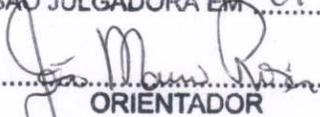


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Oscar Fernando
Avilés Sánchez E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 01 / 12 / 2008


.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de Sistema de Prensão para utilização em Dispositivos Robóticos

Autor: **Oscar Fernando Avilés Sánchez**
Orientador: **Prof. Dr. João Mauricio Rosário**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Desenvolvimento de Sistema de Prensão para utilização em Dispositivos Robóticos

Autor: **Oscar Fernando Avilés Sánchez**
Orientador: **Prof. Dr. João Mauricio Rosário**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008
S.P. – Brasil

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

Av55d	<p>Avilés Sánchez, Oscar Fernando Desenvolvimento de sistema de preensão para utilização em dispositivos robóticos / Oscar Fernando Avilés Sánchez. -- Campinas, SP: [s.n.], 2008.</p> <p>Orientador: João Maurício Rosário. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Bioengenharia. 2. Biomecânica. 3. Robótica. I. Rosário, João Maurício. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Grasp system development for using with robotic devices

Palavras-chave em Inglês: Bioengineering, Biomechanics, Robotics

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Auteliano Antunes dos Santos Junior, Marcius Fabius Henriques de Carvalho, Francisco Carlos Parquet Bizarria, Paola Andrea Niño Suarez

Data da defesa: 01/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

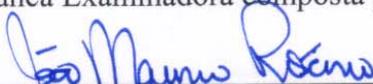
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

TESE DE DOUTORADO

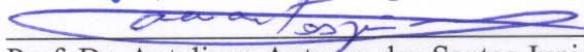
**Desenvolvimento de Sistema de Prensão para
utilização em Dispositivos Robóticos**

Autor: Oscar Fernando Avilés Sánchez
Orientador: Prof. Dr. João Mauricio Rosário

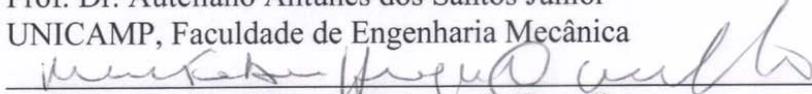
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



Prof. Dr. João Mauricio Rosário, Presidente
UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica



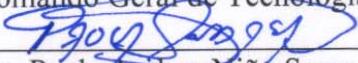
Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior
UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho
CENPRA, Centro de Pesquisa Renato Archer



Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria
CTA, Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial



Prof. Dra. Paola Andrea Niño Suarez
UMNG, Universidad Militar Nueva Granada

Campinas, 01 de Dezembro de 2008

Dedicatória:

Aos meus pais, meus irmãos e ao amor da minha vida, minha filha.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Mauricio Rosário pela confiança depositada e mim, pela sua oportuna orientação a qual me mostrou os caminhos a serem seguidos, e quem se tornou no final um grande amigo.

Aos Professores; Prof. Dr. Eurípides Nóbrega e Prof. Dr. Niederauer Mastelari pela confiança depositada em mim durante meu Programa de estágio docente PED.

Ao Prof. Dr. Nestor Sepúlveda da Universidad Militar Nueva Granada, pelo apoio e amizade.

Aos meus colegas e amigos Ing. MSc. Álvaro Joffre, Tec. Almiro Silveira e o Prof. MSc. Luis Gustavo, eles sempre tiveram comentários oportunos para enriquecer o meu trabalho.

Aos Srs. Técnicos do LAIR e Oficina do DPM: Ferreira, Mauro, pela sua amizade e oportuna colaboração.

A todas as secretarias da CPG – CG da FEM, Silvana, Denise, Juliana, Alessandra, Cristina, Regina, Carla, Isabela, Vera, etc., pela amizade e colaboração.

Ao pessoal do CTI pelo apoio na prototipagem.

A Universidad Militar Nueva Granada pelo apoio.

A todos os professores e colegas do DPM, que ajudaram de forma direta ou indireta na conclusão deste trabalho.

*Se você se sente só e por que
construiu muros em vez de pontes*

Anônimo

Resumo

AVILES, Oscar Fernando, *Projeto, Concepção, Simulação de Sistemas de Prensão para utilização em Dispositivos Robóticos: Estudo de caso dispositivo Mecatrônico MUC-1*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 178p. Tese (Doutorado)

O objetivo desta pesquisa e o desenvolvimento do protótipo de uma mão mecânica com características antropomórficas. A principal finalidade dessa tese de doutorado é projetar e construir uma mão antropomórfica com cinco dedos para pesquisa na área de manipulação. Neste trabalho é proposta inicialmente a fabricação de um mecanismo de um dedo robótico que possui um grau de liberdade (GDL) inspirado na anatomia de um dedo humano, considerando suas restrições e suas dimensões. O estudo cinetostático foi realizado utilizando a metodologia de grupos de Assur. A análise para imitar os movimentos de um dedo é realizada a partir da solução gráfica das posições obtidas pelo dedo mecânico através da utilização de um software comercial de CAD, sendo calculado de modo interativo as forças e reações que são geradas em cada junta e, posteriormente, é implementado um programa de computador utilizando a plataforma *Matlab*TM, para encontrar a solução desse sistema de equações. O protótipo inicial de dedo mecânico foi equipado com um sensor tipo FSRs (*Force Sensitive Resistors*) para a medição de força, que consiste de um polímero condutor piezo resistivo, o qual altera o valor de sua resistência ao ser deformado através da aplicação de uma força sobre sua superfície*. A inserção da sensação de força é um componente importante para a realização de sistemas robóticos que podem interatuar de forma orgânica com o mundo exterior.

Palavras Chave

Bioengenharia, Modelagem, Robótica, Controle

* Tekscan. FlexiForceTM Sensors User Manual. 2004. Disponible en <http://www.tekscan.com>.

Abstract

AVILES, Oscar Fernando, “*Project, Conception and Simulation of Apprehension Systems for using in Robotics Devices: Case of study Mechatronic Device MUC-1*”, Campinas,: Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, 2008. 178p.These (Doctorate)

The objective of this research is to develop a mechanical hand prototype with anthropomorphic characteristics. The main goal of this doctoral thesis is to project and assembly a five fingered anthropomorphic hand for research prehensile tasks. Initially the creation of a one DOF finger mechanical finger inspired on its human counterpart is proposed. the kinetostatic study was achieved by using the Assur groups method. The analysis for mimicking the movements of each finger was done through graphical solutions knowing the positions thanks to CAD software, allowing the calculation of forces and reactions over each joint, and the creation of data for solving the equations through *Matlab*TM. The first prototype was equipped with a FSRs sensor for force measurements*. The force feedback is of great importance when interacting in the real world.

Key words

Bioengineering, Modeling, Robotics, Control

* Tekscan. FlexiForceTM Sensors User Manual. 2004. Disponible en <http://www.tekscan.com>.

Índice

Índice de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura.....	xix
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Síntese do trabalho.....	2
1.3 Motivação	2
1.4 Objetivos e metodologia do trabalho	5
1.5 Organização da tese	5
Capítulo 2 Revisão da Literatura: Garras e mãos robóticas	7
2.1 Introdução	7
2.2 Grippers Robóticos	7
2.3 Mãos Robóticas.....	12
2.3.1 Mão MARCUS	12
2.3.2 Mão Southampton-Remedi	13
2.3.3 Mão da Universidade Hokkaido	14
2.3.4 Mão Antropomórfica Ultraleve.....	15
2.3.5 Modelo de mão implementada na Universidade Nacional de Taiwan (NTU).....	17
2.3.6 Mão Utah/MIT	18
2.3.7 Mão Belgrade/USC	19
2.3.8 Mão Stanford/JPL (Salisbury)	21
2.3.9 Modelo de mão da DLR's.....	23
2.3.10 Modelo de mão Robonaut	25
2.4 Avaliação mãos Robóticas.....	26
2.4.1 Índice de Antropomorfismo	28
2.4.2 Índice de Destreza	30

2.4.3 Destreza Mecânica	31
2.4.4 Destreza relativa ao aparato sensorial	33
2.5 Comentários Finais	35
Capítulo 3 Modelagem Biomecânica de uma mão humana	36
3.1 Introdução	36
3.2 Modelo Geométrico	37
3.2.1 Descrição esquelética da mão – Ferramenta terminal.....	38
3.2.3 Biomecânica Inter Falângica dos Dedos.....	40
3.3 Modelagem cinemática de cadeias cinemáticas abertas.	42
3.4 Sistemas de Referencia	43
3.5 Representação de <i>Denavit-Hartenberg</i>	45
3.6 Modelo Cinemático da Mão Humana.....	48
3.7 Restrições da Modelagem para a mão humana.....	51
3.8 Problema Cinemático Inverso.....	54
3.9 Matriz Jacobiana	54
3.9.1 Inversão da Matriz Jacobiana – Controle de Posição	56
3.10 Comentários Finais	58
Capítulo 4 Noções sobre Preensão.....	59
4.1 Introdução	59
4.2 As formas de preensão da mão humana.....	59
4.2.1 As preensões digitais.....	60
4.2.2 Preensões palmares	65
4.2.3 Preensões centradas	67
4.2.4 As preensões-ações	69
4.3 Estudo de Tarefas Modulo de Pré formas.....	72
4.3.1 Estratégias de preensão	72
4.3.2 Oposição	74
4.3.1 Modulo de Pré-formas:	78
4.4 Proposta Controle em malha fechada	82
4.4.1 Dinâmica de mãos robóticas	84
4.4.2 Atuador	85

4.4.3 Identificação dos parâmetros:	86
4.4.4 Modelo da planta.....	87
4.4.5 Estratégias de controle	88
4.4.6 Parâmetros de forma preensão	96
4.5 Física do movimento de Preensão	97
4.5.1 Forças de Preensão.....	97
4.5.2 Lei de Coulomb.....	97
4.5.3 Cone de Fricção	97
4.5.4 Representação Dual do Contato e da Preensão.....	99
4.5.5 Tipos de Contato	100
4.5.6 Conceitos de Forças de Preensão	103
4.5.7 Forças de Preensão Entre Dois Dedos	103
4.5.8 Preensões em dois Pontos de Contato Flexíveis em 3D	106
4.8 Comentários Finais	107
Capítulo 5 Implementação experimental.....	108
5.1 Introdução	108
5.2 A analogia biomecânica.....	109
5.3 Obtenção das equações interfalangianas.....	113
5.4 Elementos constitutivos	116
5.5 Mecânica.....	118
5.6 Interface Eletrônica.....	121
5.6.1 Fonte de tensão	122
5.6.2 Sensor de força.....	122
5.6.3 Atuadores (Músculo artificial).....	128
5.6.4 Etapa de Potência.....	129
5.7 Testes realizados através de interface de usuário	133
5.8 A mão MUC-1	135
5.9 Comentários Finais	140
Capítulo 6 Procedimento Experimental.....	141
6.1 Arquitetura Proposta.....	142
6.1 Implementação <i>Software</i> Robô ABB IRB1400	146

6.3 Implementação Software MUC-1 em Labview	146
6.4 Teste com a MUC-1	146
6.4 Comentários Finais	149
Capítulo 7 Conclusões e perspectivas futuras	150
Referências.....	154
Bibliografia consultada.....	162
Apêndice A	170
Apêndice B	172
Apêndice C	174
Apêndice D	177
Apêndice E.....	181

Índice de Figuras

Figura 1.1: Robôs ABB IRB 140 e IRB 1400 do LAR – UNICAMP.	4
Figura 2.1: Exemplos de pinças robóticas.	8
Figura 2.2: Imagem da mão MARCUS.	13
Figura 2.3: Modelo <i>Southampton-remedi</i>	13
Figura 2.4: Mão da Universidade Hokkaido.	15
Figura 2.5: Mão <i>Karlsruhe</i>	16
Figura 2.6: Modelo de Mão da Universidade Nacional de Taiwan (NTU).	17
Figura 2.7: A Mão Utah/MIT.	18
Figura 2.8: A Mão Belgrade/USC.	20
Figura 2.9: Mão Stanford/JPL.	21
Figura 2.10: Imagens da mão DLR.	23
Figura 2.11: <i>Robonaut Hand</i>	25
Figura 2.12: Avaliação segundo grau de antropomorfismo.	29
Figura 2.13: Comparação segundo o índice de Antropomorfismo.	30
Figura 2.14: Avaliação segundo sua destreza mecânica.	32
Figura 2.15: Comparação segundo o a destreza Mecânica.	32
Figura 2.16: Avaliação segundo sua destreza sensorial.	33
Figura 2.17: Comparação relativa ao aparato sensorial.	35
Figura 3.1: Esqueleto da mão direita humana com notação de utilizada.	39
Figura 3.2: Descrição dos tipos de articulação dos dedos da mão.	41
Figura 3.3: Movimentos que poderão ser realizados por uma mão.	41
Figura 3.4: Representação do sistema de referencia O_i	44
Figura 3.5: Parâmetros de D-H, θ , α , a e d	45
Figura 3.6: Estrutura biomecânica da mão humana.	49

Figura 3.7: Parâmetros geométricos da mão humana.	49
Figura 3.8: Movimento da ponta do dedo com todas as juntas em movimento.....	52
Figura 3.9: Flexão do dedo médio.	53
Figura 3.10: Extensão do dedo médio.....	53
Figura 3.11: Malha de controle de posição.....	57
Figura 4.1: Formas de preensão da mão humana I.	61
Figura 4.2: Formas de preensão da mão humana II.	62
Figura 4.3: Formas de preensão da mão humana III.....	63
Figura 4.4: Formas de preensão da mão humana IV.	65
Figura 4.5: Formas de preensão da mão humana V.....	66
Figura 4.6: Formas de preensão da mão humana VI.	67
Figura 4.7: Formas de preensão da mão humana VII.	68
Figura 4.8: Formas de preensão da mão humana VIII.....	69
Figura 4.9: Formas de preensão da mão humana IX.	70
Figura 4.10: Taxonomia parcial das formas de preensão de uma mão humana	71
Figura 4.11: Tipos de preensão realizados através da simulação de MUC-I.....	71
Figura 4.12: Fluxograma - seqüência de movimentos para uma tarefa de preensão.	73
Figura 4.13: Direções de proximidade.....	74
Figura 4.14: Esquema geral para classificar as preensões	75
Figura 4.15: Palavra de controle na saída digital da placa NI USB 6008.....	80
Figura 4.16: Diagrama de fluxo da lógica para configuração da palavra de controle.	81
Figura 4.17: Preensão de um objeto com dedos articulados.....	83
Figura 4.18: Cinemática da mão MUC-1.....	85
Figura 4.19: Curva de atrito aproximada.	87
Figura 4.20: Esquema mãos robóticas <i>Salisbury</i> e MUC-1.....	90
Figura 4.21: Estrutura de Controle Ativo considerando a Rigidez, versão 1.	92
Figura 4.22: Controle ativo de rigidez, versão 2.....	92
Figura 4.23: Controle através de impedância básico.	93
Figura 4.24: Controle através de impedância baseado em posição.	93
Figura 4.25: Controle por admitância.	93
Figura 4.26: Conceito da organização do Controle Híbrido Posição/Força.	94

Figura 4.27: Controle Híbrido por Impedância.....	94
Figura 4.28: Controle de Força Explícito.	94
Figura 4.29: Exemplo de forças aplicadas em robótica.	96
Figura 4.30: Importância do centro de gravidade.	97
Figura 4.31: Cone de fricção.....	98
Figura 4.32: Representação cartesiana de um “wrench”.	100
Figura 4.33: Representação de contatos primitivos.	101
Figura 4.34: Representação de contatos complexos como combinação de contatos primitivos.	102
Figura 4.35: Representação dos tipos de contato através de sistemas de molas virtuais.....	102
Figura 4.36: Esquema de contatos complexos.....	104
Figura 4.37: Diagrama geométrico de uma preensão com dois pontos de contato com fricção.	105
Figura 4.38: Contatos flexíveis em 3D.	107
Figura 5.1: Tendões e músculos do dedo indicador.....	109
Figura 5.2: Analogia mecânica robótica.	110
Figura 5.3: Esquema cinemático do dedo robô.....	111
Figura 5.4: Juntas de interesse.	115
Figura 5.5: Relação θ_1 vs θ_2	116
Figura 5.6: Relação θ_2 vs θ_3	116
Figura 5.7: Ossos de um dedo humano e seu correspondente mecânico.....	118
Figura 5.8: Esquema geral do dedo e seqüência de movimentos.	119
Figura 5.9: Esquema geral da montagem de um dedo.....	120
Figura 5.10: Seqüência de movimento do dedo mecânico.	120
Figura 5.11: Estrutura de acionamento e controle.	121
Figura 5.12: Gráfico de resistência (Ω) Vs. Força (N) de um FSR comum [1].....	123
Figura 5.13: Sensor <i>FlexiForce</i> TM (Imagem de um FSR).....	123
Figura 5.14: Circuito para condicionamento de sinal para sensor <i>FlexiForce</i> TM	124
Figura 5.15: Montagem para a caracterização do sensor.....	126
Figura 5.16: Gráfico de V_{sal1} [V] vs. Força [N].....	126
Figura 5.17: Gráfico de V_{sal2} [V] vs Força [N].....	127
Figura 5.18: Resposta estática do sistema versus resposta do polinômio de quarta ordem.....	127
Figura 5.19: Detalhe do músculo artificial.	128

Figura 5.20: Esquema Interno do L298.	130
Figura 5.21: Circuito integrado L298, pinos.....	131
Figura 5.22: Circuito Esquemático da Montagem Elétrica Geral para cada motor.	132
Figura 5.23: Circuito integrado 4n25.....	132
Figura 5.24: Circuito de condicionamento de sinal com 4N25.	133
Figura 5.25: Painel frontal em <i>Labview</i> TM	134
Figura 5.26: Diagrama de fluxo programa <i>LabView</i> TM	134
Figura 5.27: Ensaio do conjunto dedo – sensor.	135
Figura 5.28: A mão MUC-1.....	136
Figura 5.29: Sistemas de referência da MUC-1.....	137
Figura 5.30: Simulação de um dedo (flexão / extensão), MUC-1.	138
Figura 5.31: Detalhes construtivos da MUC-1.	139
Figura 6.1: Arquitetura proposta para testes com a mão robótica.	142
Figura 6.2: Integração da mão MUC-1 com o Robô ABB 1400.	144
Figura 6.3: Diagrama de fluxo geral do programa para testes.....	145
Figura 6.4: Sujeição de ferramentas (Preensão - ação).....	147
Figura 6.5: Preensão com três dedos (Indicador, pequeno, polegar).....	147
Figura 6.6: Preensão cilíndrico com todos os dedos.....	147
Figura 6.7: Preensão elemento cúbico com todos os dedos.....	148
Figura 6.8: Preensão fino	148
Figura 6.9: Preensão de potência não preênsil (suporte)	148

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Exemplo de <i>grippers</i> robóticos de aplicação industrial.....	9
Tabela 2.2: Dados técnicos da Mão <i>Southampton</i> -Remedi.	14
Tabela 2.3: Dados técnicos da mão da Universidade de Hokkaido.....	15
Tabela 2.4: Dados técnicos da mão de <i>Karlsruhe</i>	16
Tabela 2.5: Dados técnicos da mão NTU.	17
Tabela 2.6: Dados técnicos de mão Utah/MIT.	19
Tabela 2.7: Dados técnicos da mão <i>Belgrade/USC</i>	20
Tabela 2.8: Dados técnicos da mão <i>Stanford/JPL (Salisbury)</i>	22
Tabela 2.9: Dados técnicos da Mão DLR II.	24
Tabela 2.10: Dados técnicos da mão <i>Robonaut</i>	26
Tabela 2.11: Comparação de mãos artificiais.	27
Tabela 2.12: Índice de antropomorfismo da MUC-1.....	29
Tabela 2.13: Índice de destreza mecânica da MUC-1.	32
Tabela 2.14: Avaliação de acordo ao aparato sensorial da MUC-1.....	34
Tabela 3.1: Dados antropométricos médios para o dedo índice humano.	40
Tabela 4.1: Posturas típicas agrupadas em sete categorias.	76
Tabela 4.2: Tarefas típicas a serem realizadas para uma pessoa, analogia com a MUC-1.....	77
Tabela 4.3: Tarefas típicas a serem realizadas para uma pessoa.	78
Tabela 4.4: Modulo de pré formas de preensão, posições iniciais da MUC-1.	79
Tabela 4.5: Tempos para o modulo de pré formas.....	80
Tabela 4.6: Informação técnica da MUC-1.....	85
Tabela 4.7: Comparação de vários métodos de controle de força.	95
Tabela 5.1: Analogia Biológica – Mecânica.....	110
Tabela 5.2: Pontos de interesse para as juntas em estudo.....	115
Tabela 5.3: Seleção de elementos construtivos.....	117

Tabela 5.4: Resposta do sensor para três testes	126
Tabela 5.5: Especificação do motor.....	129
Tabela 5.6: Especificação da caixa redutora.....	129
Tabela 5.7: Rangos máximos permitidos no circuito L298.....	131
Tabela 5.8: Comparação limites mão humana e mão mecânica.....	137
Tabela 6.1: Lógica da programação para Test_1.....	143

Nomenclatura

$\underline{\theta}$	Vetor de posições angulares das articulações.
\underline{X}	Vetor posição.
(X, Y, Z)	Posição cartesiana
(ψ, θ, ϕ)	Vetor de orientação
\underline{O}	Matriz 3x1- origem em relação a um sistema de referência local.
\underline{O}_{i+1}	Matriz 3x1- próxima origem em relação a um sistema de referência local
${}^{i-1}A_i$	Matriz 3x3- matriz de passagem
\underline{L}_i	$(O_{i+1} - O_i)$
θ_i	Ângulo entre links adjacentes.
α_i	Ângulo de torção do link.
d_i	Menor distância entre links adjacentes.
a_i	Comprimento do link.
I	Inércia.
$J(\theta)$	Matriz Jacobiana
$J^\#(q)$	Pseudoinversa da matriz Jacobiana
T_{ij}	Tempos de duração de movimento
τ_{motor}	Torque do motor,
ϕ	Fluxo magnético,
i_a	Corrente de armadura e
k	Constante do motor
f_n	Força normal de duas superfícies em contato
f_t	Força tangencial devida a inércia
DH	Denavit-Hartenberg
GDL	Graus de liberdade
MUC-1	Mão Universidade de campinas
FSR	<i>Force Resistive Sensor</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Histórico

Nos últimos anos muitas instituições de pesquisa vêm desenvolvendo projetos de sistemas antropomórficos de prensão com o objetivo de minimizar custos de próteses mecânicas, geralmente importadas, e para fins de manipulação industrial, principal motivação deste trabalho de pesquisa. Na UNICAMP, o Laboratório de Automação Integrada e Robótica (LAIR) vêm desenvolvendo nos últimos anos, projetos nas áreas de pesquisa de automação industrial e robótica, com importantes projetos de sistemas de manipulação, inteligência artificial, e em engenharia de reabilitação e próteses antropomórficas, destacando-se trabalhos de (HERMINI, 2002) e (CASSEMIRO, 2005) que desenvolveram mãos robóticas e próteses de membro superior e inferior.

O desenvolvimento deste trabalho de tese de doutorado faz parte de trabalhos conjuntos de pesquisa envolvendo a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e Universidade Militar de Nueva Granada (UMNG) na Colômbia, além de um importante trabalho de revisão de artigos internacionais referentes ao tema (AVILES, 2007), (HERMINI, 2000), (CASSEMIRO, 2005). Para a fabricação dos elementos construtivos do protótipo desenvolvido foi necessário o apoio de profissionais em processos de usinagem e prototipagem rápida do Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPra - CTI).

1.2 Síntese do trabalho

Nesse trabalho de pesquisa foi estudada a fisiologia da mão humana como fonte inspiradora para o projeto e concepção do mecanismo de uma mão antropomórfica. Inicialmente foi projetado um mecanismo de um grau de liberdade para a construção final de um dedo mecânico com características antropomórficas e antropométricas, sendo considerada para efeitos de análise a metodologia de grupos de Assur. Para verificação e análise foram realizadas simulações para a solução de mecanismos planos pelo método gráfico utilizando o *software Matlab*TM, e *Solidworks*TM, para análise estrutural e de movimento. A seguir foi implementado um programa computacional para simulação e análise do mecanismo e posteriormente outro programa para a mão antropomórfica.

Assim, os movimentos de preensão humana foram estudados para programar uma base de dados de formas de preensão de objetos pré-definidos, com a finalidade de preensão de um determinado objeto de acordo com a geometria ou tarefa a ser realizada.

Finalmente, foi implementada uma interface eletrônica de potência para o acionamento e controle dos motores utilizando uma interface de aquisição de dados da *National Instruments* (Referencia USB6008) e outra interface para utilização de sinais Entrada/Saída para sincronização com um Robô industrial modelo ABB1400 disponível no Laboratório de Automação Integrada e Robótica da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

1.3 Motivação

Efetuadores finais (*grippers*) para diversas funções como garras paralelas, ferramentas de solda e pinças especializadas são comumente utilizadas nos sistemas robóticos atuais. Essas interfaces têm como vantagem o fato de serem de projeto mecânico de simples concepção, acarretando assim numa maior confiabilidade de utilização e custos de manutenção reduzidos. No entanto, com a finalidade de executar diferentes tarefas, como por exemplo, no caso da

utilização de um único robô, torna-se imprescindível um número variado de opções com diferentes efetadores finais.

Existe uma grande variedade de possíveis situações de tarefas que exigem uma maior flexibilidade, portanto, faz-se necessário uma técnica mais universal para interagir com o meio ambiente. Operações de manipulação de objetos, ou ainda operações espaciais requerem um efetador final com um alto grau de destreza. Por exemplo, em operações espaciais existem um elevado número de tipos de ferramentas auxiliares além de diversas interfaces que são usadas para operações fora de uma estação espacial.

Dentre as muitas opções de ferramentas existentes no mercado, as mais comuns são as chaves e as ferramentas de corte, furadoras e rosqueadoras, equipamentos elétrico e eletrônico, elementos de restrição e adaptadores. Cada uma dessas ferramentas é projetada para ser utilizada por um operário treinado (no caso espacial um astronauta). Conseqüentemente, um robô passa a ser utilizado como assistente nas diferentes tarefas, nas quais deverá ter a capacidade de utilizar todas essas diferentes ferramentas e interfaces necessárias. Assim, pode-se contemplar duas opções de solução: projetar um robô dedicado para cada tarefa e junto a ele um grande conjunto de efetadores finais e respectivos acessórios, ou projetar um efetador final capaz de realizar os mesmos movimentos de preensão realizados por um operário humano.

O Laboratório de Automação Integrada e Robótica da UNICAMP possui dois robôs industriais com seis graus de liberdade (GDL), e um conjunto de *efetadores* finais para operações específicas, uma ferramenta de solda, e uma ponta de calibração, Figura 1.1. Com estes não se tem possibilidade de manipular objetos de diferente geometria e assim o número de tarefas que poderiam ser realizadas é muito baixo. Estas ferramentas terminais possuem uma mobilidade nula, o que implica então que tarefas que exigem certo grau de destreza são inalcançáveis.

Uma última questão com os efetadores finais é a necessidade de intercambiá-los entre tarefas. Se o robô não é capaz de realizar a mudança por si só, um operador humano deve intervir, e o funcionamento do robô deverá ser interrompido para a realização dessa troca.

Embora na atualidade existam *grippers* avançados para desempenhar tarefas complexas, a utilização de um único efetuador final permitira uma operação contínua do robô, eliminando etapas de calibração e possíveis erros de montagem, implicando assim num aumento significativo de produtividade do processo.

A mão humana é um excelente exemplo de um efetuador final com grande destreza, já que é capaz de uma multiplicidade de movimentos de apreensão de objetos com precisão. Assim, é capaz de segurar uma vasta gama de diferentes objetos e utilizá-los como ferramentas em diversas atividades. As pesquisas em mãos robóticas mostram que o desenvolvimento tem variado desde um simples par de elos opostos utilizados como pinças até projetos de dispositivos altamente antropomórficos.

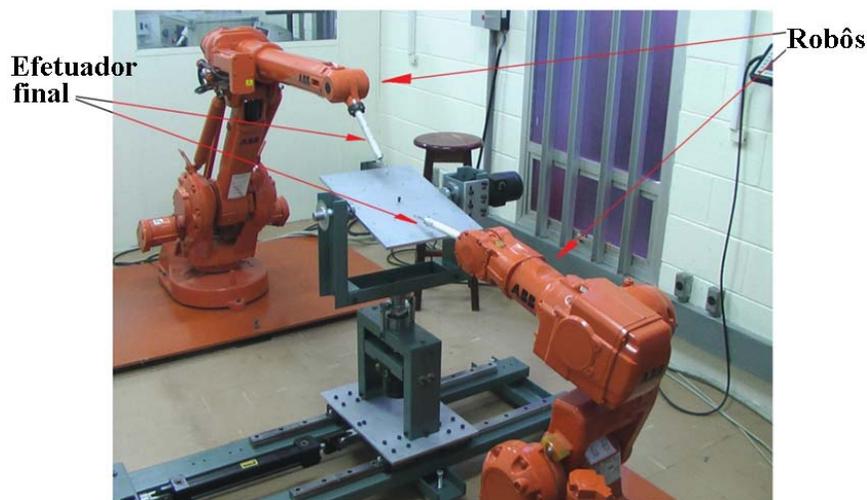


Figura 1.1: Robôs ABB IRB 140 e IRB 1400 do LAR – UNICAMP.

Para atividades de manipulação, uma mão humana serve como fonte de inspiração biológica para interagir com todas as ferramentas e, portanto, pode ser base para o projeto de um dispositivo robótico equivalente.

Este trabalho de investigação foca-se no projeto e análise de um efetuador antropomórfico para operações de manipulação. Para alcançar esse objetivo, a estrutura da mão humana foi analisada para projetar um dispositivo mecatrônico de características antropomórficas que será usado como efetuador final. O âmbito de aplicação da presente tese

também estabelece os requisitos para uma preensão antropomórfica, através da concepção inicial de um dedo e montagem final de uma mão robótica. Assim, o modelo cinemático é implementado computacionalmente, permitindo a realização de testes para demonstrar a geometria antropomórfica e sua capacidade operacional.

1.4 Objetivos e metodologia do trabalho

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um mecanismo que permita reproduzir o movimento do dedo humano para posteriormente construir uma mão com características antropomórficas para realizar tarefas de preensão de objetos de diferentes formas geométricas. Este objetivo pode-se particularizar nos seguintes desenvolvimentos:

- Revisão bibliográfica aprofundada de mãos robóticas e sistemas de preensão antropomórficos.
- Estudo e construção de um mecanismo que utilize o menor número de atuadores.
- Análise cinemática, dinâmica e de comprovação da resistência mecânica do dedo mecânico.
- Modelagem matemática do mecanismo.
- Implementação de sistema com arquitetura aberta para estudo de diferentes estratégias de controle para mãos antropomórficas.
- Projeto de interface eletrônica para acionamento e controle dos atuadores.
- Desenvolvimento de elementos de *software* ou *hardware* para medição de força.
- Implementação experimental através da adaptação do dispositivo de preensão num robô industrial.

1.5 Organização da tese

A presente tese é o projeto, desenvolvimento e validação experimental de um dispositivo de preensão antropomórfica similar a uma mão humana para utilização como efetuidora final de

um robô industrial, conforme é apresentado no Capítulo introdutório desse trabalho. O Capítulo 2 discute o desenvolvimento de trabalhos prévios em mãos robóticas, através de pesquisa bibliográfica aprofundada. No Capítulo 3 se estuda a caracterização da geometria e desempenho da mão humana assim como os requerimentos para o projeto mecatrônico. O Capítulo 4 descreve o protótipo de um dedo mecânico e sua montagem experimental, assim como as etapas necessárias para construção de uma mão completa. O modelo matemático realizado para fins de estudo cinemático e implementação do sistema de controle será discutido no Capítulo 5. No Capítulo 6 serão apresentados alguns resultados concernentes à validação experimental do protótipo implementado a partir de sua utilização como ferramenta de prensão de objetos de diferentes formas por um robô industrial. Finalmente, no último Capítulo serão apresentados conclusões finais do trabalho, assim como sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Revisão da Literatura: Garras e mãos robóticas

2.1 Introdução

O êxito que tem tido o homem em sua contínua evolução deve-se á incrível habilidade que tem de explorar e estudar o mundo que o envolve. Essa tarefa deve-se em grande parte à capacidade de manipulação que possuímos. Através de nossa mão, pode-mos agarrar, manter e manipular objetos com grande destreza, fazendo dessa uma ferramenta muito importante em nosso desempenho. Os robôs, em especial os humanóides, foram projetados para ajudar em diversos trabalhos tanto na indústria como no lar, além de ambientes que se encontram dedicados exclusivamente para o homem. Portanto, esses robôs necessitam ter a capacidade de efetuar as tarefas executadas normalmente pelos humanos, e os mesmos devem ser dotados de uma ferramenta terminal para que possam manipular objetos com a mesma destreza e capacidade de um ser humano (CAUSEY, 1988, CUNHA, 2001).

2.2 Grippers Robóticos

Os *gripper* são também designados de órgão ou elemento terminal de um robô. Os órgãos terminais podem ser classificados em dois grandes grupos: garras e ferramentas especializadas. Os robôs utilizam garras para movimentar objetos e utilizam geralmente ferramentas especializadas para executarem tarefas especiais. As garras podem ser de vários tipos: pinças mecânicas para prensão da maioria dos objetos rígidos, dispositivos atrativos eletromagnéticos

para prensão de objetos de ferro e ventosas de sucção a vácuo para prensão de objetos delicados em superfícies lisas. Alguns exemplos de pinças são mostradas na tabela 2.1.

Tarefas de prensão e manipulação precisam do desenvolvimento de efetuadores finais especializados. Dispositivos dedicados a tarefas de soldagem, ferramentas para parafusar, pulverizadores, etc., podem ser melhor adaptadas do que a mão humana para realizar essas tarefas específicas. Em muitos casos, esses efetuadores finais podem ser mais eficientes e mais econômicos do que desenhos complexos de mão. Como resultado, dispositivos dedicados para diversas tarefas são comumente encontrados em robótica industrial, o uso geral de pinças é necessário para um maior avanço desta importante área (CAUSEY, 1988).

Os dois principais projetos de efetuator final de propósito geral usados na indústria, disponíveis no mercado de hoje são: pinças de dois dedos, com movimento giratório e mandíbula de pinças paralelas (Figura 2.1). Ambos os tipos têm pouca destreza apresentando limitações em suas aplicações.

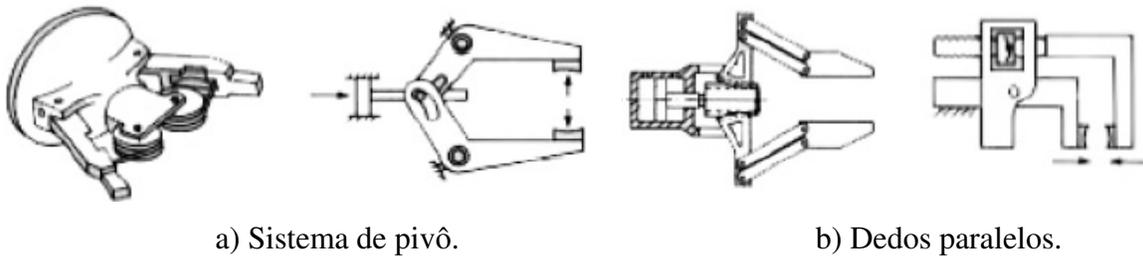


Figura 2.1: Exemplos de pinças robóticas.

Alguns robôs possuem um dispositivo automatizado de porta-ferramentas permitindo assim uma troca rápida de ferramentas, muito utilizado com a finalidade de compensar a baixa destreza das garras industriais. A fim de executar um amplo número de tarefas, esses dispositivos giram rapidamente para escolher os diferentes efetuadores disponíveis no sistema. Isso oferece um método simples e rápido para a alternância entre ferramentas, entretanto os robôs apresentam dimensões significativas e limitação em relação a um conjunto finito de ferramentas disponíveis. As pinças de troca rápida são armazenadas externamente. Ao mesmo tempo em que proporciona

um efeito menor do que dispositivos porta-ferramentas, esse método é ainda limitado pelo baixo número de ferramentas disponíveis.

Um efetuador final do tipo industrial ainda é bastante utilizado no caso de células de manufatura ou linhas de montagem de produtos comerciais com características muito semelhantes, implicando na maioria das vezes na pouca flexibilidade de alteração de um produto (MARCINCIN 1997). No entanto, como o uso de robôs para tarefas não especializadas se encontra em expansão, cresce a necessidade de uma grande destreza do efetuador final. Para atingir esse nível de sofisticação da robótica industrial, universidades e instituições de pesquisa vêm estudando nos últimos anos, sistemas de preensão antropomórficos similares a uma mão humana, com ênfase na modelagem cinemática, estrutura de controle, *design* compacto, etc.

Mãos destras são garras avançadas que se assemelham à mão humana em versatilidade, podem ser utilizadas tanto para pegar e mover objetos industriais (matéria prima, produtos industriais ou materiais de embalagem), assim como para manipular e usar ferramentas projetadas para trabalhadores humanos. Na tabela 2.1, são apresentados alguns exemplos de *grippers* robóticos (CASTRO, 1997), (CUADRADO, 2001), (OKAMURA, 1997), (OKAMURA, 2000), (PEDREÑO-MOLINA, 2004), (PENISI, 2003):

Tabela 2.1: Exemplo de *grippers* robóticos de aplicação industrial

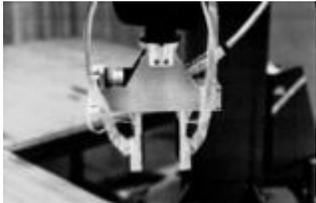
Identificação do Projeto	Pais	Portugal	
	Ano	1997	
	Autor de Referência	Castro D, Marques L, Nunes U Castro D, Silva L, e Almeida (1993).	
Características	Garra leve (562 g. de peso) de dedos paralelos. Permite uma força máxima de 7 Kg., com uma abertura de 9 cm.		
Controle	Realimentação a partir de um sistema de sensores táteis resistivos situados nas duas superfícies da pinça.		
Aplicação	Reconhecimento de formas básicas de objetos em função da distribuição de forças. Aplicação de técnicas de Processamento dos dados.		

Tabela 2.1:(cont.) Exemplo de *grippers* robóticos de aplicação industrial.

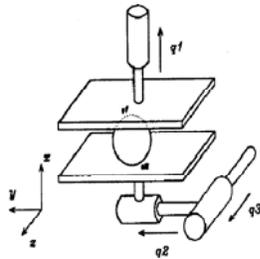
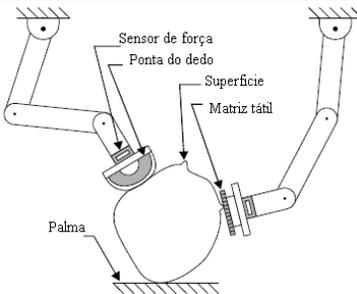
Identificação do Projeto	Pais	Itália	
	Ano	1996	
	Autor de Referência	Bicchi A, Chitour, Marigo, and Prattichizzo	
Características	Duas placas paralelas com 3 graus de liberdade que deslizam uma sobre a outra.		
Controle	Em laço aberto. São gerados movimentos aleatórios das placas e se mede a pressão mediante um sensor de força de seis eixos.		
Aplicação	Exploração de objetos desconhecidos mediante deslizamento das placas pela superfície		
Identificação do Projeto	Pais	Canadá	
	Ano	1997	
	Autor de Referência	Okamura A.M, Turner and Cutkosky	
Características	Dispositivo formado por dois dedos com movimentos independentes.		
Controle	As variáveis a controlar são: A trajetória de contato, orientação e força normal exercida.		
Aplicação	Exploração de superfícies (transversais) de objetos. Detecção de propriedades como textura, atrito, furos e cristas.		
Identificação do Projeto	Pais	Alemanha	
	Ano	1998	
	Autor de Referência	Fink Thomas, Hauck, and Färber	
Características	É parte do sistema robô <i>MinERVA</i> , formado pelo conjunto câmera-braço-mão		
Controle	Sistema com realimentação contínua (<i>“look-and-move”</i>). A partir da informação <i>visual</i> guia os movimentos do robô.		
Aplicação	Tarefas de preensão guiadas visualmente imitando o comportamento antropomórfico do sistema humano.		

Tabela 2.1:(cont.) Exemplo de *grippers* robóticos de aplicação industrial.

