos. Foram medidas as forças de entrada e as acelerações de saída, encontrando as funções de resposta em freqüências em cada articulação para um determinado ajuste de tensões nos cabos (condição de contorno).

Adicionalmente ao escopo do trabalho, foi observado através dos efeitos dinâmicos do dedo em função da tração aplicada aos cabos que quanto maior a tração, maior será a rigidez e, conseqüentemente, a freqüência natural de cada articulação. Um aumento similar foi observado para o amortecimento.

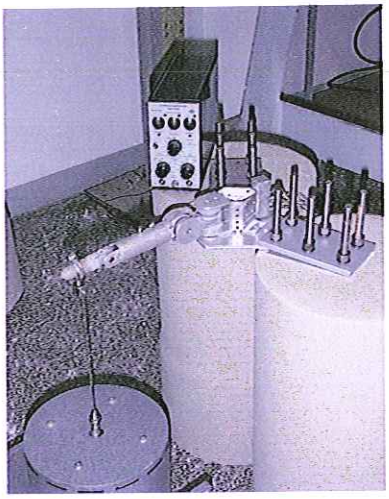
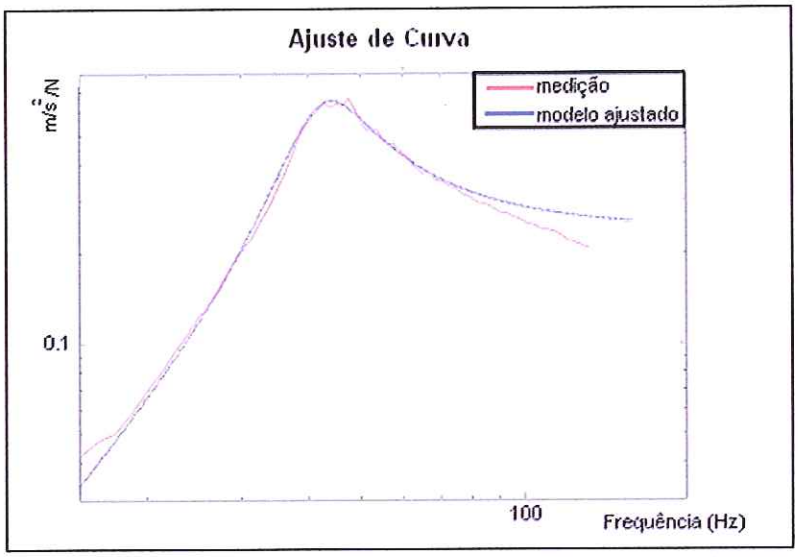


FIGURA 4.4.2 – Foto do experimento utilizado para se estimar os valores de rigidez e amortecimento dos cabos

Utilizando um método de ajuste de curvas (FIGURA 4.4.3) aplicado à resposta em freqüência do experimento, extraiu-se de forma aproximada os valores de rigidez e amortecimento das articulações.



$$K = 25.000 \frac{N.mm}{rad}$$

$$C = 500 \frac{N.mm}{rad/s}$$

FIGURA 4.4.3 – Resultado do método de ajuste de curva aplicado a uma articulação

5 CONTROLE DE POSIÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo encontrar um método para se controlar as posições angulares das articulações de um dedo da garra. Para tanto, utiliza-se a técnica de co-simulação, combinando duas ferramentas diferentes, uma de simulação de sistemas mecânicos (ADAMS) e outra de projeto de controle (MatLab/Simulink).

Inicialmente é apresentado um procedimento para se desenvolver um controle PID adaptativo (com ganhos variáveis) baseado numa análise do comportamento dinâmico em malha fechada do modelo de um dos dedos da GAUSP em diferentes configurações de trabalho, aplicando em seguida o método de (ZIEGLER-NICHOLS, 1942) para se obter os valores dos ganhos adaptativos do controle e, por fim, os resultados do controle PID proposto são apresentados.

5.2 CONTROLADOR PID

Este tipo de controlador possui um bom desempenho desde que o sistema a controlar seja conhecido, bem comportado (linear e invariante no tempo) e os parâmetros do controlador bem ajustados. A sua principal limitação derivada do procedimento de ajuste é ser sensível às diferentes condições de funcionamento (configurações de trabalho). Nesta situação, a utilização de um controlador adaptativo com ganhos variáveis é vantajosa.

Para se implementar o controlador proposto neste projeto de pesquisa, foi realizado durante esta etapa de pesquisa um estudo inicial de um controlador PID com ganhos variáveis (é realizada uma tabela de ganhos em função de suas principais configurações inerciais). Isto se deve ao fato de que numa garra antropomôrfica, durante a execução de uma determinada trajetória, apresentará uma grande variação de seus parâmetros geométricos e dinâmicos (termos inerciais, coeficientes de atrito, efeitos gravitacionais), acarretando na mudança dos parâmetros do controlador projetado em função de sua configuração inercial.

É apresentado a seguir o método utilizado na determinação dos valores utilizados no controlador PID.

5.3 PROJETO DE UM CONTROLADOR DE POSIÇÃO PID ADAPTATIVO

O procedimento para cálculo dos ganhos do PID será aplicado em cada junta, para diferentes configurações inerciais, considerando o efeito da inércia equivalente no eixo de rotação do motor.

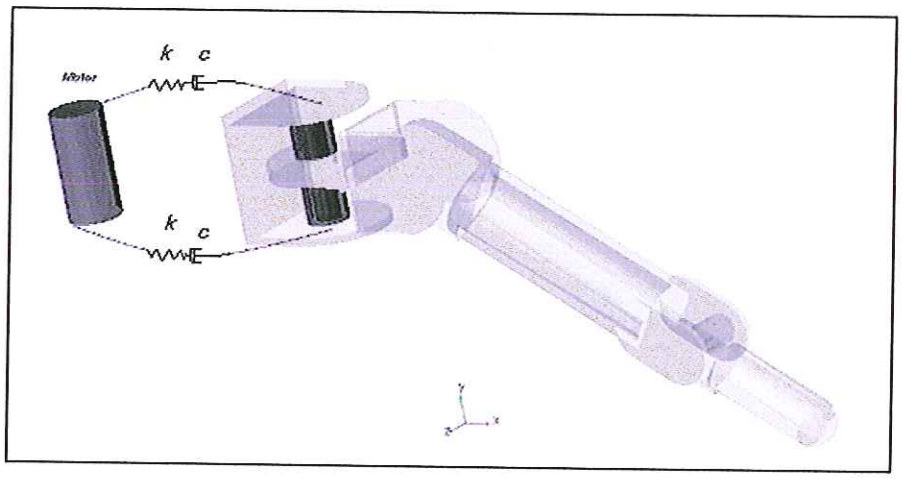


FIGURA 5.3.1 – Modelo de um dos dedos da garra antropomórfica GAUSP. Através das polias os cabos conectam os motores às articulações. Na figura um par de polias é evidenciado por uma cor mais escura.

Para o cálculo dos ganhos do PID, o sistema não linear é analisado em diferentes configurações inerciais. Através de simulações variou-se progressivamente o ângulo de trabalho de um dos dedos da garra (FIGURA 5.3.2) e analisou-se o comportamento dinâmico em malha fechada (FIGURA 5.3.3) de cada articulação do dedo associada a um controle proporcional.

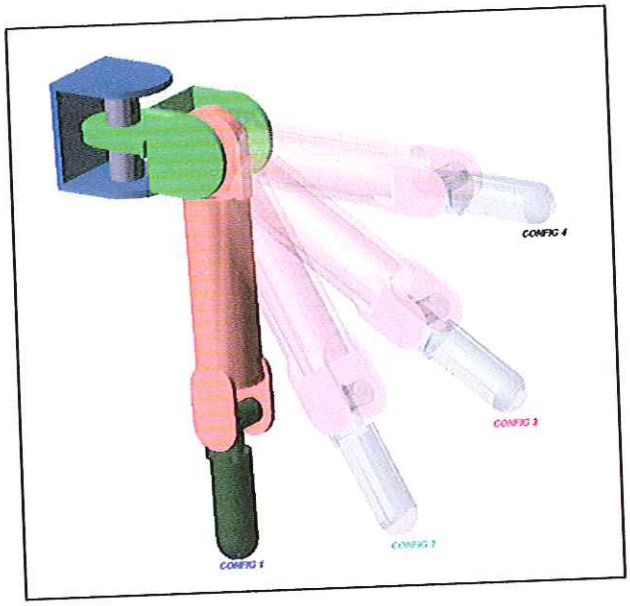


FIGURA 5.3.2 – Modelo do dedo em diferentes configurações de trabalho

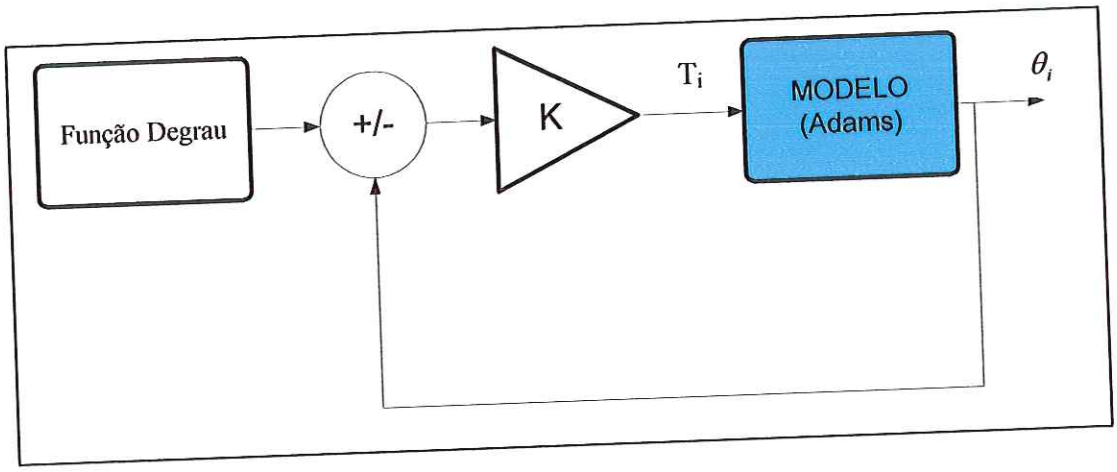


FIGURA 5.3.3 – Esquema da co-simulação entre o Adams e o Simulink. No diagrama, o bloco em azul representa o modelo não linear do dedo da garra produzido pelo Adams

Os ganhos do seguidor PID para diferentes configurações inerciais serão calculados e validados a partir de simulação computacional, utilizando um método (ZIEGLER-NICHOLS, 1942) baseado na otimização do comportamento da resposta do sistema.

A FIGURA 5.3.3 mostra na forma de diagrama de blocos o sistema do qual se deseja calcular os ganhos do regulador PID. Tomando o torque no motor como a entrada do sistema e o ângulo na articulação como a saída.

A equação do regulador é dada por:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{5.2}$$

Onde:

Kp = ganho proporcional

Ki = ganho integral

Kd = ganho derivativo

O método de Ziegler-Nichols utilizado para o cálculo dos ganhos do compensador, consiste em dois passos:

1. Um compensador proporcional é aplicado:

$$G_c(s) = K_p \tag{5.3}$$

O ganho é ajustado até o sistema tornar-se marginalmente estável. Este valor de ganho é denominado *Kpo*, e o período de oscilação *To*.

2. O compensador é definido por:

$$G_c(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \tag{5.4}$$

Onde teremos:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{5.5}$$

$$K_d = K_p T_d$$

Os valores para o cálculo dos ganhos do compensador são dados pela TABELA 5.3.1:

TABELA 5.3.1: Ganhos do compensador PID (ZIEGLER-NICHOLS, 1942)

Tipo de compensador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5.K_{P0}$	∞	0
PI	$0,45.K_{P0}$	$0,83.T_0$	0
PID	$0,6.K_{P0}$	$0,5.T_0$	$0,125.T_0$

5.4 *ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA NATURAL EM MALHA FECHADA*

Aplicando o procedimento descrito na seção 3.3 para cada articulação em diferentes configurações de trabalho (FIGURA 5.3.2). As variações dos períodos de oscilações, ou, das freqüências (inverso dos períodos de oscilações) podem ser observadas nas FIGURAS 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3.

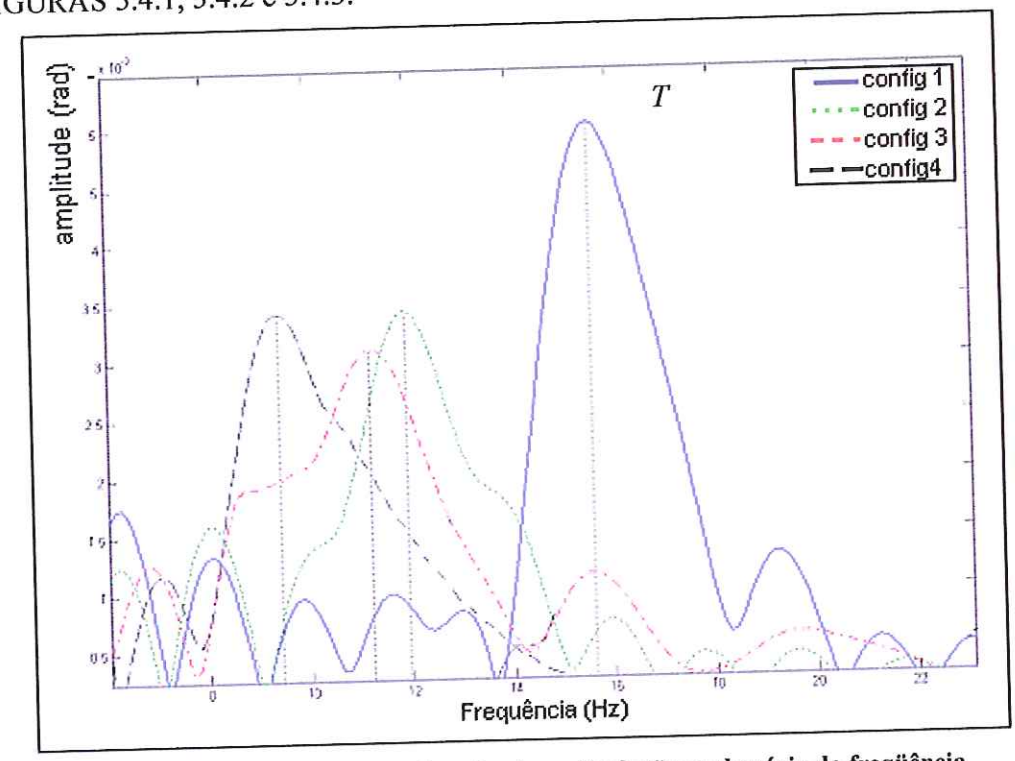


Figura 5.4.1 – Resposta angular da primeira articulação no domínio da freqüência variando a configuração de trabalho de 30 em 30 graus

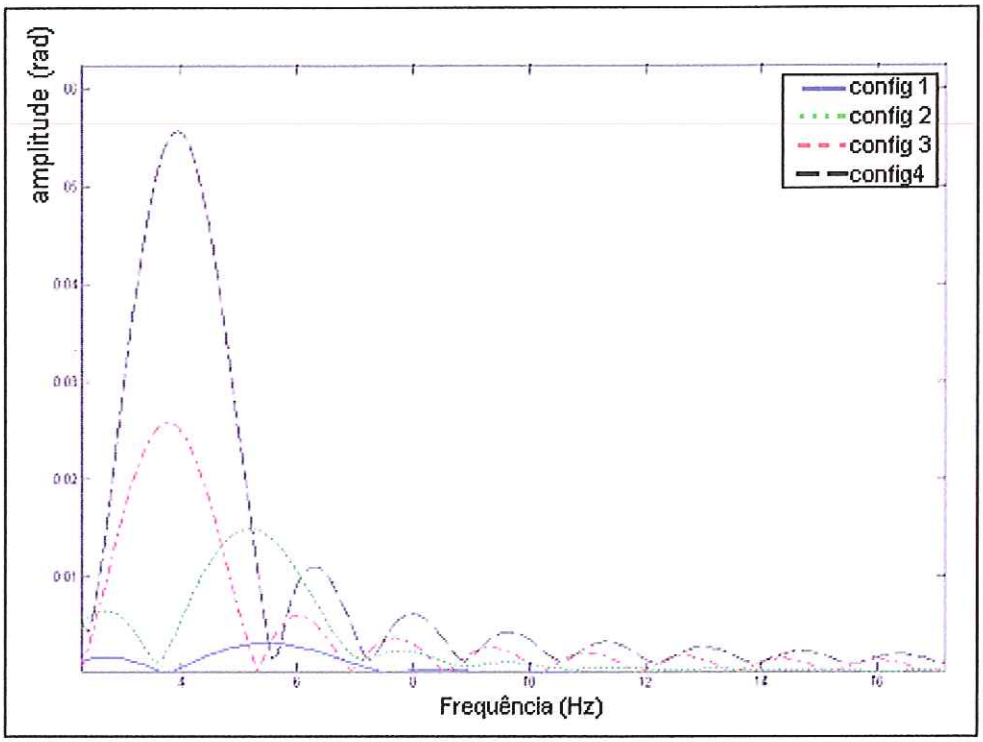


Figura 5.4.2 – Resposta angular da segunda articulação no domínio da freqüência variando a configuração de trabalho de 30 em 30 graus

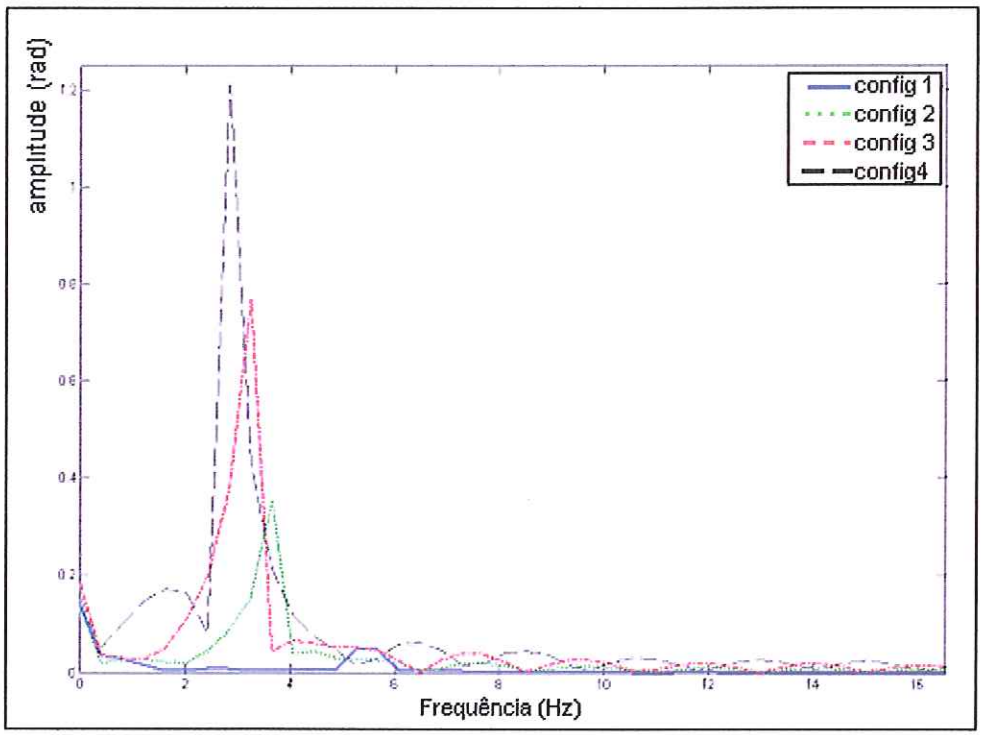


Figura 5.4.3 – Resposta angular da terceira articulação no domínio da freqüência variando a configuração de trabalho de 30 em 30 graus

Os parâmetros (freqüência, Kp_0) podem ser observados na TABELA 5.4.1.