Identificação do Projeto	Pais	USA	
	Ano	1998	
	Autor de Referência	Allen P	
Características	Dispositivo de dedo montado num braço robô de 6 graus de liberdade.		
Controle	Realimentação com um sensor octogonal cilíndrico (como no dedo humano) com seis elementos sensoriais espaçados iguais. Em total, 135 células.		
Aplicação	Reconhecimento de texturas, furos, etc, que não podem ser detectados por visão. Exploração Ativa de superfícies 3D.		
Identificação do Projeto	Pais	Espanha	
	Ano	1999	
	Autor de Referência	Cervera E, e Pobil	
Características	Pinça robô em forma de alicate e desprovida de sensores tácteis.		
Controle	Controle Neural. O sistema se realimenta por uns sensores situados na superfície do furo onde se quer inserir o objeto agarrado.		
Aplicação	Tarefas de Inserção. Aprendizado de tarefas complexas de manipulação.		
Identificação do Projeto	Pais	USA	
	Ano	1994	
	Autor de Referência	Billibon H. Yoshimi e Allen	
Características	Garra TOSHIBA FMA. Possui quatro dedos flexíveis, três graus de liberdade e oito posições possíveis. Guiado por duas câmeras fixas.		
Controle	Realimentação baseada, somente, nos sistemas de visão artificial mediante duas câmeras fixas. Como ela não possui sensores táteis o controle é só de posição e das câmeras de visão.		
Aplicação	Aplicações em tarefas de preensão, levantamento de objetos. A flexibilidade dos dedos desta garra permite funções de rosqueamento de objetos a modo de parafuso.		

2.3 Mãos Robóticas

Cotidianamente, a mão humana é o principal órgão para a recepção e a posterior reação aos estímulos táteis, que são a referência de nosso repertório de funções manuais. No entanto, a integração de um conjunto de sensações análogas num sistema robótico propõe um grande desafio tecnológico. São evidentes os avanços referentes à confiabilidade e robustez nas novas mãos robóticas, mas a capacidade de manipulação está muito longe ainda de ser alcançada. Os trabalhos de pesquisa atuais tentam diminuir a lacuna existente entre os dispositivos artificiais e a mão humana (BIAGIOTTI, 2002 e 2004), (JIMMY, 2007), (PARADA, 2008), (MASON, 1985).

Durante as últimas décadas muitas mãos robóticas com características antropomórficas vêm sendo desenvolvidas. Todas elas possuem um alto número de graus de liberdade (acima de 16), e tem uma destreza e força de preensão comparável com uma mão humana. Infelizmente, as mesmas não podem ainda serem utilizadas como prótese, por que seus sistemas de controle e de atuação possuem peso e dimensões significativas e, portanto, não podem ser embarcadas numa mão. Alguns exemplos dessas mãos são mostrados nos próximos tópicos desse trabalho.

2.3.1 Mão MARCUS

O modelo MARCUS foi projetado como uma evolução das próteses de mão da *Otto Bock*. Esse dispositivo consiste de três dedos: polegar, índice e médio. A mão MARCUS possui dois graus de liberdade e está equipada com dois atuadores elétricos separados: o primeiro é responsável pelo movimento do polegar e o segundo pelos movimentos dos dedos índice e médio, que estão mecanicamente acoplados, conforme mostra a Figura 2.2. Esta mão está equipada com sensores de efeito *Hall* para medição da posição e com sensores táteis no polegar para controle de força, (KYBERD, 1995), (BERGAMASCO, 1995).

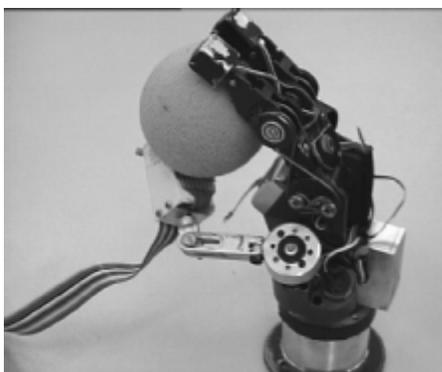


Figura 2.2: Imagem da mão MARCUS.

2.3.2 Mão Southampton-Remedi

O primeiro exemplo de um modelo avançado de mão foi desenvolvido em *Southampton-Remedi* (Figura 2.3). Esse dispositivo é composto de cinco dedos com peso aproximado de 400g, sendo que cada um deles é movimentado através de um motor DC (13 mm de diâmetro). No caso específico do dedo polegar, ele é constituído de uma caixa de engrenagens no eixo e um mini motor para a sua flexão. Essa mão é capaz de exercer preensão ativa com uma força acumulativa na faixa de 38 N (devido ao seu projeto de ligação com 6 barras). A flexão total do polegar é alcançada em 2,5 s e o tempo médio para ir de um movimento de flexão para uma extensão completa é de 0.84s, (LIGHT, 1999), conforme é apresentado na Tabela 2.2.



a) Preensão cilíndrica.

b) Preensão lateral.

c) Esquema geral.

Figura 2.3: Modelo *Southampton-remedi*.

Tabela 2.2: Dados técnicos da Mão *Southampton*-Remedi.

Dados técnicos	
Tamanho	7 ³ / ₄
Número de dedos	5
Número de GDL ativos	6
Flexão do polegar	2,5 s
Flexão/extensão	0,84s
Força de prensão estável	38 N
Peso	400 g

2.3.3 Mão da Universidade Hokkaido

Este é um trabalho de pesquisa desenvolvido no Laboratório de Sistemas Autônomos da Universidade Hokkaido. Neste trabalho foi proposto um mecanismo de transmissão de potência ajustável no qual os percursos dos cabos trocam dependendo do tamanho da carga. Graças a esse mecanismo, os dedos se movimentam rapidamente sobre uma carga leve, e lentamente, mas com alto torque, com uma carga pesada. A Figura 2.4 mostra o dispositivo, que pode ser usado como prótese de mão.

Esta mão possui sete graus de liberdade, um para cada dedo, adicionados aos movimentos de abdução e adução e a prono supinação do pulso. A mesma foi confeccionada em alumínio e o peso de cada dedo é de aproximadamente 25 gramas. Como todos os atuadores são dispostos externamente, isso incrementa o peso total da mão fazendo complicada a sua utilização como prótese (FUJII, 1998). Na Tabela 2.3 são apresentadas algumas das características técnicas desse dispositivo.



a) Dispositivo. b) Visão detalhada dos dedos.

Figura 2.4: Mão da Universidade Hokkaido.

Tabela 2.3: Dados técnicos da mão da Universidade de Hokkaido.

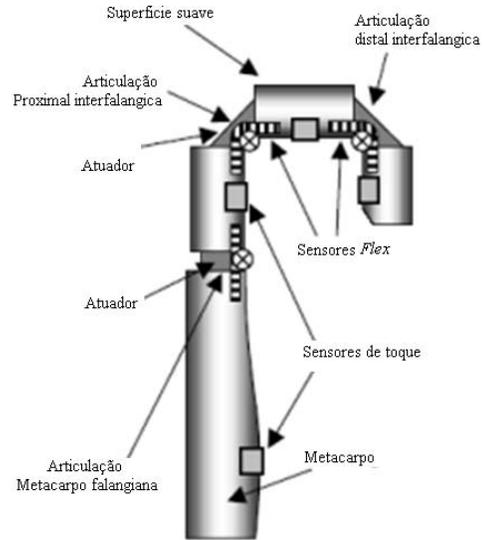
Dados técnicos	
Tamanho	> mão adulta
Número de dedos	5
Número de GDL ativos	7
Localização atuadores	Externo
Peso	125g (sem atuadores)

2.3.4 Mão Antropomórfica Ultraleve

Este modelo consiste de uma aproximação diferente para a realização de uma mão artificial ultraleve que se aproxima das capacidades de manipulação da mão humana. Esta mão utiliza 18 mini-atuadores hidráulicos flexíveis, que permitem a movimentação de cinco dedos. Cada dedo contém um atuador fluídico flexível que ajuda a flexão, sensores flex e de toque. O metacarpo fornece um espaço suficiente para abrigar um micro-controlador, micro-válvulas, a fonte de energia e a micro-bomba. O pulso contém um atuador fluídico que permite o arqueamento dos dedos da mão, conforme é mostrado na Figura 2.5 (SCHULZ, 2001 e 2005).



a) Modelo de Mão.



b) Desenho esquemático de um dedo.

Figura 2.5: Mão Karlsruhe.

Os dedos flexíveis são aptos para envolver objetos de diferentes tamanhos e formas, espalhando a força de contato sobre uma grande área. Assim, graças a sua adaptabilidade, uma grande variedade de objetos pode ser segurada, sem necessidade das informações dos sensores, permitindo assim os movimentos naturais dos dedos dessa mão. Informações adicionais dessa mão são fornecidas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Dados técnicos da mão de Karlsruhe.

Dados técnicos	
Tamanho	≈ 1 (adulto)
Número de dedos	5
Número de GDL ativos	17
Flexão/extensão	0,1 s
Peso	20g (cada dedo)
Máxima força (na ponta dos dedos)	12 N

2.3 5 Modelo de mão implementada na Universidade Nacional de Taiwan (NTU)

A mão NTU (Figura 2.6(a)), desenvolvida pela Universidade Nacional de Taiwan, é uma prótese de mão com cinco dedos, cada um deles equipado com sensores. Esse dispositivo apresenta um total de 17 GDL (LI, 1996), onde o dedo polegar e o indicador possuem 4 GDL, enquanto os outros dedos possuem três juntas ativas. Cada dedo é equipado com sensores táteis (18 no total), para detectar a força de preensão, e 17 sensores para controle de posição.

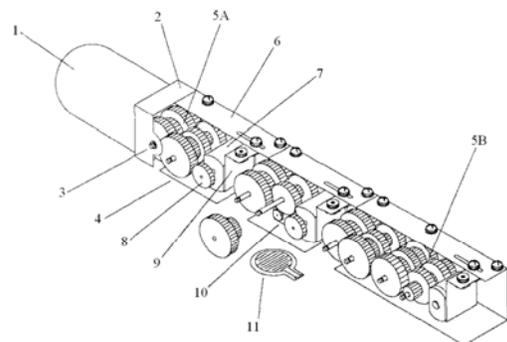
Um esquema representativo de cada dedo é mostrado na Figura 2.6(b). Embora muitos autores refiram-se a esta mão para ser utilizada como uma prótese, a mesma acaba sendo mais apropriada para aplicações robóticas devido ao seu peso, considerado alto para uma prótese de mão (LIN, 1996). A Tabela 2.5 apresenta características desse dispositivo.

Tabela 2.5: Dados técnicos da mão NTU.

Dados técnicos	
Tamanho	≈ 1 (adulto)
Número de dedos	5
Número de GDL ativos	17
Peso	1,57 Kg



a) Esquema da mão NTU.



1. Ponta do dedo
2. Base da ponta do dedo
3. Eixo
4. Casca do segmento do ded
- 5A. Engrenagens A (96:1)
- 5B. Engrenagens B (812:1)
6. Coberta do segmento do dedo
7. Micromotor de alto desempenho
8. Engrenagem no eixo do motor
9. Base do motor
10. Sensor de Posição
11. Sensor Tátil

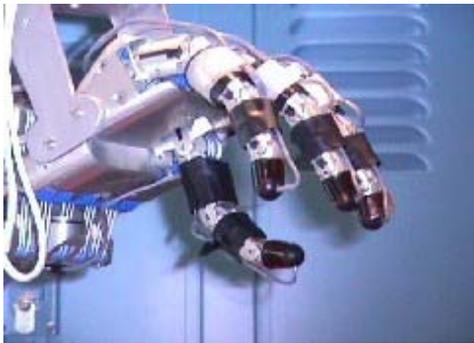
b) Projeto detalhado de um dedo.

Figura 2.6: Modelo de Mão da Universidade Nacional de Taiwan (NTU).

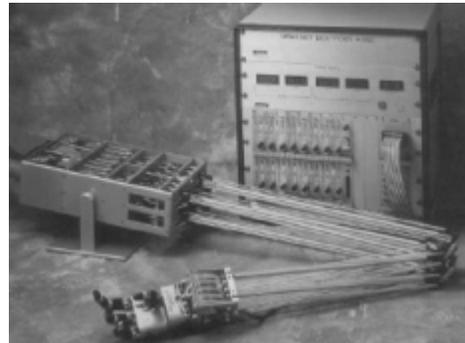
2.3.6 Mão Utah/MIT

A geometria da mão Utah/MIT (Figura 2.7(a)) tem características antropomórficas. Essa mão possui um total de 16 GDL, com 4 GDL para cada um dos três dedos e mais 4 GDL para o dedo polegar. O dedo polegar está permanentemente em oposição e as dimensões das falanges e posições das junções foram alteradas para facilitar o percurso dos tendões. Os atuadores utilizam o conceito de tendão em oposição, requerendo um sistema de 32 tendões poliméricos e atuadores pneumáticos (Figura 2.7(b)).

Os atuadores pneumáticos são rápidos, com baixo atrito e podem gerar elevadas forças. O sistema de controle inclui um controlador analógico de posição para cada um dos 16 GDL, atuando sobre o sistema de tendões (JACOBSEN, 1986), (SPEETER, 1991).



a) Detalhe dos dedos



b) Detalhe sistema de transmissão

Figura 2.7: A Mão Utah/MIT.

A Mão de Utah/MIT é uma réplica de uma mão humana, tanto em sua forma como nas suas funcionalidades, sendo concebida através de um projeto modular, onde cada dedo é idêntico. Entretanto, o sistema de acionamento através de cabos é considerado muito complexo, necessitando de uma armação externa do tipo braço articulado, onde cada uma das articulações é controlada através de um par de cabos (tendões) em oposição.

Assim, esta mão é movida através de 32 atuadores (cilindro de vidro) de dupla ação (50 a 100 psi), obtendo-se uma força nos dedos em torno de 31,8N. No interior de cada junta um

sensor linear de efeito hall fornece a informação de posição angular da mesma, permitindo também o monitoramento das tensões dos cabos de transmissão no pulso. A faixa de movimento no pulso é menor de que uma mão humana (SPEETER, 1991).

O projeto do sistema de transmissão através de tendões faz com que um dos principais inconvenientes desse dispositivo seja a implementação de uma estratégia de controle, necessitando de limitações físicas no range de movimentação do pulso e na cinemática do dedo. Em compensação o sistema é do tipo obediente (*compliant*). A implementação dos tendões faz o projeto se tornar muito complexo, pois requer um sistema muito sofisticado de acionamento com a utilização de um total de 288 polias. A Tabela 2.6 apresenta as principais especificações do modelo da mão Utah/MIT.

Tabela 2.6: Dados técnicos de mão Utah/MIT.

Dados técnicos	
Tamanho	≈ 2
Número de dedos	2
Número de GDL ativos	16
Número de atuadores	32

2.3.7 Mão Belgrade/USC

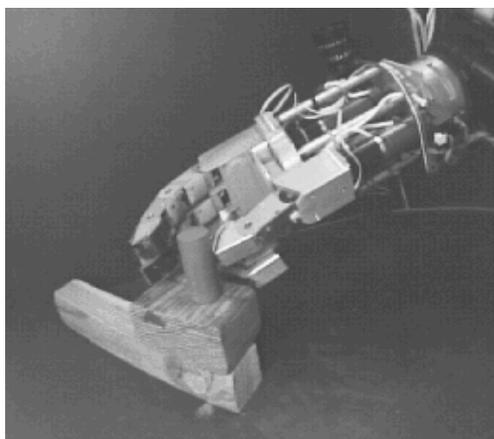
A mão Belgrade/USC (BEKEY, 1990) tem quatro dedos, onde cada um deles é movimentado através de um motor e possui três juntas (Figura 2.8(a)).

Baseado em observações de uma mão humana, o movimento de duas articulações num mesmo dedo não é independente. O dedo polegar se move em forma de arco até chegar à posição de um ou mais dedos, enquanto outro motor flexiona e estica a sua segunda junta. No dedo polegar e na superfície da palma foram colocados aproximadamente 23 sensores de pressão. Os motores estão equipados com *encoders* para medir as posições dos dedos em relação à palma da mão.

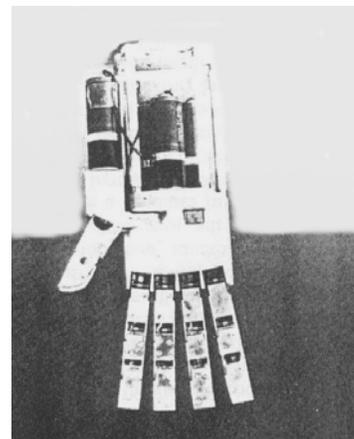
O conceito utilizado pelos autores para concepção desse dispositivo foi baseado na premissa que os sistemas de mãos robóticas devem usar a autonomia local tanto quanto possível e que o controle de preensão de um determinado objeto deve ficar dentro da própria mão, a partir da utilização de sensores de pressão, posição e deslocamento de contato (IBERALL, 1993). Conseqüentemente, um estudo exato da teoria de preensão e o conhecimento da descrição paramétrica de uma mão humana, são fatores importantes e um dos principais requisitos de projeto é a determinação analítica das propriedades de uma mão humana (BEKEY, 1993). As principais propriedades da mão de Belgrade/USC são apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Dados técnicos da mão *Belgrade/USC*.

Dados técnicos	
Tamanho	$\approx 1,1$
Número de dedos	5
Número de GDL ativos	4
Número de atuadores	4
Número de sensores	23+4



a) Preensão de uma peça



b) Vista frontal

Figura 2.8: A Mão Belgrade/USC.

2.3.8 Mão Stanford/JPL (Salisbury)

Originalmente designada de Stanford/JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), essa mão pesa 1,1 kg e a unidade de atuadores 5,5 kg. A força de saída inicialmente é 45 N (dois primeiros minutos). Possui 9 GDL com dois dedos e um polegar em oposição, conforme é mostrado na Figura 2.9 (MASON, 1985).

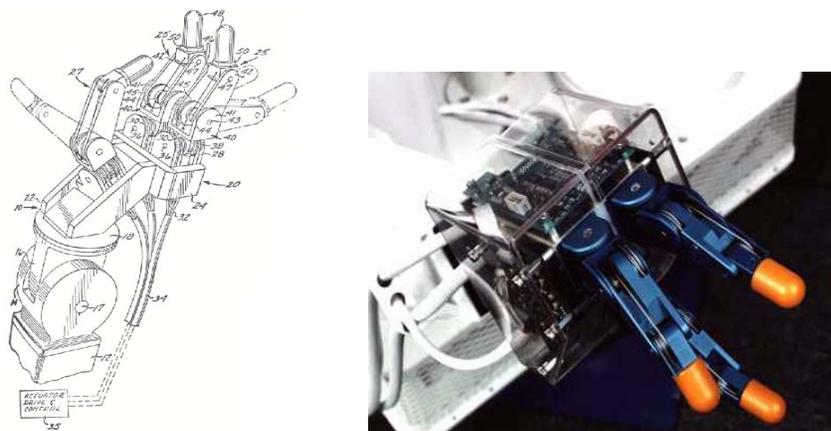


Figura 2.9: Mão Stanford/JPL.

Este dispositivo foi desenvolvido inicialmente para ser utilizado em atividades de ensino e pesquisa, permitindo a demonstração em laboratório dos principais conceitos envolvidos no seu projeto e concepção. Cada dedo possui três GDL, com quatro cabos de acionamento e controle revestidos teflon que deslizam em canalizações alinhadas. Os dedos foram concebidos de forma modular, permitindo assim, a construção de uma mão completa de forma mais fácil.

A informação da posição de cada dedo é obtida através de dois sensores situados atrás de cada junta proximal: o primeiro permite a medição da tensão no cabo e segundo a posição do motor. O sinal da tensão é traduzido em um sinal de torque usado para fechar a malha de controle do servomecanismo. As pontas dos dedos caracterizam-se por ter um material elástico altamente ajustável que fornece a fricção e “elasticidade” suficiente para uma preensão segura.

Um conjunto de servo-motores (*samarium-cobalt* LO-COG) DC, com redutores de velocidade de 25:1 e cabos, permitem a movimentação dos dedos. Cada um dos três dedos é composto de uma dupla articulação na junta proximal, o que permite movimentos de *pitch* e *yaw* em um range de mais ou menos 90 graus e 135 graus respectivamente.

As principais vantagens desse dispositivo encontram-se na sua simplicidade, conceito modular dos dedos e baixo curso das partes. Na Tabela 2.8 são apresentadas as principais especificações desse dispositivo. Por outro lado a destreza dessa mão é relativamente baixa, considerando que na cabeça da junta proximal está inserida mais de uma articulação, e também os cabos flexíveis são menos confiáveis que os da transmissão direta. Esses cabos servem para empurrar/puxar, apresentando algumas limitações na capacidade de transmissão de potência, difícil de ser transmitidas através do punho.

Esse dispositivo foi colocado no elemento terminal de um robô PUMA, sendo projetado um controlador de preensão através da modificação na interface eletrônica do sistema de controle desse robô. O *software* implementado foi dedicado para movimentar os dedos com ajuda das informações obtidas através dos sensores. Esse trabalho foi um precursor na implementação de um controlador de posição de motores com processamento dedicado baseado em DSP (*Digital Signal Processing*).

Tabela 2.8: Dados técnicos da mão *Stanford/JPL (Salisbury)*.

Dados técnicos	
Tamanho	$\approx 1,2$
Número de dedos	3
Número de GDL ativos	9
Número de atuadores	12

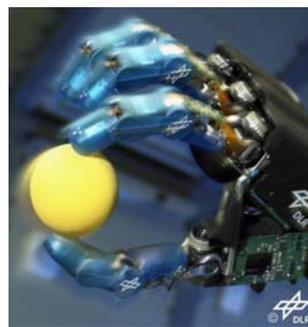
2.3.9 Modelo de mão da DLR's

Criada em 1997, a mão DLR (*Germany's national research centre for aeronautics and space*) foi à primeira mão articulada que integrava completamente os atuadores e eletrônica associada (Figura 2.10(a)). A mão DLR I foi utilizada durante muitos anos, sendo considerada a primeira versão de uma mão utilizando o conceito de mecatrônica, sendo completamente integrada, e um produto razoavelmente bem sucedido em termos de desempenho em prensão e aplicações de manipulação.

Com a finalidade de alcançar o objetivo de maior flexibilidade e desempenho, o dispositivo utilizou fortemente os conceitos de miniaturização e completa integração de todos os componentes da mão, reduzindo também o cabeamento. No projeto da mão DLR foram considerados aspectos relacionados ao máximo desempenho para prensão autônoma, possibilidades de manipulação fina e integração dos atuadores e sensores dentro da palma e não no antebraço. Assim, o tamanho da mão DLR é aproximadamente 1,5 vezes que uma mão humana.



a) DLR I.



b) DLR II.

Figura 2.10: Imagens da mão DLR

Devido às dificuldades de manutenção do modelo de mão DLR I, e com a finalidade de redução de massa e custos de confecção dos dedos e da base da mão, foi desenvolvido o modelo DLR II (LIU, 1998), (BORST, 2003), com uma estrutura esquelética aberta (Figura 2.10(b)). A estrutura aberta é coberta por 4 semi-cascas e o componente da carcaça da ponta dos dedos foi

realizado utilizando a tecnologia de prototipagem rápida (estéreo-litografia). Isso permite testar a influencia de diferentes cascas com outras superfícies em tarefas de prensão sem a necessidade de um re-projeto das partes do dedo. O número de GDL total dessa mão é 13.

Cada uma das articulações de cada dedo é independente, pois elas estão equipadas com atuadores apropriados. O sistema de atuação consiste basicamente de motores *brushless*-DC, correias dentadas, engrenagens de movimento harmônico (*harmonic drive gears*) e engrenagens cônicas na base da junta proximal. A configuração é diferente entre as articulações, onde o sistema de atuação na articulação média foi projetado para encontrar-se com as condições da articulação proximal quando o dedo estiver na posição mais esticada, podendo assim, aplicar uma força de até 30 N na ponta.

Cada articulação é equipada com sensores de deformação (*strain-gauges*) localizados na base de cada uma delas, sendo utilizados como sensores de torque e também como sensores de força nas pontas dos dedos. Os resistores variáveis (potenciômetros), situados em cada uma das juntas dos dedos não são absolutamente necessários, pois essas posições podem ser calculadas com as informações de posição proveniente dos motores, porém eles fornecem informações mais precisas das posições das junções. Além disso, cada dedo tem integrado seis sensores de temperatura. Um resumo das principais características da mão DLR II é apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Dados técnicos da Mão DLR II.

Dados Técnicos	
Tamanho	≈ 1,5
Número de dedos	4
Número de GDL ativos	13
Número de atuadores	13
Número de sensores	64
Peso	320g
Força máxima	30N

2.3.10 Modelo de mão Robonaut

A mão *Robonaut* foi uma das primeiras mãos desenvolvidas para aplicações espaciais. Ela possui 14 GDL, sendo caracterizada pelo tamanho e pela sua potencialidade, semelhante a uma mão de um astronauta. (LOVCHIK, 1999). Essa mão mostrada na figura 2.11 sendo composta pelos seguintes elementos:

- Um antebraço que embarca toda a eletrônica de acionamento dos motores;
- Um pulso com 2 GDL;
- Uma mão composta de cinco dedos perfazendo 12 GDL.



Figura 2.11: *Robonaut Hand*.

O antebraço aloja quatorze motores, 12 interfaces de circuitos eletrônicos separados e todos os cabos de acionamento da mão. Com a finalidade de possuir um tamanho parecido com o da mão de um astronauta, os motores são montados externamente a mesma (dentro do antebraço), sendo a potência mecânica transmitida através de um conjunto de cabos flexíveis.

Para movimentação dos dedos, os mesmos são acionados através de motores DC sem escovas (*brushless*), equipados com *encoder* e uma caixa de redução de engrenagens planetária com relação de transmissão de 14:1. Acoplados aos motores estão unidos cabos de aço altamente flexíveis, que se ajustam no ponto final, de forma modular através de um parafuso. O mecanismo dessa mão converte um movimento de rotação em movimento linear. Na palma da mão são obtidas as informações diretas da força que exercem dos dedos sobre uma carga, quando os mesmos estão apertando uma peça sobre uma determinada superfície, sendo isto obtido quando a

palma da mão é esticada ou comprimida por efeito da força que exercem os dedos sobre um objeto que está sendo manipulado.

Toda a mão é equipada com quarenta e três sensores sem incluir os sensores táteis. Em cada junta são embarcados sensores de posição absolutos, e cada motor é equipado com um *encoder* incremental. No pulso são instaladas células de carga para fornecer informação de força. A destreza da mão é concentrada em dois dedos com 3 GDL (médio e índice) e um polegar em oposição com 3 GDL. Um resumo contendo as principais informações técnicas da mão de *Robonaut* é apresentado na Tabela 2.10.

Tabela 2.10: Dados técnicos da mão *Robonaut*.

Dados Técnicos	
Tamanho	$\approx 1,5$
Número de dedos	5
Número de GDL ativos	12+2
Número de atuadores	14
Número de sensores	43 + tátil

Na Tabela 2.11 é apresentado um quadro comparativo das principais mãos robóticas apresentadas nesse trabalho de revisão da literatura, permitindo ao leitor uma síntese das principais diferenças e características das mesmas.

2.4 Avaliação mãos Robóticas

Para realizar um trabalho comparativo de modo claro e objetivo das diferentes mãos robóticas apresentadas nas seções 2.3 e 2.4 deste Capítulo, foram utilizados alguns índices comparativos (BIAGIOTTI, 2004), (LASCHI, 2000), que permitirão avaliar o protótipo de mão antropomórfica desenvolvida na UNICAMP, designada mão antropomórfica UNICAMP I - MUC-1, em relação às outras mãos pesquisadas na literatura. O projeto desse dispositivo é apresentado detalhadamente no Capítulo 4 deste trabalho.

Tabela 2.11: Comparação de mãos artificiais.

Nome da Mão	Autor	Ano	Tamanho (norm.)	# de Dedos	GDL	Atuadores (tipo)	Contr	# de Sensores	Peso (g)	Força (N)	Vel. (s)
Humana	(Kandel)	2000	1	5	22	38 (Muscl)	E	≈17'000	≈ 400	> 300	0.25
Okada	(Okada)	1979	> 1	3	11	E	E	-	-	-	-
Utah/MIT	(Jacobsen)	1986	> 2	4	16	32 (P)	E	16	-	31.8	-
Stanford/JPL	(Salisbury)	1983	≈ 1,2	3	9	12 (E)	E	-	1100 ¹	-45	-
Belgrade/USC	(Bekey)	1988	≈1,1	4	4	4 (E)	E	23+4	-	-	-
Barret	(Townsend)	1998	≈1	3	4	I	E	-	-	-	-
UB	(Melchiori)	1992	≈1	3	13	E	E	-	-	-	-
MARCUS	(Kyberd)	1995	> 1,1	3	2	2 (E)	I	3	-	-	-
NTU	(Li-Ren)	1996	≈ 1	5	17	17 (E)	E	35	1570	-	-
DLR I	(Butterfas)	1997	>> 1	4	12	I	E	-	-	-	-
Hokkaido	(Fujii)	1998	> 1	5	7	7 (E)	E	-	125	-	-
LMS	(Gazeau)	1998	≈1	4	16	E	E	-	-	-	-
DIST	(Caffaz)	1998	> 1	5	16	E	E	-	-	-	-
Robonaut	(Lovchik)	1999	≈ 1,5	5	12 + 2	14 (E)	E	43 + toque	-	-	-
Tokyo	(Lee)	1999	≈ 1	5	12	P	E	-	-	-	-
Southampton	(Light)	2000	> 1	5	6	6 (E)	E	-	400	38	2.5 ²
Karlsruhe	(Fukaya)	2000	≈ 1	5	17	17 (E)	E	-	20 ³	12	0.1
DLR II	(Butterfas)	2000	≈ 1,5	4	13	13 (E)	E	64	320	30	-
Ultralight	(Schultz)	2000	>> 1	5	13	P	E	-	-	-	-
Gifu	(Kawasaki)	2001	≈ 1	5	16	I	E	-	-	-	-
Ottobock SUVA	(Otto Bock)	2002	≈1	3	1	1 (E)	I	2	600	< 100	< 1
Shadow	(Shadow Co)	2002	≈ 1,1	5	23	P	E	-	-	-	-
UMNG	(Ocampo)	2004	≈ 1	4	12 + 2	12(E)	E	4 força	-	-	-

Na coluna para tipo de atuador e Controle, 'I' indica 'interno', e 'E' indica 'externo'. O tamanho das mãos artificial é normalizado respeito da mão humana (adulto).

Esses índices comparativos referem-se aos diferentes aspectos que permitem caracterizar um efetuador final, enfatizando aspectos construtivos, grau de antropomorfismo, nível de destreza, resultantes tanto da configuração cinemática como da configuração sensorial do sistema.

É importante observar nessa tabela que muitas vezes pode-se encontrar na literatura modelos de mãos que imitam a mão humana em relação à estética, entretanto as mesmas apresentam grandes limitações funcionais, ou também pode-se encontrar o problema inverso, ou seja, mãos com uma grande possibilidade de manipulação, mas com reduzida semelhança em relação a mão humana.

¹ 5500 g. mais o peso do braço

² Somente movimento de flexão

³ 20 g peso da estrutura de um dedo mecânico

2.4.1 Índice de Antropomorfismo

A partir do estudo dos diferentes modelos de efetuadores finais robóticos inspirados na mão humana, é evidente que o nível de semelhança alcançado para o similar humano é muito variável de caso para caso, embora os mesmos sejam definidos como mãos antropomórficas. Isso nos leva a um problema interessante de ser analisado: Quais são os componentes do antropomorfismo e como o nível alcançado de antropomorfismo pode ser quantificado?

Com o principal objetivo de tentar uma comparação entre as diferentes concepções e grau de antropomorfismo, um índice (denominado α_x) pode ser definido. Para a definição desse parâmetro são considerados os seguintes aspectos (Figura 2.12 e Tabela 2.12):

- **Cinemática:** esse aspecto considera a presença dos principais elementos morfológicos (palma e dedos indicador, médio, anelar, pequeno e polegar oposto). Para cada um deles é atribuído um valor que varia entre 0 e 1 (de acordo com o número de articulações dentro de cada dedo, em comparação com o caso humano), fornecendo uma outra contribuição para a pontuação da avaliação cinemática, ponderado pelo fator w_{I_i} ;
- **Superfícies de Contato:** extensão e suavidade das superfícies de contato, isso quer dizer capacidade para localizar contatos entre objetos sobre as superfícies das uniões disponíveis e a disponibilidade nas pontas dos dedos;
- **Tamanho:** essa contribuição leva em consideração o tamanho real da mão robótica, em comparação com o tamanho médio de uma mão humana, e uma correta relação de tamanho entre todos os *links*.

A Figura 2.13 apresenta uma comparação da MUC-1 com outras mãos reportadas na literatura.

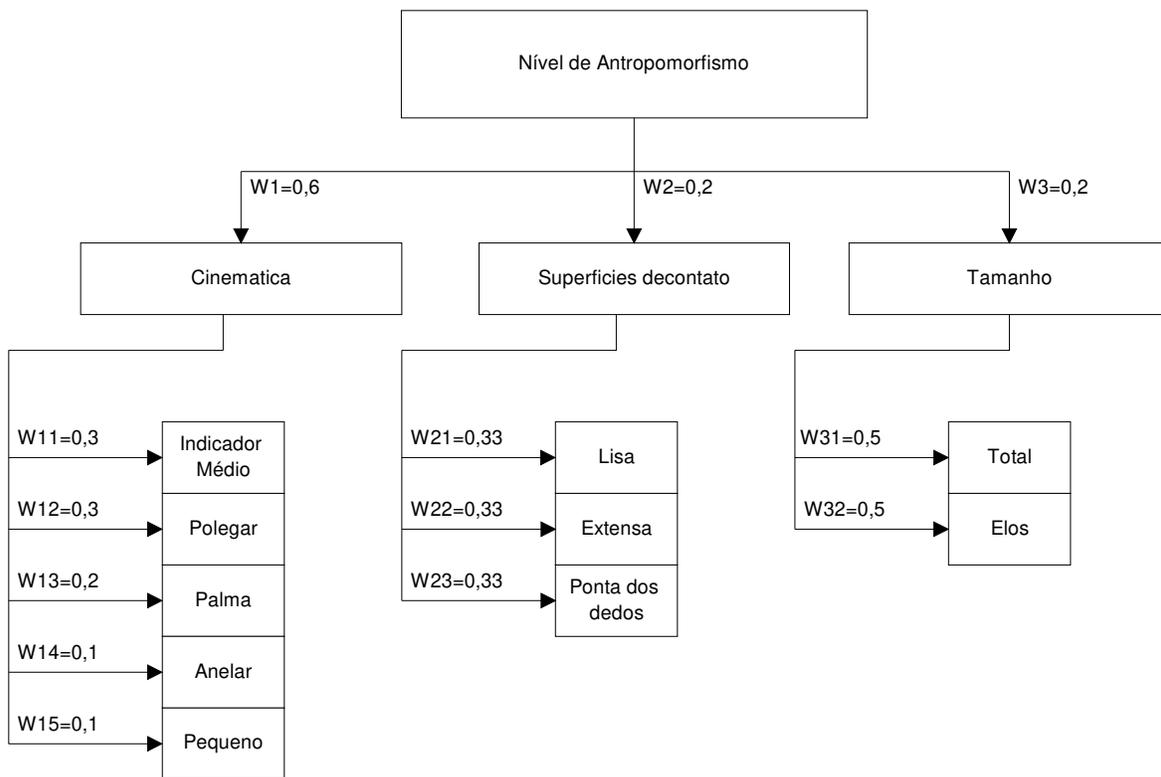


Figura 2.12: Avaliação segundo grau de antropomorfismo.

Tabela 2.12: Índice de antropomorfismo da MUC-1.

Elementos avaliados e os pesos		Valor	Resultado
Cinemática ($w_1=0,6$)	Dedos principais superiores, ($w_{11}=0,3$)	1	0,18
	Polegar, ($w_{12}=0,3$)	1	0,18
	Palma, ($w_{13}=0,2$)	1	0,12
	Dedo do anel, ($w_{14}=0,1$)	1	0,06
	Dedo pequeno, ($w_{15}=0,1$)	1	0,06
Superfícies de contato ($w_2=0,2$)	Lisa, ($w_{21}=0,33$)	1	0,0666
	Extensão, ($w_{22}=0,33$)	1	0,0666
	Ponta dos dedos, ($w_{23}=0,33$)	1	0,0666
Tamanho ($w_3=0,2$)	Tamanho total, ($w_{31}=0,5$)	0,9	0,09
	Tamanhos entre <i>links</i> , ($w_{32}=0,5$)	0,9	0,09
TOTAL			0,9798

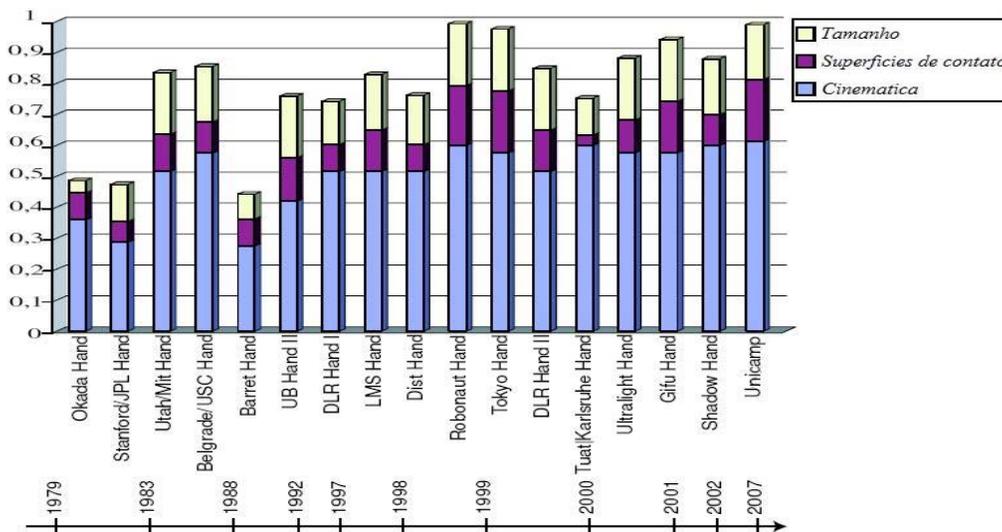


Figura 2.13: Comparação segundo o índice de Antropomorfismo.

2.4.2 Índice de Destreza

Destreza (robótica para um efector-final) é a capacidade de mudança de posição e orientação de um objeto manipulado a partir de uma determinada posição. Num sentido mais amplo, destreza significa a capacidade de um efector final ser operado através de um adequado sistema robótico, a título autônomo, como a capacidade executar tarefas com determinado nível de complexidade.

Neste sentido dois termos: *destreza* e *mãos robóticas avançadas* são utilizados como sinônimos, mesmo que o primeiro se refira às capacidades funcionais das mãos de um robô, esse último leva em conta os recursos que permitem essas capacidades. A destreza, no domínio robótico para as mãos pode ser dividida em duas áreas principais: *preensão* e *manipulação interna* (Figura 2.14).

O termo preensão destina-se a limitar os objetos no interior do efetuador final com uma configuração que restringe o movimento de um objeto, e que seja substancialmente invariante no tempo (o objeto é fixo, no que diz respeito ao espaço de trabalho da mão), enquanto manipulação interna faz referência ao controle do movimento do objeto, dentro do espaço de trabalho da mão,

com as restrições mudando de configuração com o tempo. Outras subdivisões desses dois domínios têm sido amplamente discutidas na literatura na área de topologias de apreensão (CUTKOSKY, 1989), e na área de manipulação interna (BICCHI, 2000).

Os fatores reais das capacidades de um efetuador final são muitos, e que muitas vezes a análise e sobretudo a síntese de mãos não levam em consideração, alguns destes elementos são:

- Características morfológicas;
- Equipamento sensorial;
- Algoritmos de controle;
- Planejamento nas estratégias das tarefas, etc.

2.4.3 Destreza Mecânica

É evidente que o potencial de destreza de uma mão robótica de cinco dedos é melhor do que ao de um dispositivo de apreensão rígido, entretanto, uma grande parte do potencial de destreza de uma estrutura complexa pode ser desperdiçado caso não exista um bom sistema de atuação, ou que não sejam utilizados sistemas sensoriais, ou que os procedimentos de controle não sejam os mais adequados. A avaliação do potencial de destreza de uma mão articulada em função da sua configuração cinemática pode ser relacionada a:

- Mãos com capacidade limitada para entender (configuração cinemática simplificada ou configuração cinemática complexa, mas reduzido número de graus de liberdade controlados).
- Mãos que são capazes de algum tipo de manipulação interna.

A Tabela 2.13 apresenta a avaliação da MUC-1 de acordo a sua destreza mecânica e a respectiva comparação com outras mãos reportadas na literatura se apresenta na Figura 2.15.

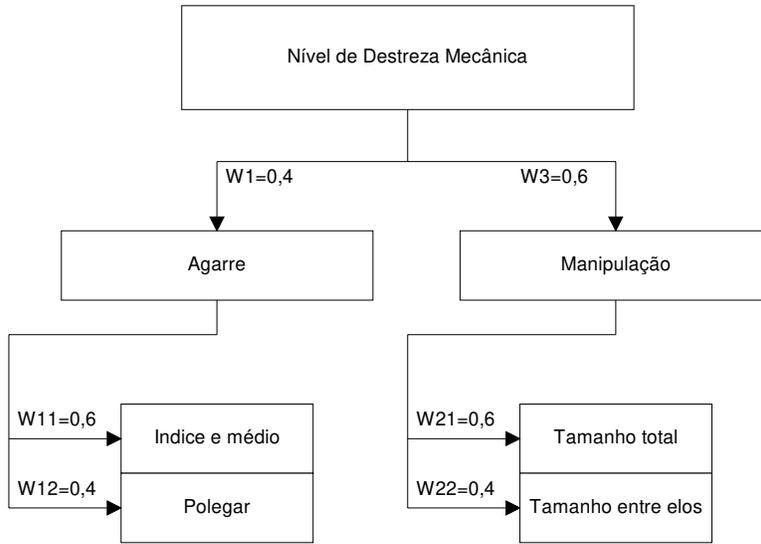


Figura 2.14: Avaliação segundo sua destreza mecânica.

Tabela 2.13: Índice de destreza mecânica da MUC-1.

Elementos avaliados e os pesos		Valor	Resultado
Preensão ($w_1=0,4$)	Ponta dos dedos, ($w_{11}=0,6$)	0,6	0,144
	Mão inteira, ($w_{12}=0,4$)	1	0,16
Manipulação ($w_2=0,6$)	Ponta dos dedos, ($w_{21}=0,6$)	0,3	0,108
	Mão inteira, ($w_{22}=0,4$)	0,3	0,072
TOTAL			0,484

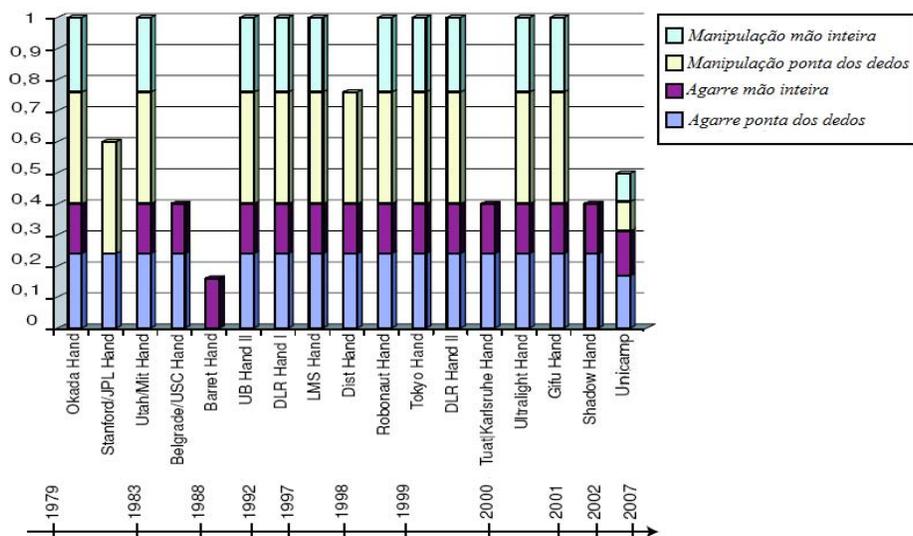


Figura 2.15: Comparação segundo o a destreza Mecânica.

2.4.4 Destreza relativa ao aparato sensorial

Sensores que detectam o estado da interação entre a mão e o objeto a ser manipulado (força / torque e sensores de tato) são considerados como indispensáveis para conseguir uma destreza. Além disso, deve-se destacar que um arranjo tátil intrínseco e sensores tácteis são tratados como alternativas: as informações de que dispõem são bastante diferentes e normalmente usadas para diferentes objetivos (planejamento e controle). No sensor tátil as capacidades são ainda maiores considerando as suas características especializadas. É importante ressaltar que a localização dos sensores é um aspecto muito importante a ser considerado na classificação das mãos em relação ao seu índice de destreza (Figura 2.16), levando em consideração a distribuição dos mesmos:

- Nos dedos / falange / palma e número de componentes de sensores detectáveis de força / torque;
- Abrangendo (parcial / total das superfícies do dedo), e a resolução espacial de *arrays* sensores tácteis.

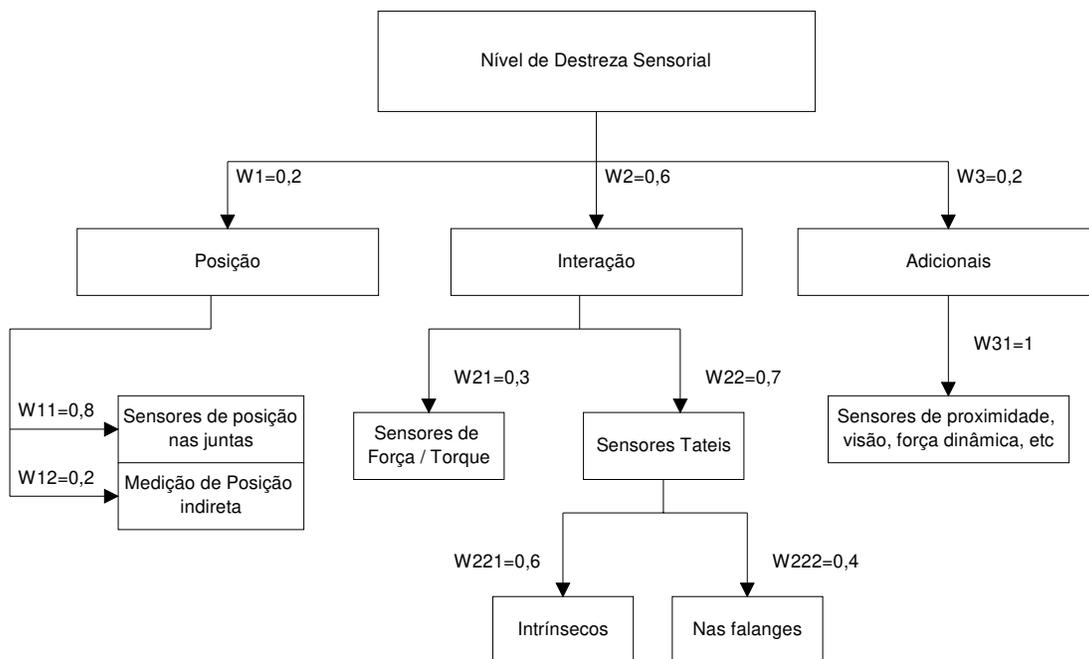


Figura 2.16: Avaliação segundo sua destreza sensorial.

O índice σ_x pode ser muito útil para comparar diferentes modelos e para ter uma idéia imediata de como diferentes pesquisadores têm enfrentado o problema da destreza. Além disso, ele fornece uma medida da diferença com a mão humana, cujo índice não está longe de ser um (não exatamente um, em virtude da ausência de alguns sensores, tais como configuração cinemática de proximidade).

A Tabela 2.14 apresenta a avaliação da MUC-1 de acordo a sua destreza mecânica e a respectiva comparação com outras mãos reportadas na literatura se apresenta na Figura 2.17.

Tabela 2.14: Avaliação de acordo ao aparato sensorial da MUC-1.

Elementos avaliados e os pesos				Valor	Resultado
Posição ($w_1=0,2$)				0,5	0,1
Força / Torque ($w_{21}=0,3$)				0,2	0,036
Interação ($w_2=0,6$)	Táteis, ($w_{22}=0,7$)	Intrínsecos ($w_{221}=0,6$)	Nos eixos ($w_{2211}=0,5$)	0	0
			No local ($w_{2212}=0,5$)	0	0
		Nas falanges ($w_{222}=0,4$)	Resolução espacial ($w_{2221}=0,3$)	0	0
			Recobrimento ($w_{2222}=0,2$)	0	0
	No local ($w_{2223}=0,5$)		0	0	
	Adicionais ($w_3=0,2$)		Proximidade, visão, força dinâmica, ($w_{31}=1$)		0
TOTAL					0,136

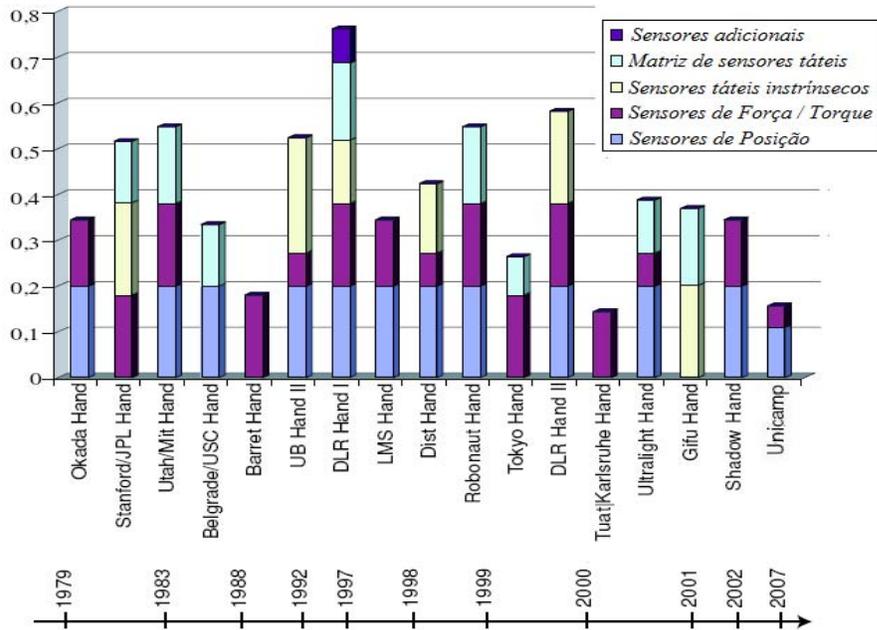


Figura 2.17: Comparação relativa ao aparato sensorial.

2.5 Comentários Finais

Neste Capítulo foi realizado um trabalho de pesquisa bibliográfica aprofundada onde são revisados diferentes tipos de mãos robóticas para aplicações em próteses antropomórficas e *grippers* industriais. É construída uma tabela comparativa das mãos robóticas pesquisadas a fim de avaliar diferentes índices (antropomorfismo, destreza mecânica e aparato sensorial) para a MUC-1.

Capítulo 3

Modelagem Biomecânica de uma mão humana

3.1 Introdução

O principal objetivo deste capítulo é a descrição de forma compacta das estruturas esquelética e muscular da mão humana, e posteriormente a análise dos seus movimentos, levando em consideração a abordagem de parâmetros fundamentais na robótica.

Trabalhos desenvolvidos anteriormente mostram que o grau de antropomorfismo é um dos principais fatores a serem observados no projeto de *grippers* robóticos e, conseqüentemente, a reprodução dos movimentos e formas naturais dos dedos torna-se um aspecto muito importante a ser considerado.

Estudos mostram que uma mão pode ser tratada como um conjunto de mini robôs (dedos) com uma base comum (palma). Conseqüentemente, existem diversas configurações desses robôs, mas nem todas podem ser reproduzidas fisicamente para se assemelhar a um dedo com características antropomórficas. Um problema construtivo mencionado na literatura é a dificuldade na transmissão dos movimentos desde os atuadores até as juntas. Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo dos mecanismos de transmissão que podem ser utilizados, além dos atuadores mais adequados para esse tipo de desenvolvimento, onde existem restrições de aplicabilidade devido ao peso, volume e grau de antropomorfismo.

A mão humana designada “*ferramenta das ferramentas*” possui essa propriedade devido as características relacionadas a seguir:

- *Prono - supinação*: movimentos de rotação do antebraço em torno de uma linha central longitudinal e os movimentos de flexão ou extensão do cotovelo ou do pulso. Esse movimento permite que a mão se adapte em diversas circunstâncias.
- *Flexão e fechamento dos dedos*: é uma função muito importante da mão, sendo possível graças á superposição das três articulações de cada dedo e a existência dos músculos extrínsecos poli-articulares.
- *Oposição do Polegar*: situado na frente da palma e dos outros dedos, o polegar pode ser usado junto com os outros dedos como uma garra para manipular objetos, particularmente isto, é um efeito natural entre os dedos polegar e índice.

O conhecimento da mão humana para o projeto de dispositivos antropomórficos que imitem suas funções é um passo indispensável. Sem levar em consideração alguns detalhes anatômicos, importantes estudos foram realizados por (BECKER, 1986), (BUCHOLZ, 1992), além de outros, mas completos sobre anatomia (TAYLOR, 1955), a fisiologia (KAPANDJI, 1987) e a cinesiologia (BROOK, 1995 e AN 1979). Através do conhecimento anatômico, fisiológico e cinesiológico do sistema articular, muscular e nervoso dos membros superiores e inferiores do corpo humano torna-se possível o dimensionamento dos elementos constituintes de uma prótese e a elaboração da modelagem cinemática e dinâmica correspondente (HERMINI, 2000), permitindo assim ao sistema artificial a reprodução de movimentos naturais, o controle do sistema de acionamento dos seus atuadores e a resposta sensorial térmica e tátil (CUTKOSKY, 1989 e HASSER, 2002).

3.2 Modelo Geométrico

O conhecimento exato do modelo geométrico da mão humana é um importante neste trabalho de pesquisa, permitindo assim projetar adequadamente uma mão artificial do tipo *gripper* robótico. Além das simulações, o modelo geométrico permite avaliar as hipóteses

teóricas propostas. No caso do problema de controle de movimentos, o modelo geométrico facilita o entendimento de como é afetado um mapeamento da posição e orientação dos dedos em relação a um determinado ponto de referência (VARDY, 1988), (DRĂGULESCU 2005 e 2007).

3.2.1 Descrição esquelética da mão – Ferramenta terminal

A mão é um dos mecanismos mais complexos do corpo humano. Ela é composta de vinte e sete ossos e mais de vinte articulações (Figura 3.1), enquanto que a sua ação envolve o uso de trinta e três músculos diferentes, as partes esqueléticas da mão incluem os ossos do punho, da palma e dos dedos (CUNHA, 2001 e 2002), (CASSEMIRO, 2002), (LIN, 1996). Os ossos da mão formam três grupos:

- 1) Ossos **carpianos** (oito): dispostos em duas fileiras com quatro ossos cada uma.
- 2) Ossos **metacarpianos** (cinco): numerados a partir do polegar e,
- 3) **Falanges** (quatorze): dispostos em três fileiras, sendo que a proximal e a distal contêm cinco ossos cada uma e a segunda fileira, quatro, porque essa falange não está presente no polegar. Os ossos do carpo têm forma irregular e são denominados, como se segue a partir do polegar:

- **Primeira Fileira:** escafóide, semilunar, piramidal e pisiforme.
- **Segunda Fileira:** trapézio, trapezóide, capitato e hamato.

Os cinco metacarpos são numerados de 1 a 5, começando do polegar, enquanto que os cinco dedos da mão são numerados como os metacarpos correspondentes, sendo mais comumente designados como polegar, indicador, médio, anelar e mínimo.

Os cinco dedos da mão humana podem ser referenciados como é apresentado a seguir. Para realizar uma breve descrição de sua estrutura (os sub índices $i = 0 .. n$ correspondem aos dedos):

- a) Polegar ($i = 0$);
- b) índice ($i = 1$);

- c) Médio ou coração ($i = 2$);
- d) Anular ($i = 3$) e;
- e) Pequeno ($i = 4$).

Ao mesmo tempo, os últimos quatro dedos são formados por quatro ossos denominados falanges, referenciados como segue:

- a) Metacarpiana (P_{i0});
- b) Falange proximal (P_{i1});
- c) Média (P_{i2}) e;
- d) Distal (P_{i3}).

O dedo polegar é o mais curto de todos (tem só duas falanges), e está composto por cinco peças ósseas, como mostra a Figura 3.1:

- a) Osso escafóide ($P00''$);
- b) Trapézio ($P00'$);
- c) Primeiro metacarpiano ($P01$);
- d) Primeira falange ($P02$) e;
- e) Segunda falange ($P03$).

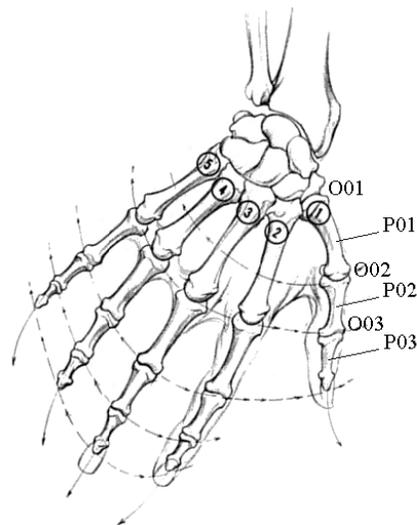


Figura 3.1: Esqueleto da mão direita humana com notação de utilizada.

As medidas dessas falanges foram estudadas e medidas em vários esqueletos. A tabela 3.1 mostra os resultados para o dedo índice (NA, 1979).

Tabela 3.1: Dados antropométricos médios para o dedo índice humano.

Falanges	Dimensões das falanges [mm]	Distancia entre as falanges [mm]
P ₁₃	19,67±1,03	5,58±0,92
P ₁₂	24,67±1,37	7,57±0,45
P ₁₁	43,57±0,98	15,57±0,84
P ₁₀	71,57±5,60	

3.2.3 Biomecânica Inter Falângica dos Dedos

Todas as articulações são formadas por interconexões recíprocas em cada uma das falanges. O ajuste dessas articulações se mantém e se estabiliza pelos ligamentos laterais. Eles se relaxam numa extensão e se forçam numa flexão com a força suficiente para realizar uma boa preensão. Dependendo das superfícies ósseas em contato e da disposição dos ligamentos nas articulações, pode-se ter 1, 2 ou 3 GDL (LIN, 2001), (HERMINI, 2000), (CASSEMIRO, 2002).

Os dedos da mão (excluindo o dedo polegar) possuem dois tipos de articulações: metacarpo Falângica (O_{i1}) e proximal e distal inter Falângica (O_{i2}), (O_{i3}), como pode-se observar na Figura 3.2(a) e 3.3(b), enquanto que o dedo polegar possui somente três articulações: o trapézio metacarpal (O_{01}), metacarpo Falângica (O_{02}), inter Falângica (O_{03}), como pode ser visto na Figura 3.2(c).

A mão humana possui 25 GDL ativos divididos em 5 GDL por dedo. A divisão desses GDL difere entre o dedo polegar e os outros dedos. Para uma correta e ágil manipulação, deve-se formular como um objeto é agarrado e manipulado, e que forças devem-se aplicar sobre o mesmo. O desenvolvimento requer conhecimento das relações geométricas do sistema

manipulador-objeto, existindo, portanto num sistema de manipulação multi-dedos, a necessidade do desenvolvimento do modelo cinemático da mão e o do contato.

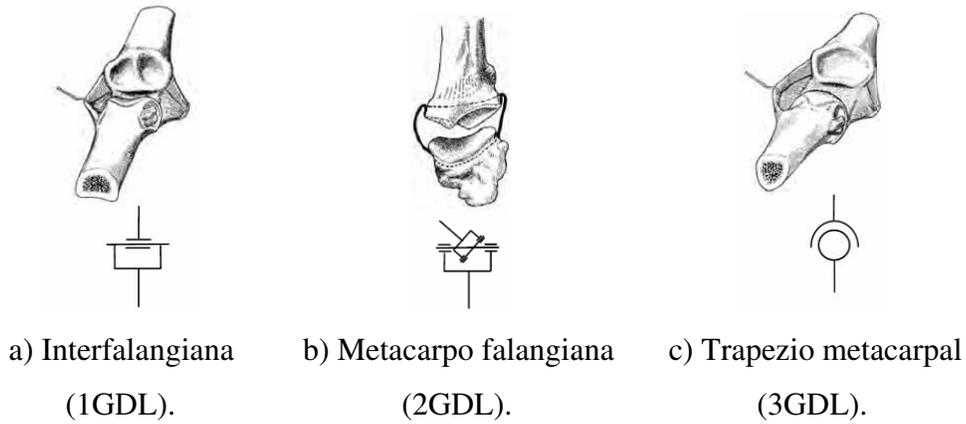


Figura 3.2: Descrição dos tipos de articulação dos dedos da mão.

Baseado nos graus de liberdade que a mão humana possui, pode-se observar na Figura 3.3 os respectivos movimentos que os mesmos podem realizar.

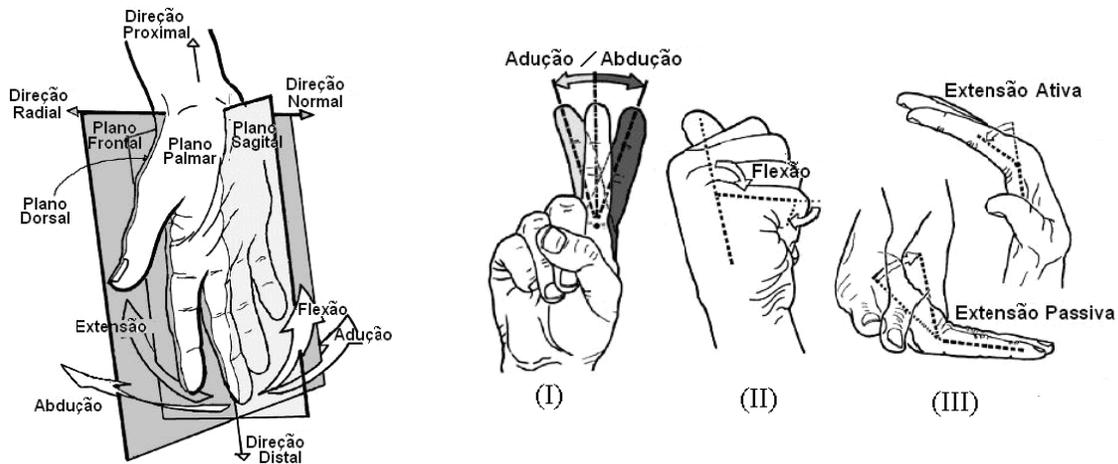


Figura 3.3: Movimentos que poderão ser realizados por uma mão.

3.3 Modelagem cinemática de cadeias cinemáticas abertas.

Com a finalidade de se obter a posição e orientação do elemento terminal em relação a uma base fixa, foi desenvolvido o modelo geométrico e cinemático do sistema esquelético humano. Ou seja, foi implementado um modelo que possa ser expresso matematicamente, a partir de suas coordenadas generalizadas (ângulos das juntas), chegando-se a uma posição delimitada por sua área de trabalho. O modelo geométrico mostra o sistema no espaço com seus graus de liberdade, enquanto o modelo cinemático direto, todos os deslocamentos serão obtidos a partir dos valores dos ângulos das juntas. Ou seja:

$$\underline{X} = f(\underline{\theta}) \quad (3.1)$$

Onde:

$\underline{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$: Vetor de posições angulares das articulações.

$\underline{X} = (X, Y, Z, \psi, \theta, \phi)$: Vetor posição, onde os três primeiros termos denotam a posição cartesiana e os três últimos a orientação do elemento terminal.

Inicialmente foi realizada a modelagem do problema em estudo, considerando apenas o problema cinemático, sem considerar as forças envolvidas. Assim, a geometria da mão torna-se fundamental, pois a partir da posição, obtém-se a velocidade e a aceleração, que são derivadas das variáveis de posição em relação ao tempo.

A modelagem do sistema articular humano é baseado na metodologia utilizada para modelagem de manipuladores robóticos, incluindo os atuadores e sistemas de transmissão mecânica. Neste capítulo serão abordados dois métodos utilizados na modelagem cinemática direta: vetores locais e representação de *Denavit-Hartenberg* (DH) (seção 3.5) que dependem basicamente do sistema de referência utilizado.

3.4 Sistemas de Referencia

Um Sistema Articular pode ser representado matematicamente através de n corpos móveis C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) e de um corpo C_0 fixo interligados por n articulações, formando uma estrutura de cadeia, sendo que essas articulações podem ser rotacionais ou prismáticas.

Para representar a situação relativa dos vários corpos da cadeia, em cada elemento C_i é fixado um referencial R . Pode-se relacionar um determinado referencial R_{i+1} ($O_{i+1}, x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$) com o seu anterior R_i (O_i, x_i, y_i, z_i), como também o sistema de coordenadas da origem da base (Figura 3.4) através da equação (3.2), e onde $A_{i,i+1}$ representa as matrizes de transformação homogênea de rotação e L_i o vetor de translação de uma origem para outro, onde $A_{i,i+1}$ é a resultante do produto matricial global entre as diversas matrizes de transformações homogêneas relacionadas com rotações ou translações sucessivas das diferentes articulações (equação (3.3)).

A representação desse sistema é feita pela relação de um ponto qualquer da cadeia (O_{i+1}) com um ponto anterior (O_i). Em cada ponto é fixado um referencial R . Esse referencial representa o vetor (x, y, z) relacionado àquela posição em estudo. Essa relação pode ser obtida através da equação (3.1).

$${}^{i-1}O_i = O_i + {}^{i-1}A_i * L_i \quad (3.2)$$

Onde:

- i : número de pontos necessários para a definição do modelo geométrico.
- \underline{O} : matriz 3x1- origem em relação a um sistema de referência local.
- \underline{O}_{i+1} : matriz 3x1- próxima origem em relação a um sistema de referência local.
- ${}^{i-1}A_i$: matriz 3x3- matriz de passagem.
- \underline{L}_i : ($O_{i+1} - O_i$)- Referenciais escolhidos convenientemente de modo a simplificar o sistema.

$${}^0 A_i = {}^0 A_1 \cdot {}^1 A_2 \cdot {}^2 A_3 \cdots {}^{i-1} A_i \quad (3.3)$$

Resultando:

$${}^{i-1} A_i = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Que é a matriz orientação do elemento terminal, onde:

$n = [n_x \ n_y \ n_z]$, direção normal às direções \underline{s} e \underline{a} .

$s = [s_x \ s_y \ s_z]$, a orientação (direção do movimento);

$a = [a_x \ a_y \ a_z]$, a aproximação (normal à direção do movimento);

Qualquer rotação no espaço pode ser decomposta num grupo de rotações elementares nos eixos x , y e z . A matriz de rotação elementar usada na equação de transformação é associada com a rotação elementar do referencial correspondente com relação ao seu anterior.

Este procedimento matemático pode ser estendido para todo o modelo. Assim sendo, a matriz de orientação de um ponto de interesse pode ser obtida pela matriz (3.4).

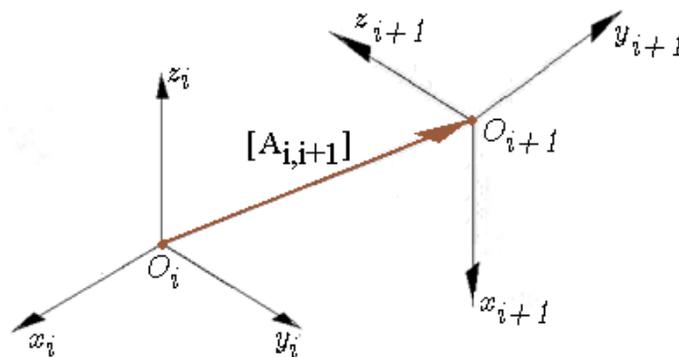


Figura 3.4: Representação do sistema de referencia O_i .

3.5 Representação de Denavit-Hartenberg.

A evolução no tempo das coordenadas das juntas de um robô representa o modelo cinemático de um sistema articulado no espaço tridimensional. A notação de D.H é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição cinemática de sistemas mecânicos articulados com N graus de liberdade (HERMINI, 2000 e SÁ, 1996).

Na Figura 3.5 podem-se visualizar dois *links* conectados por uma junta que tem duas superfícies deslizantes uma sobre as outras remanescentes em contato. Um eixo de uma junta i ($i = 1, \dots, 6$) estabelece a conexão de dois *links*.

Estes eixos de juntas devem ter duas normais conectadas neles, cada uma delas associadas aos *links*. A posição relativa desses dois *links* conectados (*link* $i-1$ e *link* i) é dada por d_i , que é a distância medida ao longo do eixo da junta entre suas normais. O ângulo de junta θ_i entre as normais é medido em um plano normal ao eixo da junta. Assim, d_i e θ_i podem ser chamados respectivamente, distância e o ângulo entre *links* adjacentes. Eles determinam a posição relativa dos *links* vizinhos.

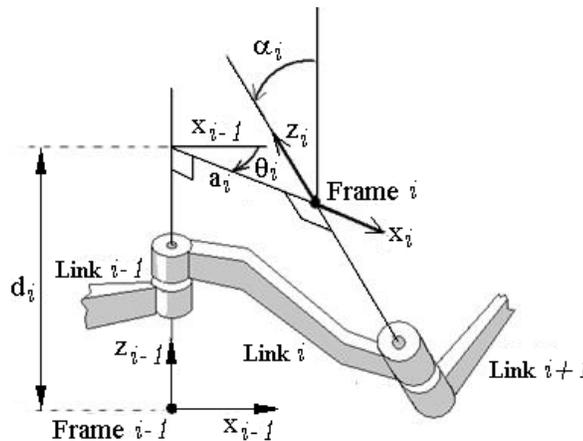


Figura 3.5: Parâmetros de D-H, θ , α , a e d .

Um *link* i poderá estar conectado, no máximo, a dois outros *links* (*link* $i-1$ e *link* $i+1$), conseqüentemente, dois eixos de junta são estabelecidos em ambos os terminais de conexão. O significado dos *links*, do ponto de vista cinemático, é que os mesmos mantêm uma configuração

fixa entre suas juntas, que podem ser caracterizadas por dois parâmetros: a_i e α_i . O parâmetro a_i é a menor distância medida ao longo da normal comum entre os eixos de junta (isto é, os eixos z_{i-1} e z_i para a junta i e junta $i+1$, respectivamente) Assim, a_i e α_i , podem ser chamados respectivamente, comprimento e ângulo de *twist* (torção) do *link* i . Eles determinam a estrutura do *link* i .

A representação D-H de um *link* rígido dependerá de quatro parâmetros associados ao link. Estes parâmetros descrevem completamente o comportamento cinemático de uma junta prismática ou de revolução (Figura 3.5). Estes quatro parâmetros são definidos a seguir:

- θ_i é o ângulo de junta obtido entre os eixos X_{i-1} e X_i no eixo Z_{i-1} (usar a regra da mão direita).
- d_i é a distância entre a origem do $(i-1)$ -ésimo sistema de coordenadas até a interseção do eixo Z_{i-1} com o eixo X_i ao longo do eixo Z_{i-1} .
- a_i é a distância (*offset*) entre a interseção do eixo Z_{i-1} com o eixo X_i até a origem do i -ésimo sistema de referência ao longo do eixo X_i (ou a menor distância entre os eixos Z_{i-1} e Z_i).
- α_i é o ângulo *offset* entre os eixos Z_{i-1} e Z_i medidos no eixo X_i (usando a regra da mão direita).

Para uma junta rotacional, d_i , a_i , e α_i são os parâmetros da junta, variando o seu valor na rotação do *link* i em relação ao *link* $i-1$. Para uma junta prismática θ_i , a_i e α_i são os parâmetros da junta, enquanto d_i é a variável de junta (deslocamento linear).

Assim sendo, os quatro parâmetros: a_i , α_i , d_i , θ_i são associados com cada link do manipulador. No momento, em que estabelece uma convenção de sinais para cada um desses parâmetros, esses constituem um conjunto suficiente para determinar a configuração cinemática de cada *link* do manipulador. Note que esses quatro parâmetros aparecem em pares:

- (a_i, α_i) que determinam a estrutura do *link* e os parâmetros da junta.
- (d_i, θ_i) que determinam a posição relativa de *links* vizinhos.

Uma vez os sistemas de coordenadas D-H tenham sido estabelecidos, uma matriz de transformação homogênea pode facilmente ser desenvolvida relacionando o i -ésimo ao $(i-1)$ -ésimo frame de coordenadas. A Figura 3.5 mostra que um ponto r_i expresso no i -ésimo sistema de coordenadas pode ser expresso no $(i-1)$ -ésimo sistema de coordenadas como r_{i-1} aplicando sucessivamente as transformações apresentadas a seguir (SÁ, 1996):

- Rotação no eixo Z_{i-1} de um ângulo de θ_i para alinhar o eixo X_{i-1} com o eixo X_i (o eixo X_{i-1} é paralelo ao eixo X_i e aponta para a mesma direção).
- Translação uma distância de d_i ao longo do eixo Z_{i-1} para trazer os eixos X_{i-1} e X_i na coincidência.
- Translação ao longo do eixo X_i uma distância de a_i para trazer as duas origens também como o eixo X na coincidência.
- Rotação do eixo X_i um ângulo de α_i para trazer os dois sistemas de coordenadas na coincidência.

Cada uma dessas quatro operações pode ser expressa através de uma matriz homogênea de rotação-translação, e o produto destas quatro matrizes de transformações elementares produzem uma matriz de transformação homogênea composta ${}^{i-1}A_i$, conhecida como matriz de transformação de DH, para sistemas de coordenadas adjacentes, i e $i-1$:

$${}^{i-1}A_i = R_{z,\theta} T_{z,d} T_{x,a} R_{x,\alpha} \quad (3.5)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Onde:

θ_i - ângulo entre *links* adjacentes.

α_i - ângulo de torção do *link*.

d_i - menor distância entre *links* adjacentes.

a_i - comprimento do *link*.

i - número de grau de liberdade.

A partir disso, obtém-se todas as matrizes ${}^{i-1}T_i$, para cada par consecutivo. Nota-se que para juntas prismáticas, as variáveis de juntas são os comprimentos d , permanecendo constantes os parâmetros θ , a e α . Já para juntas rotacionais, as variáveis de juntas são os ângulos θ ao longo da cadeia, e constantes os parâmetros d , a e α .

3.6 Modelo Cinemático da Mão Humana

Na Figura 3.6 é apresentado o modelo de uma mão antropomórfica na forma de cadeia cinemática, de acordo com os graus de mobilidade de cada uma das articulações. No entanto, para o modelo proposto nesta tese são consideradas as seguintes restrições:

1. O pulso terá todos os movimentos, portanto possui três graus de liberdade, para efeitos do modelo, todos os dedos terão movimento.
2. A articulação Metacarpo falângica (MCP) possui duas juntas de revolução independentes que são mutuamente ortonormais.
3. As articulações; distal inter falângica (DIP) e proximal inter falângica (PIP) são juntas de revolução (1GDL).

A figura 3.7 apresenta em forma geral os parâmetros geométricos da mão, onde $q_1, q_2, q_3, q_{4m}, q_{5m}, q_{6m}, q_{7m}$, são as variáveis de junta, p e o comprimento da palma, e f_{1m}, f_{2m} e f_{3m} são os comprimentos das falanges dos dedos.

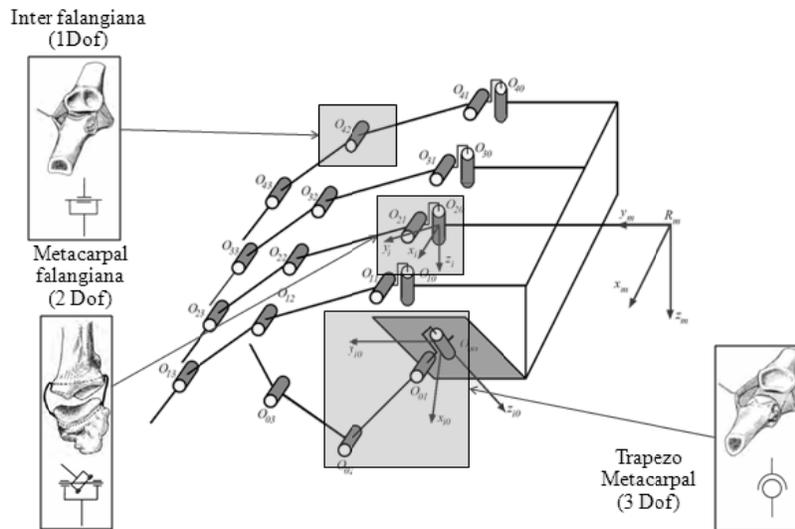
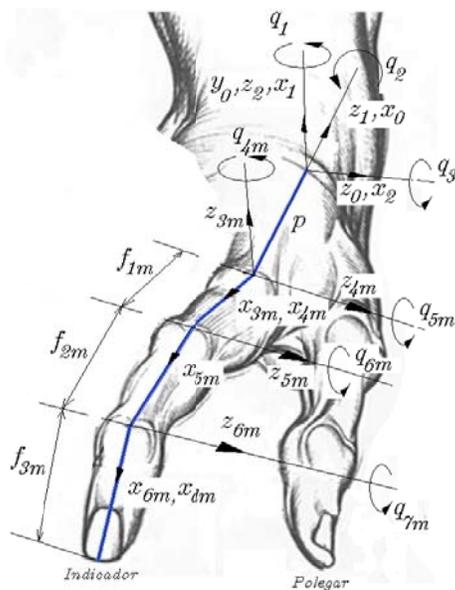


Figura 3.6: Estrutura biomecânica da mão humana.



Junta	θ_i	a_i	d_i	α_i
1	q_1	0	0	90
2	q_2	0	0	90
3	q_3	p	0	0
4	q_{4m}	0	0	-90
5	q_{5m}	f_{1m}	0	0
6	q_{6m}	f_{2m}	0	0
7	q_{7m}	f_{3m}	0	0

Figura 3.7: Parâmetros geométricos da mão humana.

Baseado na representação de *Denavit-Hertenberg* e nos parâmetros apresentados pode-se obter as respectivas matrizes de transformação homogênea para encontrar a posição e orientação na ponta de cada um dos dedos. Como a geometria para cada um dos dedos é a mesma (somente variam-se os comprimentos de cada uma das falanges), analisaremos somente o caso do dedo indicador.