TABELA 5.4.1 – Valores dos parâmetros para cada configuração de trabalho

	Articulação 1		Articulação 2		Articulação 3	
Config	K_{p0}	Freq.(Hz)	K_{p0}	Freq.(Hz)	K_{p0}	Freq.(Hz)
1	1150	15,7	105	5,7	12,4	5,65
2	1480	11,9	102	5	12,3	3,8
3	1700	11,65	95	3,7	12,15	3,6
4	1841	8,75	94	3,65	11,9	3,4

5.5 *CRIAÇÃO DO ALGORITMO*

Para descrever a variação da freqüência em função da configuração (ângulo) de trabalho do dedo é desenvolvido um algoritmo por meio de aproximação polinomial. Esta escolha se deve ao fato dos polinômios serem de fácil manipulação matemática, sendo sua implementação computacional simples e eficiente. Neste caso particular a utilização de quatro pontos para aproximação se mostra suficiente.

Quando se tem uma função dada por $n+1$ pares de pontos $(x_0, f_0),(x_1, f_1)...,(x_n, f_n)$, onde $fi = h(xi)$; $i = 0,1,...n$, com $n+1$ pontos $x_0, x_1,..., x_n$, distintos.

Procura-se determinar um polinômio com coeficientes reais com grau no máximo $m(m \leq n)$ $Pm(x) = a_0 + a_1x^1 + ... + a_mx^m$ e tal que:

$Q = \|f - Pm\|$; (Eq.1) seja mínimo.

Usando a definição de produto escalar:

$$(h, g) = \sum_{k=0}^{n} h(x_k).g(x_k)$$

$$Q = \|h - P_m\|^2 = (h - P_m, h - P_m) = \sum_{k=0}^{n} [h(x_k) - Pm(x_k)]^2 = \sum_{k=0}^{n} (f_k - Pm(x_k))^2$$

EESC-USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

Definindo:

$$f = \begin{pmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_n \end{pmatrix} \quad \text{e} \quad P = \begin{pmatrix} P_m(x_0) \\ P_m(x_1) \\ P_m(x_2) \\ P_m(x_n) \end{pmatrix} \quad \text{onde } f \text{ e } P \text{ são vetores de } R^{n+1}$$

Por outro lado:

$$P = a_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + a_1 \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_n \end{pmatrix} + a_2 \begin{pmatrix} x_0^{\ 2} \\ x_1^{\ 2} \\ x_2^{\ 2} \\ x_n^{\ 2} \end{pmatrix} + \ldots + a_m \begin{pmatrix} x_0^{\ m} \\ x_1^{\ m} \\ x_2^{\ m} \\ x_n^{\ m} \end{pmatrix}$$

Escrevendo:

$$\theta_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad \theta_i = \begin{pmatrix} x_0^{\ i} \\ x_1^{\ i} \\ x_2^{\ i} \\ x_n^{\ i} \end{pmatrix}, \quad i = 1,2,\ldots,m$$

Temos então:

$$P = a_0.\theta_0 + a_1.\theta_1 + \ldots + a_m.\theta_m$$

Como $x_0, x_1, \ldots, x_m$, são distintos, então $\theta_0, \theta_1, \ldots, \theta_m$ são linearmente independentes.

Os coeficientes $a_0, a_1, \ldots, a_m$ do polinômio procurado são dados pelo sistema:

$$\begin{pmatrix} (\theta_0,\theta_0) & (\theta_1,\theta_0) & \ldots & (\theta_m,\theta_0) \\ (\theta_0,\theta_1) & (\theta_1,\theta_1) & \ldots & (\theta_m,\theta_1) \\ (\theta_0,\theta_2) & (\theta_1,\theta_2) & \ldots & (\theta_m,\theta_2) \\ (\theta_0,\theta_m) & (\theta_0,\theta_m) & \ldots & (\theta_m,\theta_m) \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ . \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (f_0,\theta_0) \\ (f_1,\theta_1) \\ . \\ (f_m,\theta_m) \end{pmatrix}$$

$\theta.a = F \longrightarrow \quad a = \theta^{-1}.F$ onde, θ^{-1} é a matriz inversa, assim obtemos os coeficientes do polinômio que melhor se aproxima dos pontos dados.

A escolha de quatro pontos de aproximação foi suficiente pelo fato do parâmetro do termo cúbico do polinômio ser muito próximo de nulo, como pode ser observado nas respostas dos polinômios abaixo:

$$f_1 = 15{,}7 - 2{,}547.10^{-1}.\theta_2 + 5{,}416.10^{-3}.\theta_2^{\ 2} - 3{,}827.10^{-5}.\theta_2^{\ 3}$$

$$f_2 = 5{,}7 + 7{,}22.10^{-3}.\theta_2 - 1{,}36.10^{-3}.\theta_2^{\ 2} + 1{,}14.10^{-5}.\theta_2^{\ 3}$$

$$f_3 = 5{,}65 - 1{,}075.10^{-1}.\theta_2 + 1{,}833.10^{-3}.\theta_2^{\ 2} + 1{,}018.10^{-5}.\theta_2^{\ 3}$$

$$K_{p01} = 1150 + 13.177.\theta_2 - 7{,}83.10^{-2}.\theta_2^{\ 2} + 1{,}913.10^{-4}.\theta_2^{\ 3}$$

$$K_{p02} = 105 + 7{,}78.10^{-2}\theta_2 - 7{,}8.10^{-3}.\theta_2^{\ 2} + 6{,}1.10^{-5}.\theta_2^{\ 3}$$

$$K_{p03} = 12.4 - 3{,}05.10^{-3}\theta_2 - 3{,}08.10^{-7}.\theta_2^{\ 3}$$

Sendo:

f_i = Resposta em freqüência do sinal oscilatório, denominada de freqüência natural em malha fechada

K_{p0i} = Ganho

5.6 *ANÁLISE DE RESULTADOS DA APROXIMAÇÃO POLINOMIAL*

Analisando os resultados das articulações constata-se que com o aumento do ângulo de trabalho (articulação 2), ocorre uma diminuição da freqüência do sistema em todas as articulações (FIGURA 5.6.1, 5.6.2 e 5.6.3). Isto significa um aumento dos períodos de oscilações para um aumento do ângulo de trabalho.

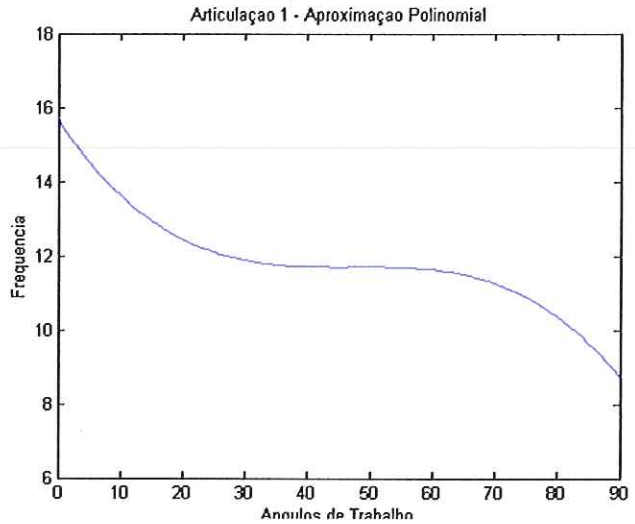


FIGURA 5.6.1 – Resposta da aproximação polinomial da freqüência (articulação 1)

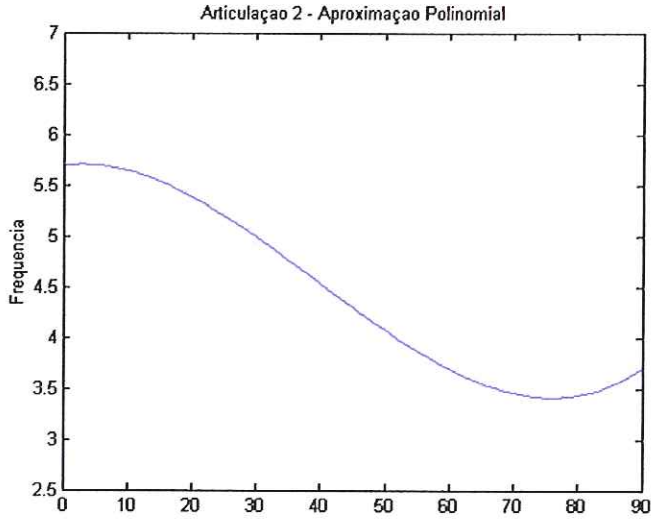


FIGURA 5.6.2 – Resposta da aproximação polinomial da freqüência (articulação 2).

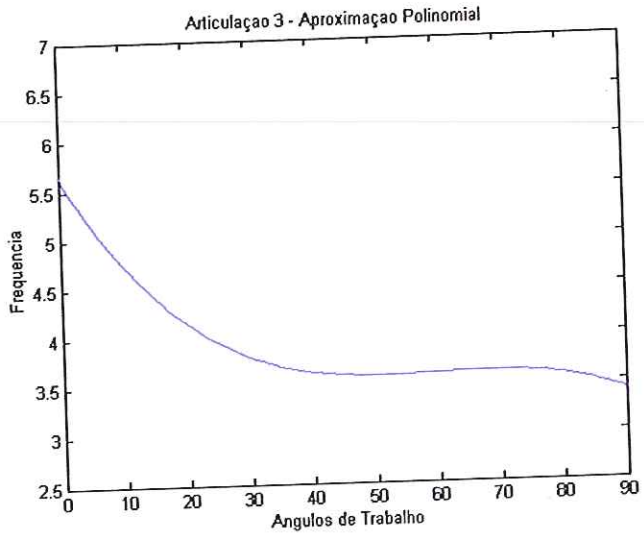


FIGURA 5.6.3 – Resposta da aproximação polinomial da freqüência (articulação 3)

Analisando os ganhos K_{p0}, observa-se um significativo aumento dos mesmos para a primeira articulação (FIGURA 5.6.4) e uma diminuição para as demais articulações (FIGURA 5.6.5 e FIGURA 5.6.6).

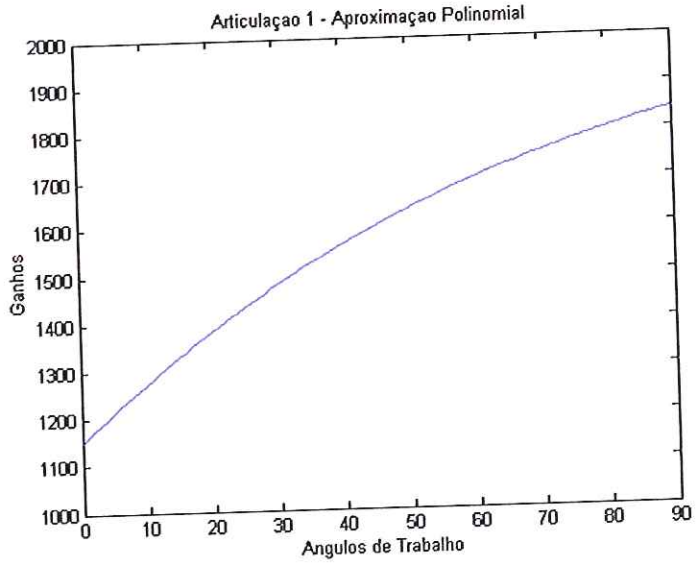


FIGURA 5.6.4 – Resposta da aproximação polinomial do ganho K_{p0} (articulação 1)

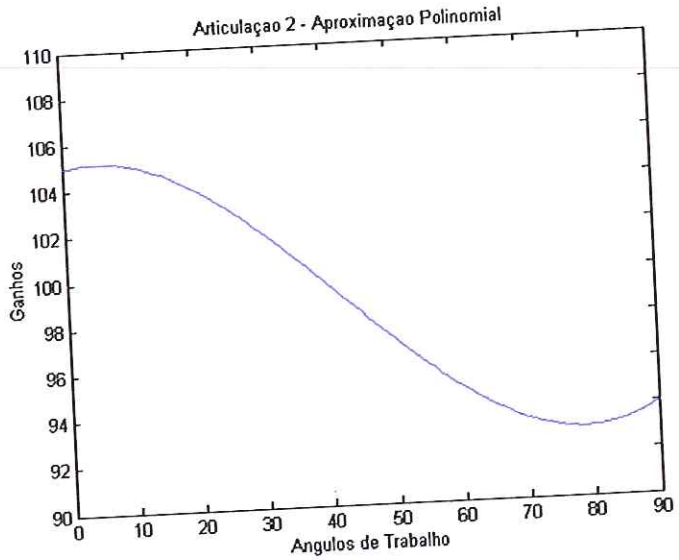


FIGURA 5.6.5 – Resposta da aproximação polinomial do ganho K_{p0} (articulação 2)

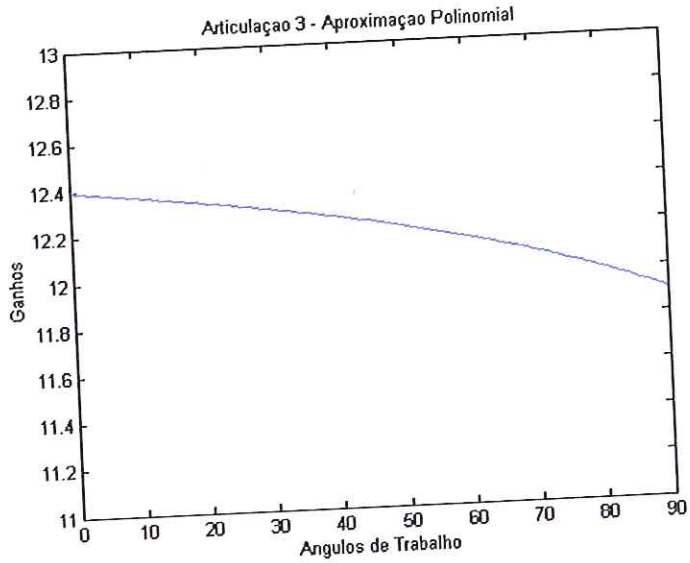


FIGURA 5.6.6 – Resposta da aproximação polinomial do ganho K_{p0} (articulação 3)

5.7 *RESULTADOS DO CONTROLADOR PID ADAPTATIVO*

Uma vez descrita a variação dos parâmetros, o controlador PID adaptativo é implementado. Os gráficos a seguir apresentados às respostas dos deslocamentos e velocidades angulares nas articulações do dedo e torques nos acionadores para uma entrada degrau de 0,3 radiano após o primeiro décimo de segundo da simulação.

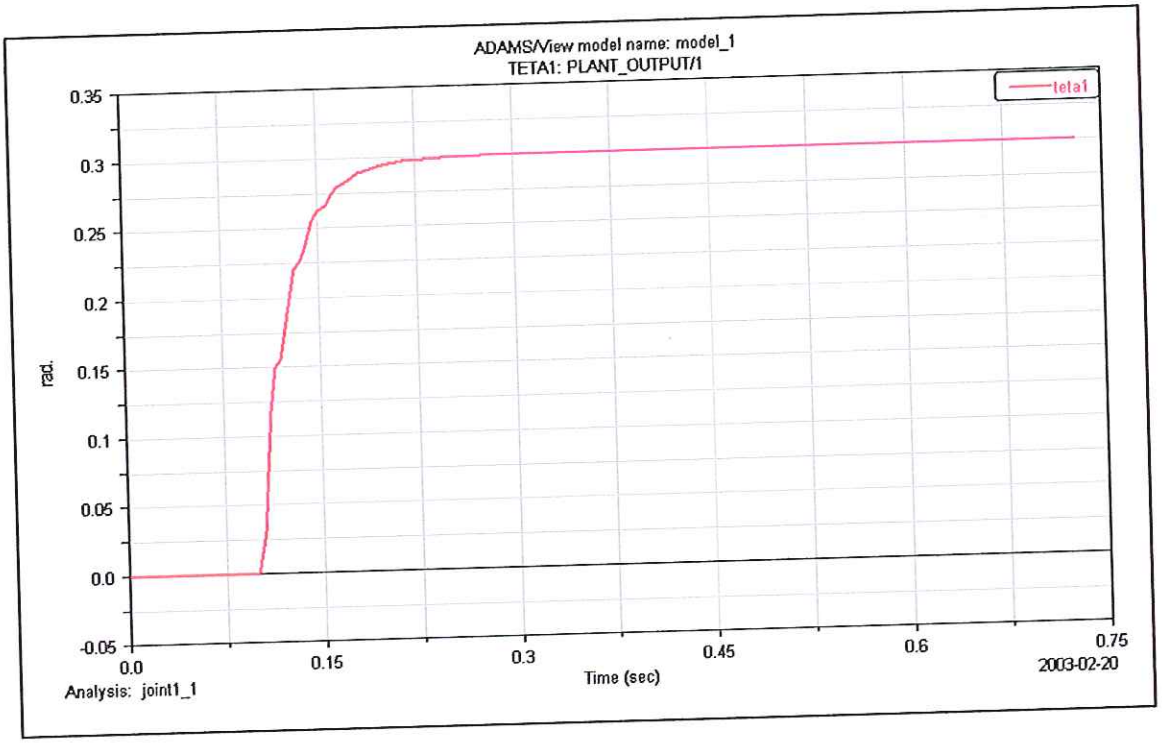


FIGURA 5.7.1 – Resposta da posição angular para uma entrada degrau na articulação 1

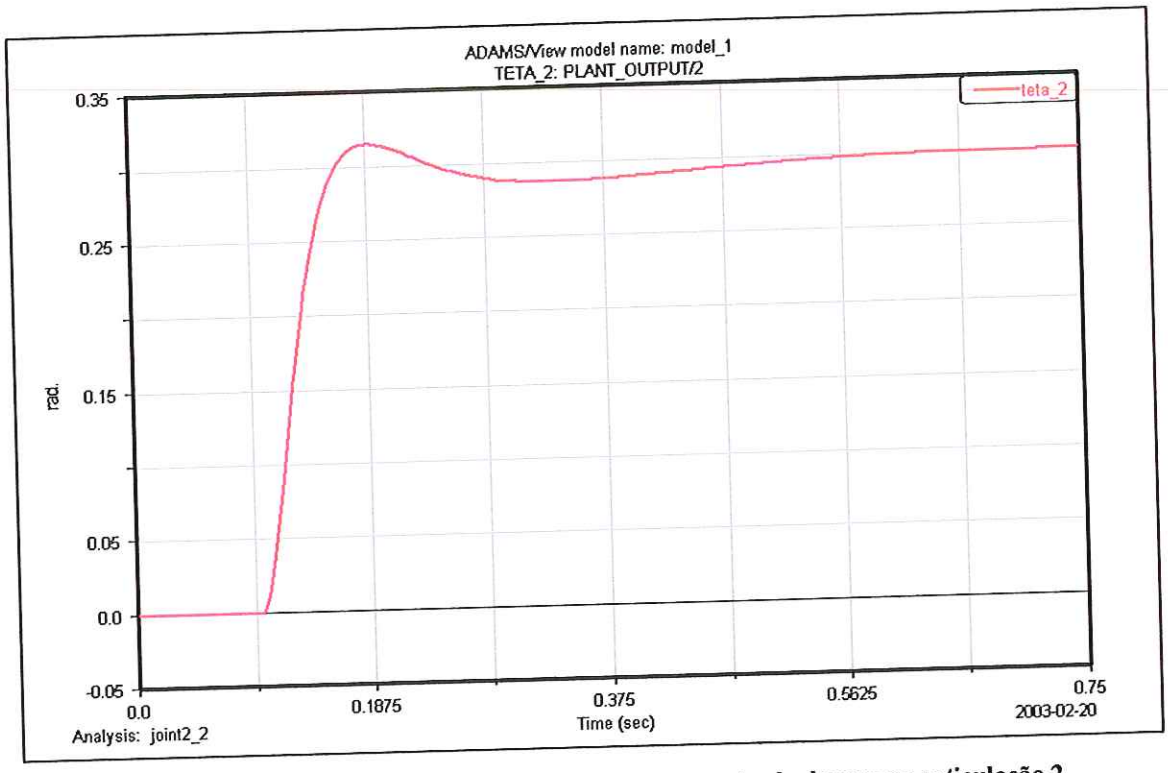


FIGURA 5.7.2 – Resposta da posição angular para uma entrada degrau na articulação 2

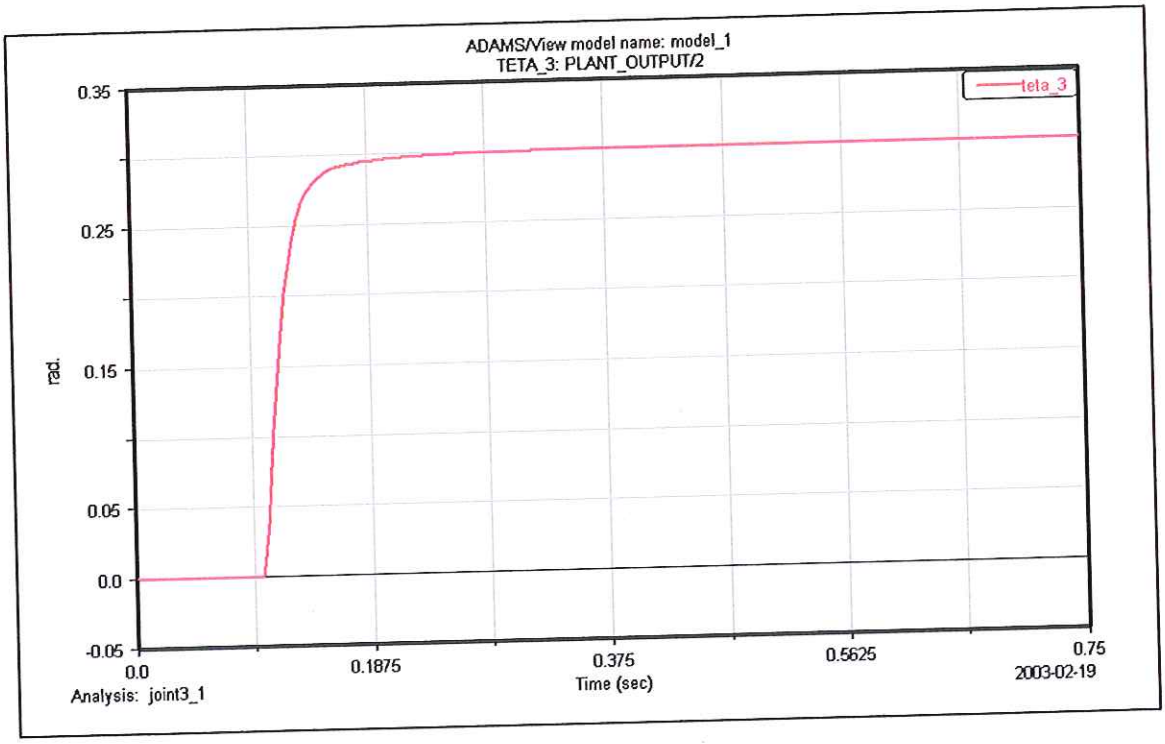


FIGURA 5.7.3 – Resposta da posição angular para uma entrada degrau na articulação 3

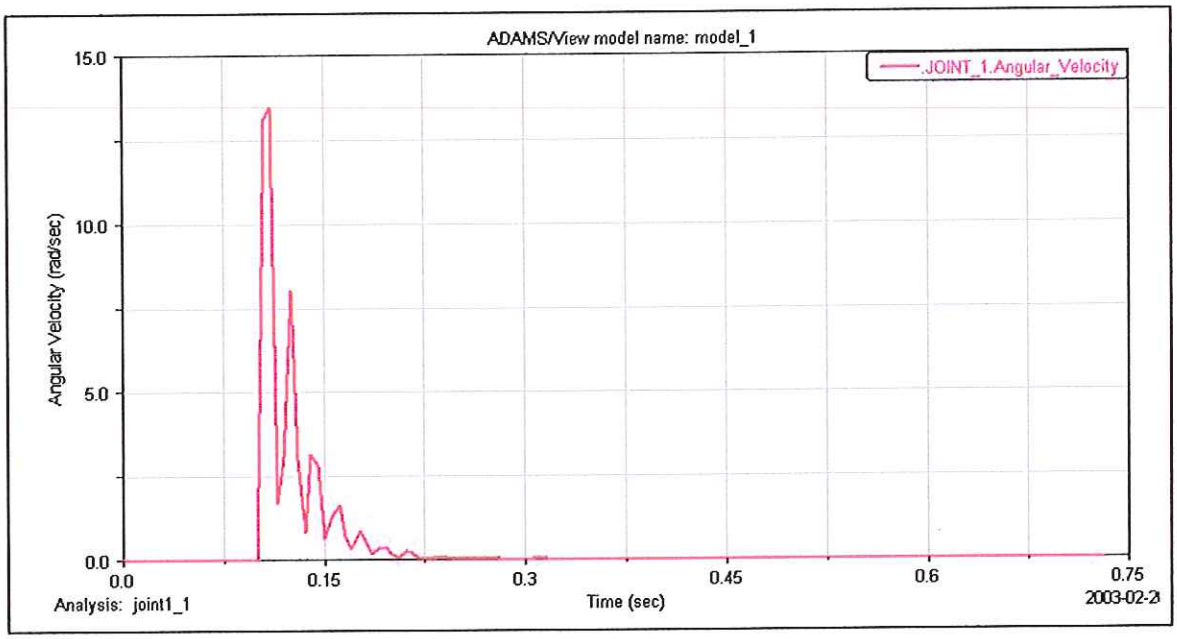


FIGURA 5.7.4 – Resposta da velocidade angular para uma entrada degrau na articulação 1

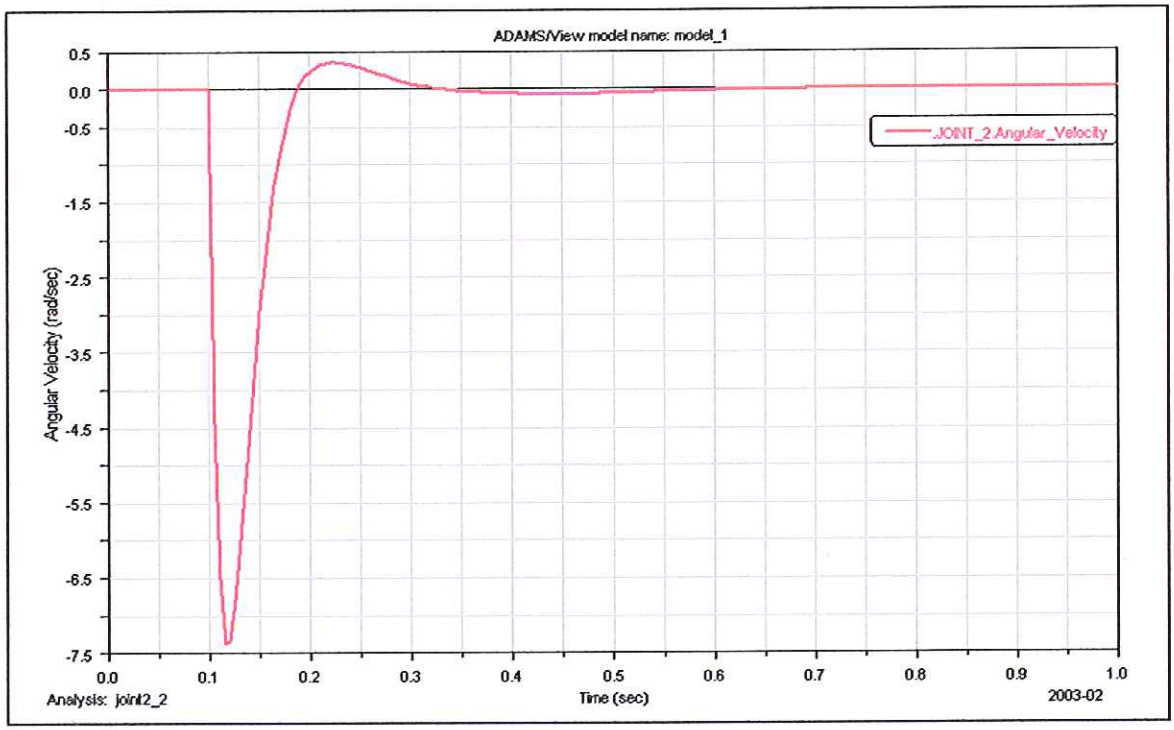


FIGURA 5.7.5 – Resposta da velocidade angular para uma entrada degrau na articulação 2

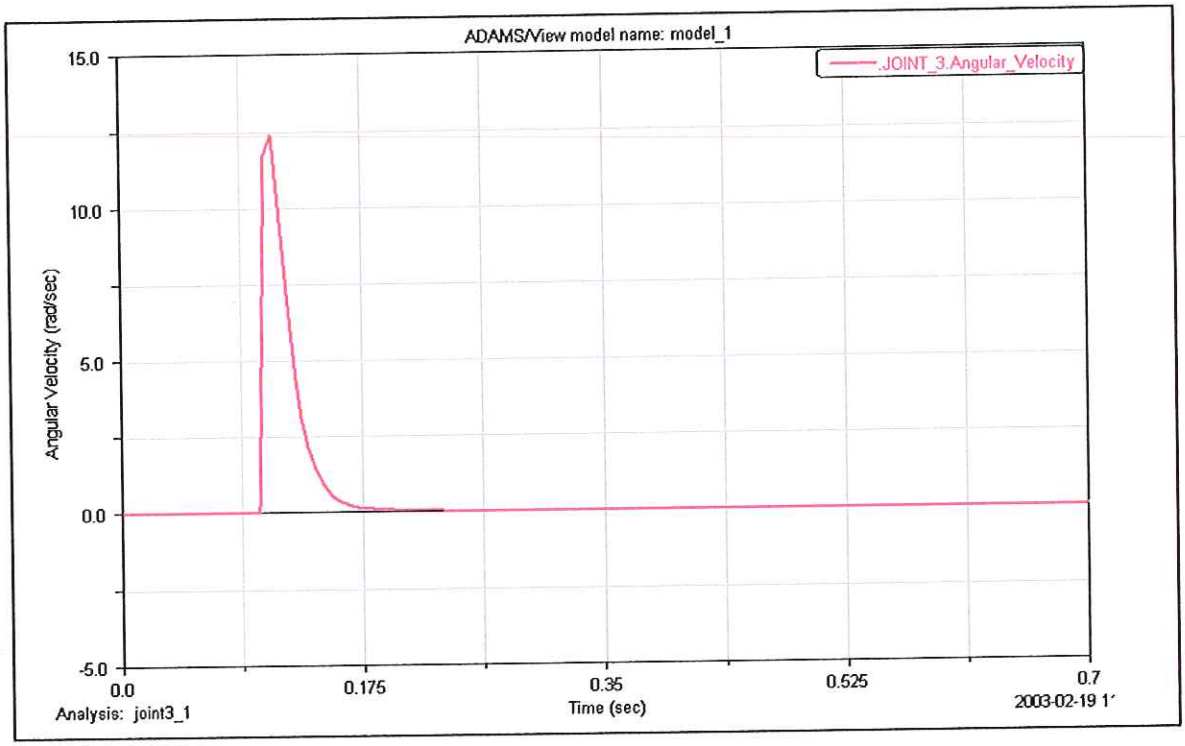


FIGURA 5.7.6 – Resposta da velocidade angular para uma entrada degrau na articulação 3

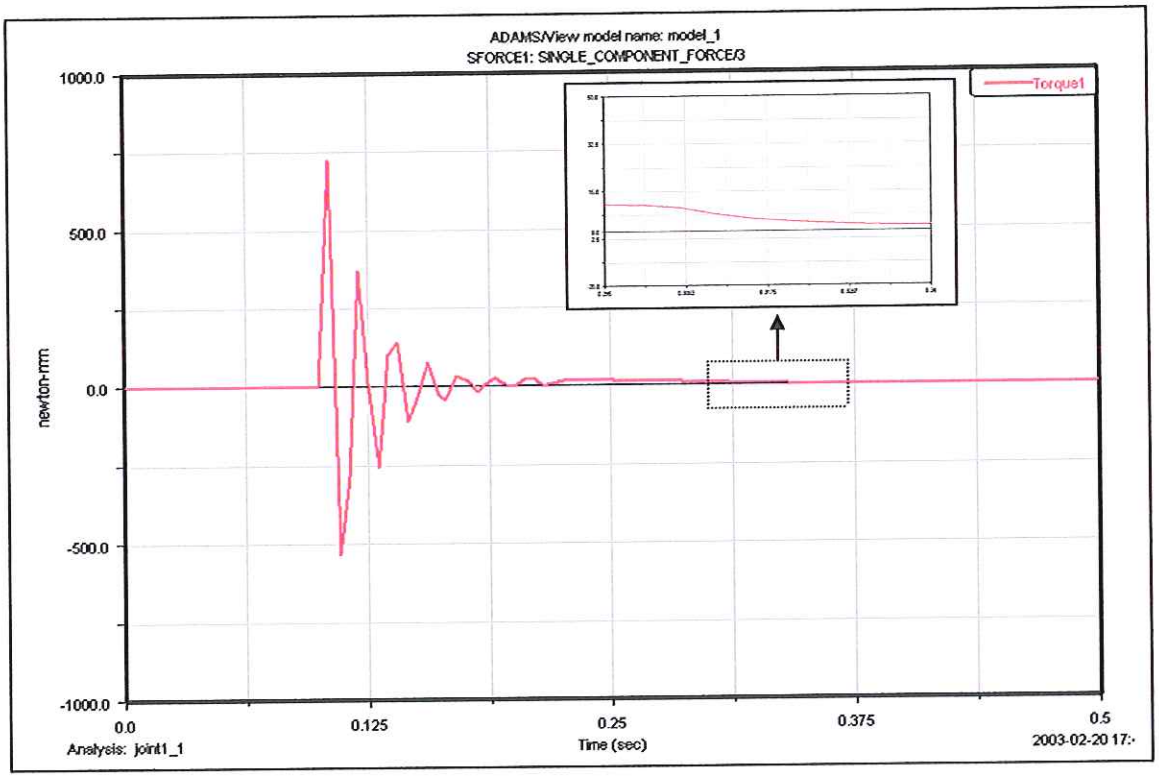


FIGURA 5.7.7 – Resposta do torque no acionador para uma entrada degrau na articulação 1