A matriz de transformação resultante poderá ser obtida através da multiplicação das matrizes de transferência associadas a cada junta. Cada um dos elementos das colunas dessa matriz resultante representa uma das equações cinemáticas que descrevem o movimento do dedo (sistema de coordenadas na ponta do dedo) como função do sistema global localizado na primeira junta de revolução no punho, equação (3.4), assim:

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

- Onde a direção do vetor unitário \vec{n}

$$n_x = \cos(q_1) \cdot [\cos(q_2) \cdot \cos(q_3+q_4) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7) - \sin(q_2) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7)] + \sin(q_1) \cdot \sin(q_3+q_4) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7)$$

$$n_y = \sin(q_1) \cdot [\cos(q_2) \cdot \cos(q_3+q_4) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7) - \sin(q_2) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7)] - \cos(q_1) \cdot \sin(q_3+q_4) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7)$$

$$n_z = \sin(q_2) \cdot \cos(q_3+q_4) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7) + \cos(q_2) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7)$$
- Onde a direção do vetor unitário \vec{s}

$$s_x = \cos(q_1) \cdot [-\cos(q_2) \cdot \cos(q_3+q_4) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7) - \sin(q_2) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7)] - \sin(q_1) \cdot \sin(q_3+q_4) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7)$$

$$s_y = \sin(q_1) \cdot [-\cos(q_2) \cdot \cos(q_3+q_4) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7) - \sin(q_2) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7)] + \cos(q_1) \cdot \sin(q_3+q_4) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7)$$

$$s_z = -\sin(q_2) \cdot \cos(q_3+q_4) \cdot \sin(q_5+q_6+q_7) + \cos(q_2) \cdot \cos(q_5+q_6+q_7)$$
- Onde a direção do vetor unitário \vec{a}

$$a_x = -\cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \sin(q_3+q_4) + \sin(q_1) \cdot \cos(q_3+q_4)$$

$$a_y = -\sin(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \sin(q_3+q_4) - \cos(q_1) \cdot \cos(q_3+q_4)$$

$$a_z = -\sin(q_2) \cdot \sin(q_3+q_4)$$
- Vetor de posição \vec{p} respeito do frame de referencia.

$$\begin{aligned}
p_x = & [\cos(q_1).\cos(q_2).\cos(q_3+q_4)+\sin(q_1).\sin(q_3+q_4)]. \\
& .[f_{3m}.\cos(q_5+q_6+q_7)+f_{2m}.\cos(q_5+q_6)+f_{1m}.\cos(q_5)]+ \\
& + p.[\cos(q_1).\cos(q_2).\cos(q_3)+\sin(q_1).\sin(q_3)]+ \\
& + \cos(q_1).\sin(q_2).[-f_{3m}.\sin(q_5+q_6+q_7)-f_{2m}.\sin(q_5+q_6)-f_{1m}.\sin(q_5)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_y = & [\sin(q_1).\cos(q_2).\cos(q_3+q_4)-\cos(q_1).\sin(q_3+q_4)]. \\
& .[f_{3m}.\cos(q_5+q_6+q_7)+f_{2m}.\cos(q_5+q_6)+f_{1m}.\cos(q_5)]+ \\
& + p.[\sin(q_1).\cos(q_2).\cos(q_3)-\cos(q_1).\sin(q_3)]+ \\
& + \sin(q_1).\sin(q_2).[-f_{3m}.\sin(q_5+q_6+q_7)-f_{2m}.\sin(q_5+q_6)-f_{1m}.\sin(q_5)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_z = & \sin(q_2).[\cos(q_3+q_4).[f_{3m}.\cos(q_5+q_6+q_7)+f_{2m}.\cos(q_5+q_6)+ \\
& +f_{1m}.\cos(q_5)]+p.\cos(q_3)]-\cos(q_2).[-f_{3m}.\sin(q_5+q_6+q_7)- \\
& -f_{2m}.\sin(q_5+q_6)-f_{1m}.\sin(q_5)]
\end{aligned}$$

3.7 Restrições da Modelagem para a mão humana

O movimento dos dedos para o modelo em estudo apresenta restrições, considerando que uma mão real não pode realizar movimentos arbitrários. Essas restrições são divididas em três tipos (WESTON, 2000) (TAYLOR, 1955):

- **Tipo I:** Limite dos movimentos dos dedos como consequência da anatomia da mão (restrições de tipo estático). Esses limites são expressados de acordo as seguintes inequações:

$$\begin{aligned}
-90^\circ \leq q_1 \leq 90^\circ \quad & -15^\circ \leq q_2 \leq 15^\circ \quad & -15^\circ \leq q_3 \leq 15^\circ \quad & -15^\circ \leq q_{4m} \leq 15^\circ \\
0^\circ \leq q_{5m} \leq 90^\circ \quad & 0^\circ \leq q_{6m} \leq 110^\circ \quad & 0^\circ \leq q_{7m} \leq 90^\circ
\end{aligned}$$

- **Tipo II:** De acordo aos limites impostos durante os movimentos de juntas. (restrições de tipo dinâmico). Estas restrições se baseiam no fato de que as articulações DIP e PIP possuem a seguinte relação de rotação:

$$q_{DIP} = \frac{2}{3} q_{PIP} \quad (3.7)$$

Tipo III: Restrições impostas no desempenho de um movimento natural. As mesmas dependem da natureza dos movimentos da mão e são mais difíceis de serem detectadas.

Para o caso da mão humana, os seguintes parâmetros estruturais poderão ser utilizados para, por exemplo para o dedo médio:

$$P = 10\text{cm} = 0,1\text{m}$$

$$f_{1m} = 5\text{cm} = 0,05\text{m}$$

$$f_{2m} = 3,5\text{cm} = 0,035\text{m}$$

$$f_{3m} = 2,5\text{cm} = 0,025\text{m}$$

No Anexo B, deste trabalho, é apresentado o código do programa implementado para simulação em ambiente *MatLab*TM. Nas Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10 são apresentados resultados obtidos para simulações dos movimentos de flexão e extensão.

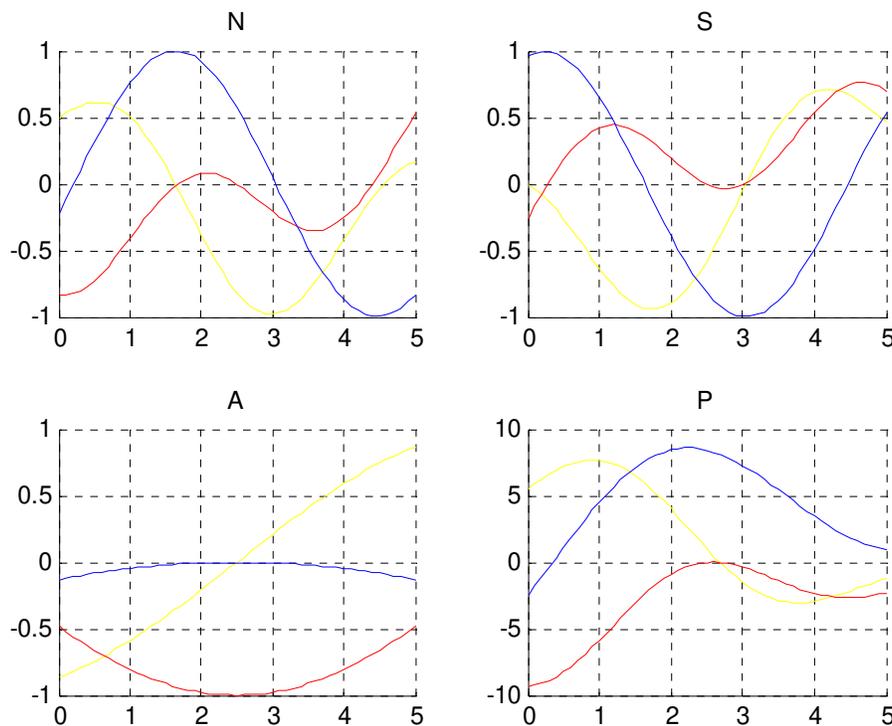


Figura 3.8: Movimento da ponta do dedo com todas as juntas em movimento.

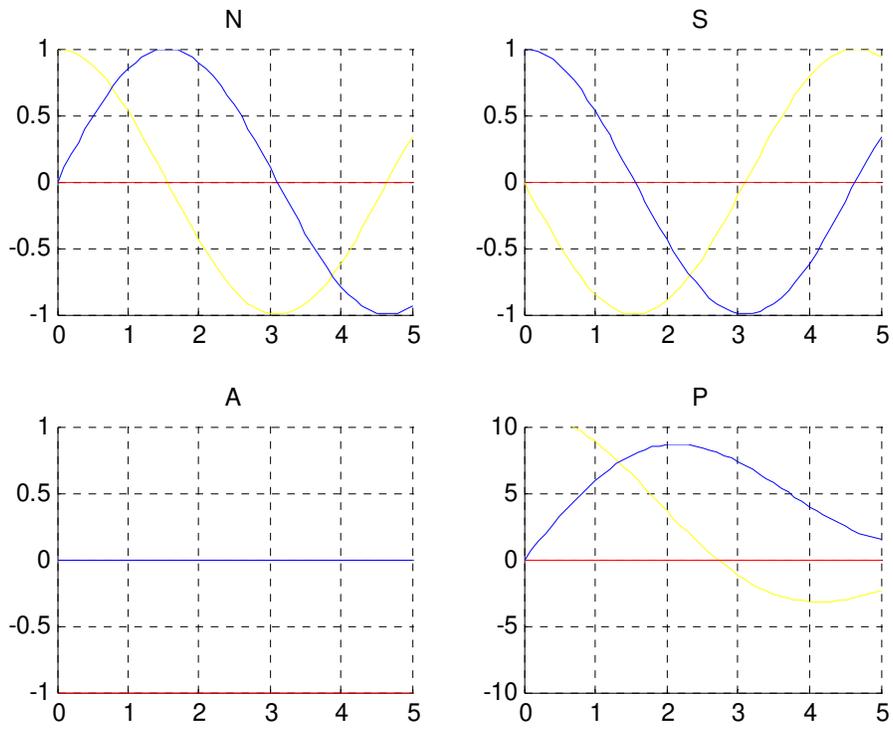


Figura 3.9: Flexão do dedo médio.

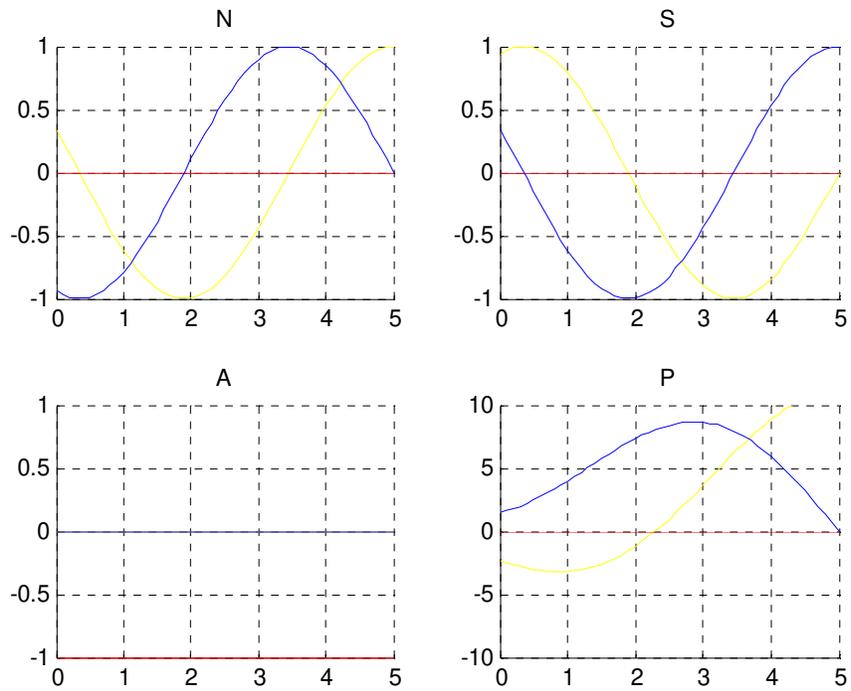


Figura 3.10: Extensão do dedo médio.

3.8 Problema Cinemático Inverso

A necessidade da obtenção de referências em coordenadas angulares, correspondentes a tarefas definidas no espaço cartesiano é expressa matematicamente pela inversão do modelo geométrico (HERMINI, 2000), isto é:

$$\underline{q} = \underline{f}^{-1}(x) \quad (3.8)$$

A função f é não linear e composta de soma de produtos de senos e cossenos das coordenadas generalizadas (translações ou rotações elementares). Por isso, a sua inversão é em geral não trivial. Como f é não linear não se pode garantir a existência e/ou a unicidade de uma função inversa f^{-1} . No caso geral, só se pode determinar o número máximo de prováveis soluções. Os métodos de solução do problema da inversão do modelo geométrico são:

- *Métodos analíticos*: esses métodos conduzem à obtenção de todas as soluções. Esses métodos não são gerais, isto é, a inversão analítica não é trivial e, além disso, não há garantia de que seja possível fazê-la para um robô qualquer. Os métodos analíticos são adequados para próteses simples, isto é, aquelas que possuem um grande número de parâmetros de DH nulos.
- *Métodos numéricos iterativos*: esses métodos convergem para uma solução possível entre todas as existentes, são de caráter geral e, com o atual desenvolvimento dos microcomputadores, a utilização desses métodos em tempo real é viável.

3.9 Matriz Jacobiana

Dada uma configuração inicial \underline{q}_o e \underline{X}_o de um robô, as coordenadas X do elemento terminal são descritas pela equação (3.9). Para pequenos deslocamentos $\delta\underline{X}$ associados aos deslocamentos das variáveis articulares $\delta\underline{q}$ pode-se escrever:

$$\delta \underline{X}_{m \times 1} = \underline{J}_{m \times n} \delta \underline{q}_{n \times 1} \quad (3.9)$$

A matriz Jacobiana $J(\theta)$ será definida como:

$$[J(\theta)_{i,j}] = [\partial F_i / \partial q_j] \quad (3.10)$$

Onde:

i é a i -ésima coordenada generalizada da junta antropomórfica e j é o j -ésimo grau de liberdade da junta antropomórfica.

Que poderá ser construída a partir das relações cinemáticas que descrevem a arquitetura da mão mecânica:

$$\begin{aligned} X_1 &= F_1(q_1, q_2 \dots q_n) \\ X_2 &= F_2(q_1, q_2 \dots q_n) \\ &\dots \dots \dots \\ X_m &= F_n(q_1, q_2 \dots q_n) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Através de derivadas parciais, a matriz Jacobiana $J(q)$ é definida como:

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & \frac{\partial F_1}{\partial q_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial q_1} & \frac{\partial F_2}{\partial q_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial q_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_m}{\partial q_1} & \frac{\partial F_m}{\partial q_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para um dispositivo robótico de um membro superior ou inferior, as coordenadas de seu elemento terminal serão descritas através de um vetor posição \underline{X} (x , y , z) e sua orientação definida a partir de três ângulos de orientação (ψ , θ , ϕ).

3.9.1 Inversão da Matriz Jacobiana – Controle de Posição

Levando-se em consideração que normalmente executa-se o controle de articulações em relação ao espaço de tarefas, o controle de uma mão robótica antropomórfica no espaço de juntas necessita de uma transformação inversa de coordenadas (F^{-1}). Essa transformação poderá ser realizada a partir da inversão da matriz Jacobiana:

$$\delta \underline{q}_{n \times 1} = \underline{J}^{\#}(q)_{m \times n} \delta \underline{X}_{m \times 1} \quad (3.13)$$

Onde

$\underline{J}^{\#}(q)$ representa a pseudoinversa da matriz Jacobiana.

Matematicamente, a relação apresentada na equação (3.13) indica a variação do incremento $\delta \underline{q}$ das variáveis articulares para um dado deslocamento $\delta \underline{X}$ do elemento terminal da mão. Como a posição atual de cada articulação $q_i \text{ atual}$ é perfeitamente conhecida (através do sistema sensorial humano), a partir da utilização da (equação (3.13) de modo iterativo e recalculando $J(q)$ a cada passo de iteração, uma trajetória $\underline{X}(t)$ poderá ser realizada num determinado tempo, em função da variação dos ângulos das juntas $q_i \text{ atual} + \delta q_i$.

A partir da comparação da posição atual do robô \underline{X} (valor calculado a partir da posição atual $\underline{X}_{\text{atual}}$ obtidas das informações de posições dos sensores de juntas ou da sinapse neural) e sua posição de referência \underline{X}_d , um sinal de erro é amplificado e transformado em termos de coordenadas articulares $\delta \underline{q}$ a partir do cálculo de $\underline{J}^{\#}(q)$. O sinal de erro é integrado e depois utilizado como sinal de entrada para controle das variáveis articulares da mão mecânica.

Finalmente, a obtenção da matriz Jacobiana, utilizada no método recursivo para o cálculo do modelo cinemático inverso, é uma forma multidimensional da derivada e relaciona a velocidade no espaço de juntas à velocidade no espaço cartesiano. A sua solução deverá ser encontrada em tempo real através da utilização de algoritmos numéricos, onde será aproximada por $\Delta \underline{x} = J \cdot \Delta q$.

Neste trabalho não foi utilizado o Jacobiano considerando que no procedimento experimental optou-se somente por três formas de prensão e programação por aprendizagem, entretanto, em trabalhos futuros que contemplem todas as formas possíveis de prensão como será mencionado no capítulo 4, a utilização do Problema cinemático inverso a partir da inversão do Jacobiano e forma de prensão desejada é imprescindível.

O controle de uma mão robotizada antropomórfica pode ser definido como um sistema cuja proposição é regular ou ajustar o fluxo de energia de uma maneira desejada. Um sistema de controle em malha fechada utiliza os sinais da saída para modificar as ações do sistema com o intuito de atingir o objetivo especificado. A partir da comparação de uma entrada de referência com a saída do sistema, um sinal de erro permitirá a atuação de um elemento controlador, que gerará um sinal de controle que depois de amplificados são enviados aos acionadores do sistema. A Figura 3.11 apresenta uma malha de controle completa para uma prótese robótica de N graus de liberdade, utilizando a resolução da matriz Jacobiana definida anteriormente no controlador de posição (modelagem cinemática inversa).

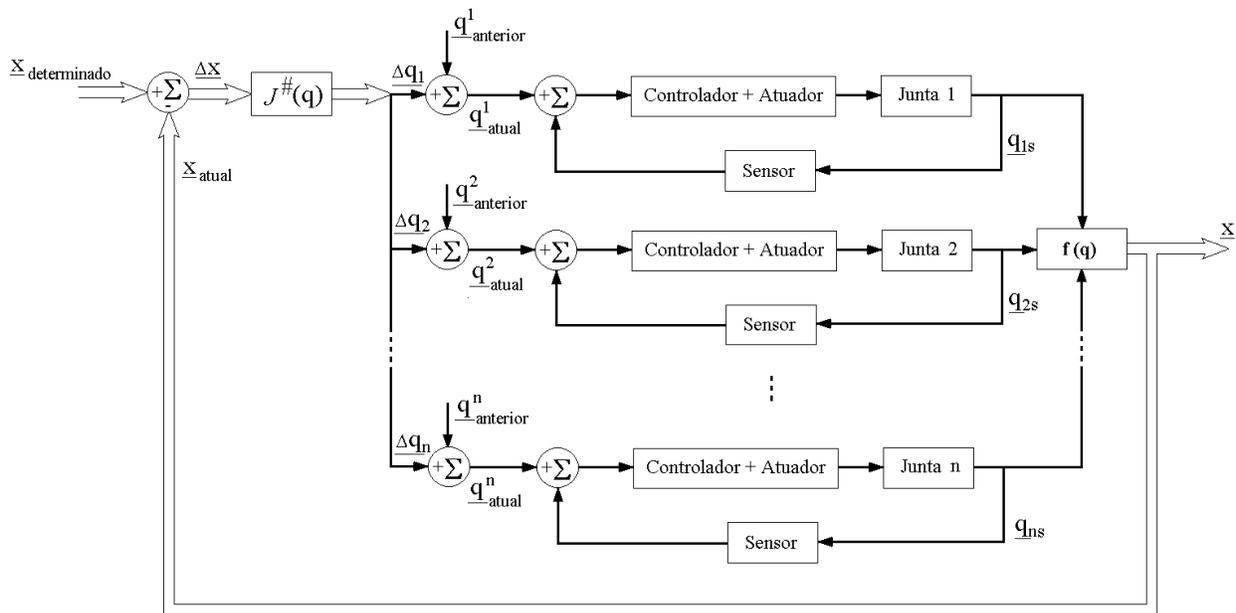


Figura 3.11: Malha de controle de posição.

3.10 Comentários Finais

Neste capítulo foi feita uma revisão dos conceitos de modelagem matemática de uma mão humana utilizando conceitos de modelos matemáticos de manipuladores antropomórficos, cuja metodologia foi aplicada na elaboração da modelagem cinemática do sistema articular da mão, visando o estabelecimento de critérios para o projeto e construção de mãos artificiais.

A partir deste modelo geométrico gerado foi desenvolvido o tratamento cinemático direto que foi implementado em algoritmos computacionais, para a simulação cinemática direta de servo-sistemas antropomórficos.

No capítulo 5 será apresentada a implementação de uma mão robótica que possui 6 GDL e características análogas as de uma mão antropomórfica, onde foi aplicado o algoritmo cinemático direto.

Capítulo 4

Noções sobre Preensão

4.1 Introdução

Em geral, o movimento de preensão define-se como: “*Ato voluntario realizado com o dedo dobrado nos três pontos de contato na mão para que o objeto fique entre os dedos e a palma, com o polegar atuando como elemento estabilizador adicional*” (AN, 1979). A preensão proporciona estabilidade e segurança ao custo da manipulabilidade do objeto, permitida pela precisão e a delicadeza que pode obter-se com a mão humana. Napier (1956) define duas classes principais para agarrar um objeto:

- 1- Preensão de precisão.
- 2- Preensão de Força.

4.2 As formas de preensão da mão humana

Toda a complexa organização anatômica e funcional da mão participa da preensão. Portanto, não há somente um tipo de preensão, mas vários, que se dividem em três grandes grupos que são as preensões propriamente ditas, as preensões com peso e as preensões-ações. As preensões propriamente ditas classificam-se em três grupos:

- As preensões digitais,

- As preensões palmares e
- As preensões centradas.

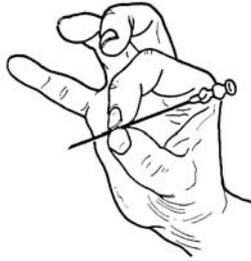
Todas elas têm um ponto em comum: elas não necessitam, ao contrário das outras preensões, da participação da gravidade.

4.2.1 As preensões digitais

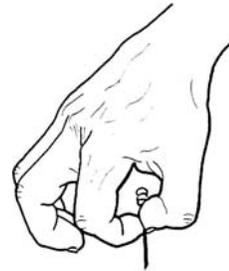
A) As preensões digitais dividem-se também em dois subgrupos: as preensões bidigitais e as pluridigitais. As preensões bidigitais constituem a clássica pinça polegar-dedos, em geral polegar-indicador. Elas, por sua vez, apresentam três tipos segundo a oposição: 1) A preensão por oposição terminal (Figura 4.1(a) e Figura 4.1(b)), que é a mais fina e a mais precisa. Ela permite segurar um objeto de pequeno calibre (Figura 4.1(a)), ou de apanhar um objeto muito fino: um fósforo ou uma agulha (Figura 4.1(b)). O polegar e o indicador (ou dedo médio) opõem-se entre si pela extremidade da polpa e, para apanhar alguns objetos muito finos (segurar um cabelo), pela borda da unha. É necessário, então, uma polpa elástica e corretamente apoiada pela unha, cujo papel é primordial nessa forma de preensão. Por essa razão, pode-se também chamá-la de preensão pulpo-ungueal. 2) A preensão por oposição subterminal ou com a ponta dos dedos (Figura 4.1(c)), que é a forma mais freqüente. Ela permite segurar objetos relativamente mais espessos: um lápis ou uma folha de papel. 3) A preensão por oposição subtérmino-lateral (Figura 4.1(d)), feita como quando se segura uma moeda. Essa forma de preensão pode substituir a oposição terminal ou subterminal, quando as duas últimas falanges do indicador tiverem sido amputadas: a preensão é menos fina mas nem por isso menos firme. A face palmar da polpa do polegar apoia-se na face externa da primeira falange do indicador.

Entre as preensões bidigitais, há uma que não constitui uma pinça policidigital (polegar-dedo); é a preensão interdigital látero-lateral (Figura 4.2(a)) que é uma forma de preensão secundária (segurar um cigarro, por exemplo). É praticada, em geral, entre o indicador e o dedo médio; o polegar não intervém. O diâmetro do objeto segurado deve ser pequeno.

As preensões pluridigitais fazem intervir, além do polegar, dois, três ou quatro dedos. Elas permitem uma preensão muito mais firme que a bidigital, que é uma preensão de precisão.



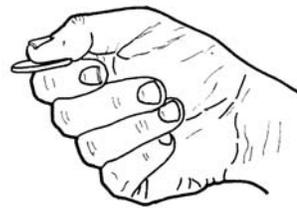
(a) Oposição terminal nas pontas dos dedos.



(b) Preensão fina para agarrar uma agulha.



(c) Preensão por oposição subterminal



(d) Preensão por oposição subtérmino-lateral

Figura 4.1: Formas de preensão da mão humana I.

As preensões tridigitais envolvem polegar, indicador e médio, e são as mais frequentemente utilizadas. Uma parte importante senão preponderante, da humanidade, que não conhece o uso do garfo, utiliza-a para levar os alimentos à boca. Ela assemelha-se à preensão tridigital ponta dos dedos (Figura 4.2(b)), tal como é empregada para segurar uma pequena bola, onde o polegar opõe sua polpa à do indicador e do médio em relação ao objeto. Escrever com um lápis, por exemplo, (Figura 4.2 (c)), necessita uma pinça tridigital, na ponta dos dedos para o indicador e o polegar, lateral para a terceira falange do médio, que serve de suporte como o fundo da primeira comissura. Nesse sentido, esta preensão é muito direcional e parecem as preensões centradas e as

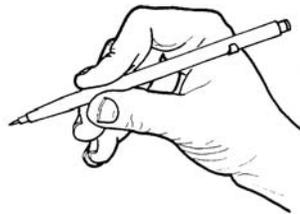
preensões-ações, que é apresentada em seguida, já que a escrita é o resultado não somente dos movimentos do ombro e da mão, que desliza sobre a mesa em sua borda ulnar e do dedo mínimo, mas também dos movimentos dos três primeiros dedos, que colocam em jogo o flexor longo próprio do polegar e o flexor superficial do indicador para o vaivém do lápis, e os músculos sesamóides externos e o segundo interósseo dorsal para sua manutenção.



(a) Bidigital, interdigital látero-lateral



(b) Tridigital



(c) Pinça tridigital, (Preensão ação na ponta dos dedos)

Figura 4.2: Formas de preensão da mão humana II.

As preensões tetradigitais são utilizadas quando o objeto é mais espesso e deve ser mais fortemente segurado. A preensão pode ser então:

Tetradigital pulpar (Figura 4.3 (a)), quando segura um objeto esférico como bola de pingue-pongue. Observa-se, então, que o contato é com a polpa para o polegar, indicador e médio, enquanto é lateral na falange distal do anelar, cujo papel é impedir que o objeto escape para dentro. Tetradigital pulpolateral (Figura 4.3 (b)), durante o desenroscar de uma tampa. De

fato, o contato é grande com o polegar, envolvendo a polpa e a face palmar da primeira falange, e também com o indicador e o médio; é pulpar e lateral na segunda falange do anular, que bloqueia o objeto por dentro. "O envolvimento circular" da tampa pelos quatro dedos imprime um movimento em espiral aos segundo, terceiro e quarto dedos, e pode-se demonstrar que a resultante das forças que eles exercem anula-se no centro da tampa, que se projeta na frente da articulação metacarpofalangiana do indicador. Tetradigital pulpar policitridigital (Fig. 3.8 (c)), como quando se segura um giz, um pincel ou um lápis: a polpa do polegar aplica e mantém fortemente o objeto contra a polpa do indicador, do médio e do anular, em extensão quase completa. É também a forma com que um violinista e um violoncelista seguram seu arco.



(a) Tetradigital pulpar



(b) Tetradigital pulpolateral



(c) Tetradigital pulpar policitridigital



(d) Pentadigital pulpar

Figura 4.3: Formas de preensão da mão humana III.

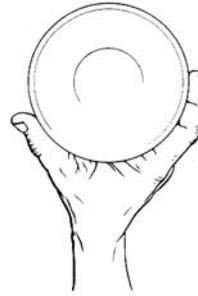
As preensões penta-digitais empregam todos os dedos, com o polegar se opondo de maneira variável aos outros. Geralmente, são utilizadas para segurar os objetos maiores. Entretanto, quando o objeto é pequeno, pode ser apanhado numa preensão pentadigital pulpar

(Figura 4.3(d)), com somente o quinto dedo tendo um contato lateral. Se o objeto é mais volumoso, como uma bola de tênis, por exemplo, a preensão torna-se pentadigital pulpo-lateral (Figura 4.4(a)): os quatro primeiros dedos tomam contato em toda a sua face palmar e envolvem quase totalmente o objeto, com o polegar se opondo aos três outros dedos e o mínimo impedindo, com sua face externa, o escape por dentro e proximalmente. Embora não seja uma preensão palmar, pois a bola situa-se mais nos dedos que na palma, essa preensão já é muito firme. Uma outra preensão pentadigital que poderia ser denominada pentadigital comissural (Figura 4.4(b)) agarra os objetos espessos hemi-esféricos, uma tigela, por exemplo, envolvendo-os na primeira comissura: polegar e indicador bem estendidos e afastados exercem contato com toda sua face palmar, o que exige grande flexibilidade e possibilidades normais de separação da primeira comissura. A tigela é também sustentada (Figura 4.4(c)) pelos dedos médio, anular e mínimo, que só tem contato em suas duas últimas falanges. Portanto, trata-se de uma preensão digital, não palmar.

A preensão pentadigital panorâmica (Figura 4.4(d)) permite segurar os objetos planos muito espessos, como um pires. Ela precisa de uma grande separação dos dedos, largamente divergentes, e o polegar, colocando-se em retroposição e em extensão extrema, encontra-se em contra-oposição máxima. Ele se opõe diametralmente ao anular (flechas brancas), formando um arco de 180° , sobre o qual se prendem o indicador e o médio. O dedo mínimo "agarra-se" ao outro semicírculo, de tal forma que o arco formado entre ele e o polegar seja de 215° ; esses dois dedos, em afastamento máximo, em oitava (assim como falam os pianistas), formam com o indicador uma preensão "triangular" quase regular, e, com os outros dedos, uma preensão "aranha", de onde o objeto não pode escapar. Notar que a eficácia dessa preensão depende da integridade das articulações interfalângicas distais e da ação dos músculos flexores profundos.



(a) Pentadigital pulpo-lateral



(b) Pentadigital comissural



(c) Digital, não palmar



(d) Pentadigital panorâmica

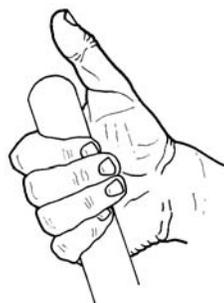
Figura 4.4: Formas de preensão da mão humana IV.

4.2.2 Preensões palmares

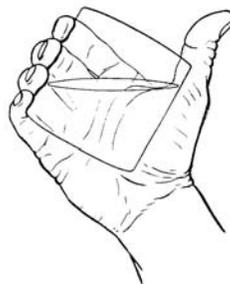
Nas preensões palmares intervêm, além dos dedos, a palma da mão. Elas são de dois tipos, conforme o polegar seja ou não utilizado:

A preensão digitopalmar (Figura 4.5(a)) opõe a palma aos quatro últimos dedos. É uma forma de preensão acessória, mas utilizada com muita frequência quando se manobra uma alavanca ou se segura um volante. O objeto de diâmetro muito pequeno (3 a 4 cm) é agarrado entre os dedos fletidos e a palma e o polegar não intervêm: a preensão só é firme, até um certo ponto, no sentido distal; em direção ao punho, o objeto pode escapar facilmente - a preensão não é "fechada". Além disso, observa-se que o eixo da preensão é perpendicular ao eixo da mão, e não segue a direção oblíqua da corredeira palmar. Essa preensão digitopalmar pode também servir para agarrar um objeto mais volumoso, como um copo (Figura 4.5(b)), mas quanto maior o

diâmetro do objeto, mais firmeza falta na preensão. A preensão palmar "plena" (Figura 4.5(c)) é a preensão de força para os objetos pesados e relativamente volumosos. Literalmente, a mão se enrola em torno de objetos cilíndricos.



(a) Digitopalmar I



(b) Digitopalmar II

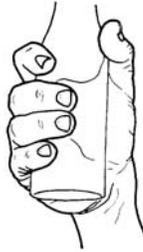


(c) Palmar "plena"

Figura 4.5: Formas de preensão da mão humana V.

Quando a preensão palmar cilíndrica aplica-se aos objetos de diâmetro importante (Figura 4.6(a) e Figura 4.6(b)), a preensão é tanto menos firme quanto maior for o diâmetro. As preensões palmares esféricas podem envolver três, quatro ou cinco dedos. Quando elas fazem intervir três (Figura 4.6(c)) ou quatro dedos (Figura 4.6(d)), o último dedo do lado de dentro, seja o médio na preensão esférica tridigital, ou o anular na preensão esférica tetradigital, toma contato lateral externo com o objeto, formando apoio interno, escorado pelos dedos restantes (mínimo sozinho ou associado ao anular). Esse apoio se opõe à pressão do polegar e o objeto se encontra "preso" distalmente pela ou pelas "garras" dos dedos, que fazem um contato palmar com o objeto.

Na preensão palmaresférica pentadigital (Figura 4.6 (a)), todos os dedos fazem contato com o objeto por sua face palmar. O polegar opõe-se ao anular; eles ocupam junto o maior diâmetro e o fechamento da preensão é assegurado distalmente pelo indicador e médio, e proximalmente pela eminência tenar e o dedo mínimo. O objeto, firmemente mantido por todos os dedos em garra, o que pressupõe, por sua vez, as possibilidades máximas de afastamento comissural e a eficiência dos flexores superficiais e profundos, toma contato com toda a palma.



(a) Palmar cilíndrica I



(b) palmar cilíndrica II



(c) Palmar esféricas I



(d) Palmares esféricas II

Figura 4.6: Formas de preensão da mão humana VI.

4.2.3 Preensões centradas

As preensões centradas realizam, de fato, uma simetria em torno de um eixo longitudinal, que se confunde geralmente com o eixo do antebraço. Isto é evidenciado pela batuta do maestro (Figura 4.7(b)), que só faz o prolongamento da mão e representa uma extrapolação do indicador na sua função de indicar. Esse mecanismo é indispensável na preensão da chave de fenda (Figura 4.7(c)), que se confunde, então, com o eixo de prono supinação no ato de aparafusar ou de desparafusar. Em todos os casos, o objeto de forma alongada é mantido firmemente por uma

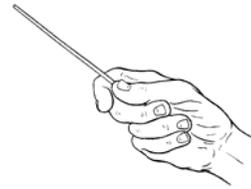
preensão palmar, fazendo intervir o polegar e os três últimos dedos, e com o indicador desempenhando um papel direcional essencial para orientar o utensílio.

Até agora foram estudadas às formas de preensão onde a gravidade não intervém, mas existem outras para as quais a gravidade é indispensável, e que não podem ser utilizadas nos meios sem gravidade.

Nas preensões auxiliadas pela gravidade, a mão serve de suporte, como quando ela sustenta uma bandeja (Figura 4.8(a)), o que pressupõe que ela possa se colocar de forma plana, com a palma horizontal voltada para cima (portanto, não com os dedos em garra), ou que ela possa constituir um tripé sob o objeto a sustentar.



(a) Auxiliada pela gravidade I



(b) Auxiliada pela gravidade II

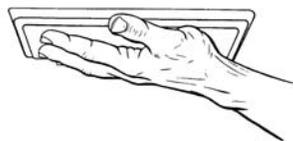


(c) Auxiliada pela gravidade III

Figura 4.7: Formas de preensão da mão humana VII.

Graças à gravidade, a mão pode também se comportar como uma colher, como quando ela contém grãos (Figura 4.8(b)) ou um líquido. A concavidade da palma é, então, prolongada por aquela dos dedos, mantidos juntos por ação dos inter ósseos palmares, para evitar que o conteúdo

da mão caia. A preensão de uma tigela por três dedos (Figura 4.8(c)) utiliza a gravidade, pois sua circunferência é mantida entre dois apoios, formada pelo polegar e pelo dedo médio, e uma garra constituída pelo indicador.



(a) Sem preensão auxiliadas pela gravidade I



(b) Sem preensão auxiliadas pela gravidade II



(c) Auxiliadas pela gravidade IV

Figura 4.8: Formas de preensão da mão humana VIII.

4.2.4 As preensões-ações

A mão também é capaz de agir segurando. É o que será chamado por preensões mais ação ou mais simplesmente, preensões-ações. Estas preensões-ações, onde a mão age sobre ela mesma, são inúmeras; a seguir pode-se tomar como exemplos:

A ação de acender um isqueiro (Figura 4.9(a)), que se assemelha muito à de jogar a bola de gude; o isqueiro é mantido na concavidade do indicador e dos outros dedos, enquanto o polegar em garra aciona o mecanismo (ação do flexor próprio e dos músculos tenares).

A ação de cortar com a tesoura (Figura 4.9(b)): os anéis da tesoura são colocados, de um lado, no polegar e do outro, nos dedos médios e anular. O polegar é essencialmente motor, tanto

no fechamento da tesoura quanto na sua abertura. O afastamento dos anéis, quando é repetido num gesto profissional, pode ocasionar a ruptura do extensor longo. O indicador orienta a tesoura, constituindo um exemplo de preensão mais ação direcional.

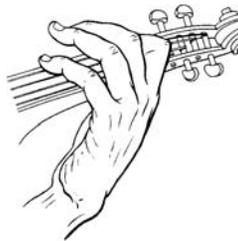
A mão esquerda do violinista (Figura 4.9(c)), ou a do violonista, realiza uma preensão mais ação móvel: o polegar sustenta a "haste" do violino e, deslocando-se, serve de contra-apoio à ação dos quatro outros dedos que, colocando-se sobre a corda deve ser precisa, firme e modulada para criar a vibração. Essas ações complexas nascem de um longo aprendizado e devem ser mantidas pelos exercícios cotidianos.



(a) Ação de acender um isqueiro



(b) Ação de cortar com a tesoura



(c) Mão esquerda do violinista

Figura 4.9: Formas de preensão da mão humana IX.

Já em conclusão se pode resumir o estudo das preensões no esquema apresentado na Figura 4.10, já na Figura 4.11 são mostradas algumas simulações de preensão com a mão MUC-1 (as características da MUC-1 são estudadas no Capítulo 3).

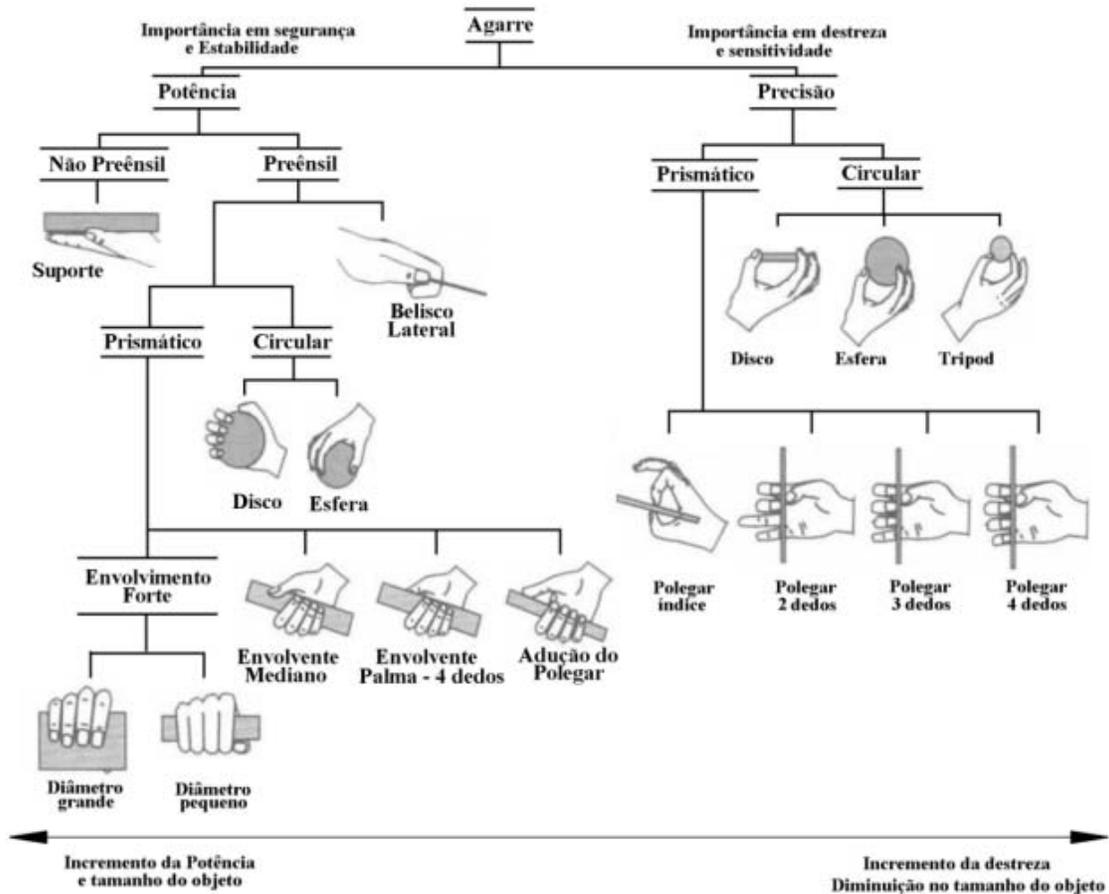


Figura 4.10: Taxonomia parcial das formas de preensão de uma mão humana (CUTKOSKY , 1989).