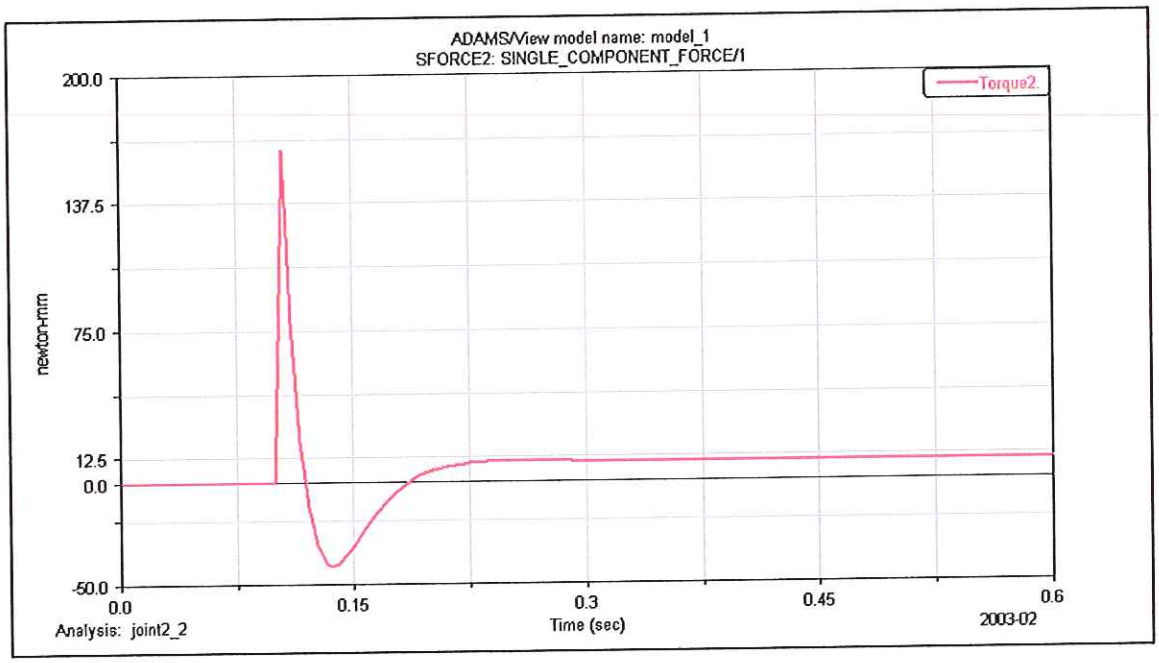


FIGURA 5.7.8 – Resposta do torque no acionador para uma entrada degrau na articulação 2

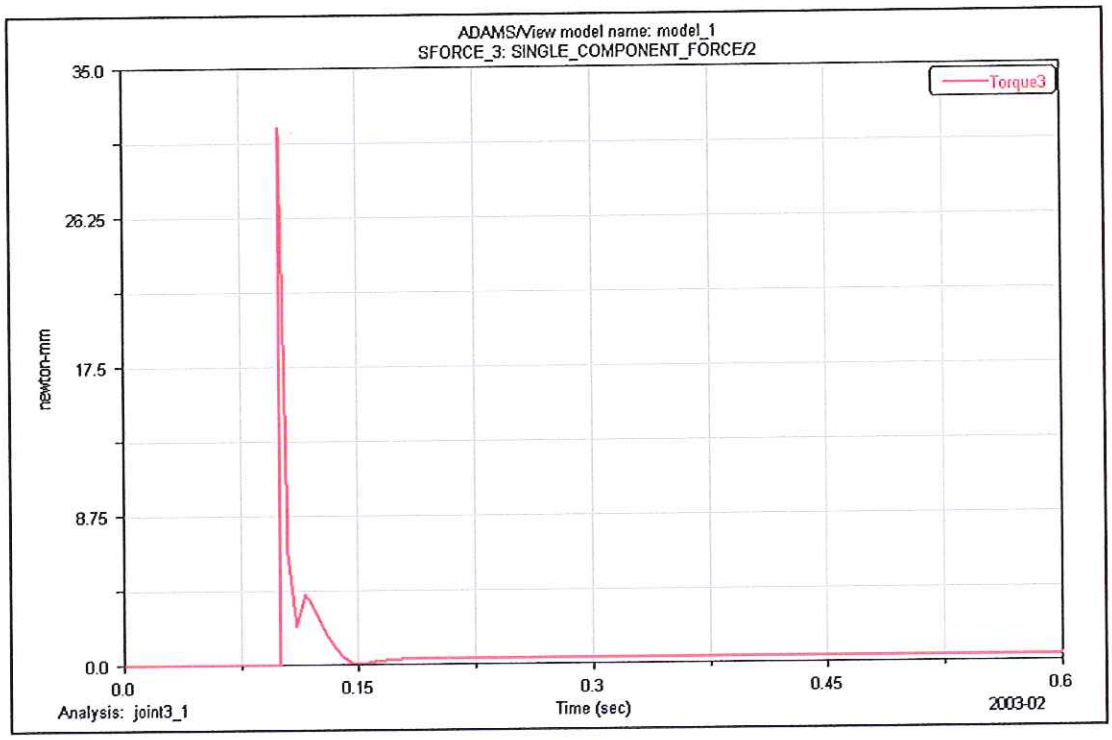


FIGURA 5.7.9 – Resposta do torque no acionador para uma entrada degrau na articulação 3

6 CONTROLE DE FORÇA

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma proposta inicial para se desenvolver um controle simultâneo de força e posição para garras antropomórficas em cadeia cinemática fechada. O estudo cinestático (quase-estático e movimento instantâneo) do sistema garra-objeto, é baseado na Teoria Helicoidal (FASE, 2000). Esta abordagem permite análises e representações de problemas do espaço dimensional igual a seis, no espaço Euclidiano tridimensional, através de coordenadas de Plücker que descrevem uma reta com seis informações.

Para descrever o controle de força e posição é necessário fazer uma breve conceituação da Teoria Helicoidal como uma ferramenta. Em seguida será apresentado um estudo sobre equilíbrio de forças, estendendo para as forças presentes no sistema, juntamente com as influências das formas de contato. Utiliza-se para tanto, a Teoria Helicoidal na obtenção da matriz de forças generalizadas (matriz W), que possibilita a implementação da matriz G (SALISBURY, 1982) que, por sua vez, rege o sistema garra-objeto em cadeia cinemática fechada de forma análoga a matriz Jacobiana para cadeias cinemáticas abertas.

6.2 TEORIA HELICOIDAL

Neste trabalho apresenta-se o conceito básico da Teoria Helicoidal como uma ferramenta. Conceitos mais aprofundados podem ser encontrados no APÊNDICE 2 e nos trabalhos de BALL, R.S. (1900), SALISBURY (1982), PHILLIPS, J. (1984) e STRAMIGIOLI, S. (2001).

Esta teoria surgiu da necessidade de entender os movimentos rígidos de translação e de rotação de um corpo rígido do ponto de vista geométrico em meados de 1800 com estudos de CHARLES e POINSOT (AGUIAR, 2000).

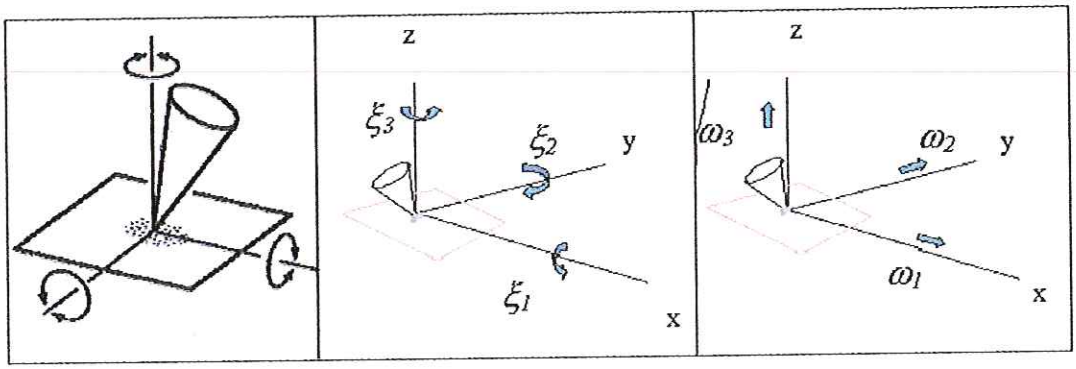
Um corpo rígido é composto por infinitos pontos de massas, onde a distância entre eles permanecem constantes. Sendo a dimensão do espaço necessária para descrever a sua configuração igual a seis: três dimensões para a rotação e três dimensões para translação. A relação entre força-aceleração é uma matriz 6x6 completa e não apenas um escalar como no caso de uma partícula.

A versão infinitesimal do movimento helicoidal fornece a descrição da velocidade instantânea do corpo rígido em termos de seus componentes linear e angular.

O movimento helicoidal leva aos conceitos chamados de força generalizada (*wrench*), representada por um "par" $\omega =$ (força, momento); e de velocidade generalizada (*twist*) associada a esse par, representada por um "par" $\xi =$ (velocidade linear, velocidade angular).

Cada tipo de contato entre corpos rígidos está associado a dois conjuntos de retas: um sobre a qual podem ser exercidas as forças generalizadas; outro sobre a qual podem ser exercidas as velocidades generalizadas.

Estes dois conjuntos de retas são duais no sentido em que ao se obter um deles obtém-se automaticamente o outro. Isso pode ser observado, nos contatos com atrito analisados nas figuras abaixo:

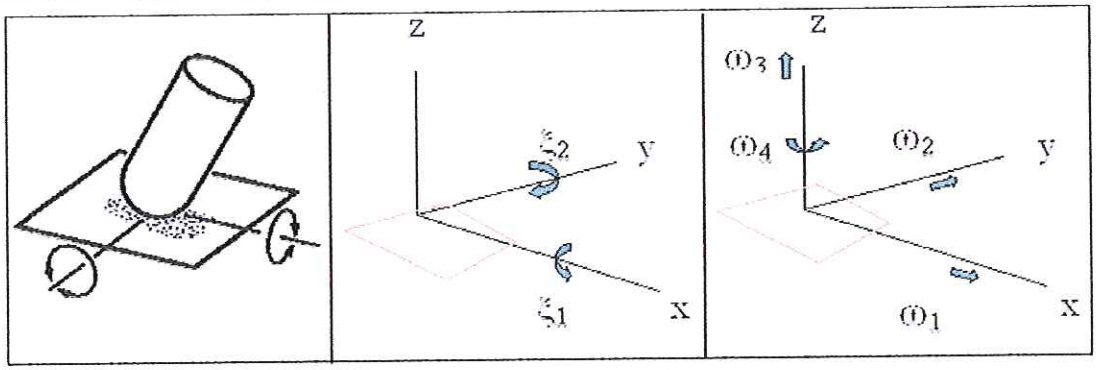


$\underline{\xi}_1 = (0,0,0,1,0,0)$ $\underline{\varpi}_1 = (1,0,0,0,0,0)$

$\underline{\xi}_2 = (0,0,0,0,1,0)$ $\underline{\varpi}_2 = (0,1,0,0,0,0)$

$\underline{\xi}_3 = (0,0,0,0,0,1)$ $\underline{\varpi}_3 = (0,0,1,0,0,0)$

FIGURA 6.2.1 – Contato Pontual Com Atrito



$\underline{\xi}_1 = (0,0,0,1,0,0)$ $\underline{\varpi}_1 = (1,0,0,0,0,0)$

$\underline{\xi}_2 = (0,0,0,0,1,0)$ $\underline{\varpi}_2 = (0,1,0,0,0,0)$

$\underline{\varpi}_3 = (0,0,1,0,0,0)$

$\underline{\varpi}_4 = (0,0,0,0,0,1)$

FIGURA 6.2.2 – Contato Suave Com Atrito

Na FIGURA 6.2.1 e 6.2.2, as velocidades generalizadas e as forças generalizadas são oriundas do tipo de contato. Observa-se, por exemplo, que tanto os vetores velocidade generalizada ξ_i (i = 1, 2, 3) quanto os vetores força generalizada ω_i (i = 1, 2, 3) possuem 6 coordenadas. No vetor velocidade generalizada, as três primeiras

coordenadas representam os deslocamentos lineares, responsáveis pelas translações e, as três últimas coordenadas, os deslocamentos angulares, responsáveis pelas rotações. No vetor força generalizada, as três primeiras coordenadas representam as forças e, as três últimas, os momentos aplicados ao objeto. Assim, a força generalizada que atua num corpo rígido consiste de uma componente linear (força) e uma componente angular (momento). Na situação analisada na FIGURA 6.2.1, observa-se que as componentes lineares (força) dos vetores de força generalizada restringem os movimentos de deslocamento lineares entre os corpos para a condição de permanência do contado entre os corpos, permitindo que haja somente deslocamentos angulares (rotação) nos vetores de velocidade generalizada.

Optou-se por fazer uso dessa teoria, ao invés de métodos tradicionais da cinemática de corpos rígidos porque essa:

1) Descreve globalmente o movimento de um corpo rígido que não sofre as singularidades devidas ao uso de coordenadas locais. Singularidades estas, que surgem naturalmente quando se escolhe representar as rotações através dos ângulos de Euler;
2) Fornece, na forma geométrica, a interdependência entre força e velocidade; todo o conjunto de forças e momentos que atua sobre um corpo rígido pode ser reduzido a uma força ao longo de uma única reta de ação e um momento sobre esta reta (POINSOT, 1848).

6.3 EQUILÍBRIO DE FORÇAS

Uma propriedade importante no sistema objeto-garra é atingir o equilíbrio entre as forças generalizadas externas que agem no objeto (força peso, distúrbios) e as forças generalizadas *internas* aplicadas apropriadamente através dos dedos nos pontos de contato. Utilizando, por exemplo, uma garra antropomórfica para se erguer um objeto de cima de uma bancada, deve ser aplicado a ele forças que ajam no sentido contrário ao da

gravidade, tendo que resistir às forças generalizadas em outras direções para que não ocorra escorregamento entre o objeto e a extremidade dos dedos.

O contato entre os corpos é somente numa direção, visto que dois corpos em contato por um ponto podem somente empurrar um ao outro. Estas forças que devem ocorrer somente numa direção são as forças internas que são um conjunto de forças aplicadas ao objeto. Para que a garra capture um objeto de forma segura, na maioria dos casos, a força de atrito é fundamental e como sua magnitude depende do produto do coeficiente de atrito pela força normal, é necessário que esta seja ao menos positiva.

6.4 APROXIMAÇÃO ALGÉBRICA

Assume-se que n forças generalizadas internas atuam sobre o objeto, dos quais p tem sentido único e, portanto n-p são bidirecionais podendo atuar no sentido positivo ou negativo.

Monta-se então a matriz das forças generalizadas, W, que será da forma (6 x n). Representando as forças generalizadas em coordenadas helicoidais, tem-se:

$$W = [\underline{\varpi}_1, \underline{\varpi}_2, \underline{\varpi}_3, \ldots, \underline{\varpi}_p, \underline{\varpi}_{p+1}, \ldots, \underline{\varpi}_n] \tag{6.4.1}$$

Para aplicar ao objeto um conjunto de forças generalizadas que resista às forças externas que atuam sobre ele, como força peso e forças que surgem do encontro do objeto com obstáculos do meio, é necessário encontrar o vetor das intensidades das forças generalizadas, $\underline{c}$, que satisfaça:

$$W\underline{c} = \underline{\hat{W}} \tag{6.4.2}$$

onde o vetor $\underline{\hat{W}}$ representa as intensidades das forças internas.

Devemos ter ao menos 7 forças generalizadas aplicadas sobre o objeto para conseguir restringí-lo completamente LAKSHIMIRAYANA (1978). No caso de n = 7 teremos a seguinte solução para a EQUAÇÃO 6.4.2:

$$\underline{c} = \underline{c}_p + \lambda \underline{c}_h \qquad (6.4.3)$$

onde :

$\underline{c}_p$ = é a solução particular de (4.2)

$\underline{c}_h$ = é a solução homogênea de (4.2)

λ = é uma variável livre arbitrária, que determina a magnitude da força interna.

Segundo LAKSHIMINARAYANA (1978), se todos os $\lambda\underline{c}_h$ são positivos para qualquer valor de $\underline{c}_p$, pode-se encontrar um vasto número de λ que deixarão todos os elementos de $\underline{c}$ positivos satisfazendo a EQUAÇÃO 6.4.2. A solução homogênea pode ser interpretada como um conjunto de bias de forças que objetivam, sem quebrar o equilíbrio do objeto, aumentar algumas ou todas as forças de contato. No exemplo, um objeto é fixado por 3 dedos, proporcionando três contatos pontuais com atrito.

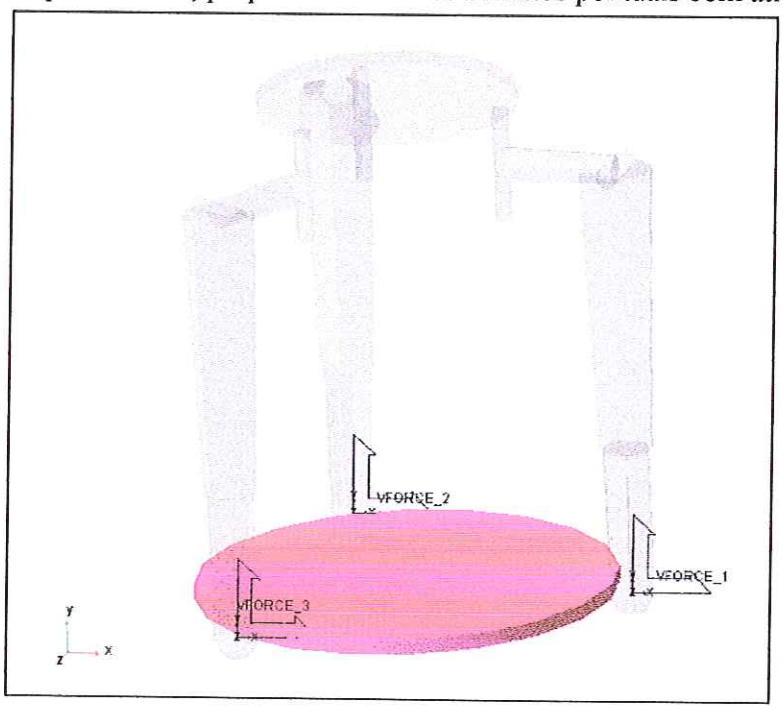


FIGURA 6.4.1 – Forças (wrenches) aplicadas ao objeto por 3 dedos.

Analisando somente o objeto e as forças de contato, tem-se:

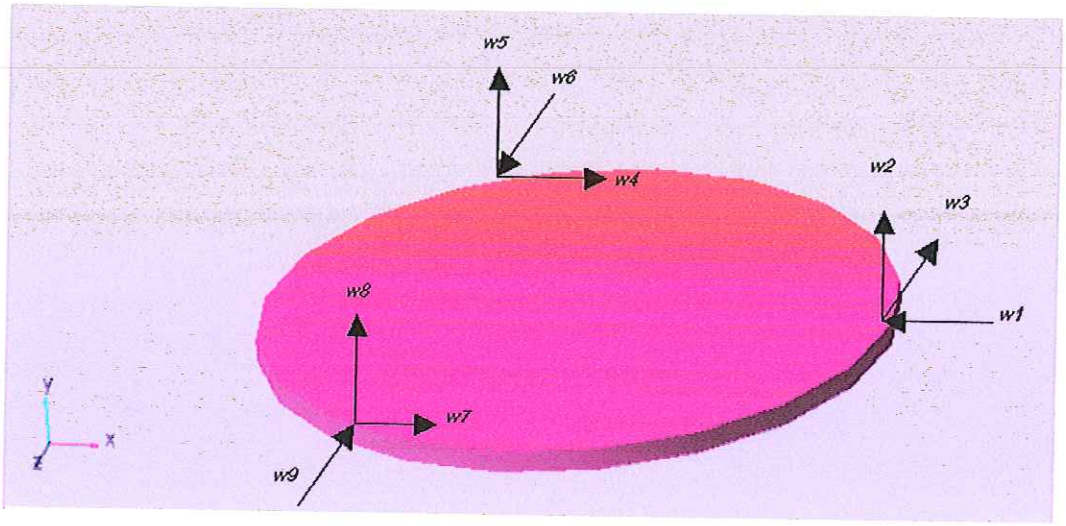


FIGURA 6.4.2 – Forças (wrenches) aplicadas ao objeto por 3 pontos de contato com atrito.

Observa-se que w1, w9 e a combinação de w4 e w6 são forças normais à superfície e, portanto, não podem mudar de sentido para que o objeto permaneça preso à garra, sendo as outras 5 forças uma função do atrito decorrente do contato entre dedos e objeto.

A matriz W representa as forças generalizadas em coordenadas helicoidais. Cada coluna da matriz representa um vetor de força generalizada com 6 coordenadas (F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z).

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.4.4}$$

Pode-se então, encontrar a solução homogênea que representa as forças internas:

$$W\lambda \underline{c_h} = 0 \tag{6.4.5}$$

$$\underline{c_h} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]^T$$

De forma explícita temos:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (6.4.6)$$

As soluções homogêneas são:

$$c_h = [\lambda_1(1,0,0,.5,0,0,.5,0,0) + \lambda_2(1,0,0,.5,0,.5,.5,0,.5) + \lambda_3(.75,0,.75,.75,0,.75,0,0,0)] \qquad (6.4.7)$$

6.5 *ANÁLISE DE FORÇA E VELOCIDADE - MATRIZ G*

A matriz de transformação G, SALISBURY (1982), permite trabalhar num universo cinestático e a obter as 4 relações básicas necessárias para o sensoriamento e controle na manipulação de corpos por garras antropomórficas. G é uma matriz quadrada de posto e dimensão iguais ao número dos n forças generalizadas internas que são aplicadas sobre o objeto. Esta matriz, em uma primeira fase, é definida pelo tipo de contato que temos entre o corpo e os dedos que atuam no corpo, e, portanto só precisa ser recalculada caso o tipo de contato seja alterado. As forças generalizadas externas que atuam no objeto serão representadas por $\Im$. No caso de manipulação por garras ou, robôs

cooperativos em contato com uma peça (cadeia cinemática fechada), $\Im$ incluirá o conjunto de forças generalizadas que atuam sobre o corpo e as intensidades das forças internas presente nesta pega[1] (EQUAÇÃO 6.6.1). Da mesma forma υ será utilizado para representar as velocidades generalizadas do objeto e as intensidades das velocidades internas (EQUAÇÃO 6.7.3).

A matriz G permite determinar quais forças generalizadas internas do contato nos dedos devem ser atuadas para aplicar um conjunto desejado de forças sobre o corpo numa cadeia cinemática fechada.

Devido às forças serem exercidas sobre o corpo por juntas paralelas, as projeções para encontrar os elementos de G, geométricamente, terão a forma inversa. Então serão obtidas G^{-T} e G^{-1}, assim G^{T} e G serão encontradas aplicando-se a matriz de inversão (SALISBURY, 1982). Para se montar a matriz G^{-T}, é necessário montar inicialmente a matriz W (EQUAÇÃO 6..4.1 e 6.4.4) e, fazer uma análise conforme descrito no item anterior, no intuito de garantir a plena restrição do corpo. Então se tem que a matriz G^{-T} é formada pelos argumentos (6 x n) da matriz W e pelos (n – 6), vetores base, da solução homogênea.

$$G^{-T} = \begin{bmatrix} W \\ \hline \underline{c}_{1,h} \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{c}_{n-6,h} \end{bmatrix} \qquad (6.5.1)$$

A matriz G^{-T} será quadrada, e assumindo que os (n – 6) $c_{i,h}$ são linearmente independentes e preenchem o espaço nulo (n – 6) de W, G^{-T} será também inversível.

[1] Define-se pega como a forma que um objeto é seguro pela garra. (tradução em português de grasping)

6.6 *ANÁLISE DE FORÇAS EXTERNAS E INTERNAS*

Define-se força generalizada como:

$$\underline{\Im} = [f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z, \lambda_1, \ldots\ldots \lambda_{n-6}]^T \tag{6.6.1}$$

Onde, os primeiros 6 elementos representam os forças generalizadas que são aplicados sobre o corpo e, os n – 6 restantes representam a magnitude das forças internas. Sendo $\underline{F}$ definido como um vetor das intensidades das forças generalizadas de contato para um contato de n forças generalizadas, entre o dedo e o objeto, então:

$$\underline{F} = [f_1, \ldots\ldots\ldots\ldots, f_n]^T \tag{6.6.2}$$

$$\underline{\Im} = G^{-T}\,\underline{F} \tag{6.6.3}$$

$$\underline{F} = G^T\,\underline{\Im} \tag{6.6.4}$$

No caso de uma garra utilizando 3 pontos de contato com atrito para fixar um corpo, $\underline{F}$ seria composta por 9 elementos (FIGURA 6.4.2).

Fazendo uso da EQUAÇÃO 6.6.3 pode-se determinar quais forças externas estão atuando sobre o corpo e quais forças internas estão sendo suportadas pelos dedos. Isso é possível através da obtenção das intensidades das forças que estão presentes nos dedos durante a pega, através de sensores.

Já a EQUAÇÃO 6.6.4 pode ser utilizada para criar um conjunto controlado de forças internas, garantindo que as forças generalizadas de único sentido mantenham-se desta forma (através de λ_i). Assim pode-se, por exemplo, numa tarefa de montagem, encaixar uma peça em um orifício sem que o contato seja quebrado, através do controle das forças internas.

6.7 ANÁLISE DE VELOCIDADES

As relações da velocidade na pega serão definidas através dos princípios da conservação da energia, então se define o significado de taxa de entrada e saída de energia no sistema.

Para a mesma condição da pega tendo-se 3 contatos com atrito, haverá um vetor com 9 componentes. Sendo os elementos de $\underline{V}$ as intensidades do movimento ao longo do eixo correspondente às forças generalizadas de contato, tem-se:

$$\underline{V} = [v_1, \ldots\ldots\ldots, v_n]^T \tag{6.7.1}$$

$$\underline{F}^T \underline{V} = \sum_{i=1}^{n} c_i d_i \tag{6.7.2}$$

A equação acima representa a taxa de energia entrando nos pontos de contato, como resultado do movimento ao longo dos eixos de aplicação de forças.

Define-se $\underline{\upsilon}$ como sendo um vetor onde os 6 primeiros elementos representam as velocidades lineares e angulares e as outras n - 6 γ_is componentes são velocidades virtuais resultantes da deformação do corpo, então :

$$\underline{\upsilon} = [v_x, v_y, v_z, \varpi_x, \varpi_y, \varpi_z, \gamma_1, \ldots\ldots\ldots \gamma_{n-6}]^T \tag{6.7.3}$$

Assim a potência instantânea, também conhecida como produto de Ball (DUFFY, 1990), associada ao movimento de corpo rígido através de a um conjunto de forças aplicadas.

$$\underline{\Im}^T \underline{\upsilon} = f_x v_x + f_y v_y + f_z v_z + m_x \varpi_x + m_y \varpi_y + m_z \varpi_z + \lambda_1 \gamma_1 + \ldots \lambda_{n-6} \gamma_{n-6} \tag{6.7.4}$$

As forças internas λ_i podem não ser nulas, mas não podem realizar trabalho, pois isto significa que está ocorrendo um escorregamento na pega e/ou as condições de contorno estão sendo violadas.

Igualando-se a taxa de energia de entrada com a potência instantânea e, utilizando a EQUAÇÃO 6.6.3, tem-se:

$$\underline{F}^T \underline{V} = \underline{\Im}^T \underline{\upsilon} = \left(F^T G^{-1}\right)\underline{\upsilon} \tag{6.7.5}$$

e sendo $F \neq 0$

$$\underline{V} = G^{-1}\underline{\upsilon} \tag{6.7.6}$$

Invertendo:

$$\underline{\upsilon} = G\underline{V} \tag{6.7.7}$$

A EQUAÇÃO 6.7.6 permite determinar qual o conjunto de velocidades dos dedos (velocidades generalizadas oriundos do contato) para se imprimir uma velocidade desejada no corpo.

A EQUAÇÃO 6.7.7 permite saber qual a velocidade do corpo, bem como se está ocorrendo escorregamento, através de um conjunto de medidas da velocidade do dedo.

Determinam-se então as 4 relações básicas necessárias para o sensoriamento e controle na manipulação de corpos pegos por uma garra antropomórfica, que são:

1) $\underline{\Im} = G^{-T}\,\underline{F}$

2) $\underline{F} = G^{T}\,\underline{\Im}$

3) $\underline{\upsilon} = G\underline{V}$

4) $\underline{V} = G^{-1}\underline{\upsilon}$

Nota-se que a transformação G é de fundamental importância e a dualidade de força e velocidade, que é um princípio de mecanismos, fica evidente uma vez que as transformações de força e velocidade podem ser derivadas uma da outra.

6.8 *CONTROLE*

Como proposta inicial de controle utilizando a abordagem helicoidal, foi apresentado o seguinte cenário:

- As pontas dos dedos estão em contato com um objeto (FIGURA 6.4.1). Deseja-se elevar este objeto até uma determinada altura.
- A matriz G é conhecida.

O objetivo deste controle (FIGURA 6.8.1) é o de garantir o equilíbrio da pega. Isto é, que no vetor de força generalizada $\Im$, os seis primeiros elementos sejam nulos. Isto significa que a somatórias de forças e de momentos sejam iguais a zero.

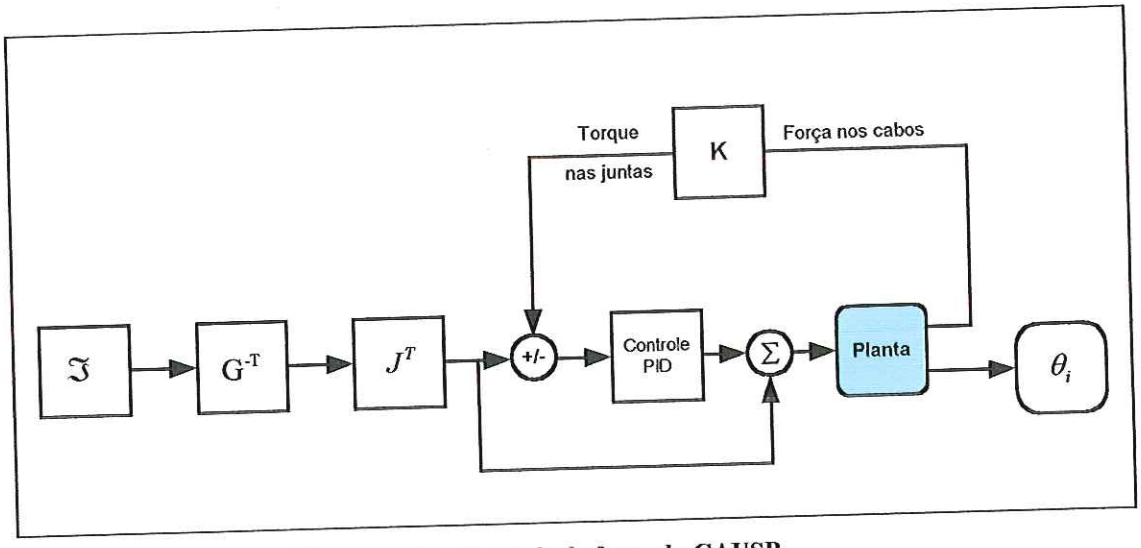


FIGURA 6.8.1 – Controle de força da GAUSP

Observa-se na FIGURA 6.8.1, a utilização de um controlador PID se justifica pela necessidade de oferecer ao sistema um comportamento estável, aplicando forças internas ($\underline{F}$) ao objeto de forma otimizada, ou seja, num espaço de tempo mínimo e com o menor overshoot possível.

6.9 *RESULTADOS DO CONTROLE*

É apresentado o resultado preliminar de um controle de força utilizando a Teoria Helicoidal para se manter o equilíbrio no sistema garra-objeto sendo elevado de uma bancada.