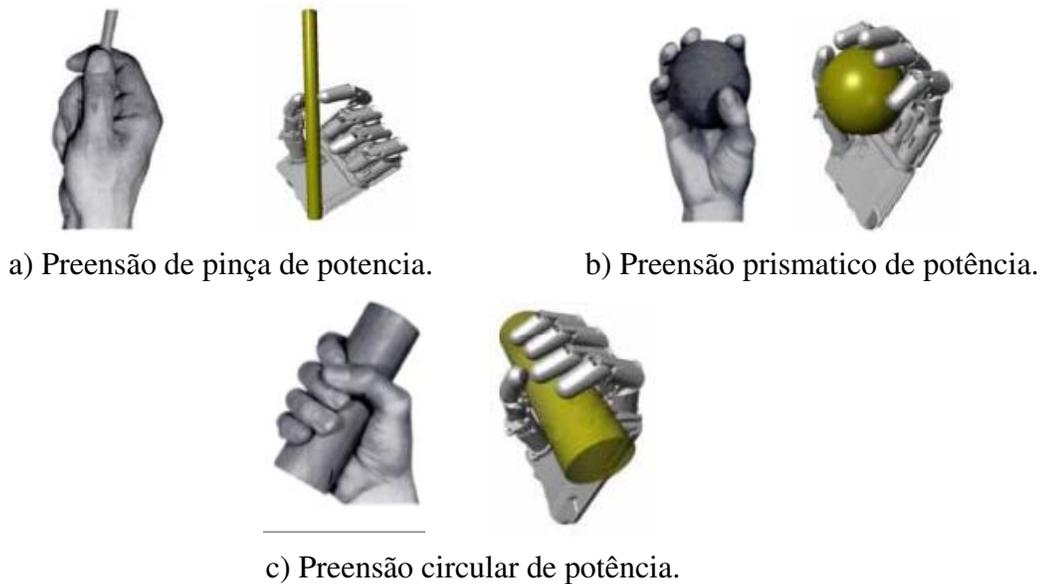


Figura 4.11: Tipos de preensão realizados através da simulação de MUC-I.

4.3 Estudo de Tarefas Modulo de Pré formas.

4.3.1 Estratégias de preensão

Agarrar uma peça pode parecer uma tarefa fácil. Em (BORST, 2003) um algoritmo para planejamento automático de preensão com um *gripper* paralelo e apresentado. Como ele é utilizado em muitos experimentos, uma mão com um controle rígido está pronta para agarrar um objeto, com a condição de que a forma do objeto seja perfeitamente conhecida.

No mundo real, no qual a forma de preensão precisa ser resolvida, existem algumas incertezas. Em geral um sistema visual (com câmeras), pode ser disponibilizado para conhecer a forma do objeto e assim decidir qual dedo e necessário mover primeiro e em que direção, o que significa conhecer o estado atual e qual a seguinte ação que precisa ser feita. Um algoritmo (seqüência de movimentos) para preensão de um objeto em um ambiente com incertezas (IBERALL, 1987 e 1993), ver Figura 4.12.

A posição de preensão, também chamada de pré-configuração, é a posição/orientação na qual somente através de movimento dos dedos, um determinado objeto poderá ser alcançado. Nesse caso, os movimentos dos dedos dependem da forma do objeto. Duas estratégias podem ser definidas neste estágio.

- a) Fechamento dos dedos até que o objeto seja firmemente apreendido. Tendo a forma aproximada do objeto, um procedimento geométrico pode definir quais as superfícies do objeto correspondem a cada dedo (Figura 4.13)

- b) Utilização da projeção do objeto pode ser uma boa estratégia para determinar a melhor direção do movimento. Conseqüentemente, a partir da detecção de pelo menos três pontos de contato, dará continuidade a aplicação de uma força. Nesse contexto, a configuração de preensão pode ser avaliada como função da medição das forças que estão sendo aplicadas, pouco a pouco até que o peso do objeto possa ser suportado. Uma rápida abertura e fechamento da mão podem produzir

uma perturbação e assim mudar o posicionamento do objeto, como também, um leve afastamento de um dos dedos poderá ser utilizado para gerar um movimento de rotação do objeto.

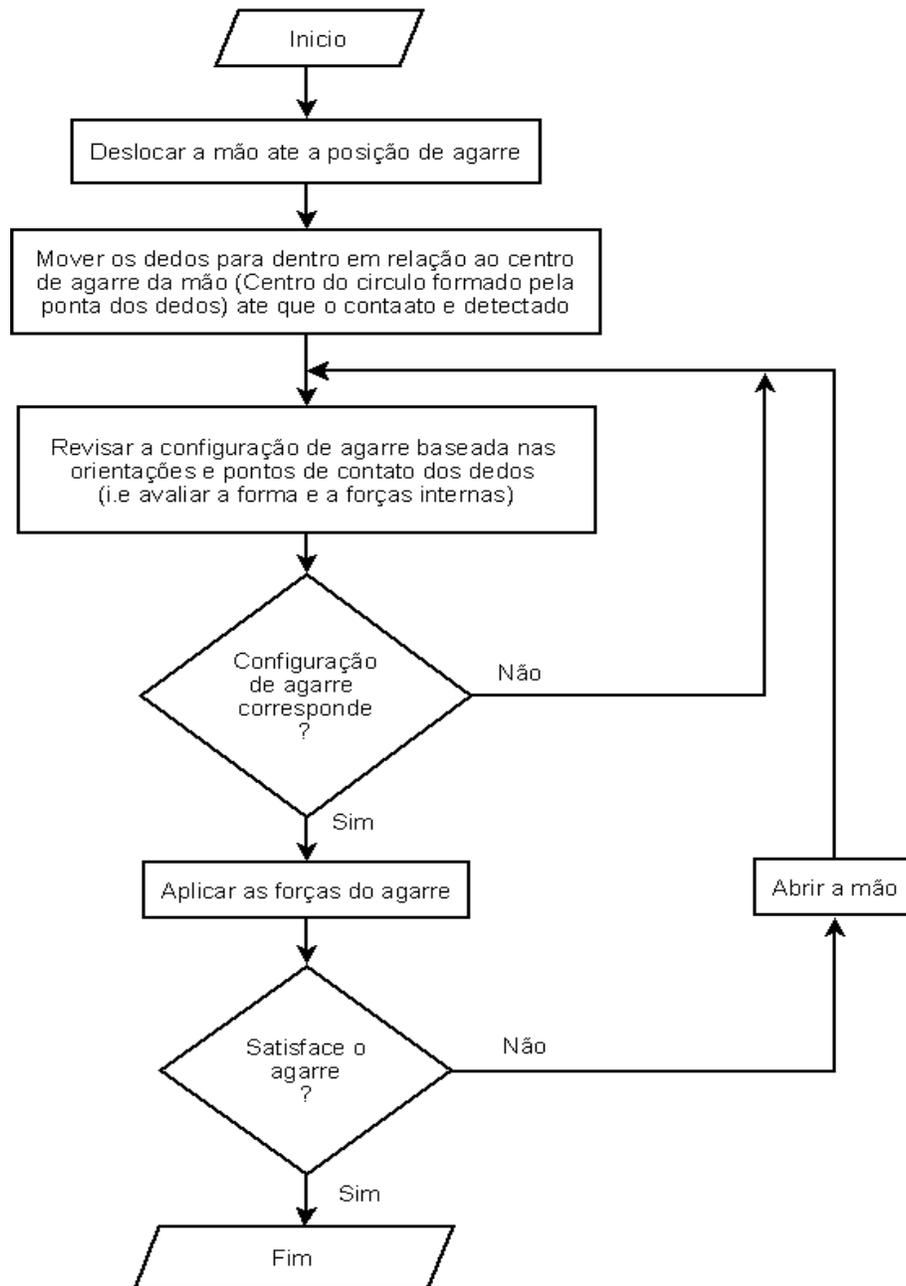


Figura 4.12: Fluxograma - seqüência de movimentos para uma tarefa de prensão.

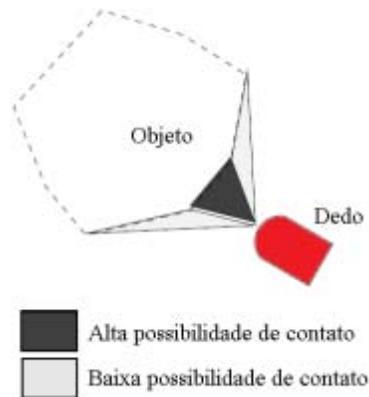


Figura 4.13: Direções de proximidade.

4.3.2 Oposição

A mão humana é versátil nas suas interações com o ambiente de atuação, demonstrando assim as habilidades que os projetistas de mãos artificiais devem levar em consideração quando se projetam mãos robóticas (ver seção. 2.3 Mãos Robóticas).

As tarefas de apreensão são definidas como: “*A aplicação de forças efetivamente funcionais aplicadas pela mão e para um objeto com a finalidade de realizar uma determinada tarefa, possuindo numerosas restrições*” (IBERALL, 1993). Cada tarefa a ser realizada exige uma determinada postura, movimentos específicos e uma boa informação sensorial. Essas posturas podem variar dependendo das propriedades da mão, do objeto a ser manipulado e da tarefa.

Uma boa postura direciona como o resultado excelentes características anatômicas da mão junto ao resultado de complexas habilidades cognitivas do sistema nervoso central. Quando essa é escolhida dentre várias posturas, a decisão de escolha de um controlador de mão robótica inteligente depende dos requerimentos das tarefas e das habilidades do manipulador. A destreza humana não depende somente das características anatômicas da mão, mais também da habilidade do sistema nervoso central de repartir o problema para um conjunto de subproblemas e utilizar soluções paralelas para resolver cada um deles simultaneamente.

Como visto nas secções anteriores a oposição entre o polegar e os outros dedos com uma suficiente aplicação de força sobre as superfícies de um objeto, esses podem ser agarrados. O termo oposição pode ser usado para descrever três direções básicas ao largo das quais a mão pode aplicar forças, ver Figura 4.14: Oposição das pontas dos dedos (*Pad oposition*), Oposição Palmar (*Palm oposition*), Oposição Lateral (*Side oposition*).

As posturas então são a combinação de diferentes oposições entre os dedos. Para cada dedo virtual⁴ um ou mais dedos reais ou a palma são usados na Tabela 4.1, a qual apresenta uma lista das combinações dos movimentos de oposição, e uma descrição dos dedos reais sendo usados dentro de cada dedo virtual.

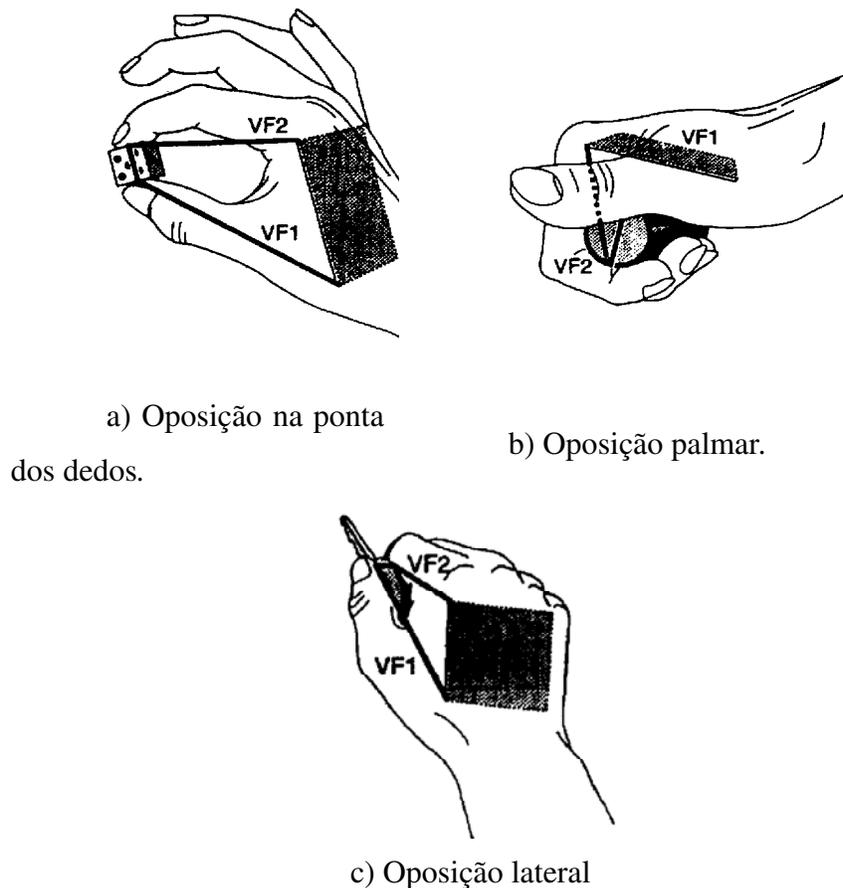


Figura 4.14: Esquema geral para classificar as preensões (IBERALL, 1987).

⁴ Um *dedo virtual* se define como uma representação abstrata de uma unidade funcional (dedo), para uma coleção de dedos individuais e superfícies da mão, onde estão sendo aplicadas forças de oposição.

Tabela 4.1: Posturas típicas agrupadas em sete categorias.

Grupo	ID	Oposição 1			Oposição 2			Oposição 3		
		Tipo	VF1	VF2	Tipo	VF1	VF2	Tipo	VF1	VF2
A.	1	Palmar	P	I-M-R-L						
	2	Palmar	P	I-M-R						
	3	Palmar	P	M-R-L						
	4	Palmar	P	I-M						
	5	Palmar	P	I						
B.	6	Dedos	T	I-M-R-L						
	7	Dedos	T	I-M-R						
	8	Dedos	T	M-R-L						
	9	Dedos	T	I-M						
	10	Dedos	T	I						
C.	11	Lateral	T	I						
D.	12	Palmar	P	I-M-R-L	<i>Side</i>	T	I			
	13	Palmar	P	I-M-R	<i>Side</i>	T	I			
	14	Palmar	P	M-R-L	<i>Side</i>	T	I			
	15	Palmar	P	I-M	<i>Side</i>	T	I			
	16	Palmar	P	R-L	<i>Side</i>	T	I			
E.	17	Palmar	P	M-R-L	<i>Pad</i>	T	I			
	18	Palmar	P	M-R	<i>Pad</i>	T	I			
	19	Palmar	P	R-L	<i>Pad</i>	T	I-M			
F.	20	Dedos	T	I	<i>Side</i>	T	M			
G.	21	Palmar	P	R-L	<i>Pad</i>	T	I	<i>Side</i>	T	M

P: Palma, T: Polegar, I: Indicador, M:Medio, R: Anelar, L: Pequeno

Baseado na Tabela 4.1 é escolhido algumas tarefas que poderiam ser realizada em forma cotidiana por uma pessoa, essas são sumarizadas e sua respectiva simulação com a MUC-1. Cada postura identifica uma combinação de oposições e mapeamento dos dedos virtuais para os dedos reais. (IBERALL, 1987 e 1993) são apresentadas nessa tabela, que serve como base de conhecimento das formas de preensão, ver Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tarefas típicas a serem realizadas para uma pessoa, analogia com a MUC-1.

Atividade	Da base de dados	Possível configuração	Atividade	Da base de dados	Possível configuração
Arrumar o cabelo	11		Pegar um martelo longo	1	
Bater em uma porta	12		Apertar a mão fortemente	1	
Coçar	1		Fechar a mão para cumprimentar	1	
Escrever	20	 	Manipular cartas de tamanho pequeno	9	
Pegar objetos de tamanho pequeno	6		Pegar objetos de tamanho médio suavemente	6	
Carregar um grupo de objetos na mão	9		Pegar objetos grandes de pouco peso	1	
Tomar objetos grandes pesados	1				

Para cada tarefa simples na base de dados das tarefas (Tabela 4.2) uma postura dominante da mão é especificada. Onde uma “postura” descreve qual a combinação de oposições e dedos virtuais que estão sendo utilizados. “Tamanho de abertura” descreve a abertura entre os dedos virtuais, e “força”, descreve a quantidade de força necessária na tarefa. As posturas são definidas segundo a numeração da Tabela 4.1. Por exemplo: comandos de nível de oposição podem ser observados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tarefas típicas a serem realizadas para uma pessoa.

Postura	Tamanho da abertura	Força
1	Grande	
20	Pequena	
7	Média	Forte
6	Média	
14	Pequena	Macia

4.3.1 Modulo de Pré-formas:

Logo que o comando para ter oposição na mão tem sido identificado, a mão pode adotar algumas formas pré-estabelecidas. Os comandos de oposição são usados para deixar uma forma com os dedos pelo envio dos comandos elétricos para cada um dos motores. Uma opção pode ser o envio dos ângulos ou deslocamentos normalizados para um determinado nível de oposição. Por exemplo: na Tabela 4.4 são apresentadas algumas posições que são atingidas com a mão mecânica MUC-1 e os respectivos movimentos para cada um dos motores levando em consideração que para ter uma determinada pré-forma, neste protótipo, será utilizado um controle em malha aberta, ou seja, serão levados em consideração tempos normalizados para o movimento de cada um dos movimentos.

Tabela 4.4: Modulo de pré formas de prensão, posições iniciais da MUC-1.

Nível de oposição		Ângulos Normalizados						Posição dos dedos na prensão
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
1	Grande	0.5	0.5	1	1	1	1	
6	Médio	0.7	0.5	1	1	1	1	
20	Pequeno	0.7	0.5	1	0	0	0	
14	Pequeno	0	0.7	0	1	1	1	
11	Pequeno	0	0.7	1	0	0	0	
12	Médio	0.5	0.5	1	1	1	1	
9	Médio	0.5	0.5	1	1	0	0	

Controle laço aberto mão mecânica MUC-1: Na Tabela 4.5 se apresenta a lógica que foi implementada como base de dados das pré formas de interesse, T_{ij} indica os tempos de duração dos movimentos de cada um dos motores para uma pré-forma determinada.

Tabela 4.5: Tempos para o modulo de pré formas.

Motor \ Preensão	Motor					
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6
P_1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}	T_{16}
P_6	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{24}	T_{25}	T_{26}
P_{20}	T_{31}	T_{32}	T_{33}	T_{34}	T_{35}	T_{36}
P_{14}	T_{41}	T_{42}	T_{43}	T_{44}	T_{45}	T_{46}
P_{11}	T_{51}	T_{52}	T_{53}	T_{54}	T_{55}	T_{56}
P_{12}	T_{61}	T_{62}	T_{63}	T_{64}	T_{65}	T_{66}
P_9	T_{71}	T_{72}	T_{73}	T_{74}	T_{75}	T_{76}

Para a configuração das palavras de controle se usa a placa de aquisição de dados da National Instruments USB 6008, Figura 4.15 e Figura 4.16.

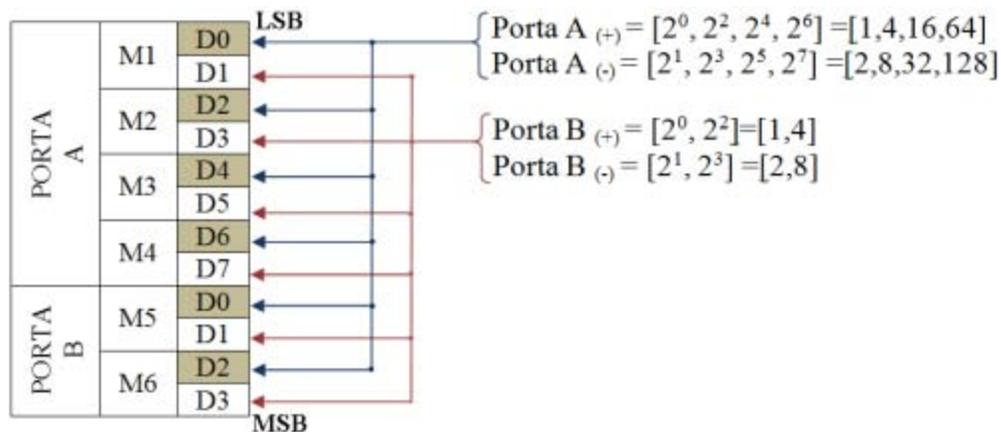


Figura 4.15: Palavra de controle na saída digital da placa NI USB 6008.

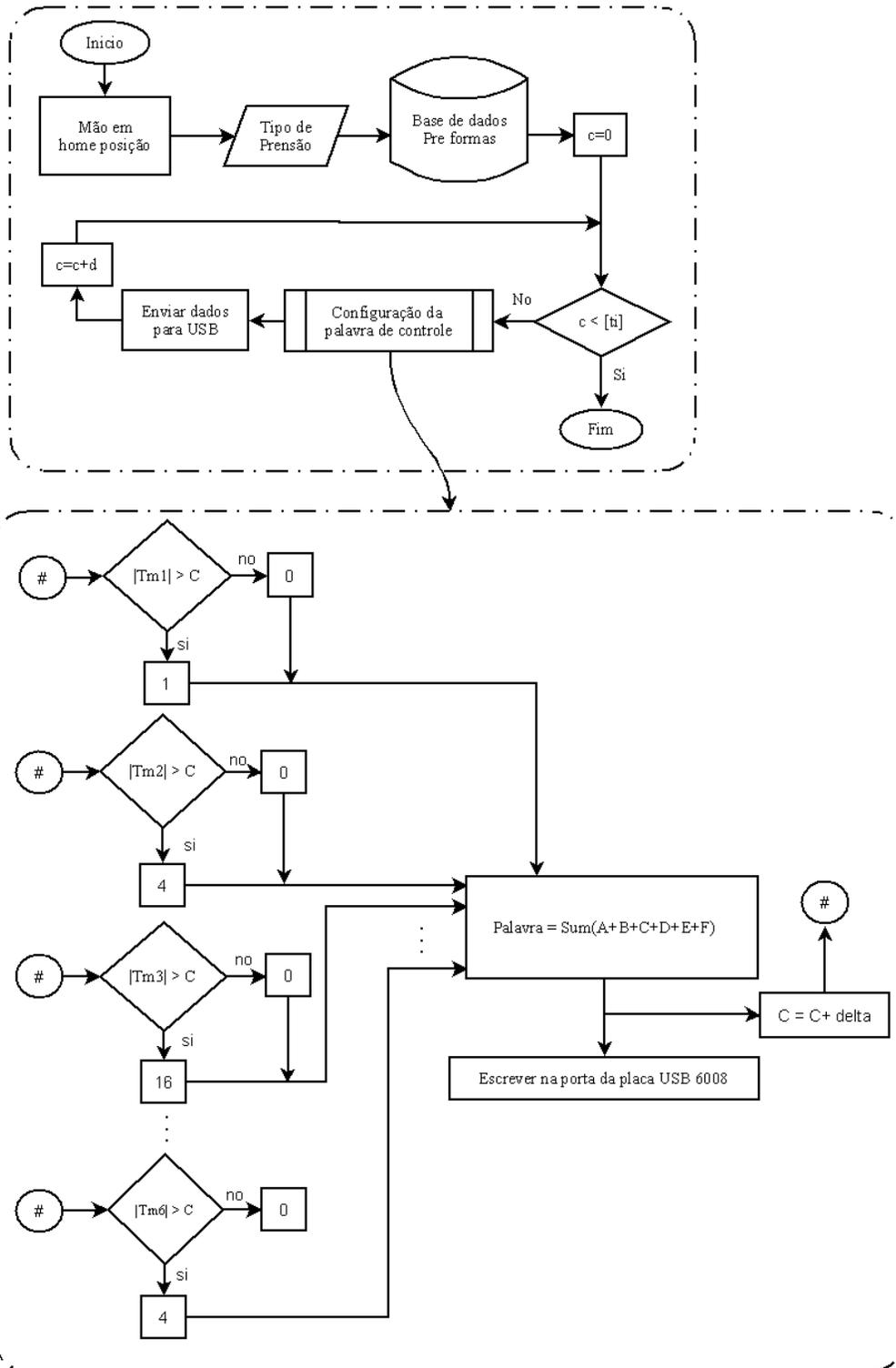
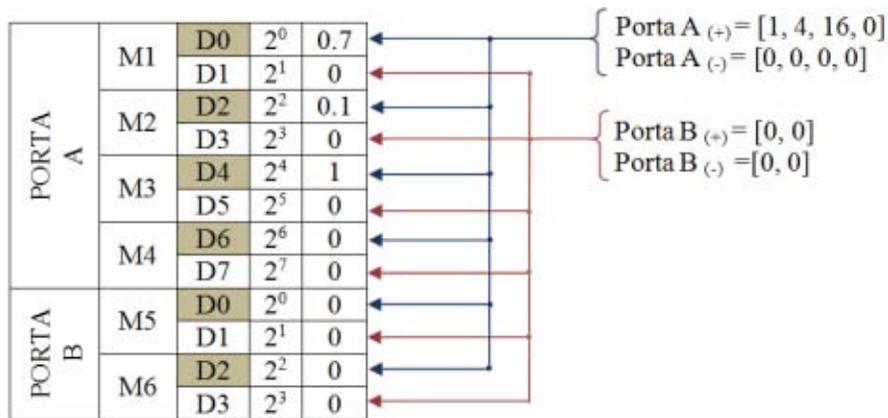


Figura 4.16: Diagrama de fluxo da lógica para configuração da palavra de controle.

Exemplo: Supondo que tem-se uma preensão de pinça, os motores devem se movimentar os tempos indicados para atingir uma posição aceitável para logo mudar para o modo com controle híbrido (força/posição).

Motor Preensão	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	
	P ₂₀	0.7	0.1	1	0	0	



4.4 Proposta Controle em malha fechada

O sistema de controle tem que gerar as trajetórias para posição e força da maneira mais simples possível. Essa precisão depende da resposta dos atuadores (motores) e do sistema de transmissão de movimento, engrenagens, sistemas de alavancas, etc, os quais geram os movimentos nas juntas. O controlador para uma mão robótica pode ser particularmente complexo devido à complexidade do sistema a controlar. Essa complexidade refere-se aos GDL, à grande quantidade de informação do sistema sensorial e aos múltiplos objetivos de controle necessários para uma tarefa de manipulação ou preensão (CARROZA, 2005), (BIAGIOTTI, 2002).

O controle de um sistema complexo, *i.e* uma mão robótica, pode ser reduzido ao controle de um conjunto de manipuladores “simples”, os quais, durante a manipulação são acoplados uns

aos outros com o objetivo de agarrar um objeto levando em conta as restrições de força / velocidade.

Uma tarefa que envolve tarefas de manipulação e montagem pode ser dividida em quatro passos fundamentais:

- *Pré-configuração*: É configurado inicialmente o sistema braço / mão, livre de colisões e no qual o objeto pode ser alcançado com o movimento de um dedo.
- *Preensão*: depois de ter uma pré-configuração na mão, são utilizadas técnicas de controle híbrido força / posição no momento de ter contato com um objeto. Elevados valores de aceleração podem produzir perturbações nos dedos e assim incertezas na posição. Também objetos delicados podem sofrer rupturas se não é usada uma sofisticada estratégia de contato.
- *Transporte*: Logo que um objeto é agarrado em forma estável, esse pode ser trasladado para realizar as operações de montagem, a possibilidade de colisões como obstáculos deve ser levada em conta.
- *Montagem*: São requeridas estratégias de controle robusto para controle força / posição.

Mãos robóticas oferecem uma ampla flexibilidade em manipulação e preensão (Figura 4.17) a qual envolve interação entre as pontas dos dedos e o objeto, e a interação entre o objeto agarrado e o ambiente.

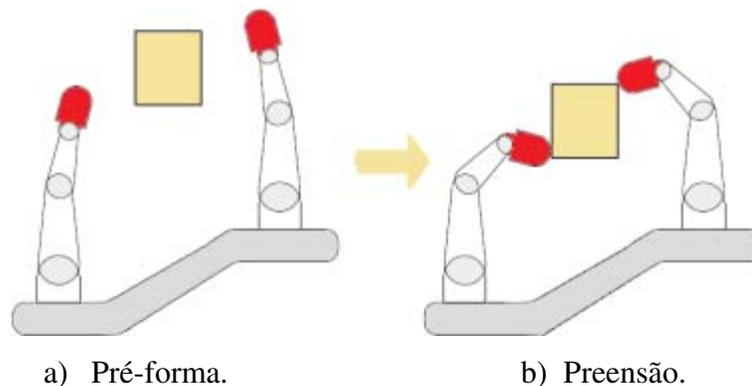


Figura 4.17: Preensão de um objeto com dedos articulados.

4.4.1 Dinâmica de mãos robóticas

A dinâmica de sistemas robóticos desempenha um rol muito importante na simulação e controle. As tarefas desenvolvidas por robôs podem ser complexas, então a necessidade de entender o comportamento dinâmico e assim determinar a melhor estratégia de controle (HERMINI, 2000), (LIU, 1998), (COELHO, 1997), (DOERSAM, 1997).

Um dos resultados mais importantes obtidos logo da modelagem dinâmica serve para clarificar quais das propriedades físicas são fáceis de obter e quais são computacionalmente custosas. No caso da MUC-1 cada dedo da mão pode ser considerado como um pequeno robô independente, nesse sentido pode ser definido a dinâmica para cada dedo como sendo para uma cadeia cinemática de corpos rígidos, unidos a caixa redutora (transmissão) e o sistema de atuação (motor).

Cinemática da mão MUC-1: Para introduzir ao assunto é referido à mão MUC-1. Essa mão apresenta uma estrutura modular, caracterizada por cinco dedos idênticos, organizados da mesma forma como acontece com a mão humana, que seria quatro dedos superiores e um oposto (polegar) mais uma palma. Essa aproximação modular simplifica o desenho geral de uma mão, assim como o processo de manufatura, para a construção do dedo e levado em consideração as características de desempenho de um dedo humano. Cada dedo possui uma característica cinemática antropomórfica, com três falanges e três juntas de tipo rotacional. A junta proximal possui um (1) GDL para flexão / extensão, os movimentos da falange meia e distal não são individualmente controláveis devido a que estão rigidamente acoplados através de um sistema de alavancas, tentando acompanhar um movimento similar aos dedos humanos durante uma tarefa de preensão. Cada um dos dedos é atuado por meio de um único motor DC (integrado na palma da estrutura da mão), seu movimento é transmitido através de um parafuso sem fim na articulação localizada na base de cada dedo. Cada um dos motores possui um *encoder* incremental o que possibilita a medição de posição, na ponta do dedo polegar e colado um sensor de força. A Figura 4.18 apresenta a estrutura cinemática da MUC-1.

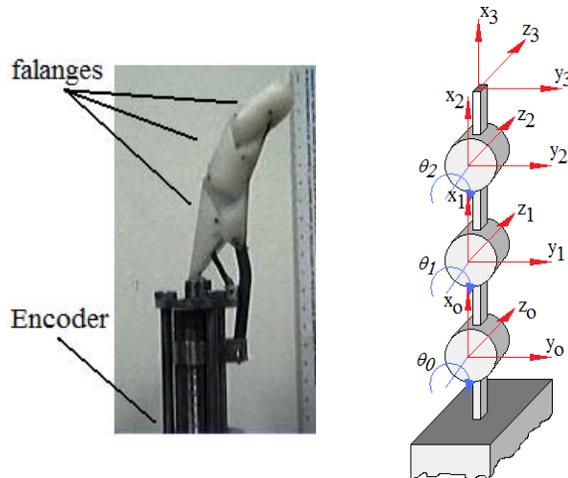


Figura 4.18: Cinemática da mão MUC-1

A Tabela 4.6 mostra as informações técnicas de o dedo modular da mão MUC-1:

Tabela 4.6: Informação técnica da MUC-1.

Elemento		Características
Falanges	Proximal	Teflão; $x_0 = 47\text{mm}$
	Media	Teflão; $x_1 = 31\text{mm}$
	Distal	Teflão; $x_2 = 21\text{mm}$
Atuador		Motor DC. Faulhaber C1616T
Transmissão		Caixa redutora relação de 141:1 Sistema de alavancas
Sensor		<i>Flexiforce</i> TM

4.4.2 Atuador

O atuador e o sistema de transmissão são necessários para a geração do movimento nas juntas do mecanismo, o torque aplicado no eixo do motor:

$$\tau_{motor} = k\phi_a \quad (4.1)$$

Onde τ_{motor} é o torque do motor, ϕ o fluxo magnético, i_a a corrente de armadura e k a constante do motor. A equação dinâmica do sistema:

$$I\ddot{q} = \tau_{motor} - F(\dot{q}) - G(q) - \varepsilon(\dot{q}) - \underbrace{J^T(q)f}_{Contato} \quad (4.2)$$

Onde F é o atrito, G o componente gravitacional, ε o termo elástico, e o contato e o efeito dinâmico da força externa f que pode ser aplicada pelo dedo ao ambiente ou vice-versa.

4.4.3 Identificação dos parâmetros:

Atrito:

O atrito representa um dos fatores importantes para cálculo dos parâmetros do sistema controle, por exemplo, para mover uma articulação, para vencer o atrito estático o motor deve gerar de 40% a 60% do seu valor máximo de torque. Uma articulação em movimento atinge um 20% de seu valor máximo (dados técnicos da *Karlsruhe hand*). Os efeitos do atrito em *grippers* com juntas rotacionais podem ser classificados em função da velocidade nas juntas ($\dot{\theta}$):

- Atrito Estático (Conhecida como atrito de Coulomb ou atrito seco): $\tau_c = K_c \text{sign}(\dot{\theta})$ com $\dot{\theta} \neq 0$.
- Atrito Dinâmico (também atrito viscoso): $\tau_v = K_v \dot{\theta}$.
- Atrito Sêco (Stiction): Atrito para velocidade igual a zero. (atrito adesivo) $\tau_{stic} = K_{stic}$ com $\dot{\theta} = 0$.
- Atrito Negativo: Efeito da diminuição do atrito como o aumento da velocidade, usualmente muito baixo, só para velocidade.
- Atrito de Deslizamento (Slip Stick): Transição do *stiction* para o movimento, usualmente o movimento para, continua, etc.

Superpondo todos esses efeitos se obtêm a seguinte aproximação não linear:

$$\tau_{fric} = \left(K_c + K_v |\dot{\theta}| + (K_{stic} - K_c) e^{-(\beta\dot{\theta})} \right) \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (4.3)$$

A Figura 4.19 mostra a curva de atrito aproximada.

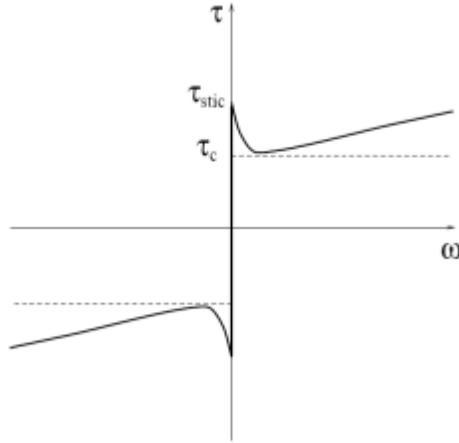


Figura 4.19: Curva de atrito aproximada.

4.4.4 Modelo da planta

Com os termos mencionados a dinâmica de uma junta pode ser expressa como:

$$I\ddot{q} = \tau_{motor} - \tau_{fric} - \tau_{grav} - \tau_{perturb} \quad (4.4)$$

Através da identificação dos parâmetros da mão MUC-1 o modelo pode ser simplificado. Por exemplo: A medição do atrito estático tem características de ruído, conseqüentemente esse valor fica muito difícil de ser identificado. Por conseguinte esse termo é desprezado do modelo e assume-se como um termo aditivo do torque devido às perturbações ($\tau_{perturb}$) e, portanto não precisa ser compensado pelo controlador. Assim, o atrito é modelado através dos atritos de Coulomb e viscoso, o seja:

$$\tau_{fric} = K_c \text{sign}(\dot{\theta}) + K_v \dot{\theta} \quad (4.5)$$

O componente gravitacional, a massa do motor, engrenagens, *encoder*, pode ser aproximado por um ponto onde se concentra essa massa (M). E por tanto:

$$I\ddot{q} = \tau_{motor} - K_c \text{sign}(\dot{\theta}) - K_v \dot{\theta} - Mgl \cos \theta_1 \quad (4.6)$$

$\tau_{motor} = k\phi i_a$ é o torque de excitação proporcional a corrente de armadura a qual é controlada pelo controlador de armadura do motor. Essa equação é linear, e para a identificação de seus parâmetros podem ser utilizados simplesmente os dados fornecidos pelo fabricante ou recorrer a métodos clássicos de identificação, como por exemplo, o algoritmo de mínimos quadrados.

Embora a equação dinâmica do sistema tenha sido simplificada, essa representação é muito próxima do sistema real, onde os parâmetros para a inércia I , podem ser considerados irrelevantes, devido a elevada redução (1/141), o qual pode ser representado na forma:

$$I = I_{motor} + \left(\frac{1}{141}\right)^2 I_{dedo} \quad (4.7)$$

4.4.5 Estratégias de controle

Com a finalidade de agarrar um objeto, devem ser planejados os movimentos do braço para atingir uma posição perto do objeto. Sem nenhuma restrição cinemática, a mão deve ser capaz de agarrar o objeto ao mesmo tempo. O controle de posição no processo de pré-preensão tem como objetivo garantir uma configuração inicial requerida de acordo com a forma do objeto a ser manipulado. O controle de posição é combinado com o controle de força, o que é conhecido também como controle híbrido (força / posição), (CRAIG, 1979), (MUÑOZ, 1996).

Como exemplo, pode-se considerar o controle de posição da *Salisbury hand*, que é baseado no controle ao nível dos tendões. Os atuadores dessa mão são motores DC, os quais estão unidos a tendões flexíveis que ajudam a produzir o torque necessário nas articulações, e assim obter a flexão / extensão do dedo. Para um dedo é necessário realizar o controle de quatro motores, no caso da mão MUC-1 o sistema mecânico garante que só é necessário um atuador para a geração dos movimentos, o que facilita o controle.

a) Controle de Posição:

No caso da *Salisbury hand* existem duas possibilidades para o controle de posição: controlar a tensão dos tendões, ou controlar a posição dos motores, a medição do vetor de tensão dos tendões (T) é usado para estimar o correspondente *vetor de torque* (τ) para o dedo, usando a relação $\tau=RT$ ($T=R^{-1}\tau$) onde R é uma matriz constante determinada pelo cabeamento e o raio das polias. Outra equação importante $\theta=A\theta_m+BT$, relaciona ambas as medidas do vetor de tensões (T) e a posição dos motores θ_m com o correspondente vetor de ângulos $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ para o dedo (MASON, 1985).

Um controlador do tipo PID é usado para controlar as tensões dos cabos. Mesmo uma boa calibração do PID para os quatro tendões, esse responde com um desempenho limitado e com uma restrição nas forças na faixa de operação de 5N a 25N. Problemas de atrito se tornam importantes com baixa corrente incrementando alguns efeitos não lineares nos motores. Problemas como atrito no motor, atrito na transmissão, ruído nos sensores, são os principais fornecedores das limitações no desempenho do controlador. Já no caso do controle de posição dos motores, e resolvido o problema cinemático inverso para atingir as posições desejadas na ponta do dedo e assim obter os correspondentes ângulos nas juntas. Usando a tensão nominal para o tendão e os ângulos nas juntas, são calculadas as posições requeridas para o motor. Um controlador PID não é suficiente para essa aplicação devido a influencia dos efeitos elásticos do tendão que se refletem.

A dinâmica do atuador, como mostrado é composta pela ação das forças de inércia, atrito, gravidade e inércia. Os efeitos da gravidade podem ser desprezados, portanto os efeitos do atrito, elasticidade e tensão são mais importantes.

Na MUC-1 só é possível o controle nos motores, ver Figura 4.20, técnicas de controle clássico são usadas, mais para compensar as não linearidades do modelo pode ser proposto num controle difuso.