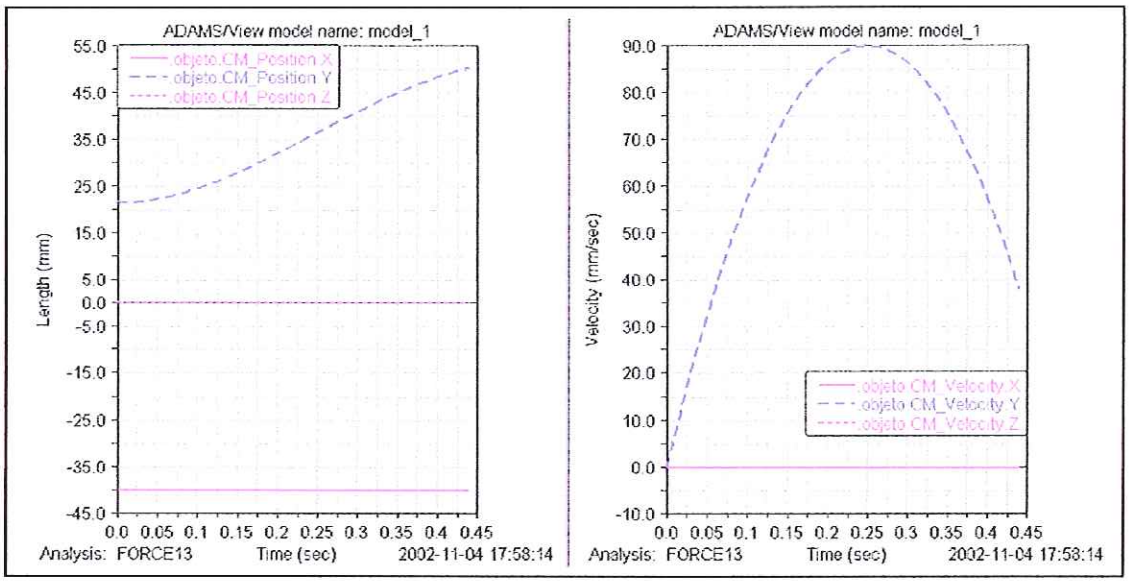


FIGURA 6.9.1 – Deslocamento e velocidade de um objeto sendo elevado de uma bancada

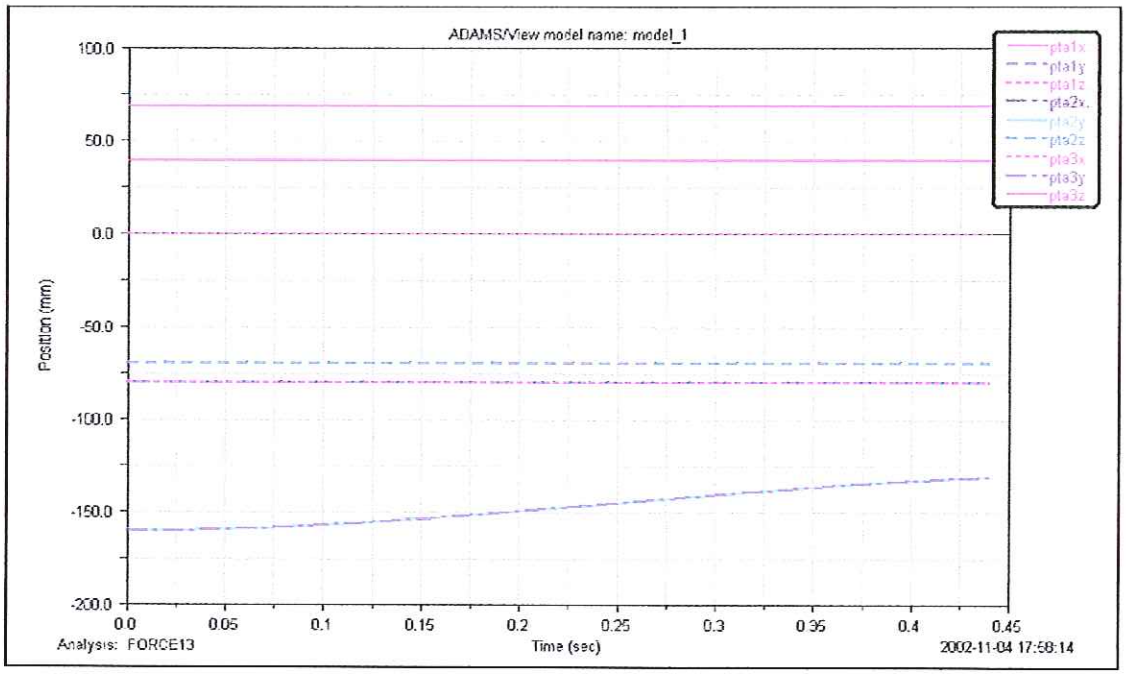


FIGURA 6.9.2 – Deslocamento das pontas dos dedos da garra nas direções x, y e z

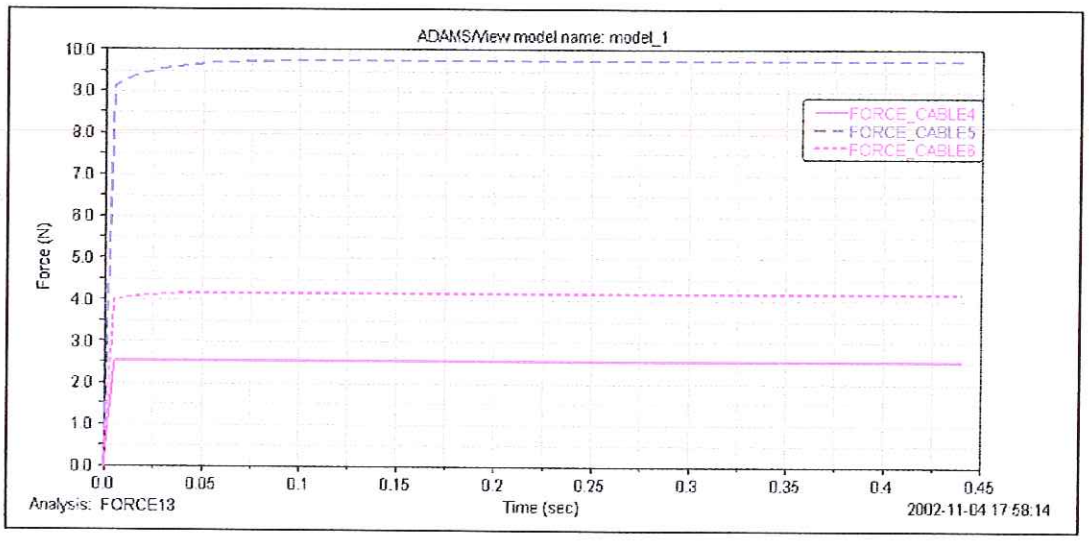


FIGURA 6.9.3 – Medições de forças em um dos dedos da garra

7. CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido para as simulações deste trabalho utilizando o programa de MBS numérico, denominado ADAMS, se mostrou eficiente no estudo e desenvolvimento de novos sistemas de controle. A obtenção experimental dos valores estimados de rigidez e amortecimento nas articulações dos dedos da garra proporcionou maior confiabilidade ao modelo, aproximado-se assim, o movimento dos dedos ao comportamento elástico real do sistema.

Um controlador de posição do tipo PID adaptativo foi implementado utilizando técnicas de co-simulação, combinando duas ferramentas diferentes, uma de simulação de sistemas mecânicos (ADAMS) e outra de projeto de controle (MatLab/Simulink). Para entradas do tipo degrau, o controlador apresentou respostas eficientes, obtendo um overshoot somente em uma das articulações do dedo (FIGURA 5.7.2), sendo este valor abaixo de sete por cento com tempo de estabilização de seis décimos de segundo.

Utilizado a mesma técnica de co-simulação, foi desenvolvido e implementado um controlador de força em uma tarefa de levantar um objeto de uma bancada. O controle da interação entre os dedos da garra e o ambiente apresentou-se como uma tarefa não trivial. Através dos resultados obtidos podemos comprovar a viabilidade do uso da Teoria Helicoidal para controlar o equilíbrio do sistema (matriz G). A abordagem apresentou-se como uma ferramenta poderosa na manipulação de garras com objetos devido a dualidade existente entre força e posição. O controle de força se mostrou eficiente na tarefa proposta neste trabalho onde se deseja manter as mesmas forças nas pontas dos dedos da garra, mas ainda muito restrito para tarefas genéricas de manipulação. Por isto, a

abordagem helicoidal deve ser mais explorada afim de que se possa criar novas estratégias de manipulação de controle a partir dos resultados obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, P.M. (2001). *Controle Simultâneo de Força e Posição para Garras Antropomórficas.* 74 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ALBUQUERQUE, A.R.L. (2003). *Modal Analysis of an Anthropomorphic Gripper Finger in Different Working Configurations.* In: X International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics. P. 141-146.

AMADEUS PROJECT. (2002) <http://www.cee.hw.ac.uk/oceans/people/David_Lane> Acesso em: 02 Jun. 2002.

BALL, R.S.(1900). *A Tretise on the Theory of Screws.* Inglaterra, Cambridge University Press.

BICCHI, A. (2000). *Hand for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Toward Simplicity.* In: IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMOTION, vol.16, no.6, p.652-662.

BONITZ, R.G.; HSIA, T.C. (1996). *Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Robots.* In: IEEE International Conference on Robotics and Automation,V.12,p.78-89.

BONITZ, R.G. AND HSIA, T.C. (1996). *Robust Internal Forcetracking Impedance Control for Coordinated Multi-Arm Manipulation - Theory and Experiments.* In: Proceedings of the 6th International Symposium of Robotics and Manufacturing, 2nd World Automation Congress.

CRAIG, J.J. (1989). *Introduction to Robotics : mechanical and control*. EUA, Addison-Wesley.

DE SCHUTTER, J. et.al. (1998). *Force Control: A bird's eye view*. In: Control Problems in Robotics and Automation, London, p.1-17.

DORF, R.C.; BISHOP, R.H. (1998). *Modern Control Systems*. EUA, Addison Wesley Longman.

DLR ARTICULATED HAND.(2002). <http://www.robotic.dlr.de/> Acesso em: 15 Nov. 2002.

DUFFY, J. (1990). *The Fallacy of Modern Hybrid Control, Theory that isBased on "Orthogonal Complements of Twist and Wrench Spaces*. IN: Journal of Robot System. p.139-144.

FASSE, E. D. (2000). *Some applications of screw theory to lumped-parameter modeling of visco-elasticallycoupled rigid bodies*. IN: Ball Symposium, Cambridge.

GEAR, C.W. *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*. New Jersey: Prentice-Hall, 1971.

GOLDBERG,K.; HALPERIN,D.; LATOMBE,J.C.; WILSON,R. eds. (1995). *Algorithmic Foundations of Robotics*. Massachusetts-EUA, AK Peter.

IBERALL. T. (1997). *Human prehension and dexterous robot hands*, In: Int. J. Robot. Res., vol. 16, no. 3, p. 285–299, 1997.

LAKSHMIRNARAYANA, K. (1978). *Mechanics of Form Closure* . ASME Paper no. 78 – DET – 32.

LUND UNIVERSITY (THE ARTIFICIAL HAND PROJECT). (2002). <http://www.lucs.lu.se/arthand/research.html> Acesso em: 15 Nov. 2002.

MASON, M.T. (2000). *Mechanics of Robotic Manipulation*. EUA, MIT press.

O'BRIEN, D. J.; LANE, D. M. (2003). *Force and Slip Sensing for a Dextrous Underwater Gripper*. < http://www.ece.eps.hw.ac.uk/Research/oceans/index.html >. Acesso em 05.Jan. 2003.

OKAMURA, A. M.; SMABY, N. ; CUTKOSKY, M. R. (2000). *An Overview of Dexterous Manipulation*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation.

PHAM, D.T; SAHIM YILDIRIM. (1999). *Control of Trajectory of Planar Robot Using Recurrent Hybrid Networks*. In: International Jornal of Machine Tools & Manufectur, v.5, p.415-429.

PHILLIPS, J. (1984). *Fredom in Machinery*. Inglaterra, vol 1 e 2, Cambridge University Press.

PONCE, J.; FAVERJON, B; (1995). *On Computing Three-Finger Force-Closure Grasps of Polygonal Objects*. In:IEEE Transaction on Robotics and Automation, v.11, n.6, p.868-881.

RAIBERT, M. H.; CRAIG, J.J.(1980). *Hybrid Position/Force Control of Manipulators*. In: ASME Winter Annual Meeting, USA.

RAMS - ROBOT ASSISTED MICROSURGERY. (2002). <http://robotics.jpl.nasa.gov/accomplishments/rams-robot/ramsTB.html>. Acesso em: 12 Jan. 2002.

SALISBURY, J.K. (1980). *Active Stiffness Control of Manipulator in Cartesian Coordinates*. IEEE, EUA.

SALISBURY, J.K. (1982). *Kinematic and Force analysis of Articulated Hands*. Stanford.Phd Thesis, Stanford University.

STANFORD/ JPL HAND (2002). <http://www.osci.ttu.edu/TURAC/Interface-dgn/WP-hc-jpl.html>. Acesso em: 12. Nov. 2002.

SOUTHAMPTON ARTIFICIAL HAND (2002). <http://www.soton.ac.uk/~eewww/Arthand.htm>. Acesso em: 12 Jan. 2002.

STRAMIGIOLI, S., MELCHIORRI, C. (1999). *A passivity-based control scheme for robotic grasping and manipulation*. In: Proceedings of the International conference of Decision and Control, Phoenix.

STRAMIGIOLI, S. (2001). *Geometric and Screw Theory for Robotics - Tutorial.* In: IEEE ICRA.

VALENTE, C.M.O. (1999). *Fixação de objetos de formato geométrico desconhecido utilizando redes neurais artificiais.* 97 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VALERO, F. J. (2000). *Applying principles of robotics to understand the biomechanics, neuromuscular control and clinical rehabilitation of human digits.* In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. pp. 270–275.

UTAH/MIT DEXTROUS HAND. (2002). <http://www-robotics.cs.umass.edu/p50/utah-mit-hand.html>. Acesso em: 12 Nov. 2002.

ZIEGLER, J. G., AND N. B. NICHOLS (1942). *Optimum settings for automatic controllers.* In: Trans. ASME, 64, p. 759-768.

WHITNEY, D.E. (1987). *Historical perspctive and state of art in robot force control.* In. Jornal of Robotics Research, vol.6, p. 3-14.

SISTEMA DE CONTROLE LINEAR
APÊNDICE 1

SISTEMA DE CONTROLE LINEAR

São utilizados dois modelos de um dedo da garra gerados a partir do software de modelagem dinâmica *ADAMS*. Um linearizado e um não linear apresentando ambos com três entradas que são os torques nos atuadores e seis saídas, onde três são os deslocamentos angulares dos atuadores e as outras três a derivada desses deslocamentos.

O modelo linearizado em variáveis de estados é utilizado para realizar o controle em torno da posição de linearização. É formado por quatro matrizes: $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ e $\boldsymbol{D}$. A matriz $\boldsymbol{A}$ possui dimensões $n \times n$ onde n é o número de estados sendo igual a duas vezes o número de graus de liberdade do sistema. Como um dedo da garra possui três graus de liberdade este é igual a seis. A matriz $\boldsymbol{B}$ possui dimensões $n \times m$ onde m é igual a três que é o número de entradas do sistema. A matriz $\boldsymbol{C}$ é $p \times n$ onde p é o número de saídas do sistema e a matriz $\boldsymbol{D}$ é $p \times m$ com todos os seus elementos nulos.

O modelo não linear é utilizado para simular o comportamento do dedo real e testar a eficiência do controle utilizado.

Sistema de Controle Seguidor

O Sistema linearizado de malha aberta é representado abaixo pelas equações de estado de *n-ésima* ordem e as equações de saída de *p-ésima* ordem.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \qquad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix} \mathbf{x} \tag{2}$$

onde y é um vetor $p \times 1$ e $w = Ex$ é um vetor $m \times 1$ representando as saídas que são requeridas para seguir o vetor de entrada r.

O controle por realimentação de estados é projetado com o intuito de que o vetor w siga o comando de entrada r no sentido de que a resposta em regime seja

$$\lim_{t \to \infty} \mathbf{w}(t) = \mathbf{r}(t) \tag{3}$$

quando r é um comando de entrada constante por partes. Segundo D'Azzo & Houpis, (1995) o método do projeto consiste em adicionar um vetor comparador e integrador que satisfaça a equação

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{r} - \mathbf{w} = \mathbf{r} - \mathbf{E}\mathbf{x}\,. \tag{4}$$

O sistema de malha aberta composto é então governado pelas equações aumentadas de estado e saída formadas a partir das equações (1) a (4)

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{E} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{r}$$

$$= \overline{\mathbf{A}}\mathbf{x}' + \overline{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \overline{\mathbf{B}}'\mathbf{r} \tag{5}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} = \overline{\mathbf{C}}\mathbf{x}' \tag{6}$$

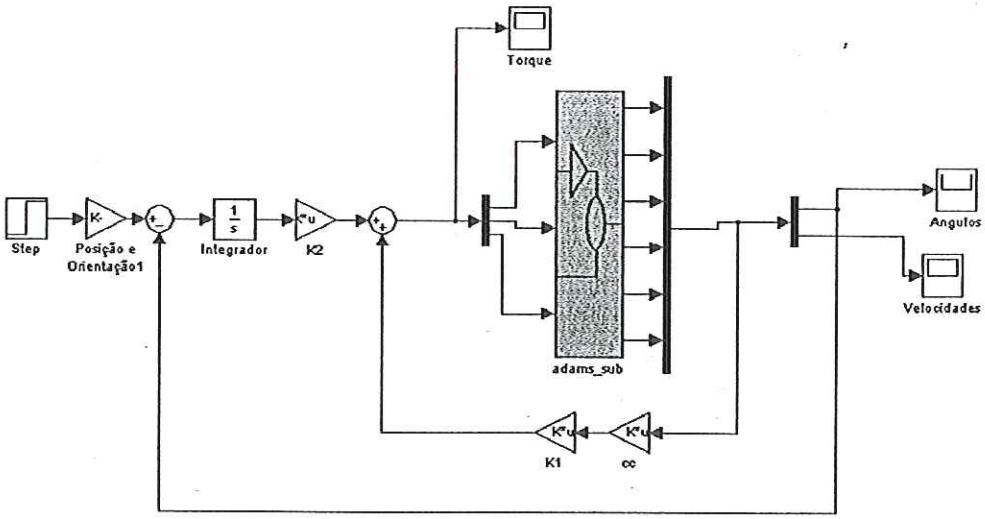


FIGURA A1. 1 - Sistema de Controle Seguidor.

onde

$$\overline{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -E & 0 \end{bmatrix}; \overline{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\overline{B}' = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}; \overline{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

D'Azzo e Houpis (1995) mostram que a lei de controle a ser usada é:

$$u = K_1 x + K_2 z = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\overline{K} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

O diagrama representando o sistema de controle por realimentação, consistindo das equações de estado e de saída dadas pelas equações (1) e (2) e a lei de controle dada pela eq. (18), é mostrado na Figura 4. Esta lei de controle atribui o espectro de autovalores de malha fechada, se e somente se, a planta aumentada e o par de matrizes de controle $(\overline{A}, \overline{B})$ é controlável (D'Azzo e Houpis, 1995). Esta condição é satisfeita se (A, B) é um par controlável e

$$posto \begin{bmatrix} B & A \\ 0 & -E \end{bmatrix} = n + m \tag{10}$$

Para que (A, B) seja controlável é necessário que satisfaça a seguinte condição de controlabilidade:

$$posto\, M_c = posto \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-m}B \end{bmatrix} = n \tag{11}$$

Satisfeitas as condições das equações (10) e (11) garantem que a lei de controle pode ser sintetizada tal que a saída da malha fechada w siga o comando de entrada r. E neste caso a equação de malha fechada é:

$$\dot{\mathbf{x}}' = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}+\mathbf{BK}_1 & \mathbf{BK}_2 \\ -\mathbf{E} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{r}$$

$$= \mathbf{A}'_{cl}\mathbf{x}' + \mathbf{B}'\mathbf{r}\,. \tag{12}$$

A matriz de realimentação deve ser selecionada tal que os autovalores da matriz da planta de malha fechada estejam todos no semiplano complexo esquerdo.

A obtenção da matriz $\overline{K}$ é realizada a partir da seleção dos autovalores a serem atribuídos à matriz da planta de malha fechada A'_{cl} na eq. (12)

$$\sigma\left(\overline{\mathbf{A}}+\overline{\mathbf{BK}}\right) = \{\lambda_1,\ \lambda_2, \ldots \lambda_{n+m}\} \tag{13}$$

e um conjunto associado de autovetores

$$\mathbf{v}\left(\overline{\mathbf{A}}+\overline{\mathbf{BK}}\right) = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \ldots \mathbf{v}_{n+m}\} \tag{14}$$

que são selecionados a fim de se obter as características de resposta no tempo desejadas. Os autovalores e autovetores são relacionados pela equação:

$$\left[\overline{\mathbf{A}}+\overline{\mathbf{BK}}\right]\mathbf{v}_i = \lambda_i\,\mathbf{v}_i \tag{15}$$

que pode ser colocada na forma:

$$\left[\overline{\mathbf{A}} - \lambda_i\mathbf{I} \quad \overline{\mathbf{B}}\right]\begin{bmatrix} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{g}_i \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

$$para\ i = 1,2,\ldots n+m, \tag{16}$$

onde v_i é o autovetor e

$$\mathbf{g}_i = \overline{\mathbf{K}}\mathbf{v}_i \tag{17}$$

Para satisfazer a eq. (16), o vetor $[v_i^T\ g_i^T]^T$ deve pertencer ao kernel de

$$\overline{\mathrm{S}}(\lambda_i) = \left[\overline{\mathrm{A}} - \lambda_i \mathrm{I} \quad \overline{\mathrm{B}}\right] \quad para\ i = 1,2,\ldots n+m. \tag{18}$$

A notação $ker\,S(\lambda_i)$ é usada para definir o espaço nulo que contém todos os vetores $[v_i^T\ g_i^T]^T$ para que a eq.(16) seja satisfeita (D'Azzo e Houpis, 1995). A equação (17) pode ser usada para formar a igualdade matricial

$$\left[\mathbf{g}_1 \quad \mathbf{g}_2 \quad \ldots \quad \mathbf{g}_{n+m}\right] = \left[\overline{\mathbf{K}}\mathbf{v}_1 \quad \overline{\mathbf{K}}\mathbf{v}_2 \quad \ldots \quad \overline{\mathbf{K}}\mathbf{v}_{n+m}\right] \tag{19}$$

donde se obtém a matriz $\overline{K}$ como segue:

$$\overline{\mathbf{K}} = \left[\mathbf{g}_1 \quad \mathbf{g}_2 \quad \ldots \quad \mathbf{g}_{n+m}\right]\left[\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \ldots \quad \mathbf{v}_{n+m}\right]^{-1} = \mathbf{Q}\mathbf{V}^{-1} \tag{20}$$

Observa-se que os autovalores podem ter valores repetidos de número igual às entradas do sistema. Isso se deve ao fato do espaço nulo ter dimensão igual ao número de entradas. Assim associa-se um autovalor repetido a um vetor da base do espaço nulo. Com isso, todas as colunas da matriz V continuam sendo linearmente independentes e, por isso, a matriz V^{-1} existe.

Resultados da Simulação

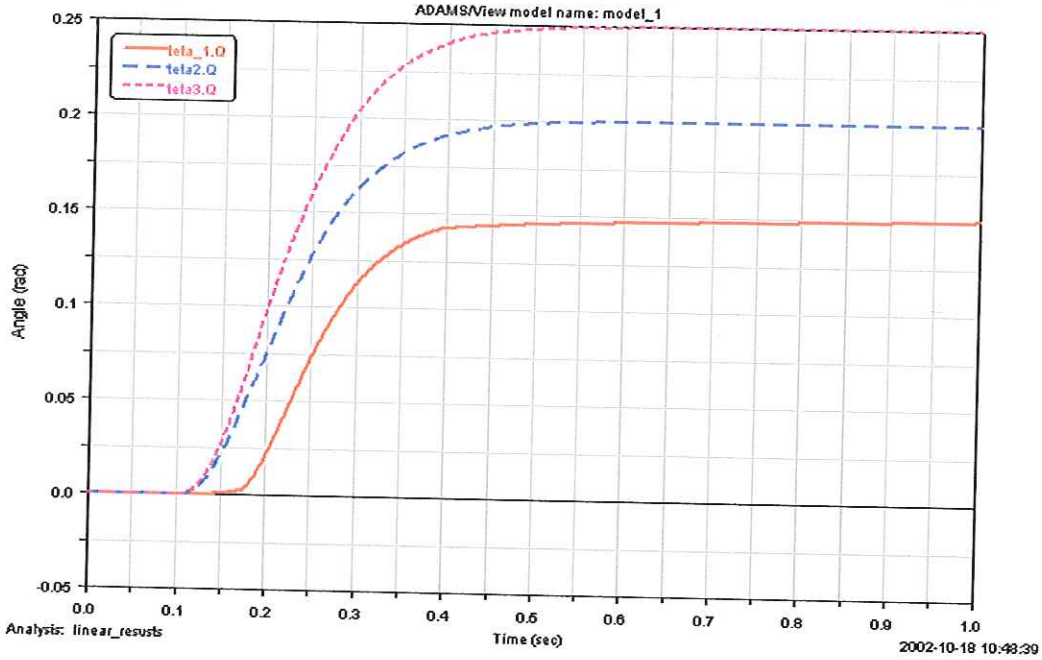


FIGURA A1. 2 – Resposta dos deslocamentos angulares das articulações do dedo para entradas do tipo degrau.

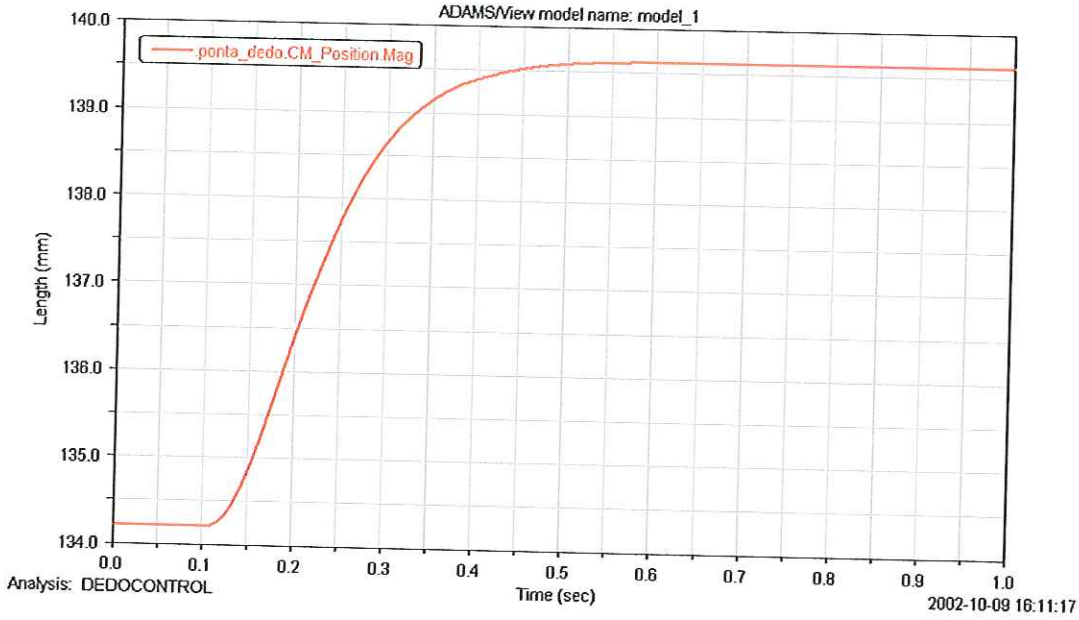


FIGURA A1. 3 – Resposta do deslocamento da ponta do dedo para uma entrada do tipo degrau.

MODELO DO ADAMS
APÊNDICE 2

MODELOS DA GAUSP DESENVOLVIDO NO ADAMS

Object Name: .modelo_1
Object Type : Model
Title : Dedo número 1 da garra – Utilizado no Controle de Posição

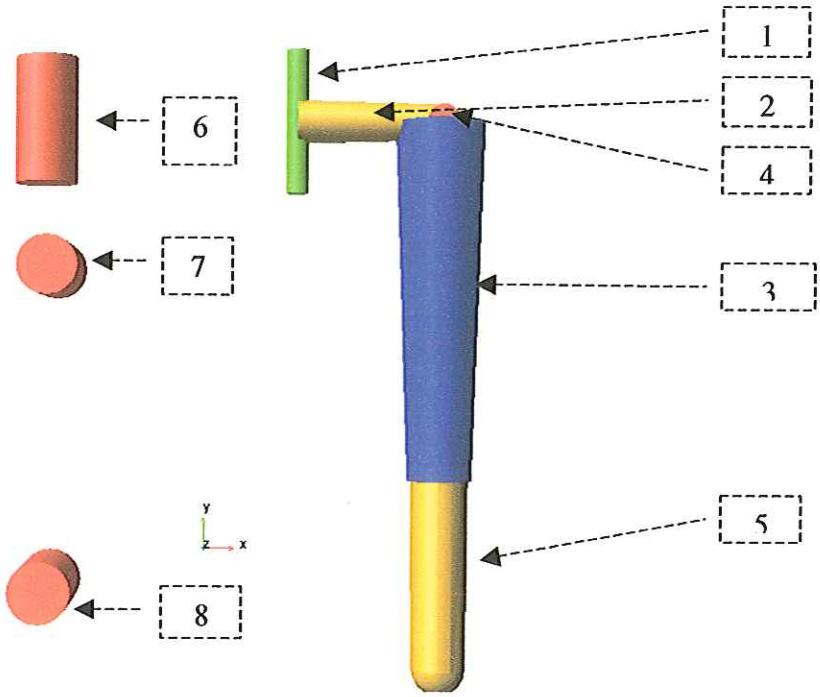


FIGURA A2. 1 – Modelo de um dedo da Garra

Part:

ground		ADAMS ID: 1	TYPE: Part
1)	pino1	ADAMS ID: 2	TYPE: Part
2)	PART_1	ADAMS ID: 3	TYPE: Part
3)	body_dedo	ADAMS ID: 4	TYPE: Part
4)	pino2	ADAMS ID: 6	TYPE: Part
5)	ponta_dedo	ADAMS ID: 8	TYPE: Part
6)	motor1	ADAMS ID: 12	TYPE: Part
7)	motor2	ADAMS ID: 13	TYPE: Part
8)	motor3	ADAMS ID: 14	TYPE: Part

8) motor3 ADAMS ID: 14 TYPE: Part

Point_mass:
None.

Flexible_Body:
None.

Constraint:

JOINT_1	ADAMS ID: 1	TYPE: Revolute Joint
fixed1	ADAMS ID: 2	TYPE: Fixed Joint
fixed2	ADAMS ID: 3	TYPE: Fixed Joint
JOINT_3	ADAMS ID: 5	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor2	ADAMS ID: 6	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor3	ADAMS ID: 7	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor1	ADAMS ID: 8	TYPE: Revolute Joint
JOINT_2	ADAMS ID: 9	TYPE: Revolute Joint
JOINT_10	ADAMS ID: 10	TYPE: Fixed Joint
JOINT_11	ADAMS ID: 11	TYPE: Fixed Joint

Force:

gravity	ADAMS ID: 1	TYPE: Gravity_Field
FRICTION_1	ADAMS ID: 1	TYPE: Friction
FRICTION_3	ADAMS ID: 3	TYPE: Friction
SFORCE2	ADAMS ID: 1	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_3	ADAMS ID: 2	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE1	ADAMS ID: 3	TYPE: Single_Component_Force
FRICTION_4	ADAMS ID: 4	TYPE: Friction
FRICTION_6	ADAMS ID: 6	TYPE: Friction
FRICTION_7	ADAMS ID: 7	TYPE: Friction
cable1	ADAMS ID: 0	TYPE: Single_Component_Force
cable2	ADAMS ID: 0	TYPE: Single_Component_Force
cable3	ADAMS ID: 0	TYPE: Single_Component_Force

Equation:
None.

Data_Element:

torque_1	ADAMS ID: 1	TYPE: ADAMS_Variable
torque_2	ADAMS ID: 2	TYPE: ADAMS_Variable
torque_3	ADAMS ID: 3	TYPE: ADAMS_Variable
teta_1	ADAMS ID: 4	TYPE: ADAMS_Variable
teta2	ADAMS ID: 5	TYPE: ADAMS_Variable
teta3	ADAMS ID: 6	TYPE: ADAMS_Variable
teta1	ADAMS ID: 1	TYPE: Plant_Output
teta2	ADAMS ID: 2	TYPE: Plant_Output
teta3	ADAMS ID: 3	TYPE: Plant_Output
torque1	ADAMS ID: 1	TYPE: Plant_Input
torque2	ADAMS ID: 2	TYPE: Plant_Input
torque3	ADAMS ID: 3	TYPE: Plant_Input

Topology of model: model_1

Ground Part: ground

Part ground
Is connected to:

pino1	via fixed1	(Fixed Joint)
motor2	via JOINT_motor2	(Revolute Joint)
motor2	via COUPLER_2	(Coupler)
motor3	via JOINT_motor3	(Revolute Joint)
motor3	via COUPLER_3	(Coupler)
motor1	via JOINT_motor1	(Revolute Joint)
motor1	via COUPLER_1	(Coupler)
motor2	via SFORCE2	(Single_Component_Force)
motor3	via SFORCE_3	(Single_Component_Force)
motor1	via SFORCE1	(Single_Component_Force)

Part pino1
Is connected to:

PART_1	via JOINT_1	(Revolute Joint)
PART_1	via COUPLER_1	(Coupler)
ground	via fixed1	(Fixed Joint)

Part PART_1
Is connected to:

pino1	via JOINT_1	(Revolute Joint)
pino1	via COUPLER_1	(Coupler)
PART_6	via fixed2	(Fixed Joint)

Part body_dedo
Is connected to:

ponta_dedo	via JOINT_3	(Revolute Joint)
ponta_dedo	via COUPLER_3	(Coupler)
PART_6	via JOINT_2	(Revolute Joint)
PART_6	via COUPLER_2	(Coupler)
ponta_dedo	via JOINT_10	(Fixed Joint)
PART_6	via JOINT_11	(Fixed Joint)

Part PART_6
Is connected to:

PART_1	via fixed2	(Fixed Joint)
body_dedo	via JOINT_2	(Revolute Joint)
body_dedo	via COUPLER_2	(Coupler)
body_dedo	via JOINT_11	(Fixed Joint)

Part ponta_dedo
Is connected to:

body_dedo	via JOINT_3	(Revolute Joint)

body_dedo via COUPLER_3 (Coupler)
body_dedo via JOINT_10 (Fixed Joint)

Part motor1
Is connected to:
ground via JOINT_motor1 (Revolute Joint)
ground via COUPLER_1 (Coupler)
ground via SFORCE1 (Single_Component_Force)

Part motor2
Is connected to:
ground via JOINT_motor2 (Revolute Joint)
ground via COUPLER_2 (Coupler)
ground via SFORCE2 (Single_Component_Force)

Part motor3
Is connected to:
ground via JOINT_motor3 (Revolute Joint)
ground via COUPLER_3 (Coupler)
ground via SFORCE_3 (Single_Component_Force)

Object Name : .model_2
Object Type : Model
Title : GAUSP – Utilizado no Controle de Força

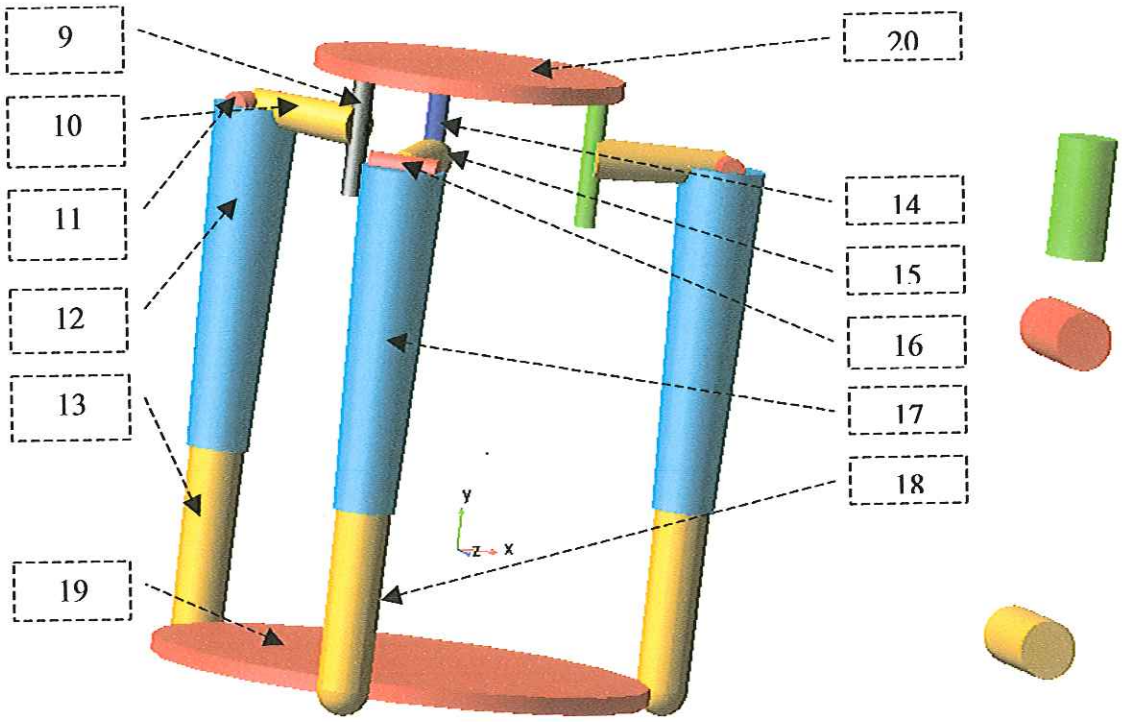


FIGURA A2. 2 – Modelo da garra

Part:

ground		ADAMS ID: 1	TYPE: Part
1)	pino1	ADAMS ID: 2	TYPE: Part
2)	PART_1	ADAMS ID: 3	TYPE: Part
3)	body_dedo	ADAMS ID: 4	TYPE: Part
4)	PART_6	ADAMS ID: 6	TYPE: Part
5)	ponta_dedo	ADAMS ID: 8	TYPE: Part
6)	motor1	ADAMS ID: 12	TYPE: Part
7)	motor2	ADAMS ID: 13	TYPE: Part
8)	motor3	ADAMS ID: 14	TYPE: Part
9)	pino1_2	ADAMS ID: 16	TYPE: Part
10)	PART_1_2	ADAMS ID: 17	TYPE: Part
11)	PART_18	ADAMS ID: 18	TYPE: Part
12)	body_dedo_2	ADAMS ID: 19	TYPE: Part
13)	ponta_dedo_2	ADAMS ID: 20	TYPE: Part
14)	pino1_3	ADAMS ID: 21	TYPE: Part
15)	PART_1_3	ADAMS ID: 22	TYPE: Part
16)	PART_23	ADAMS ID: 23	TYPE: Part

17)	body_dedo_3	ADAMS ID: 24	TYPE: Part
18)	ponta_dedo_3	ADAMS ID: 25	TYPE: Part
	motor1_3	ADAMS ID: 26	TYPE: Part
	motor2_3	ADAMS ID: 27	TYPE: Part
	motor1_2	ADAMS ID: 29	TYPE: Part
	motor2_2	ADAMS ID: 30	TYPE: Part
	motor3_2	ADAMS ID: 31	TYPE: Part
	motor3_4	ADAMS ID: 37	TYPE: Part
19)	object	ADAMS ID: 38	TYPE: Part
20)	base	ADAMS ID: 39	TYPE: Part

Point_mass:
None.