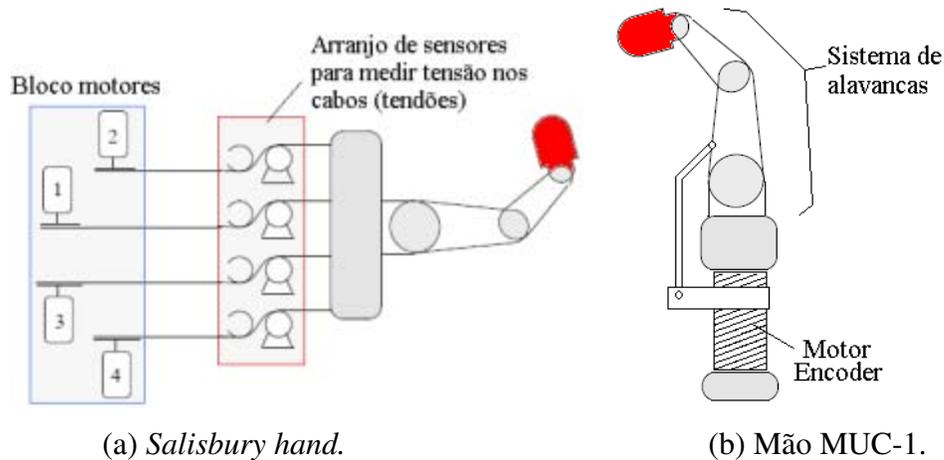


Figura 4.20: Esquema mãos robóticas *Salisbury* e MUC-1.

b) Estratégias de controle de força

Muitas das tarefas desenvolvidas por um robô manipulador requerem que o robô interatue como seu ambiente de trabalho. Por exemplo: empurrar, golpear, cortar, brilhar, escavar, torcer, etc. Para que todas essas tarefas possam ser executadas o robô intrinsecamente precisa, além de realizar um controle de posição, fornecer a força necessária para superar a resistência do meio, ou para interagir com ele. Por tanto, o controle de força envolve a integração de vários elementos como: modelagem do ambiente, realimentação de posição, velocidade, força e ajuste do torque aplicado nas juntas do manipulador. A realimentação de vários sinais de saída (posição, força, velocidade) e a escolha dos sinais de comando de entrada para o robô resulta em diferentes métodos de controle de força. Esses métodos podem ser categorizados como algoritmos fundamentais de controle de força e estratégias de controle avançado (CRAIG, 1979), (HONG, 1985), (PAROMTCHIK, 1995), (VOLPE, 1992).

c) Fundamentos de Controle de força

A classificação dos algoritmos de controle de força se baseia na aplicação da relação entre posição e a força ou entre a velocidade e a força aplicada, ou a aplicação de uma realimentação de força direta, ou combinação desses inclui:

- Relação entre posição e força: controle de rigidez (*stiffness control*) como realimentação de força somente, e controle de rigidez por correção de realimentação de força.
- Relação entre velocidade e força: controle de impedância e admitância.
- Métodos que aplicam diretamente posição e força aplicada: controle híbrido de posição/força, controle de impedância híbrido.
- Métodos que aplicam realimentação de força diretamente: controle de força explícita.

d) Controle de força

Os algoritmos de controle de força são baseados em técnicas de controle adaptativo, controle robusto e métodos de aprendizagem integrados entre si ou em combinação com os métodos fundamentais. Os métodos adaptativos incluem: Controle de movimento adaptativo obediente, adaptativo por impedância (ou admitância), adaptativo força/posição e controle de força explícita adaptativo. Os métodos de controle robusto são: Controle de movimento robusto obediente, controle robusto por impedância (ou admitância), controle robusto força/posição e robusto de força explícito. Outros métodos são de controle por aprendizado, como as técnicas de redes neurais artificiais e controle difuso para controle de força em robôs.

Na prática, a implementação de cada uma das aproximações contém detalhes que podem ser diferentemente formuladas.

e) Algoritmos de controle de força fundamentais

Nos diagramas seguintes, J é a matriz Jacobiana do robô, X_D o vetor de posição desejado no espaço de trabalho, X e \dot{X} são os vetores de posição e velocidade respectivamente, ΔX é o vetor de erro de posição, $\Delta \theta$ é o vetor de ângulo de deslocamento da junta, τ_p é o vetor de comando de entrada para as juntas associadas com o controle de rigidez, N é o vetor de

compensação *feedforward* não linear para gravidade e forças centrífugas e de coriolis, τ é o vetor de torque/força total de entrada nas juntas, X_E é o vetor de posição do ambiente contatado, K_E é a rede de rigidez entre os sensores e o ambiente e F é o vetor de força (ou torque) de contato resultante no espaço global, K_p e K_v são os ganhos de controle, usualmente escolhidas como matrizes diagonais, K_F é a matriz de complacência (*compliance*) para modificar os comandos de posição. Da Figura 4.21 até a Figura 4.28 apresentada a seguir mostram as estratégias sugeridas para a implementação de controladores híbridos, na Tabela 4.7 se apresenta uma comparação de todas as estratégias.

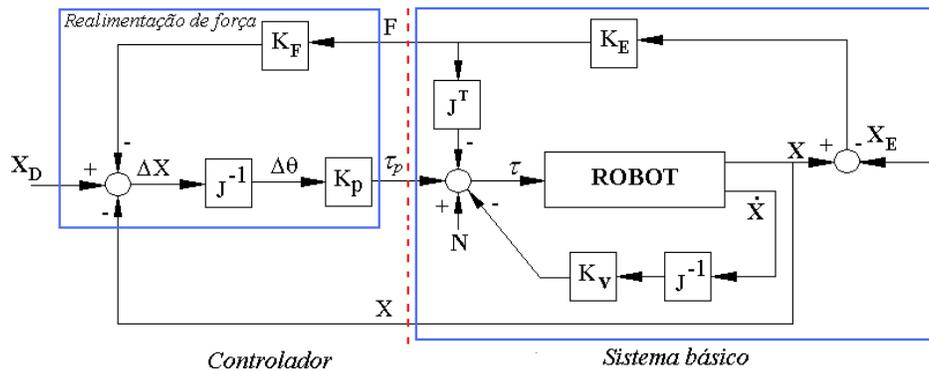


Figura 4.21: Estrutura de Controle Ativo considerando a Rigidez, versão 1.

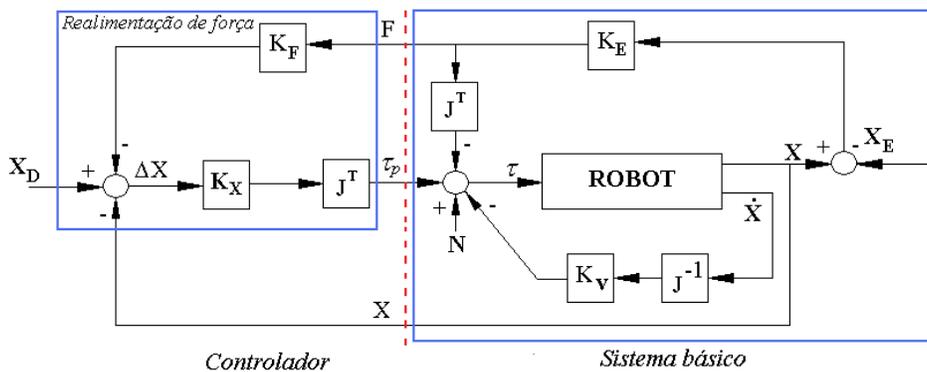


Figura 4.22: Controle ativo de rigidez, versão 2.

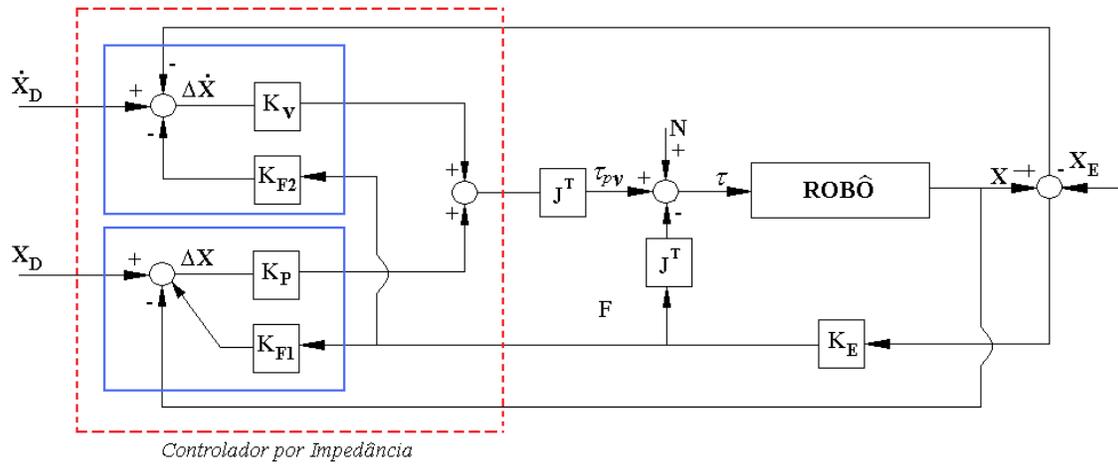


Figura 4.23: Controle através de impedância básico.

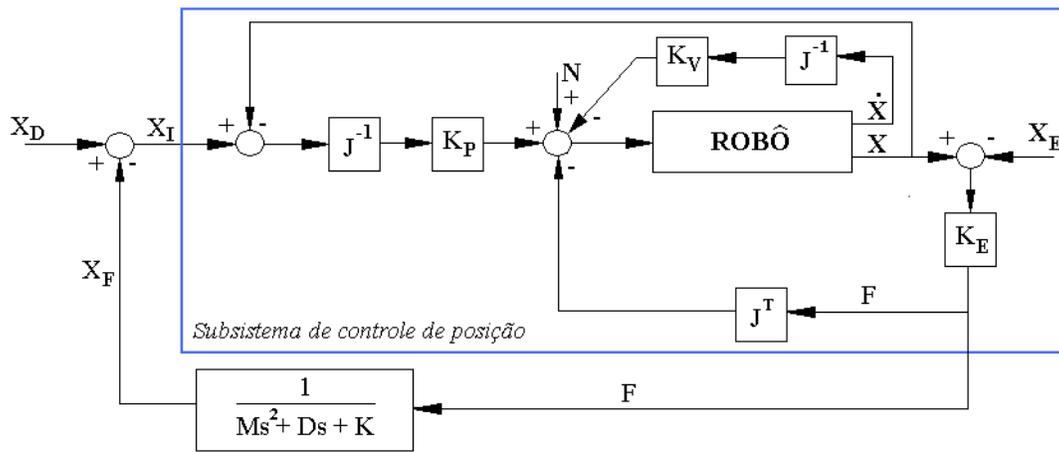


Figura 4.24: Controle através de impedância baseado em posição.

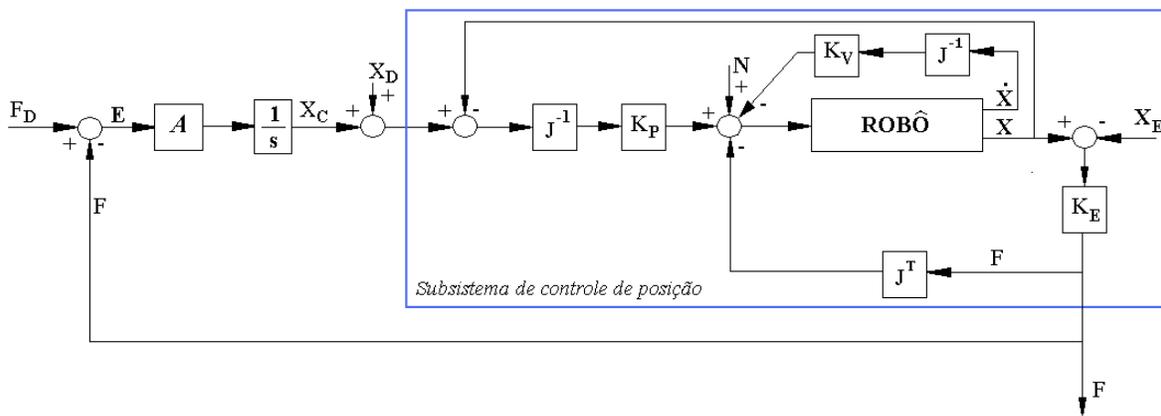


Figura 4.25: Controle por admitância.

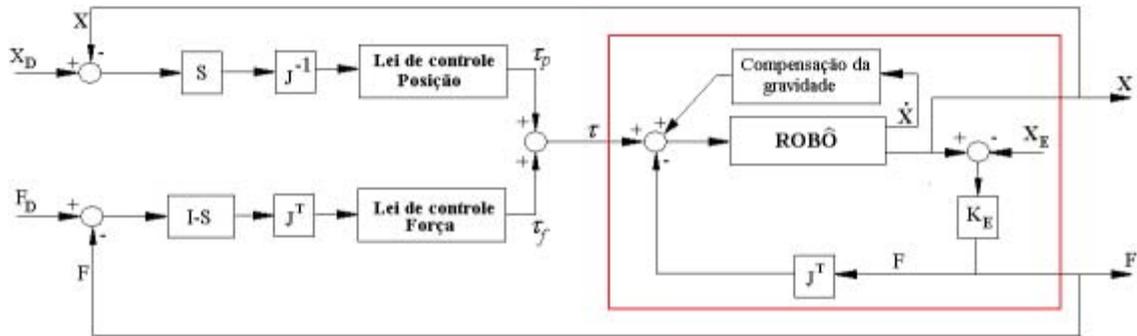


Figura 4.26: Conceito da organização do Controle Híbrido Posição/Força.

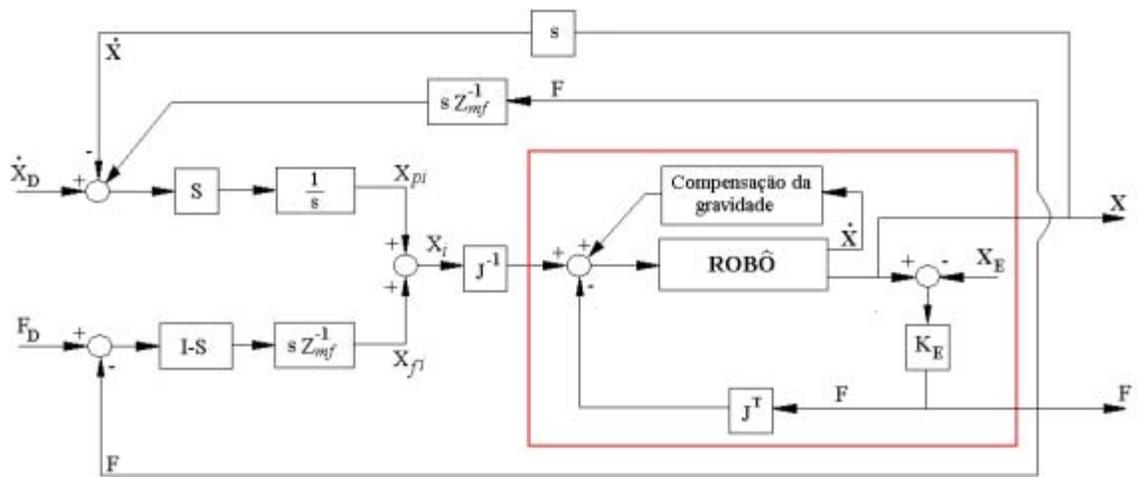


Figura 4.27: Controle Híbrido por Impedância.

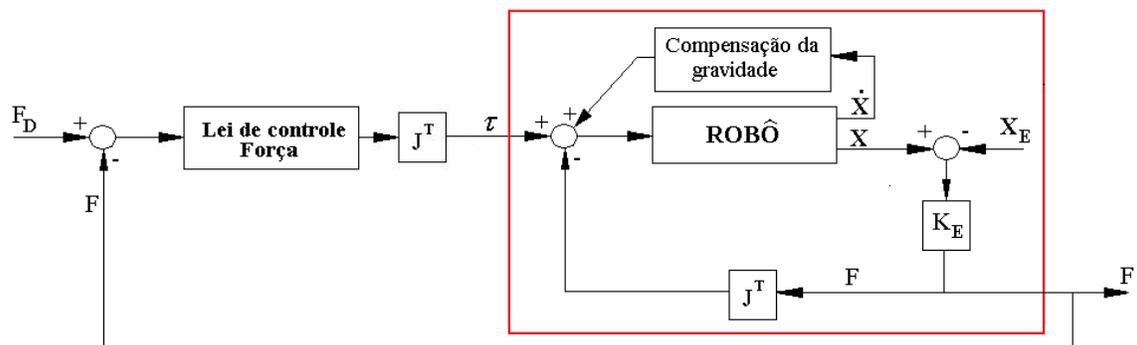


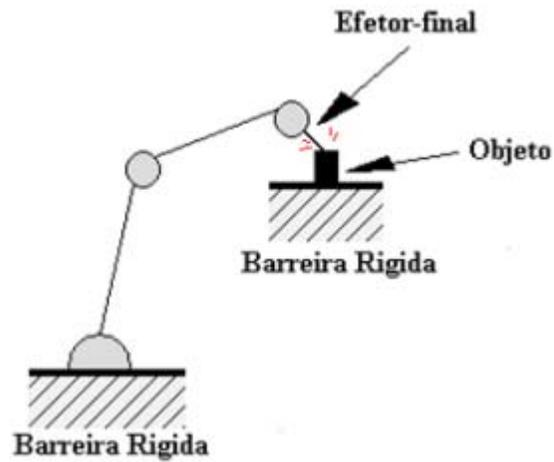
Figura 4.28: Controle de Força Explícito.

Tabela 4.7: Comparação de vários métodos de controle de força.

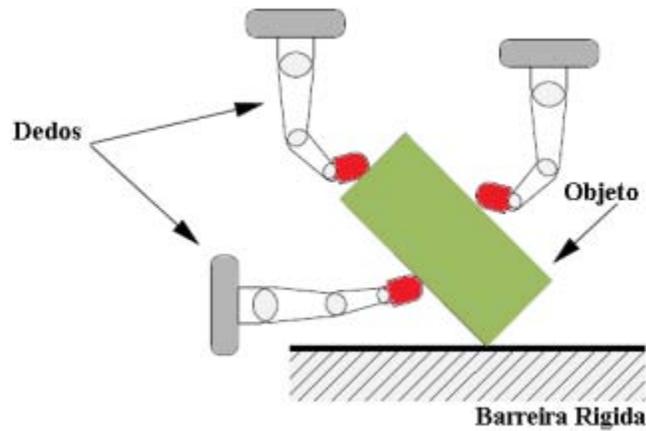
Algoritmo de classificação		Espaço de trabalho	Variáveis medidas	Variáveis modificadas	Objetivos modulados
Controle ativo de rigidez	Versão 1	Espaço das articulações	Posição Força	Deslocamento nas Juntas, força de contato	Matriz de rigidez de junta
	Versão 2	Espaço de tarefas ^a		Erro de posição, força de contato	Matriz de rigidez
Controle de impedância	Controle por impedância básico	Espaço de tarefas	Posição Velocidade Força	Erro de posição e velocidade, força de contato	Impedância
	Controle por impedância baseado em posição			Trajectoria desejada modificada, força de contato	
Controle por admitância		Espaço de tarefas	Força	Erro de força	Admitância
Controle Híbrido	Controle híbrido posição/força	$\{P\}^b$	Posição	Erro de posição	Posição
		$\{F\}^c$	Força	Erro de força	Força
	Controle híbrido por impedância	$\{P\}$	Força	Erro de velocidade	Z_{mp}^d
		$\{F\}$		Erro de força	Z_{mf}^e
Controle de força explícito	PI, PD, PID	Espaço de tarefas	Força	Erro de força	Força desejada F_D
Controle de força implícito		Espaço de tarefas	Posição	Erro de posição	Rigidez predefinido

^a Espaço de tarefas, ^b $\{P\}$: Subespaço de posição, ^c $\{F\}$: Subespaço de força, ^d $\{Z_{mp}\}$: Impedância expressa no Subespaço de posição, ^e $\{Z_{mf}\}$: Impedância expressa no Subespaço de força

Algumas estratégias de controle de força foram definidas nos últimos anos essas envolvem diferentes situações e por tanto diferentes esquemas de controle são utilizados. A Figura 4.29 apresenta dois exemplos de forças aplicadas em robótica. No primeiro exemplo, um braço robô serial clássico está aplicando uma força sobre um objeto sobre uma mesa rígida. Em muitos casos, aqui não é levado em conta a dinâmica entre o efetor final e o objeto. Então o problema é aplicar uma força pelo último elo da cadeia cinemática sobre o objeto. No segundo exemplo um objeto é agarrado por múltiplos “robôs seriais” (dedos de uma mão mecânica). Então, nesse caso existe uma dinâmica entre o objeto e a ponta dos dedos, e a estabilidade do objeto depende de todas as forças aplicadas em ele.



a) Força aplicada para um robô serial.



b) Força para uma mão robótica.

Figura 4.29: Exemplo de forças aplicadas em robótica.

4.4.6 Parâmetros de forma preensão

Os parâmetros requeridos para a preensão são indicados como segue, ver Figura 4.30:

- Coordenadas dos pontos de contato na superfície do objeto e seu correspondente vetor normal,
- Centro de massa do objeto,
- Coeficiente de atrito do objeto.

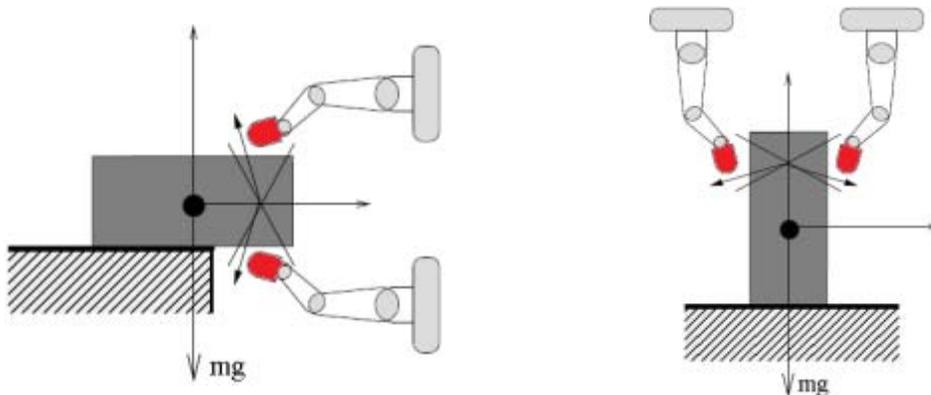


Figura 4.30: Importância do centro de gravidade.

4.5 Física do movimento de Preensão

4.5.1 Forças de Preensão

As forças de preensão garantem que forças e momentos possam ser aplicados aos objetos nos pontos de contato de modo a obtém-se uma preensão estável. A determinação das forças de preensão baseia-se na aplicação da lei de Coulomb (que efetuou os primeiros estudos sobre a fricção do deslizamento em 1781), na noção de cone de fricção, na representação dual do contato e da preensão, e na modelagem dos vários tipos de contatos.

4.5.2 Lei de Coulomb

A força de fricção tangencial durante um deslizamento tem sentido oposto ao movimento, com magnitude proporcional à normal da força (MASON, 1985).

4.5.3 Cone de Fricção

O cone de fricção é a interpretação geométrica da lei de Coulomb introduzida por Moseley em (1835) (MASON, 1985). Considerando um ponto a mover-se numa superfície, f representa a

força de contato total atuante nesse ponto, compreendendo a força normal, f_n correlacionada com a rigidez da superfície e a força tangencial f_t devido à fricção. Através da lei de Coulomb podem-se relacionar estas forças como:

$$f_t = \mu f_n \quad (4.8)$$

A interpretação geométrica da lei de Coulomb (que relaciona a componente normal f_n com a componente tangencial f_t da força f exercida num ponto de contato) revela que a força de contato f faz um ângulo ϕ com a normal à superfície, de valor $\tan^{-1}\mu$. O conjunto de vetores que satisfazem essa condição geométrica forma o cone de fricção representado na Figura 4.31. Em que μ representa o coeficiente de fricção entre a superfície e a força de contato.

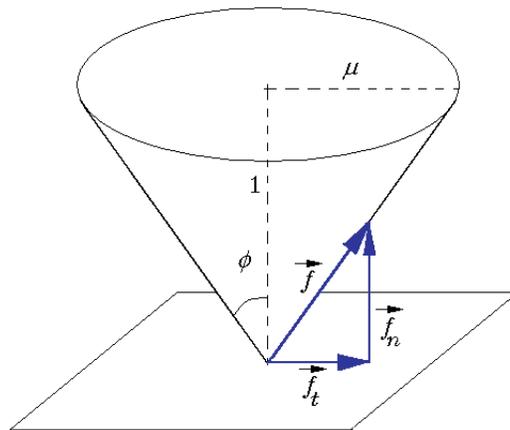


Figura 4.31: Cone de fricção.

Se for construído uma normal à superfície, pela lei de Coulomb pode-se afirmar que a força de contato f faz um ângulo ϕ com a normal, denominado por ângulo de fricção:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{f_t}{f_n} \right) \quad (4.9)$$

O cone de fricção resulta assim da formação geométrica obtida pelo conjunto de vetores que fazem o referido ângulo com a normal, como ilustra a Figura 4.31. O coeficiente de fricção entre o dedo e o objeto, só depende da natureza dos materiais em contato. Se μ for muito grande,

por exemplo, o caso de uma borracha, f_t será também muito grande, aumentando o raio do cone de fricção e o ângulo de fricção.

4.5.4 Representação Dual do Contato e da Preensão

A representação dual do contato é feita por um "wrench" - w - que descreve a gama de forças e momentos que podem ser aplicados no objeto. Um "wrench" consiste num vetor da força de contato, com o seu ponto de aplicação fixo, e a sua componente de momento associado. Um "wrench" em 2D é um vetor de R^3 , definido por $w = (f_x, f_y, m_z)^t$, cujas duas primeiras componentes são as projeções da força nos eixos de coordenadas (x, y) e a sua terceira componente é o momento da força. Um "wrench" em 3D é representado por um vetor de R^6 , dado como $w = (f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z)^t$, cujas três primeiras componentes são as projeções da força nos eixos de coordenadas (x, y, z) e as três últimas componentes são as projeções do momento nos mesmos eixos de coordenadas (NUSEIRAT, 1999), (BICCHI, 2000).

A representação dual da preensão é o "twist", reciprocamente ao "wrench", descreve a gama de momentos nos quais o objeto se pode mover livremente ou perder contato. O objetivo dessas duas representações duais consiste na obtenção um "wrench" que possa abranger todo o espaço de forças e momentos, e que o "twist" seja nulo. A utilização da notação dual no planeamento da preensão tem sido bastante eficiente (NGUYEN, 1998), (NGUYEN, 1987).

Na Figura 4.32 se mostra a representação cartesiana de um "wrench" no sistema de coordenadas $\{S\}$. O "wrench" w representa o vetor da força de contato, com o seu ponto de aplicação fixo, e a sua componente de momento associado. É definido em 2D por $(f_x, f_y, m_z)^t$.

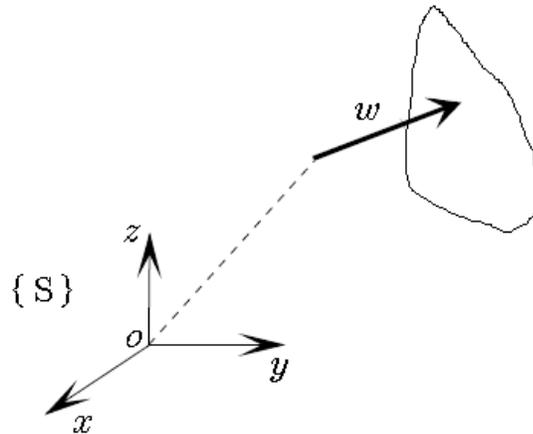


Figura 4.32: Representação cartesiana de um “wrench”.

4.5.5 Tipos de Contato

O contato entre o dedo e o objeto pode ser modelado em três diferentes tipos de contatos primitivos:

- **Contato sem fricção;** o dedo só pode exercer forças normais no ponto de contato;
- **Contato rígido;** é um ponto de contato com fricção, o dedo pode exercer uma força qualquer que aponte para o cone de fricção no ponto de contato;
- **Contato flexível;** a fricção na área de contato é tal que permite ao dedo exercer um binário em adição às forças que apontam para o cone de fricção.

O estudo da prensão de polígonos (2D) e de poliedros (3D) necessita de diferentes modelagens para os vários tipos de pontos de contato devido às diferentes características dos espaços de trabalho. A Figura 4.33 representa os vários tipos de contato primitivos: a) contato sem fricção; b) contato rígido; c) contato flexível. Na parte superior da figura temos a representação dos contatos em 2D e na parte inferior da figura as representações em 3D.

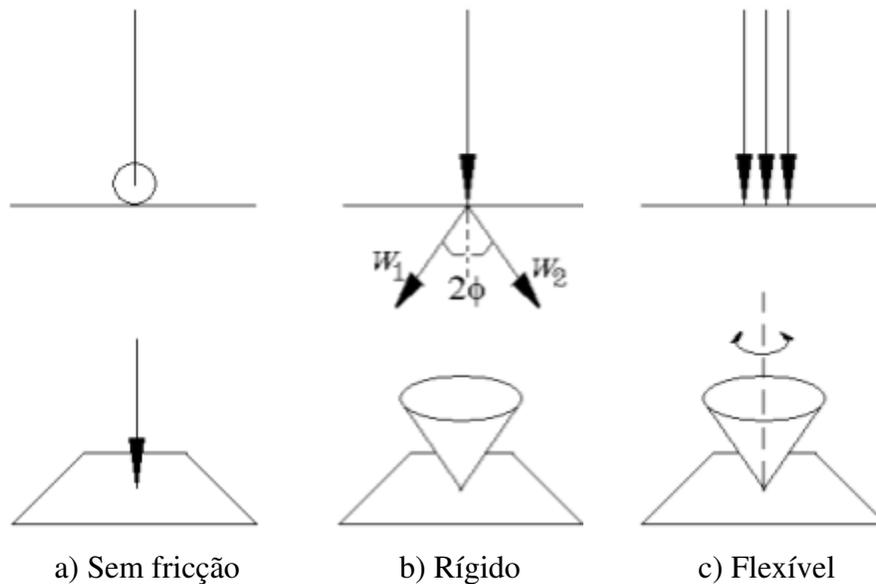


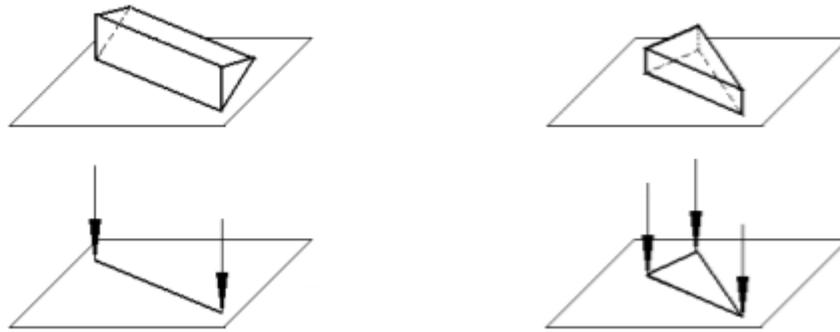
Figura 4.33: Representação de contatos primitivos.

Um ponto de contato sem fricção é modelado por um "wrench" convexo com linha de ação através do ponto de contato e direção negativa à normal do contato, quer em 2D como em 3D. Contatos mais complexos podem ser descritos pela soma convexa de contatos primitivos

Um contato rígido é um ponto de contato com fricção, em que o dedo pode exercer qualquer força que aponte para o cone de fricção. Em 2D (respectivamente a 3D) o contato é modelado pela soma convexa de dois (um número infinito) "wrenches" gerados pelo cone de fricção, com afastamento angular de valor igual ao dobro do ângulo de fricção (2ϕ), como ilustra a Figura 4.33b). Em 3D a modelagem é representada por um poliedro convexo com vértice no ponto de contato, que representa o cone de fricção.

Um contato flexível é modelado em 2D pela soma convexa dos vários contatos rígidos existentes sobre o segmento de contato. Em 3D a fricção sobre a área de contato permite ao dedo exercer um binário segundo duas direções em relação ao eixo normal no ponto de contato. Deste modo o "wrench" convexo é representado por um cone de fricção ao qual se adicionou um binário com duas possíveis direções.

Um contato mais complexo pode ser sempre descrito por uma soma convexa de contatos primitivos. Por exemplo, o contato de uma aresta sem fricção pode ser descrita pela soma convexa dos dois pontos extremos da aresta, Figura 4.34a, e o contato de uma face pode ser descrita como a soma convexa dos pontos de contato nos seus vértices, Figura 4.34b.

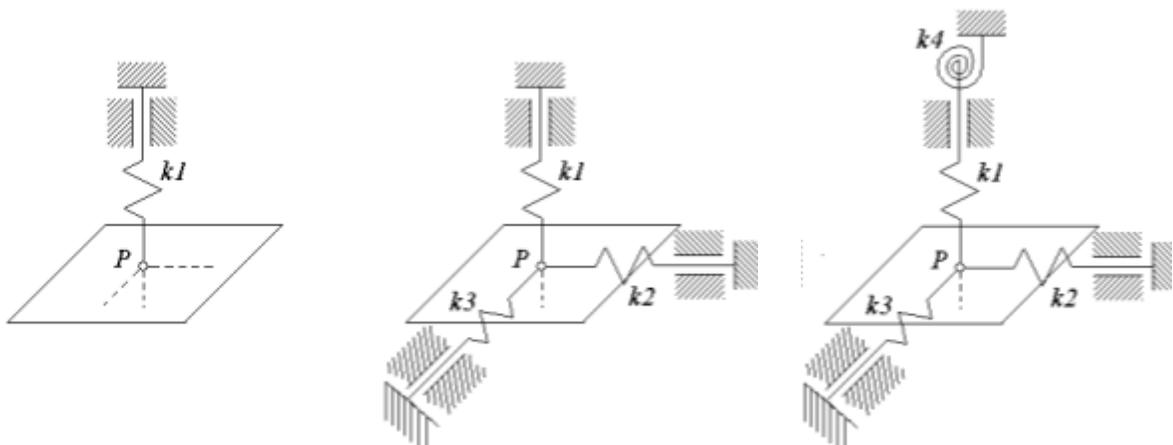


a) Aresta com um plano sem fricção

b) Face e Plano sem fricção.

Figura 4.34: Representação de contatos complexos como combinação de contatos primitivos.

Já na Figura 4.35 se faz a representação dos vários tipos de contato através de sistemas de molas virtuais (molas lineares e angulares): a) contato sem fricção; b) contato rígido; c) contato flexível. Os símbolos k_i representam as constantes de elasticidade das molas virtuais. O símbolo P representa o ponto de contato.



a) Sem fricção

b) Rígido

c) Flexível

Figura 4.35: Representação dos tipos de contato através de sistemas de molas virtuais.

4.5.6 Conceitos de Forças de Preensão

A forma mais simples de enunciar a definição de forças de preensão ("*Force Closure*" - FC) num espaço de ordem n é a apresentada por (NGUYEN, 1987). Uma preensão é definida por forças de preensão se e só se para um conjunto de n "*wrenches*" $\{w_1, \dots, w_n\}$ com ordem igual a três, sendo $w_i = (f_{ix}, f_{iy}, m_{iz})^t$ e exercido no ponto P_i , exista um conjunto de coeficientes não negativos $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$, que verifique a seguinte igualdade:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i w_i = 0 \quad (4.10)$$

A aplicação de forças de preensão em objetos poliédricos (ou polígonos) (NGUYEN, 1987), (BICCHI, 2000), que têm faces (ou arestas) com normais constantes, levou a subdividir a determinação das forças de preensão em dois novos subproblemas:

- **Direção das Forças de Preensão** ("*Force Direction Closure*" - FDC) - testa se os cones de fricção de todos os pontos de contato abrangem todas as direções.
- **Binário de Preensão** ("*Torque Closure*" - TC) - confirma se os pares de forças de contato só geram binários puros. Em 2D pode ser validado através da criação de suficiente fricção entre um objeto com deslizamento rotacional e o seu eixo de suporte de modo a contrabalançar o deslizamento rotacional do objeto.

4.5.7 Forças de Preensão Entre Dois Dedos

Segundo o terceiro corolário de (NGUYEN, 1987) e considerando a Figura 4.36a), dois pontos de contato com fricção em P e Q formam uma preensão FC se e só se o segmento de reta PQ ou QP apontam estritamente para fora e para dentro dos dois cones de fricção nos respectivos pontos P e Q . Nessa figura se apresentam diagramas geométricos de duas preensões com dois pontos de contato com fricção, nos pontos P e Q . Os símbolos w_i representam os "*wrenches*" gerados pelos cones de fricção (com ângulo de fricção ϕ) nos pontos de contato P e Q .

Através da Figura 4.36 podemos interpretar com maior clareza a condição enunciada por Nguyen. Em a) pode verificar-se que a preensão é FC, pois o segmento de reta entre os dois pontos de contato está compreendido na área de intercepção dos dois cones de fricção. Já em b) o segmento de reta que liga os dois pontos não pertence à área de intercepção dos dois cones de fricção, o que faz com que a preensão não seja FC.

Na figura 4.36 tem-se a) Preensão definida por forças de preensão (FC). Uma preensão é FC, se cada um dos seus pontos de contato estiver contido no cone de fricção do outro ponto de contato. b) As condições de FC não são satisfeitas com os pontos de contato nas posições em que se encontram.

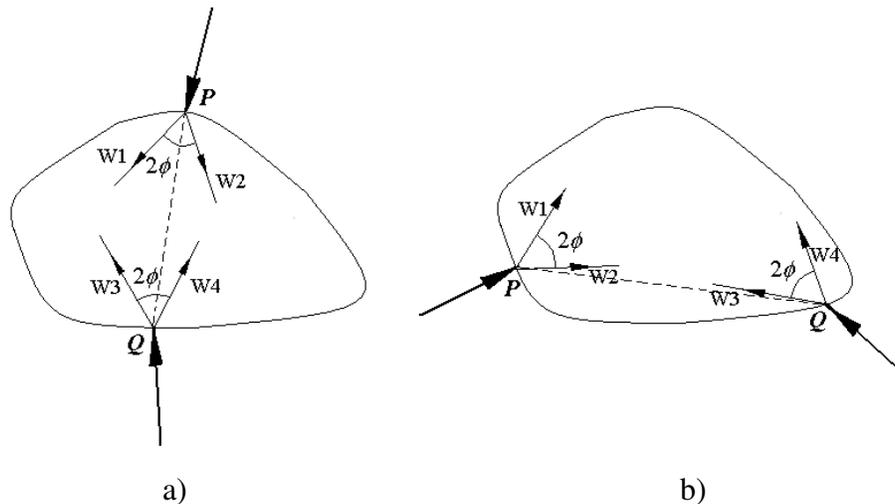


Figura 4.36: Esquema de contatos complexos

Na Figura 4.37 estão representadas as componentes normais e tangenciais, das forças de contato aplicadas nos pontos de contato com fricção, P e Q , de uma preensão FC. Os ângulos efetuados pelas normais nos pontos de contato, com o segmento de reta que liga os dois pontos de contato, têm o valor α_1 e o valor α_2 , como está ilustrado na figura. Nesta figura se mostra o diagrama geométrico de uma preensão com dois pontos de contato com fricção, nos pontos P e Q . Os vetores de força normal estão representados por n_P e n_Q , e os vetores de força tangencial estão representados por t_P e t_Q . A linha que liga os dois pontos de contato faz um ângulo de valor α_1 e um ângulo de valor α_2 , com as respectivas normais nos pontos de contato.

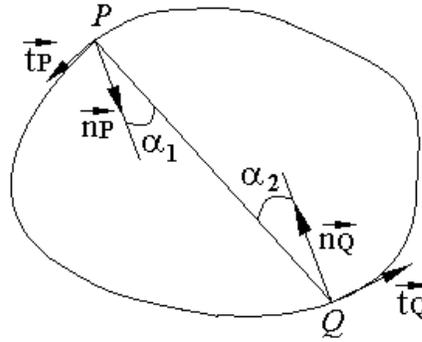


Figura 4.37: Diagrama geométrico de uma preensão com dois pontos de contato com fricção.

Denominando o vetor que liga os dois pontos de contato por R , se obtém as seguintes relações trigonométricas:

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) = n_p R \\ \sin(\alpha_1) = t_p R \end{cases} \quad (4.11)$$

Para o ângulo α_2 obtém-se relações semelhantes.

As condições para uma preensão ser FC estão garantidas se cada um dos pontos de contato pertencer á área do cone de fricção oposto, o que acontece se:

$$\begin{cases} |\tan \alpha_1| < \mu \\ |\tan \alpha_2| < \mu \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) > 0 \quad (4.13)$$

tendo o coeficiente de fricção um valor $\mu > 0$.

Essas condições são válidas para preensões compressivas, quando $\cos(\alpha_1) > 0$ e $\cos(\alpha_2) > 0$, e para preensões expansivas, quando $\cos(\alpha_1) < 0$ e $\cos(\alpha_2) < 0$.

Ao agarrar em 3D, conseguem-se gerar binários puros, perpendiculares com o segmento de reta PQ, que liga os dois pontos de contato, através de pares de forças de contato contrárias.

Esses binários só podem ser criados, se e só se, o segmento PQ ou QP, apontar estritamente para fora e para dentro dos cones de fricção.

Dois pontos de contato com fricção não podem por si só contrariar a rotação do objeto sobre o segmento de reta PQ, sendo necessários pelo menos três contatos com fricção, ou dois pontos de contato flexíveis, para obtermos as condições de FC.

A aplicação deste corolário em 3D com contatos flexíveis levam que o binário puro gerado por dois pontos de contato flexíveis tenha projeção sobre o segmento PQ, validando além das condições de FC, também as condições de TC.

Através deste corolário pode também constatar-se que quanto maior for o raio do cone de fricção (maior ângulo de fricção), maior a probabilidade de ele envolver outros pontos de contato, ou de validar as forças de preensão.

4.5.8 Preensões em dois Pontos de Contato Flexíveis em 3D

Como os objetos poliédricos têm faces com normais constantes, à validação das condições de direção das forças de preensão (FDC) reduz-se ao teste do ângulo entre os dois planos normais. Uma vez que as condições de FDC estejam satisfeitas, os dois cones de fricção terão sectores que se interceptam.

O binário de preensão (TC) é satisfeito com este tipo de contato, se e só se, o segmento P1P2 estiver orientado dentro do setor de sobreposição, calculado por $\pm (C_1 \cap C_2)$, onde C_1 e C_2 são os setores dos dois cones de fricção contrapostos.

Se a face do objeto tiver buracos ou não for convexa, pode sempre ser feita a aproximação de uma área de contato circular a um conjunto de discos circulares locais de justaposição, em que cada disco local se aproxima a uma pequena região convexa da face.

Contatos com dois pontos de contato flexíveis são FC se os dois pontos de contato estiverem frente-a-frente ou costas-com-costas, de modo que ângulos entre os dois planos normais ao contato permitam que os cones de fricção se interceptem, e possa pertencer ao sector interceptado um segmento de reta P_1P_2 .

A Figura 4.38 apresenta diagramas geométricos de preensões FC com dois pontos de contato flexíveis nos pontos P_1 e P_2 . Em 3D os contatos flexíveis também podem ser representados por círculos, que representam a região de contato.

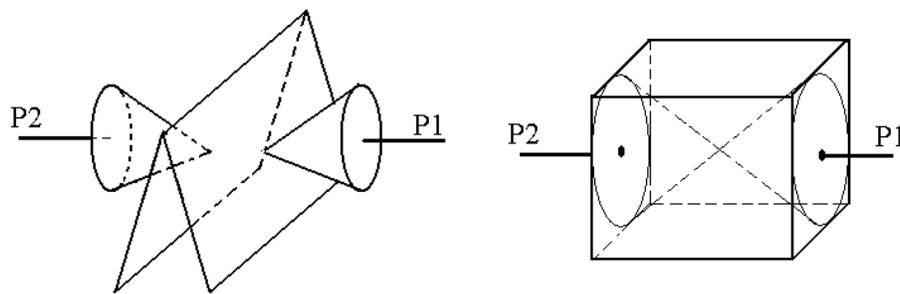


Figura 4.38: Contatos flexíveis em 3D.

4.8 Comentários Finais

Neste Capítulo foi estudada a mão humana como ferramenta terminal para desempenhar tarefas de preensão, são estudados os movimentos de preensão e classificados em sete grupos de acordo as possibilidades de oposição entre os dedos ou a palma com o dedo polegar, baseado nesse são definidas algumas tarefas típicas para serem realizadas por uma mão robótica. Foi realizada uma revisão das condições necessárias para garantir que a preensão de um objeto estudando a física da preensão e os tipos de contato.

Capítulo 5

Implementação experimental

5.1 Introdução

Graças à disponibilidade de estruturas de controle avançadas, a melhoria na fabricação de atuadores, eletrônica e sensores miniaturizados, processos de fabricação, etc., o projeto e construção de estruturas robóticas complexas já não pode ser considerada como uma tarefa altamente complicada, e os objetivos principais vêm sendo voltados a conceber dispositivos robóticos com uma melhor concepção de destreza e mobilidade.

A concepção de sistemas robóticos avançados está passando do conceito "clássico" de estruturas precisas e rígidas, muitas vezes pesadas e muito complexas, para estruturas mais flexíveis e leves, com as perspectivas de aumento do desempenho, alta simplificação mecânica e conseqüentemente redução dos custos (BIAGIOTTI, 2003).

Neste Capítulo são apresentados os elementos levados em consideração para o projeto e construção de um dedo robótico que serve como elemento constitutivo fundamental na implementação final de uma mão robótica, MUC-1, é um dispositivo mecatrônico que assemelha as características antropomórficas e antropométricas de uma mão humana.

5.2 A analogia biomecânica

Os componentes do dedo mecânico são referidos no texto pelos nomes dos elementos anatômicos correspondentes. Depois de estudar as funções dos músculos e tendões nas diferentes articulações pode-se afirmar que os tendões são tecidos conectivos fibrosos que juntam os músculos aos ossos. Os tendões servem para mover o osso ou a estrutura, e os ligamentos são tecidos conectivos fibrosos que unem os ossos entre si e geralmente sua função é de unir estruturas e mantê-las estáveis, Figura 5.1.

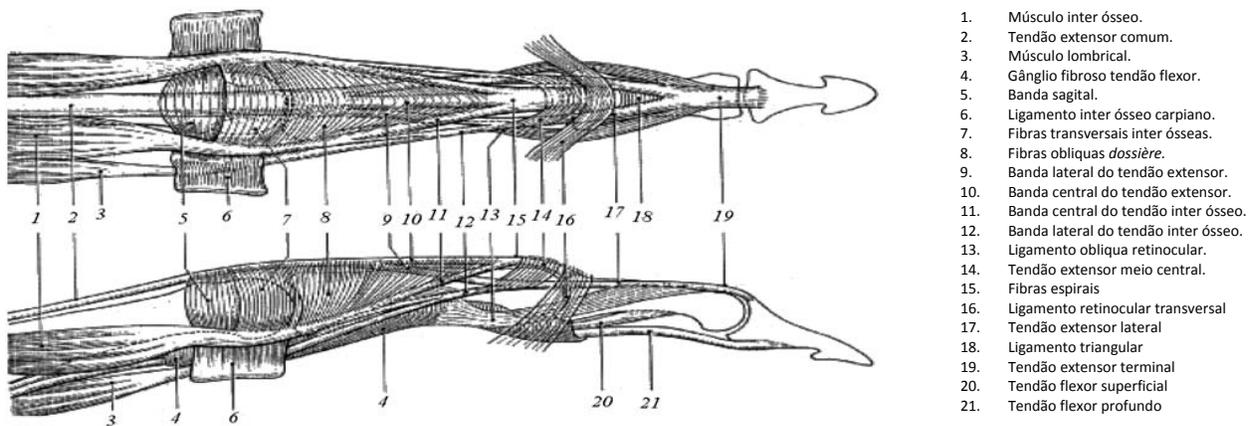
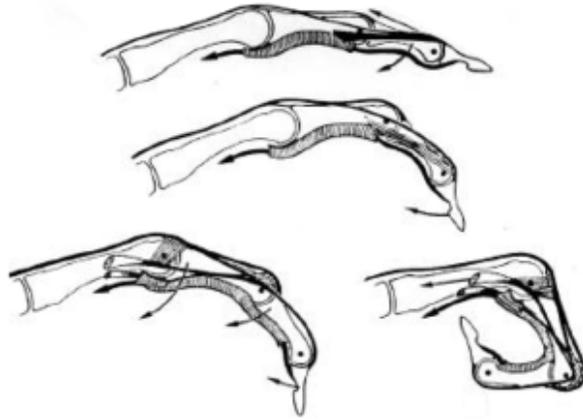
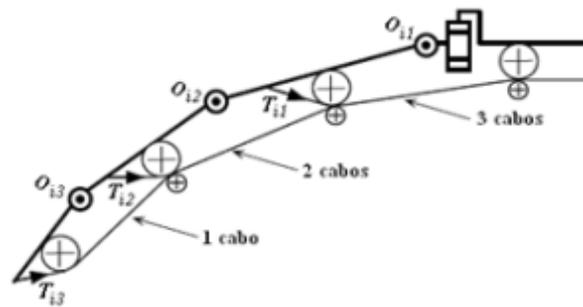


Figura 5.1: Tendões e músculos do dedo indicador. (AN, 1979)

Na ação de flexão de um dedo são muitos os elementos que atuam. A falange proximal se flexiona sobre o metacarpiano pela ação do *lumbrical*. A falange média se flexiona sobre a falange proximal pela ação do flexor *digitorium sublimis* ou *superficialis*, e a distal sobre a média pelo flexor *digitorium profundus*. Na Figura 5.2a, apresenta-se a análise do movimento de flexão de um dedo, e equivalente mecânico como função dos tendões (AVILES, 2006).



a) Tendões e polias de um dedo, mostrando o acoplamento natural entre as falanges.



b) Analogia do dedo humano com um sistema mecânico.

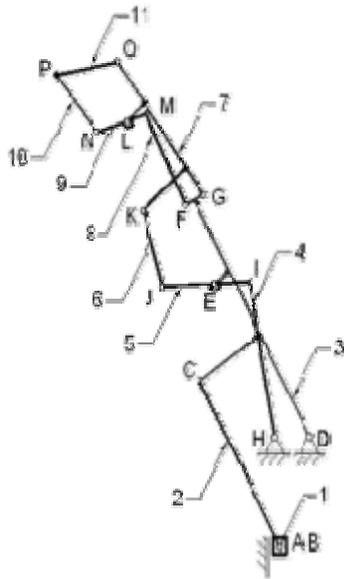
Figura 5.2: Analogia mecânica robótica.

Na fabricação física do protótipo se tem a seguinte analogia entre o sistema biológico e seu equivalente mecânico, Tabela 5.1: Analogia Biológica – Mecânica. O esqueleto do dedo antropomórfico, neste trabalho, modela o dedo indicador humano.

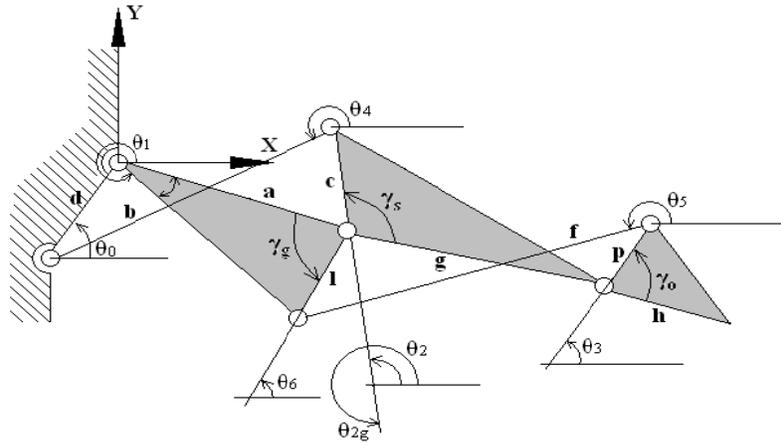
Tabela 5.1: Analogia Biológica – Mecânica.

Sistema Biológico	Dedo mecânico
Ossos	Resina, compostos plásticos
Articulações	Rotação
Tendões	Sistema de Alavancas em aço
Músculos	Micro motor CC

No processo de desenho são levadas em consideração as medidas de um dedo indicador de uma pessoa adulta, como apresentado na Tabela 3.1. Para a realização dos movimentos de flexão / extensão é construído um mecanismo composto por dois sistemas de quatro barras acoplados. Isso é mostrado no esquema cinemático do mecanismo que se apresenta na Figura 5.3. (a) e (b)



a) Numeração das barras do mecanismo.



b) Esquema cinemático.

Figura 5.3: Esquema cinemático do dedo robô.

No estudo e fabricação do dedo mecânico é requerida a avaliação dos aspectos cinemático, cinético e de projeto mecânico, recorrendo para isto a diferentes técnicas, incluindo análises gráficos assistidos por computador e análises de elementos finitos. Para o estudo cinemático e cineto-estático do mecanismo é utilizada a ferramenta *Assur Toolbox* (CALLE ET AL. 2006). A entrada de movimento e de translação pelo corpo 1, tendo então o mecanismo uma classificação estrutural, $ID_{0,1} \rightarrow IIGGG_{2,3} \rightarrow IIGGG_{4,5} \rightarrow IIGGG_{6,7} \rightarrow IIGGG_{8,9} \rightarrow IIGGG_{10,11}$. Para impulsionar o mecanismo é usado um motor elétrico acoplado a um dispositivo de parafuso de potência, onde a porca é solidaria com o elemento 1, figura 5.3a.

O mecanismo total consta de doze barras, quinze pares giratórios e um par deslizante. Os elementos fisiológicos (tendões e ligamentos), no equivalente mecânico, estão representados pelos passadores e pela geometria das peças, que são montadas uma dentro da outra de maneira que não se permite o movimento de giro com respeito a um eixo normal ao passador. O funcionamento do mecanismo se entende assim: quando um deslocamento tem lugar em 1, se exerce uma força que faz com que a barra 2 baixe, que por sua vez está conectada a 3 e logo a 5, o que leva a estrutura toda a descrever no extremo da barra 5 uma trajetória circular.

O mecanismo mostrado na Figura 5.3b pode ser analisado escrevendo as equações fechadas para cada mecanismo de 4 barras, sob a forma vetorial. Assim:

$$\begin{aligned} a+b+c+d &= 0 \\ f+g+h+l &= 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Onde em forma escalar ficarão:

$$\begin{aligned} a \cos \theta_1 + b \cos \theta_2 + c \cos \theta_4 + d \cos \theta_0 &= 0 \\ a \sin \theta_1 + b \sin \theta_2 + c \sin \theta_4 + d \sin \theta_0 &= 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} g \cos \theta_{2g} + p \cos \theta_3 + f \cos \theta_5 + l \cos \theta_6 &= 0 \\ g \sin \theta_{2g} + p \sin \theta_3 + f \sin \theta_5 + l \sin \theta_6 &= 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Tomando em conta algumas considerações geométricas pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \theta_{2g} &= 2\pi - (\gamma_g - \theta_2) \\ \theta_6 &= \theta_1 + \gamma_G \end{aligned} \quad (5.4)$$

Essas equações podem ser resolvidas em forma algébrica, assumindo que θ_0 como constante e θ_1 como a variável cinemática de entrada, onde a solução pode ser expressa como:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{-2C \pm \sqrt{(2C)^2 - 4(A+B)(A-B)}}{2(A+B)} \right) \quad (5.5)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{-2E \pm \sqrt{(2E)^2 - 4(D+F)(D-F)}}{2(D+F)} \right) \quad (5.6)$$

Onde:

$$A = (a^2 - b^2 + c^2 + d^2) + 2a \cos(\theta_1 - \theta_0)_{11}$$

$$B = 2ac \cos \theta_1 + 2cd \cos \theta_0$$

$$C = 2acs \sin \theta_1 + 2c ds \sin \theta_1$$

$$D = (a^2 + b^2 + d^2 - c^2) + 2ad \cos(\theta_1 - \theta_0)$$

$$E = 2ad \cos \theta_1 + 2bd \cos \theta_0$$

$$F = 2abs \sin \theta_1 + 2b ds \sin \theta_0$$

De maneira similar a análise anterior pode ser estendida para a obtenção dos valores de θ_3 e θ_5 .

Já para a construção de uma mão completa, o mesmo procedimento é realizado, através de cópias do mecanismo anterior, deslocando-os fisicamente de modo a representar o antropomorfismo de uma mão humana, ou seja, utilizando-os junto a uma estrutura de palma. No caso deste trabalho a construção final possui características semelhantes as medidas antropométricas de uma mão humana.

5.3 Obtenção das equações interfalangianas

Nesta seção é realizada a análise do acoplamento existente entre as falanges, os dedos e seus limites angulares, quando realizam seus movimentos. Esses acoplamentos existem por fatores anatômicos e são dados pela distribuição e fixação dos tendões nos dedos, de como estes tendões passam através de dutos naturais, chamados de bainhas tendineas digitais, que são revestidas pelas bainhas sinoviais (favorecendo a lubrificação dos tendões), e através das trócleas que forçam com que os movimentos fiquem acoplados, como pode ser observado na Figura 5.2a.

Esse fato é facilmente percebido quando se tenta movimentar apenas as falanges distais de qualquer dedo ou se tenta movimentar os dedos mínimo e anular independentemente um do outro (com algumas exceções em alguns indivíduos). Outro detalhe importante é que o dedo é um mecanismo redundante, ou seja, possui um número maior de GDL do que o mínimo necessário para executar sua tarefa. Isso é um fator preponderante como tomada de decisão na escolha de qual método será usado na resolução do problema cinemático envolvido no movimento de um dedo.

Sendo analisado em um plano, um dedo (com exceção do dedo polegar) pode ser representado por um mecanismo de três barras (Figura 5.4): falanges proximal (FP), medial (FM) e distal (FD), considerando apenas os movimentos de flexão e extensão dessas juntas, e conseqüentemente desprezando os movimentos de adução e abdução da junta MF. Assim como no caso biológico os ângulos das articulações de um dedo são dependentes entre si, que também é dependente dos movimentos de outro dedo, e essa dependência pode variar de indivíduo para indivíduo (lembrando também da redundância envolvida), os ângulos das articulações do dedo mecânico são, também, dependentes entre si, devido ao mecanismo utilizado para a transmissão de movimento, como mencionado na seção 5.1.

Para a obtenção das equações que relacionam o movimento de uma falange ao respeito de outra (ângulos nas juntas) e escolhido um movimento de flexão, do movimento total são escolhidos alguns quadros (*frames*) para representar o movimento todo. Tais *frames* foram escolhidos de modo que fossem espaçados com iguais intervalos de variação (Δx) da barra de entrada de movimento (Figura 5.4, elemento A, B). Os dados obtidos são apresentados na Tabela 5.2.

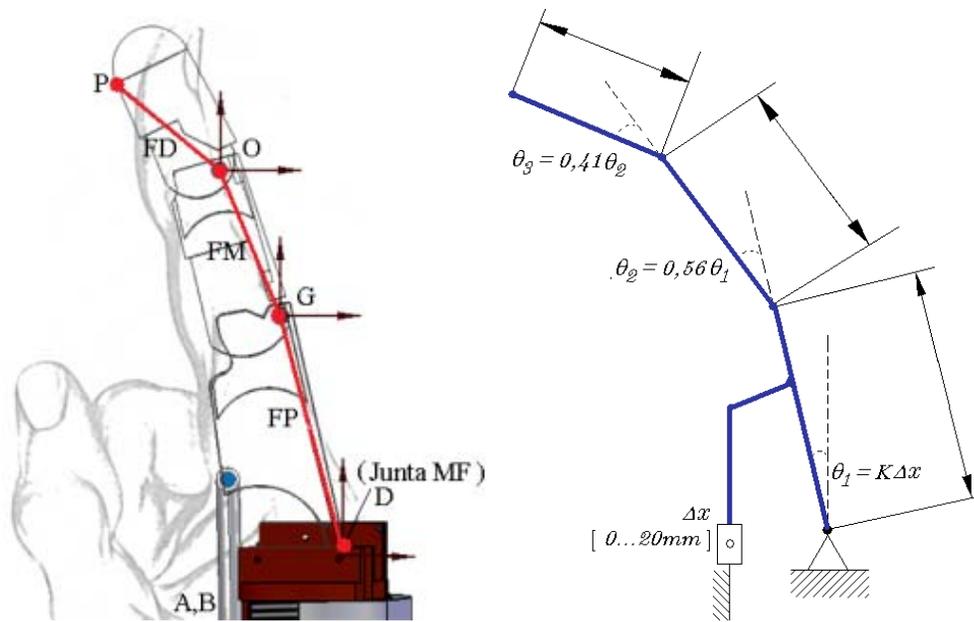


Figura 5.4: Juntas de interesse.

Tabela 5.2: Pontos de interesse para as juntas em estudo.

A,By	Gx	Gy	Ox	Ou	Px	Py
-17	-14,0252	37,8287	-31,114	58,7473	-42,9867	56,7025
-18,9573	-18,1735	35,2054	-39,1335	52,2433	-50,1194	47,2982
-21,1549	-21,997	32,1295	-45,9333	44,6462	-55,3728	37,1603
-23,5918	-25,4478	28,6405	-51,3699	36,234	-58,7555	26,7159
-26,2516	-28,4815	24,7834	-55,3743	27,3111	-60,3891	16,3569
-28,428	-30,5065	21,5967	-57,4863	20,2918	-60,5892	8,6508
-30,6926	-32,246	18,2457	-58,7969	13,2795	-60,0064	1,2929
-33,0169	-33,6869	14,7559	-59,3686	6,3854	-58,7752	-5,6475
-35,3678	-34,8181	11,1537	-59,28	-0,3019	-57,0285	-12,1371
-37,7096	-35,6311	7,4667	-58,6181	-6,7183	-54,8873	-18,1736

Desses dados são obtidas as relações apresentadas nas equações (5.7), (5.8) e (5.9), os gráficos destas são apresentados nas Figura 5.5 e Figura 5.6. Para isso foi realizado um ajuste polinomial de primeira e segunda ordem pelo método dos mínimos quadrados. Nota-se que a relação entre o ângulo θ_3 e θ_2 e entre θ_2 e θ_1 pode ser expresso por uma constante.

$$\theta_2 = 0.5672\theta_1 + 0.0251 \quad (5.7)$$

$$\theta_2 = -0.0050\theta_1^2 + 1.0838\theta_1 - 11.9999 \quad (5.8)$$

$$\theta_3 = 0.4133\theta_2 + 15.1840 \quad (5.9)$$

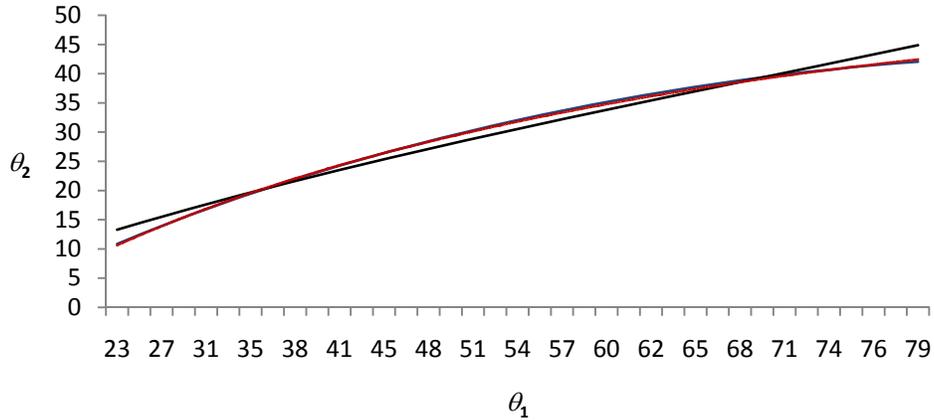


Figura 5.5: Relação θ_1 vs θ_2 .

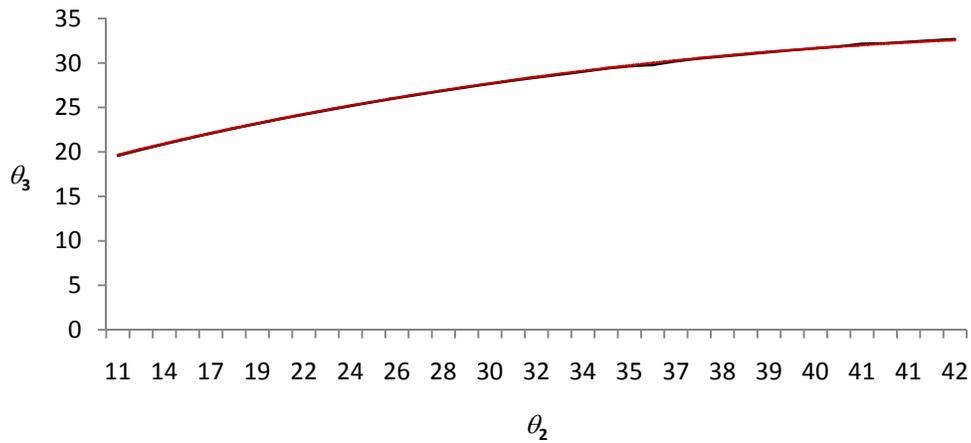


Figura 5.6: Relação θ_2 vs θ_3 .

5.4 Elementos constitutivos

Para a seleção dos motores, sensores e mecanismos foi utilizado a metodologia apresentada por (CUNHA, 2001) cujos critérios de seleção dos dispositivos a serem utilizados são tabulados e avaliados de acordo aos critérios de desenho e desempenho.

Com base na Tabela 5.3, se verifica que o melhor sensor de força a utilizar são os FSRs. Esses tiveram um empate na seleção com os sensores de efeito Hall, porém desde o ponto de vista de custo são os mais favoráveis. Os micros motores CC, é a melhor opção para o atuador, também podem ser usados micro motores sem escovas. Para o mecanismo, o sistema de manivela deslizante foi o selecionado. Esse mecanismo facilita a emulação dos músculos para os movimentos de flexão / extensão do dedo.

Tabela 5.3: Seleção de elementos construtivos.

<i>Sensores, atuadores e mecanismos</i>		<i>Tamanho</i>	<i>Peso</i>	<i>Flexibilidade e aplicabilidade</i>	<i>Precisão</i>	<i>Faixa de</i>	<i>Histerese e não reutilizabilidade</i>	<i>Consumo de energia</i>	<i>Frequência de funcionamento</i>	<i>Eficiência</i>	<i>Densidade de Potência</i>	<i>Antropomorfismo</i>	<i>Custo</i>	<i>Total</i>
<i>Sensor de força</i>	<i>Strain gages</i>	3	3	2	5	5	5	2	-	-	-	-	1	26
	<i>Efeito Hall</i>	3	2	3	4	5	5	3	-	-	-	-	3	28
	<i>Piezoelétricos</i>	2	1	1	5	2	5	5	-	-	-	-	2	23
	FSRs	5	5	4	2	5	2	1	-	-	-	-	4	28
<i>Atuador Convenc.</i>	<i>Micro motor DC</i>	5	5	4	4	-	5	5	5	5	3	-	4	47
	<i>Brushless</i>	5	5	4	4	-	5	5	5	5	3	-	5	46
	<i>Músculo artificial hidráulico.</i>	3	3	3	3	-	4	4	2	3	2	-	4	31
<i>Atuador Não Convenc.</i>	<i>Atuadores piezo-elétricos.</i>	3	4	3	4	-	5	5	5	5	5	-	2	41
	<i>Ultrasônicos</i>	5	5	4	4	-	5	5	5	4	5	-	1	43
	<i>NiTinol (ligas de metal)</i>	2	5	3	2	-	2	2	1	2	5	-	4	28
	<i>Polímeros gel</i>	4	5	2	2	-	3	3	1	3	5	-	2	30
<i>Mecanismos</i>	<i>Engrenagens</i>	2	2	4	4	-	1	1	1	3	-	5	4	27
	<i>Transmissão por Cabo</i>	4	5	5	4	-	-	-	-	5	-	5	5	33
	<i>Obediente (compliant)</i>	3	3	3	4	-	-	-	-	5	-	4	3	25
	<i>4 barras entrada de par helicoidal</i>	5	5	4	4	-	-	-	-	5	-	5	3	31

O esqueleto do dedo robô, representado na Figura 5.8, modela o dedo indicador humano. Uma razão para selecionar o dedo índice como modelo principal para o desenvolvimento e

devido a sua adjacência com o dedo polegar. Esse dedo possui a mobilidade maior, o que permite que se dobre completamente no plano sagital, fazendo o desenho da articulação mais simples.

5.5 Mecânica

Os elementos fisiológicos (tendões e ligamentos), no equivalente mecânico, estão representados pelos passadores e pela geometria das peças, que encaixam de maneira que não se permite o movimento de giro com respeito a um eixo normal ao passador. A Figura 5.7 apresenta cada uma das peças que foram construídas e seu correspondente osso (falanges), além dos passadores que fazem às vezes de ligamentos para garantir a estabilidade da articulação.

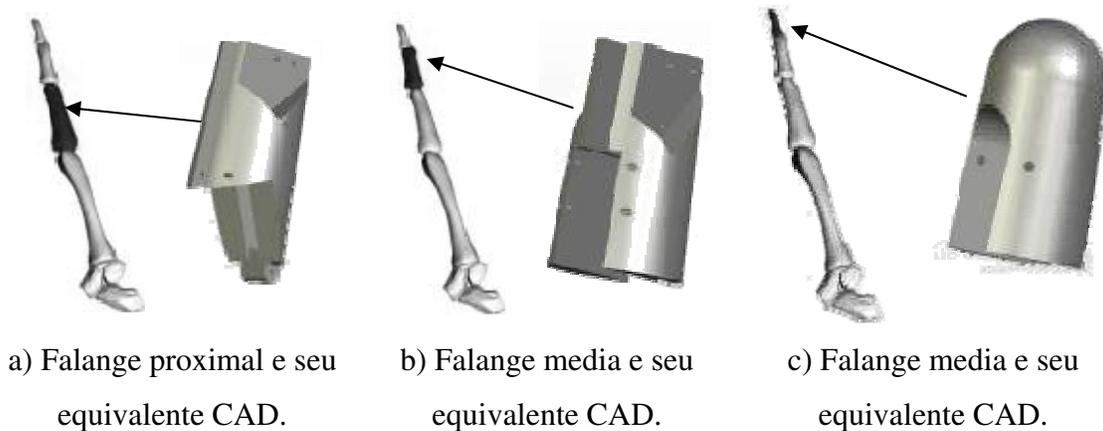


Figura 5.7: Ossos de um dedo humano e seu correspondente mecânico.

A dificuldade na fabricação de peças com geometrias complicadas faz que o uso de resinas, madeira e materiais plásticos seja uma boa alternativa devido a sua facilidade de manipulação. O ideal para construir este tipo de peças, e assim minimizar todos os erros gerados numa construção manual, é o uso da técnica de prototipagem rápida usando a técnica de estéreo litografia⁵ (SILVA, 2001). As alavancas, passadores, base do dedo e barras de suporte são construídas em aço.

⁵ <http://www.3drapid.com>

A estrutura esquelética se desenha com a ferramenta computacional de CAD *SolidWorks*TM. O processo de fabricação inicia com a construção das peças que conformam à estrutura do mecanismo. Essas são fabricadas em *Teflón*TM auto lubrificado. Algumas características importantes do *Teflón*TM: é capaz de resistir à temperaturas elevadas (da ordem de 300 °C) durante períodos prolongados sem sofrer grandes deformações, é resistente á maioria dos ácidos e as bases, é resistente a muitos dissolventes orgânicos e é fácil de manusear. Na Figura 5.9 (a), (b), e (c) se pode observar o dedo robô construído.

Já construída a estrutura mecânica, apresentada na figura 5.9 (c) se procede à montagem do sistema para a transmissão de movimento. Como foi mencionado no capítulo anterior, o mecanismo escolhido foi o de elos com entrada de par helicoidal, o músculo artificial é formado de um motor CC e sistema de transmissão através de parafuso sem fim.

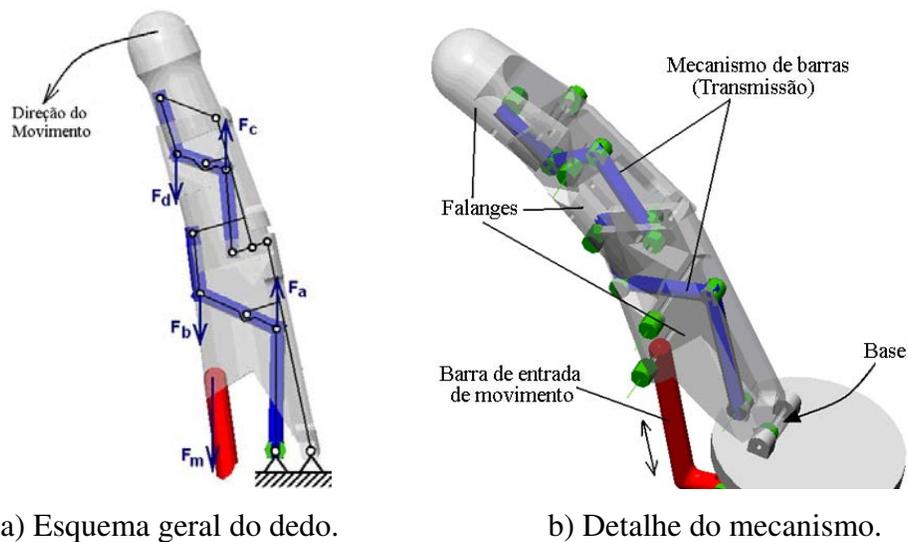


Figura 5.8: Esquema geral do dedo e seqüência de movimentos.

Os motores utilizados para os músculos artificiais são micro motores CC, da série C1616T da *Falhauler*⁶. Como foi mencionado, considerando que os tendões e os músculos deslocam o osso numa determinada direção; se converte o movimento de rotação do motor num movimento de tipo linear mediante um parafuso sem fim, como apresentado na Figura 5.9b.

⁶ www.micromo.com

Na Figura 5.10 se apresentam imagens da resposta obtida pelo mecanismo para três posições: inicial, intermediária e final.

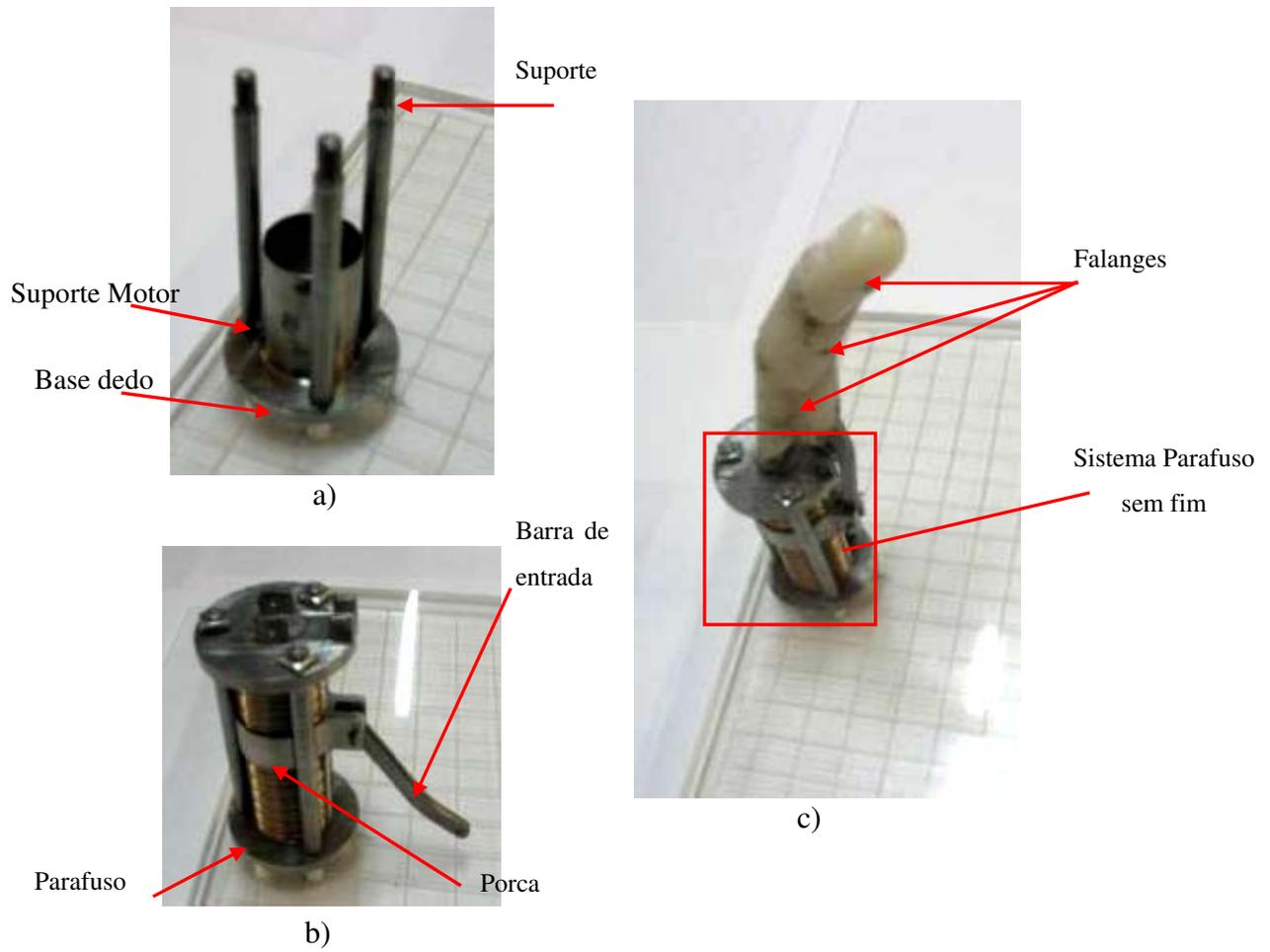


Figura 5.9: Esquema geral da montagem de um dedo.



Figura 5.10: Sequência de movimento do dedo mecânico.

5.6 Interface Eletrônica

Nesta seção são apresentados os dispositivos utilizados, e respectivos projetos e implementação final de todo o sistema eletrônico. São realizados testes de funcionamento do sensor de força, da fonte de tensão e do circuito de potência. Os circuitos impressos foram projetados utilizando a ferramenta computacional para análise e desenho de circuitos *Proteus*⁷.

O sistema de acionamento e controle utilizado é baseado no CI-L298⁸, a implementação da arquitetura de controle proposta foi desenvolvida em duas partes assim: *software* (*LabView*TM) e um *hardware* (NI USB6008 mais elementos eletrônicos convencionais) conforme é apresentado na Figura 5.11.

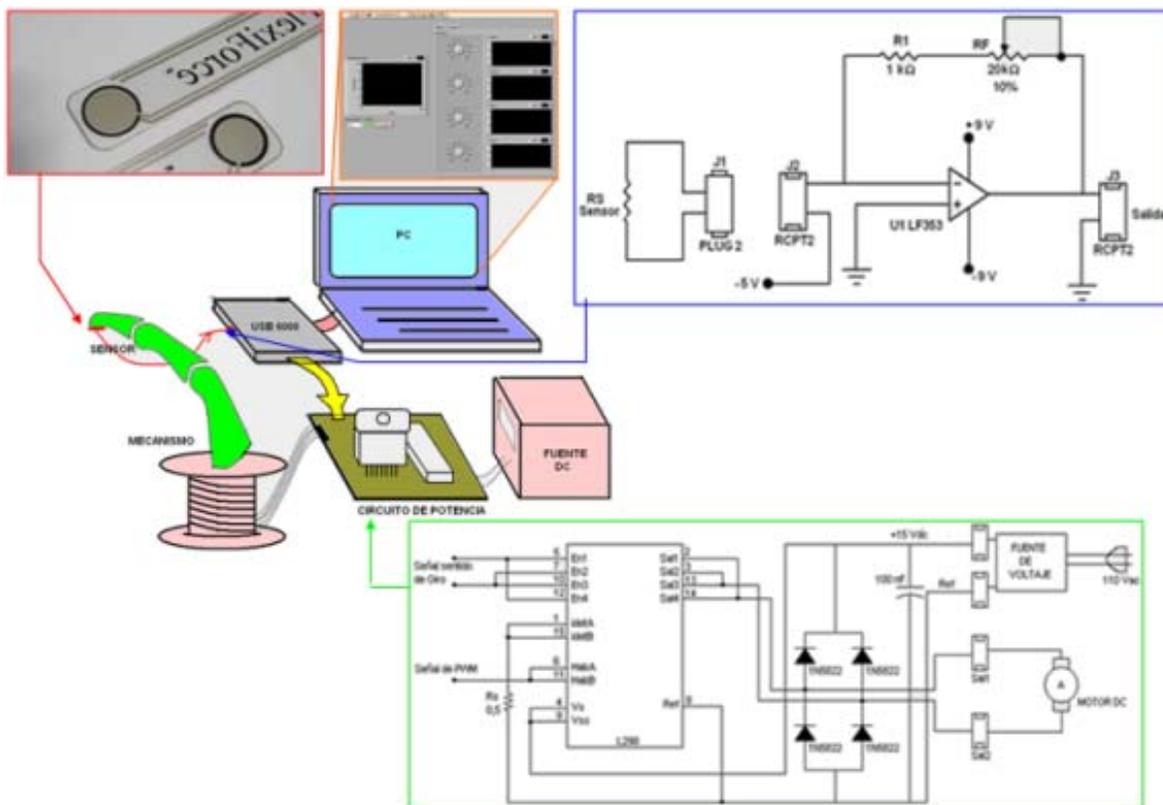


Figura 5.11: Estrutura de acionamento e controle.

⁷ www.labcenter.co.uk

⁸ http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/2/9/8/L298.shtml

5.6.1 Fonte de tensão

O sistema total utiliza uma fonte de tensão típica de uso em laboratório, a assim:

- Saída variável até 15 VCC.
- Corrente máxima fornecida pela fonte 3 A.
- É utilizada uma saída de +10 V.

5.6.2 Sensor de força

Os sensores tácteis são dispositivos que indicam o contato entre eles mesmos e algum outro objeto sólido. São divididos em duas classes: sensores de contato e sensores de força (também chamados sensores de esforço). Os sensores de contato proporcionam um sinal de saída binário que indica se é estabelecido ou não contato com alguma peça. Os sensores de força indicam se o contato se estabelece com a peça, mais também determinam a magnitude da força de contato entre os dois objetos.