Constraint:

JOINT_1	ADAMS ID: 1	TYPE: Revolute Joint
fixed1	ADAMS ID: 2	TYPE: Fixed Joint
fixed2	ADAMS ID: 3	TYPE: Fixed Joint
JOINT_3	ADAMS ID: 5	TYPE: Revolute Joint
JOINT_2	ADAMS ID: 9	TYPE: Revolute Joint
fixed1_2	ADAMS ID: 10	TYPE: Fixed Joint
JOINT_1_2	ADAMS ID: 11	TYPE: Revolute Joint
JOINT2_2	ADAMS ID: 12	TYPE: Revolute Joint
JOINT_3_2	ADAMS ID: 13	TYPE: Revolute Joint
fixed1_3	ADAMS ID: 14	TYPE: Fixed Joint
JOINT_1_3	ADAMS ID: 15	TYPE: Revolute Joint
JOINT_2_3	ADAMS ID: 16	TYPE: Revolute Joint
fixed2_2	ADAMS ID: 17	TYPE: Fixed Joint
fixed2_3	ADAMS ID: 18	TYPE: Fixed Joint
JOINT_3_3	ADAMS ID: 19	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor1	ADAMS ID: 20	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor2	ADAMS ID: 21	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor3	ADAMS ID: 22	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor1_2	ADAMS ID: 23	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor2_2	ADAMS ID: 24	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor3_2	ADAMS ID: 25	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor1_3	ADAMS ID: 26	TYPE: Revolute Joint
JOINT_motor2_3	ADAMS ID: 27	TYPE: Revolute Joint
JOINT_29	ADAMS ID: 29	TYPE: Revolute Joint
JOINT_30	ADAMS ID: 30	TYPE: Translational Joint

Force:

gravity	ADAMS ID: 1	TYPE: Gravity_Field
FRICTION_1	ADAMS ID: 1	TYPE: Friction
FRICTION_3	ADAMS ID: 3	TYPE: Friction
FRICTION_4	ADAMS ID: 4	TYPE: Friction
FRICTION_5	ADAMS ID: 5	TYPE: Friction
FRICTION_6	ADAMS ID: 6	TYPE: Friction
FRICTION_7	ADAMS ID: 7	TYPE: Friction
FRICTION_8	ADAMS ID: 8	TYPE: Friction

FRICTION_9	ADAMS ID: 9	TYPE: Friction
FRICTION_10	ADAMS ID: 10	TYPE: Friction
SFORCE_1	ADAMS ID: 1	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_2	ADAMS ID: 2	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_3	ADAMS ID: 3	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_4	ADAMS ID: 4	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_5	ADAMS ID: 5	TYPE: Single_Component_Forcep
SFORCE_6	ADAMS ID: 6	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_7	ADAMS ID: 7	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_8	ADAMS ID: 8	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_9	ADAMS ID: 9	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable1	ADAMS ID: 10	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable2	ADAMS ID: 11	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable3	ADAMS ID: 12	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable4	ADAMS ID: 13	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable5	ADAMS ID: 14	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable6	ADAMS ID: 15	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable7	ADAMS ID: 16	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable8	ADAMS ID: 17	TYPE: Single_Component_Force
SFORCE_cable9	ADAMS ID: 18	TYPE: Single_Component_Force
FRICTION_11	ADAMS ID: 11	TYPE: Friction
FRICTION_12	ADAMS ID: 12	TYPE: Friction
FRICTION_13	ADAMS ID: 13	TYPE: Friction
FRICTION_14	ADAMS ID: 14	TYPE: Friction
FRICTION_15	ADAMS ID: 15	TYPE: Friction
FRICTION_16	ADAMS ID: 16	TYPE: Friction
FRICTION_17	ADAMS ID: 17	TYPE: Friction
FRICTION_18	ADAMS ID: 18	TYPE: Friction
FRICTION_19	ADAMS ID: 19	TYPE: Friction
CONTACT_1	ADAMS ID: 1	TYPE: Contact
CONTACT_2	ADAMS ID: 2	TYPE: Contact
CONTACT_3	ADAMS ID: 3	TYPE: Contact

Equation:
None.

Data_Element:

teta1	ADAMS ID: 4	TYPE: ADAMS_Variable
teta2	ADAMS ID: 5	TYPE: ADAMS_Variable
teta3	ADAMS ID: 6	TYPE: ADAMS_Variable
POUTPUT_teta2	ADAMS ID: 2	TYPE: Plant_Output
POUTPUT_teta3	ADAMS ID: 3	TYPE: Plant_Output
POUTPUT_tetas	ADAMS ID: 4	TYPE: Plant_Output
Vel_teta1	ADAMS ID: 7	TYPE: ADAMS_Variable
Vel_teta3	ADAMS ID: 8	TYPE: ADAMS_Variable
Vel_teta2	ADAMS ID: 9	TYPE: ADAMS_Variable
POU_NL	ADAMS ID: 5	TYPE: Plant_Output
MEA_PT2PT_10	ADAMS ID: 10	TYPE: Measure_POINT_POINT
MEA_PT2PT_11	ADAMS ID: 11	TYPE: Measure_POINT_POINT
MEA_PT2PT_12	ADAMS ID: 12	TYPE: Measure_POINT_POINT
VARIABLE_torque1	ADAMS ID: 13	TYPE: ADAMS_Variable

VARIABLE_torque2	ADAMS ID: 14	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_torque3	ADAMS ID: 15	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_torque4	ADAMS ID: 16	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_torque5	ADAMS ID: 17	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_torque6	ADAMS ID: 18	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_torque7	ADAMS ID: 19	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_torque8	ADAMS ID: 20	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_torque9	ADAMS ID: 21	TYPE: ADAMS_Variable
PINPUT_torques	ADAMS ID: 1	TYPE: Plant_Input
VARIABLE_pta1x	ADAMS ID: 22	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta1y	ADAMS ID: 23	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta1z	ADAMS ID: 24	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta2x	ADAMS ID: 25	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta2y	ADAMS ID: 26	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta2z	ADAMS ID: 27	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta3x	ADAMS ID: 28	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta3y	ADAMS ID: 29	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_pta3z	ADAMS ID: 30	TYPE: ADAMS_Variable
POUTPUT_ponta_dedos	ADAMS ID: 6	TYPE: Plant_Output
teta4	ADAMS ID: 31	TYPE: ADAMS_Variable
teta5	ADAMS ID: 32	TYPE: ADAMS_Variable
teta6	ADAMS ID: 33	TYPE: ADAMS_Variable
teta7	ADAMS ID: 34	TYPE: ADAMS_Variable
teta8	ADAMS ID: 35	TYPE: ADAMS_Variable
teta9	ADAMS ID: 36	TYPE: ADAMS_Variable
planta1_1	ADAMS ID: 7	TYPE: Plant_Output
VARIABLE_motor1_1	ADAMS ID: 37	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor1_2	ADAMS ID: 38	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor1_3	ADAMS ID: 39	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor2_1	ADAMS ID: 40	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor2_2	ADAMS ID: 41	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor2_3	ADAMS ID: 42	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor3_1	ADAMS ID: 43	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor3_2	ADAMS ID: 44	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_motor3_3	ADAMS ID: 45	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_desl_vertical	ADAMS ID: 46	TYPE: ADAMS_Variable
PINPUT_2	ADAMS ID: 2	TYPE: Plant_Input
POUTPUT_2	ADAMS ID: 8	TYPE: Plant_Output
VARIABLE_FORCE_CABLE1	ADAMS ID: 47	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE2	ADAMS ID: 48	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE3	ADAMS ID: 49	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE4	ADAMS ID: 50	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE5	ADAMS ID: 51	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE6	ADAMS ID: 52	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE7	ADAMS ID: 53	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE8	ADAMS ID: 54	TYPE: ADAMS_Variable
VARIABLE_FORCE_CABLE9	ADAMS ID: 55	TYPE: ADAMS_Variable
POUTPUT_3	ADAMS ID: 9	TYPE: Plant_Output

UDE_Instance:
general_motion_3 TYPE: general_motion

Topology of model: model_2

Ground Part: ground

Part ground
Is connected to:

motor1	via JOINT__motor1	(Revolute Joint)
motor2	via JOINT_motor2	(Revolute Joint)
motor3	via JOINT_motor3	(Revolute Joint)
motor1_2	via JOINT__motor1_2	(Revolute Joint)
motor2_2	via JOINT_motor2_2	(Revolute Joint)
motor3_2	via JOINT_motor3_2	(Revolute Joint)
motor1_3	via JOINT__motor1_3	(Revolute Joint)
motor2_3	via JOINT_motor2_3	(Revolute Joint)
motor3_4	via JOINT_29	(Revolute Joint)
motor1	via SFORCE_1	(Single_Component_Force)
motor2	via SFORCE_2	(Single_Component_Force)
motor3	via SFORCE_3	(Single_Component_Force)
motor1_2	via SFORCE_4	(Single_Component_Force)
motor2_2	via SFORCE_5	(Single_Component_Force)
motor3_2	via SFORCE_6	(Single_Component_Force)
motor1_3	via SFORCE_7	(Single_Component_Force)
motor2_3	via SFORCE_8	(Single_Component_Force)
motor3_4	via SFORCE_9	(Single_Component_Force)
base	via general_motion_3.motion_t1	(Point Motion)
base	via general_motion_3.motion_t2	(Point Motion)
base	via general_motion_3.motion_t3	(Point Motion)
base	via general_motion_3.motion_r1	(Point Motion)
base	via general_motion_3.motion_r2	(Point Motion)
base	via general_motion_3.motion_r3	(Point Motion)
base	via JOINT_30	(Translational Joint)

Part pino1
Is connected to:

PART_1	via JOINT_1	(Revolute Joint)
base	via fixed1	(Fixed Joint)

Part PART_1
Is connected to:

pino1	via JOINT_1	(Revolute Joint)
PART_6	via fixed2	(Fixed Joint)
motor1	via SFORCE_cable1	(Single_Component_Force)

Part body_dedo
Is connected to:

ponta_dedo	via JOINT_3	(Revolute Joint)
PART_6	via JOINT_2	(Revolute Joint)
motor2	via SFORCE_cable2	(Single_Component_Force)

Part PART_6
Is connected to:

PART_1	via	fixed2	(Fixed Joint)
body_dedo	via	JOINT_2	(Revolute Joint)

Part ponta_dedo
Is connected to:

body_dedo	via	JOINT_3	(Revolute Joint)
motor3	via	SFORCE_cable3	(Single_Component_Force)
object	via	CONTACT_1	(Contact)

Part motor1
Is connected to:

ground	via	JOINT__motor1	(Revolute Joint)
ground	via	SFORCE_1	(Single_Component_Force)
PART_1	via	SFORCE_cable1	(Single_Component_Force)

Part motor2
Is connected to:

ground	via	JOINT_motor2	(Revolute Joint)
ground	via	SFORCE_2	(Single_Component_Force)
body_dedo	via	SFORCE_cable2	(Single_Component_Force)

Part motor3
Is connected to:

ground	via	JOINT_motor3	(Revolute Joint)
ground	via	SFORCE_3	(Single_Component_Force)
ponta_dedo	via	SFORCE_cable3	(Single_Component_Force)

Part pino1_2
Is connected to:

base	via	fixed1_2	(Fixed Joint)
PART_1_2	via	JOINT_1_2	(Revolute Joint)

Part PART_1_2
Is connected to:

pino1_2	via	JOINT_1_2	(Revolute Joint)
PART_18	via	fixed2_3	(Fixed Joint)
motor1_2	via	SFORCE_cable4	(Single_Component_Force)

Part PART_18
Is connected to:

PART_1_2	via	fixed2_3	(Fixed Joint)
body_dedo_2	via	JOINT2_2	(Revolute Joint)

Part body_dedo_2
Is connected to:

PART_18	via	JOINT2_2	(Revolute Joint)
ponta_dedo_2	via	JOINT_3_2	(Revolute Joint)

motor2_2 via SFORCE_cable5 (Single_Component_Force)

Part ponta_dedo_2
Is connected to:
body_dedo_2 via JOINT_3_2 (Revolute Joint)
motor3_2 via SFORCE_cable6 (Single_Component_Force)
object via CONTACT_2 (Contact)

Part pino1_3
Is connected to:
base via fixed1_3 (Fixed Joint)
PART_1_3 via JOINT_1_3 (Revolute Joint)

Part PART_1_3
Is connected to:
pino1_3 via JOINT_1_3 (Revolute Joint)
PART_23 via fixed2_2 (Fixed Joint)
motor1_3 via SFORCE_cable7 (Single_Component_Force)

Part PART_23
Is connected to:
PART_1_3 via fixed2_2 (Fixed Joint)
body_dedo_3 via JOINT_2_3 (Revolute Joint)

Part body_dedo_3
Is connected to:
PART_23 via JOINT_2_3 (Revolute Joint)
ponta_dedo_3 via JOINT_3_3 (Revolute Joint)
motor2_3 via SFORCE_cable8 (Single_Component_Force)

Part ponta_dedo_3
Is connected to:
body_dedo_3 via JOINT_3_3 (Revolute Joint)
motor3_4 via SFORCE_cable9 (Single_Component_Force)
object via CONTACT_3 (Contact)

Part motor1_3
Is connected to:
ground via JOINT__motor1_3 (Revolute Joint)
ground via SFORCE_7 (Single_Component_Force)
PART_1_3 via SFORCE_cable7 (Single_Component_Force)

Part motor2_3
Is connected to:
ground via JOINT_motor2_3 (Revolute Joint)
ground via SFORCE_8 (Single_Component_Force)
body_dedo_3 via SFORCE_cable8 (Single_Component_Force)

Part motor1_2
Is connected to:
ground via JOINT__motor1_2 (Revolute Joint)

ground	via	SFORCE_4	(Single_Component_Force)
PART_1_2	via	SFORCE_cable4	(Single_Component_Force)

Part motor2_2
Is connected to:

ground	via	JOINT_motor2_2	(Revolute Joint)
ground	via	SFORCE_5	(Single_Component_Force)
body_dedo_2	via	SFORCE_cable5	(Single_Component_Force)

Part motor3_2
Is connected to:

ground	via	JOINT_motor3_2	(Revolute Joint)
ground	via	SFORCE_6	(Single_Component_Force)
ponta_dedo_2	via	SFORCE_cable6	(Single_Component_Force)

Part motor3_4
Is connected to:

ground	via	JOINT_29	(Revolute Joint)
ground	via	SFORCE_9	(Single_Component_Force)
ponta_dedo_3	via	SFORCE_cable9	(Single_Component_Force)

Part object
Is connected to:

ponta_dedo	via	CONTACT_1	(Contact)
ponta_dedo_2	via	CONTACT_2	(Contact)
ponta_dedo_3	via	CONTACT_3	(Contact)

Part base
Is connected to:

pino1	via	fixed1	(Fixed Joint)
pino1_2	via	fixed1_2	(Fixed Joint)
pino1_3	via	fixed1_3	(Fixed Joint)
ground	via	general_motion_3.motion_t1	(Point Motion)
ground	via	general_motion_3.motion_t2	(Point Motion)
ground	via	general_motion_3.motion_t3	(Point Motion)
ground	via	general_motion_3.motion_r1	(Point Motion)
ground	via	general_motion_3.motion_r2	(Point Motion)
ground	via	general_motion_3.motion_r3	(Point Motion)
ground	via	JOINT_30	(Translational Joint)