Para a realização de diversas tarefas em uma mão robótica é fundamental a utilização dos sensores de força. Nestas tarefas se incluem a capacidade para agarrar objetos de tamanhos diferentes e na manipulação de materiais, carregamento de maquinas e trabalhos de montagem.

Na categoria de sensores de contato se incluem dispositivos simples, como interruptores de limite, micros interruptores e dispositivos similares, esses, por exemplo, se podem utilizar para determinar a presença ou ausência de objetos numa montagem de sujeição. Uma aplicação mais avançada poderia ser a de formar parte de uma sonda de inspeção, manipulada pelo robô para medir as dimensões de uma peça de trabalho.

Existe no mercado varias classes de sensores tácteis de força, os mais comuns são: detectores de força (células de carga), sensores de agulhas ou arranjos tácteis, sensores de barras de silicone e sensor táctil óptico. Hoje em dia tem se popularizado uma nova classe de sensores chamados FSR sensores de cambio de resistência por força o pressão. Esse tipo de resistor

cambia a resistência quando uma força é aplicada, sendo a resistência inversamente proporcional à força aplicada, Figura 5.12.

Os FSR consistem num polímero condutor piezo resistivo, que varia a resistência ao aplicar uma força sobre sua superfície. Na Figura 5.13 se observa um tipo de FSR. Estes sensores possuem uma grande confiabilidade, além de ser lineares, tem boa resolução, baixa tolerância, baixo nível de histerese, boa exatidão e precisão. O sensor utilizado é o *FlexiForce*TM A201⁹ (4.4 N) da *Teckscan*.

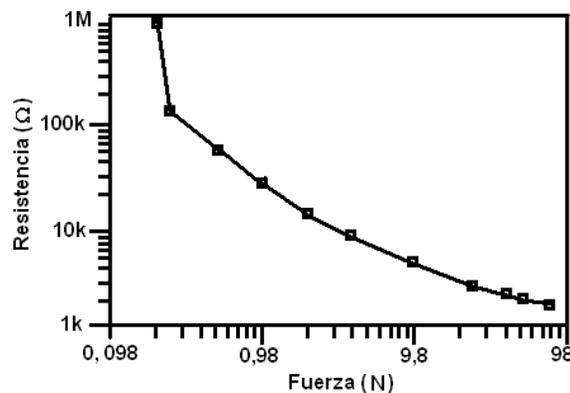


Figura 5.12: Gráfico de resistência (Ω) Vs. Força (N) de um FSR comum [1]



Figura 5.13: Sensor *FlexiForce*TM (Imagem de um FSR)

Estes sensores utilizam para seu condicionamento de sinal um circuito de conversão força-tensão. Sua implementação se apresenta na Figura 5.14. O circuito utiliza um amplificador inversor com operacional polarizado com 5 VCC, que produz um sinal analógico baseada na resistência do sensor (R_S) e de uma resistência fixa de referência (R_F). Nesse circuito, a sensibilidade do sensor pode ser ajustada mudando a resistência fixa de referencia (R_F), um valor

⁹ <http://www.tekscan.com/flexiforce/flexiforce.html>

de referência baixo fará que o sensor seja menos sensível, além de incrementar o rango ativo de medida de força. É usado um sensor deste tipo para medição de força o qual esta localizada na ponta do dedo polegar (na falange distal).

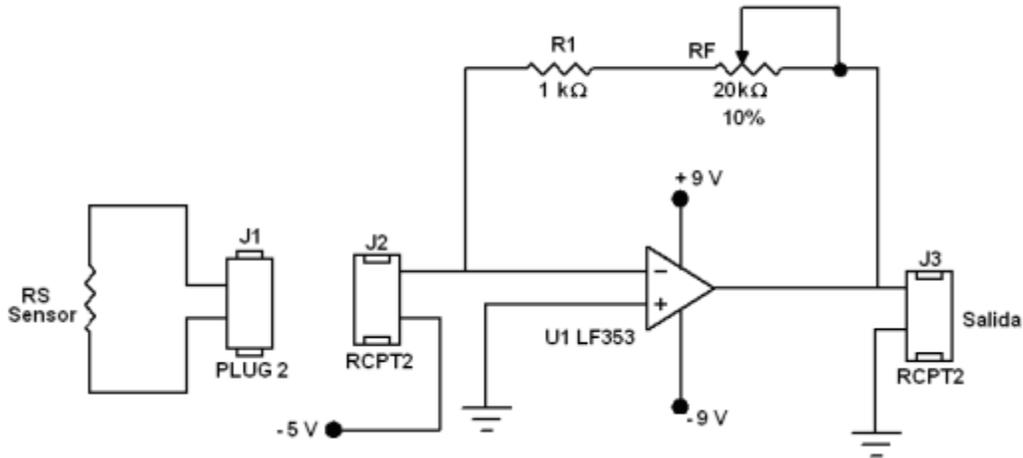


Figura 5.14: Circuito para condicionamento de sinal para sensor *FlexiForce*TM.

Onde:

$$V_o = -V_T * \left(\frac{R_F}{R_S} \right); \text{ onde } R_F = 20k\Omega \quad \text{Resistência sem carga} = 20 \text{ k}\Omega$$

O range para R_F é 1 k Ω a 21 k Ω Resistência plena carga = 5 k Ω

Características gerais dos sensores *FlexiForce*TM: O sensor *FlexiForce*TM é um circuito impresso ultra delgado e flexível, construído por duas capas de poliéster. Cada capa possui um material condutivo (prata), seguido por outra capa delgada para recobrimento. Ademais, se utiliza uma capa adesiva exterior para laminar e recobrir as duas capas de poliéster. A extensão circular de prata no topo do sensor forma a área de medição que possui um diâmetro de 0,375 polegadas (9,5 mm). A capa de prata se estende desde a área de medição até os conectores que se encontram ao final do sensor, formando as franjas condutivas. Esses sensores terminam com três pinos soldáveis, o que permite que sejam incorporados em qualquer circuito. Os pinos externos são ativos e o interno é inativo. O sensor atua como um resistor variável, quando o sensor se encontra sem carga, possui uma resistência muito alta (maior que 5 M Ω),

quando uma força é aplicada sobre o sensor, a resistência decresce, dentro de suas características possuem geralmente um erro de repetibilidade ao redor de 2,5%, e o erro de linearidade de $\pm 5\%$.

Os sensores *FlexiForce*TM, com o 50% da faixa máxima de força aplicada, possuem um nível de histerese abaixo do 4,5%, operam em ambiente com temperaturas desde 15°F (-9°C) até 140°F (60°C) aproximadamente. A saída pode variar aproximadamente 0,36% por grau centígrado (0,2% por °F), pelo geral a saída varia se combinadas altas temperaturas com grandes cargas. Com cargas inferiores a 4,54 kg, o rango de temperatura incrementa até 165°F (74°C). A vida útil do sensor depende da aplicação. Este sensor tem sido provado carregando-os um milhão de vezes com uma massa de 22,72 kg, sem afetar suas características.

Testes com o sensor de força: Como mencionado anteriormente, o sensor escolhido para a medição de força é o FSRs, o sinal neste sensor será a obtida entre o dedo e o objeto que se está manipulando. Inicialmente, são realizados testes estáticos com o FSR, aqui são colocadas massas conhecidas (100 g) sobre o sensor, Figura 5.15. Foi usado o circuito da Figura 5.14 como condicionador de sinal para a obtenção de valores de tensão proporcionais ao valor da força medida pelo sensor. Os resultados obtidos do sensor para massas entre 100 g e 1400 g são mostrados na Tabela 5.4. As Figura 5.16 e Figura 5.17 mostram a resposta do sensor para duas das medições obtidas (V_{sal1} , V_{sal2}). Para as medições do sinal de tensão é usado um multímetro¹⁰. As massas utilizadas são verificadas em balança de laboratório. Observa-se que para forças entre 9,8 N e 10 N, o sistema se satura, ou seja, que para forças superiores o sistema não responde adequadamente, entanto que para valores de 1 N a 8 N a resposta tem uma tendência linear.

¹⁰Fluke 83V Digital Multimeter

Tabela 5.4: Resposta do sensor para três testes

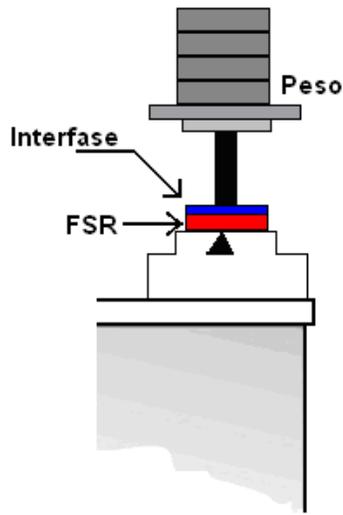


Figura 5.15: Montagem para a caracterização do sensor.

massa (g)	V_{sal1} [V]	V_{sal2} [V]	V_{sal3} [V]
100	0	0	0
200	1,93	2,4	2,4
300	2,83	3,41	3,5
400	3,84	4,1	4,61
500	4,88	4,9	5,08
600	5,85	5,6	5,6
700	6,67	6,6	6,5
800	7,49	7,3	7,3
900	7,69	7,6	7,6
1000	7,72	7,71	7,71
1100	7,73	7,73	7,73
1200	7,74	7,74	7,74
1300	7,74	7,74	7,74
1400	7,74	7,74	7,74

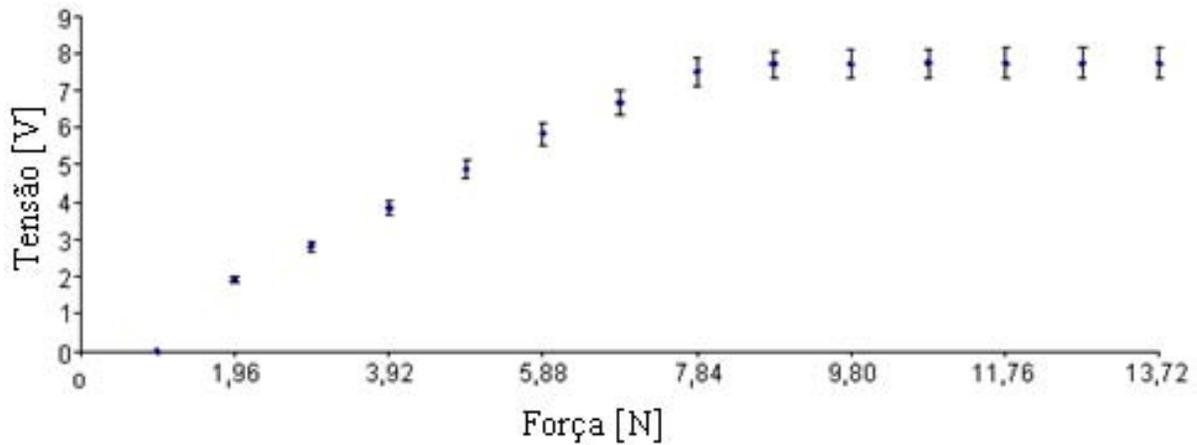


Figura 5.16: Gráfico de V_{sal1} [V] vs. Força [N]

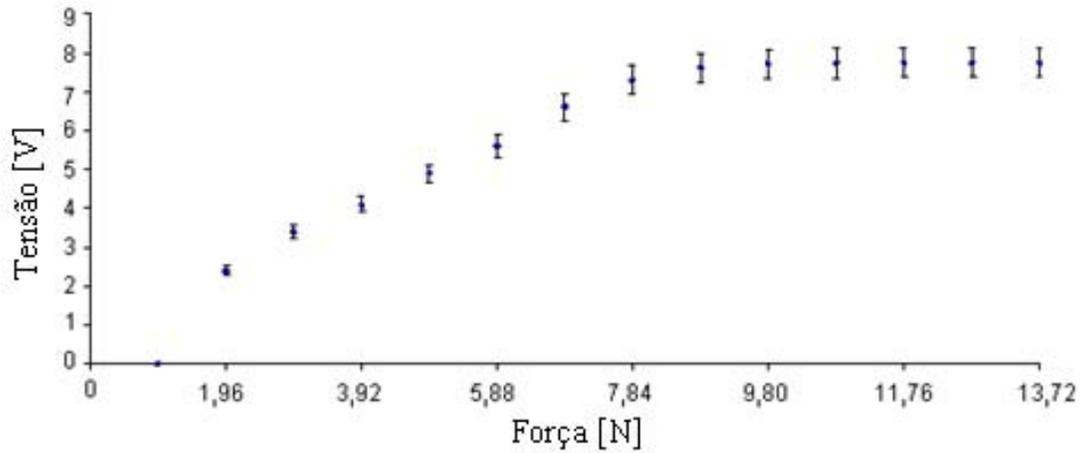


Figura 5.17: Gráfico de V_{sal2} [V] vs Força [N]

Baseado nos dados da Tabela 5.4, é obtido o modelo do sensor, para isso é utilizado o método dos mínimos quadrados, obtendo-se a equação (5.10):

$$V(F) = -1,0421 + 1,2133F + 6,1492 \times 10^{-2} F^2 - 1,4658 \times 10^{-2} F^3 + 5,1869 \times 10^{-4} F^4 \quad (5.10)$$

Na Figura 5.18 se apresenta a resposta do polinômio de quarta ordem que relaciona a resposta do sistema com as massas (força) aplicadas.

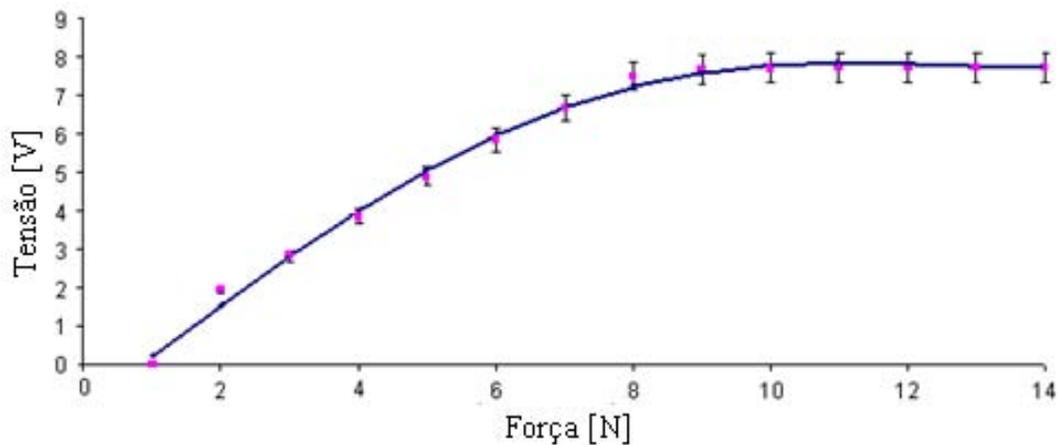


Figura 5.18: Resposta estática do sistema versus resposta do polinômio de quarta ordem

5.6.3 Atuadores (Músculo artificial)

Utiliza-se como atuador (para cada dedo da mão) um motor CC, com redutor e *encoder*¹¹, para deslocar o parafuso sem fim, Figura 5.19c. O motor utilizado é o C1616T da *Falhauler*¹² com um redutor planetário de relação de redução de 146:1 e um *encoder* incremental.



a) Motor C1616T.



b) Esquema CAD do músculo artificial.



c) músculo construído.

Figura 5.19: Detalhe do músculo artificial.

O motor tem um diâmetro de 16 mm por 51 mm de comprimento, incluindo o codificador e a caixa de engrenagens. As especificações mecânicas são mostradas nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Através da placa de aquisição de dados se fornece um sinal de referencia ao motor, que faz às vezes de músculo. Sem carga, o motor mais o redutor têm uma frequência de giro máxima de 15.200 min^{-1} . O esforço de torção de parada do motor é $0,86 \text{ mNm}$. Com a caixa redutora e com o sistema de transmissão através do parafuso sem fim se permitirá apoiar uma carga elevada na ponta do dedo sem que o motor requiera de maiores valores de corrente para satisfazer os requerimentos de par (quando a carga aumenta estaticamente). Isto em oposição aos 20 – 40 N e aos 5 – 10 N de força que um dedo humano é capaz de gerar no movimento de flexão e extensão, respectivamente, embora, uma pessoa média possa somente exercer uma força aproximada de 7 N no dedo sem sentir a sensação de mal estar ou fadiga (NAPIER, 1956), (TAYLOR, 1955).

¹¹ Elemento eletrônico utilizado como sensor de velocidade e/o posição

¹² www.micromo.com

Tabela 5.5: Especificação do motor.

Tensão Nominal	12 V
Resistência Terminal	85,4 Ω
Potencia de saída	0,32 W
Eficiência	47 %
Frequência de giro sem carga	15200 min^{-1}
Corrente sem carga	0,018 A
Torque de parada	0,86 mN m
Torque de fricção	0,12 mN m
Constante de velocidade	1450 V
Força contra eletro motriz	0,688 mV/ min^{-1}
Constante de torque	6,57 mN m/A
Constante de corrente	0,152 A/mN m

Tabela 5.6: Especificação da caixa redutora.

Relação de redução	141:1
Par máximo de saída continua	30 mN m
Par máximo de saída intermitente	100 mN m
Eficiência	66%
Massa	4 g
Longitude	12,8 mm

Cada motor está conectado com uma placa para o abastecimento da corrente necessária, e essa por sua vez ao sistema de aquisição de dados para comunicação ao computador. Essa conexão oferece:

- Manejo do sinal de tensão, a qual está na faixa de 0 a 5 V, para controle de velocidade e sentido de giro.
- O amplificador de ponte-H L298 que pode manejar 3 A, 50 V de polarização e 7 V como sinal lógico de controle.
- Uma interface gráfica para visualização de sinais de tensão, força e posição.

5.6.4 Etapa de Potência

Nesta etapa se construiu os circuitos necessários para satisfazer as demanda de corrente e assim garantir o correto funcionamento do motor. Existem principalmente três problemas para controlar um motor de corrente continua:

1. **Sinal de atuação de baixa potência.** O sinal de atuação fornecido pela placa de aquisição de dados é da ordem dos mA, e a tensão nominal de trabalho do motor é de +5 V ~ +12 V e a corrente que esse consome é de 0,1 a 2 A, a corrente consumida com o protótipo real é de 500 mA, aproximadamente.
2. **Sentido de giro.** Para cambiar o sentido de giro de um motor de corrente contínua é necessário inverter a tensão que o alimenta.
3. **Consumo de energia.** Para variar a velocidade de um motor de corrente contínua existem vários métodos. O mais comum de eles é variar a tensão de alimentação dele, obtendo uma variação proporcional no número de revoluções.

Um dos problemas é a dissipação de potência dos amplificadores utilizados para alimentar o motor, já que se o motor é alimentado com a metade de tensão de alimentação nominal, a metade da potência fornecida pela fonte de alimentação se dissipa no amplificador. Os dois primeiros problemas são resolvidos mediante o uso do circuito integrado dual tipo *driver* L298. Esse é um circuito monolítico integrado de 15 pinos. A tensão de alimentação máxima é de 46 volts DC. A corrente total DC fornecida é de 2 A, esse é projetado para aceitar níveis lógicos TTL *standard* e manejar cargas indutivas como relés, solenóides, motores DC e passo a passo. A configuração deste circuito é mostrada na Figura 5.20 e Figura 5.21, as características elétricas na Tabela 5.7.

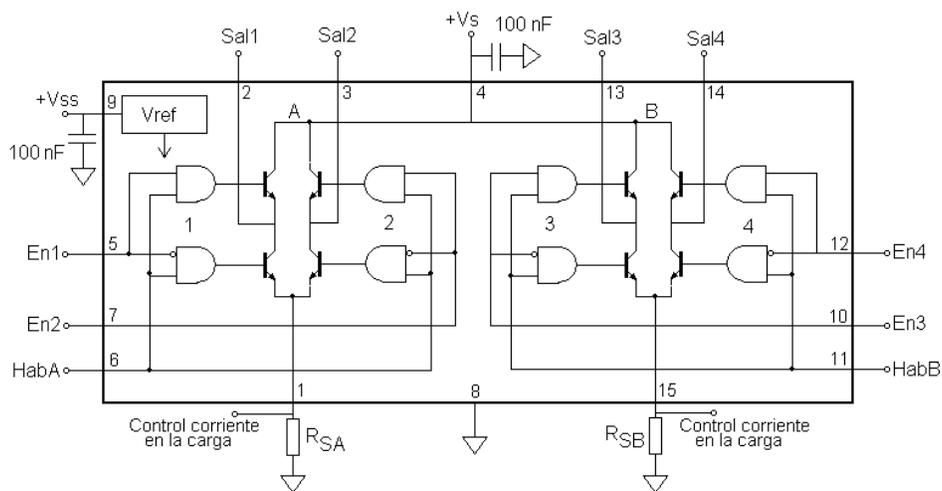


Figura 5.20: Esquema Interno do L298 (Tomado do DATASHEET L298).

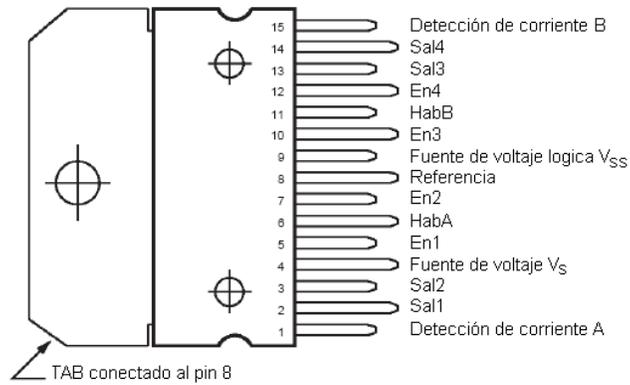


Figura 5.21: Circuito integrado L298, pínos¹³.

Tabela 5.7: Valores máximos permitidos no circuito L298¹⁴.

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
V_S	Fonte de alimentação.	50	V
V_{SS}	Tensão de alimentação (lógica).	7	V
V_b, V_{en}	Tensão de entrada e habilitação.	-0,3 a 7	V
I_o	Corrente pico de saída (cada canal).	3	A
	-No repetitivo ($t=100\mu s$).	2,5	A
	-Repetitivo (80% ligado -20% desligado, $t_{on}=10ms$).	2	A
	-Operação DC.		
V_{sens}	Tensão de detecção.	-1 a 2,3	V
P_{tot}	Total potencia dissipada ($T_{case}=75^\circ C$).	25	W
T_{op}	Temperatura de operação na junção.	-25 a 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_j	Temperatura de acumulação e na junção..	-40 a 150	$^\circ C$

Para girar o motor num sentido se aplica uma tensão alta (+5v) na entrada 1, e um baixo (0v) na entrada 2, para girar em sentido contrário, se muda a condição anterior, quando as duas condições são iguais o motor está em estado de parado. Já o método para solucionar o controle de velocidade, é a aplicação da técnica de modulação de largura de pulso (PWM), na qual se alimenta o motor com um sinal quadrado de uma frequência determinada e uma amplitude igual á tensão nominal do motor, à que se modifica o tempo ativo, obtendo uma media de tensão proporcional a esse tempo. A diferença existente com outros métodos é que neste caso, sempre

¹³ Figura Tomada del DATA SHEET L298 Pág. 2.

¹⁴ Datos tomados del DATA SHEET L298 Pág. 2.

se aplica uma tensão nominal ao motor. A modulação por largura de pulso é controlada desde o computador. O circuito para controlar o motor se apresenta na Figura 5.22.

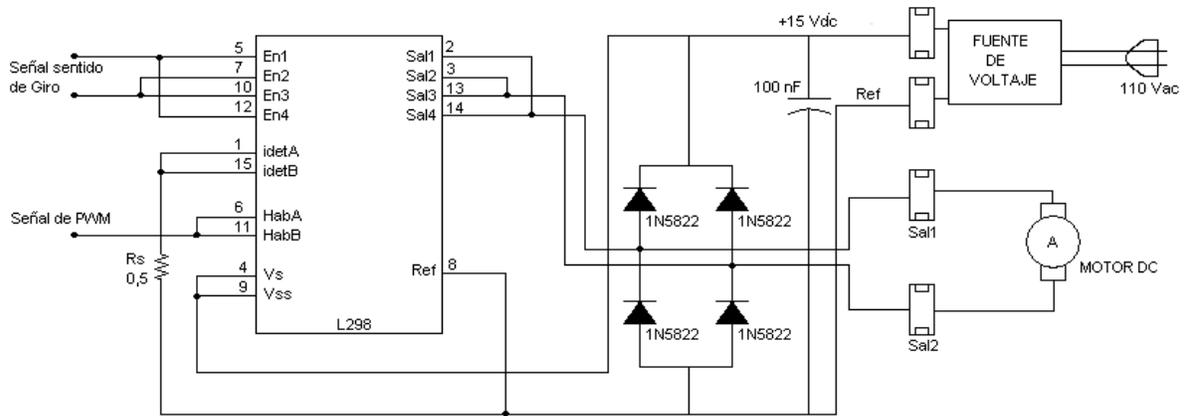
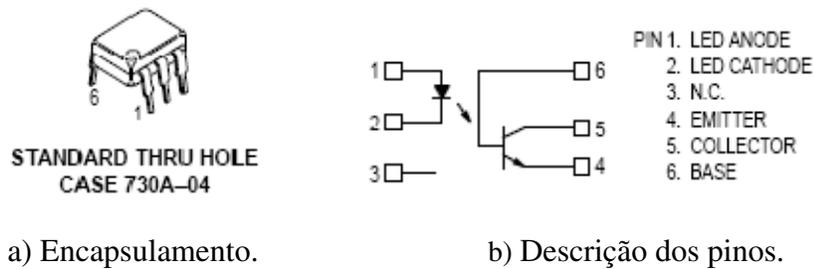


Figura 5.22: Circuito Esquemático da Montagem Elétrica Geral para cada motor.

Acondicionamento de sinal: Levando em consideração que o sinal de saída da placa USB 6008 e TTL (+5V), deve-se acondicionar para 10 V que é a tensão de trabalho dos motores. Para isto e utilizado um circuito de acoplamento óptico com o circuito integrado 4N25, Figura 5.23.



a) Encapsulamento.

b) Descrição dos pinos.

Figura 5.23: Circuito integrado 4n25.

Baseado neste dispositivo implementou-se o circuito da Figura 5.24 para condicionamento de sinal da etapa digital com a potência.

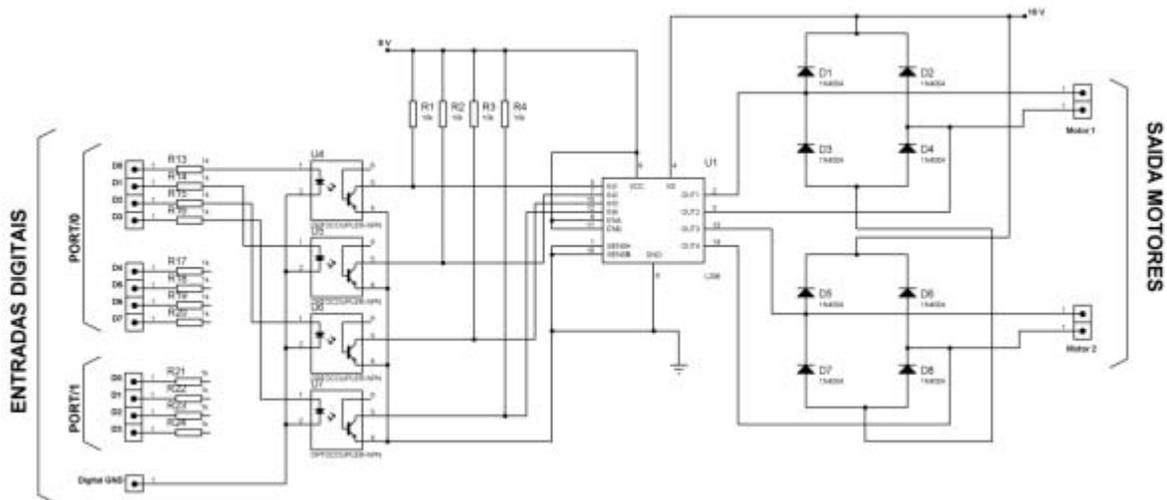


Figura 5.24: Circuito de condicionamento de sinal com 4N25.

5.7 Testes realizados através de interface de usuário

A partir da construção das etapas mecânica e eletrônica são realizados procedimentos de testes com o mecanismo e o sensor de força. Como mencionado utiliza-se um sinal de tensão DC para o controle da velocidade e sentido de giro do motor. Para isso programou-se na plataforma *Labview*TM um algoritmo para a geração dos sinais que posteriormente, mediante a placa de aquisição de dados NI USB 6008, é entregue ao módulo de potência para gerar o movimento do motor. A Figura 5.25 apresenta a interfase de usuário para testes.

O programa está baseado nos passos gerais que se apresentam no diagrama da Figura 5.26, onde é feito inicialmente a configuração das portas e configuram-se as entradas analógicas para a leitura do sinal proveniente do sensor de força. A placa USB 6008 permite ler dados de oito entradas análogas diferentes. Da mesma maneira são configuradas as portas de saída, nesse caso o sinal de tensão será um sinal digital que irá alimentar a módulo de potência.

A medição final com o dedo robô se faz pondo um bloco fixo numa base fixa, a altura dos blocos é variada para tomar as medições a diferentes alturas, implicando numa variação nos ângulos das falanges como mostrado na Figura 5.27.

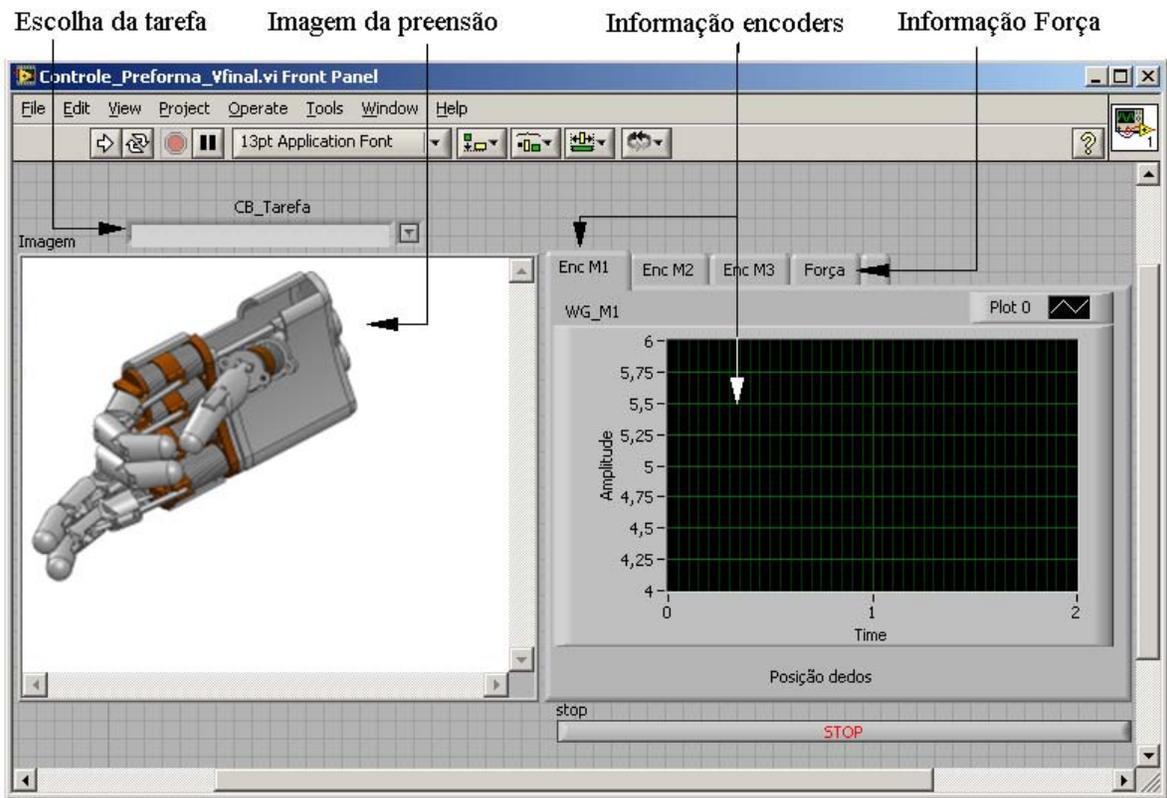


Figura 5.25: Painel frontal em *Labview*TM.

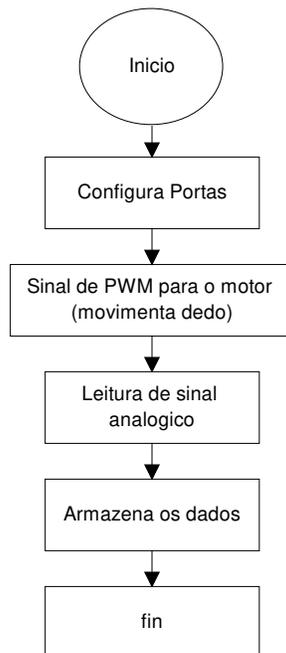


Figura 5.26: Diagrama de fluxo programa *LabView*TM.

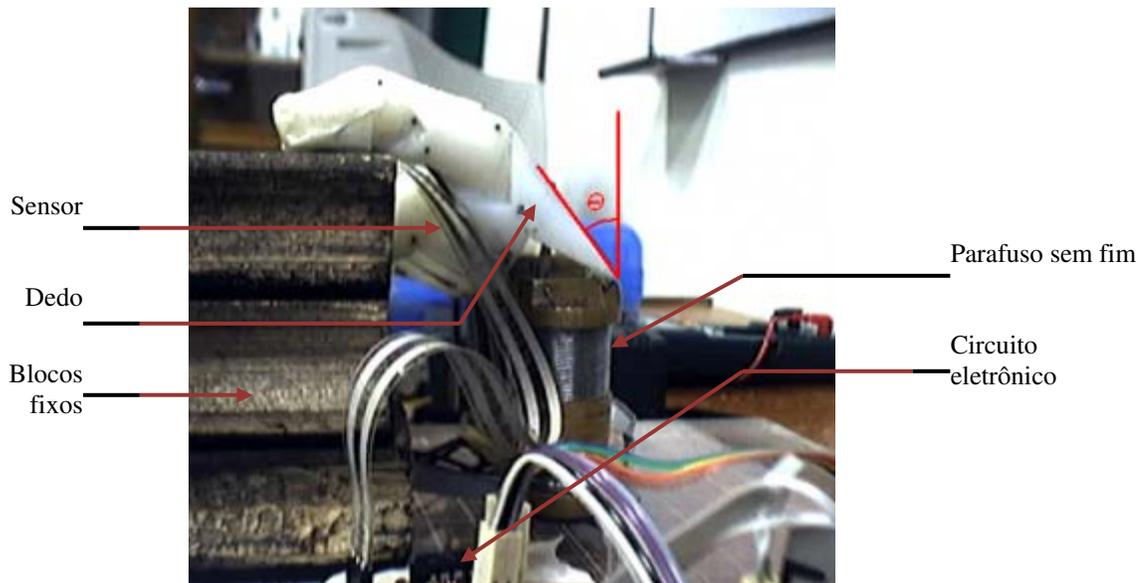


Figura 5.27: Ensaio do conjunto dedo – sensor.

São usados quatro posições para a medição da força que pode gerar o dedo na falange distal, tal como ocorre num dedo humano quando se faz uma pinça tri digital (Figura 4.2).

Depois de projetado o dedo mecânico a seguir é construído o mecanismo de uma mão com características antropomórficas como bancada para testes de preensão.

5.8 A mão MUC-1

Com os dados obtidos para o funcionamento do dedo é desenhado o protótipo de mão mecânica, usando cada um dos dedos como elemento modular o que facilita a construção total de uma mão mecânica, Figura 5.28. Na implementação final é considerado o seguintes:

1. O pulso será fixo, terá zero GDL para efeitos do modelo só os dedos terão movimentos. (essa restrição considera que a mão estará acoplada em um braço robótico)

2. A articulação Metacarpo falângica (MCP) está restringida para um grau de liberdade.
3. As articulações; distal inter falângica (DIP) e proximal inter falângica (PIP) são juntas de revolução (1GDL).

Baseado na representação de Denavit-Hertenberg os parâmetros obtidos os quais são utilizados para obter as respectivas matrizes de transformação. Baseado na figura 3.7 (pág 49) se apresenta em forma geral os parâmetros geométricos, lembrando que $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_{4m}, \theta_{5m}, \theta_{6m}, \theta_{7m}$, são as variáveis de junta, p e o comprimento da palma, e f_{1m}, f_{2m} e f_{3m} são os comprimentos das falanges dos dedos.

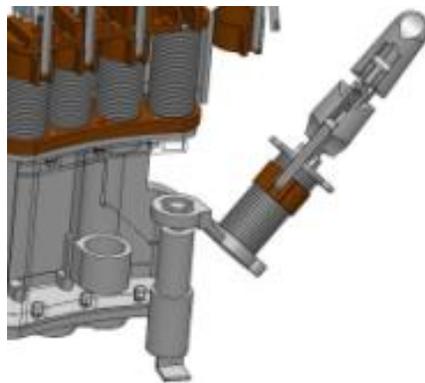
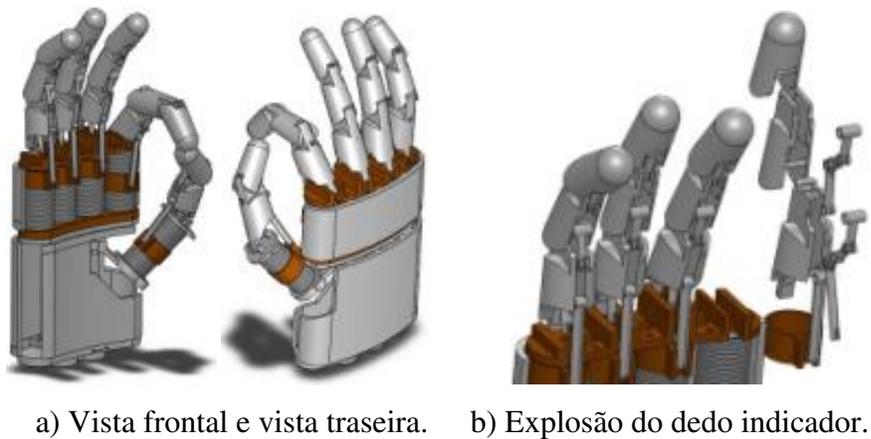


Figura 5.28: A mão MUC-1.

A MUC-I apresenta as seguintes restrições mecânicas, Figura 5.29:

- a) Limite dos movimentos dos dedos como consequência da anatomia da mão (restrições de tipo estático). Esses limites são expressos de acordo as seguintes desigualdades, Tabela 5.8:

Tabela 5.8: Comparação limites mão humana e mão mecânica.

Mão Humana	Mão MUC-I
$-90^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$
$-15^\circ \leq \theta_2 \leq 15^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$
$-15^\circ \leq \theta_3 \leq 15^\circ$	$\theta_3 = 0^\circ$
$-15^\circ \leq \theta_{4m} \leq 15^\circ$	$\theta_{4m} = 0^\circ$
$0^\circ \leq \theta_{5m} \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \theta_{5m} \leq 80^\circ$
$0^\circ \leq \theta_{6m} \leq 110^\circ$	$\theta_{6m} = f(\theta_{5m})$
$0^\circ \leq \theta_{7m} \leq 90^\circ$	$\theta_{7m} = f(\theta_{6m})$

- b) De acordo aos limites impostos durante os movimentos de juntas. (restrições de tipo dinâmico). Essas restrições se baseiam no fato de que todas as articulações possuem uma relação de rotação.
- c) Restrições impostas no desempenho de um movimento natural. Essas dependem da natureza dos movimentos da mão e são mais sutis de detectar, na MUC-I as restrições são impostas pela mesma construção mecânica.

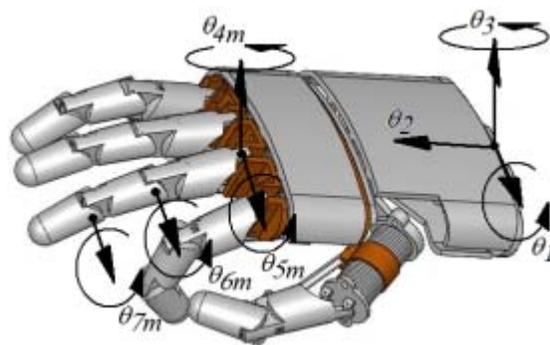
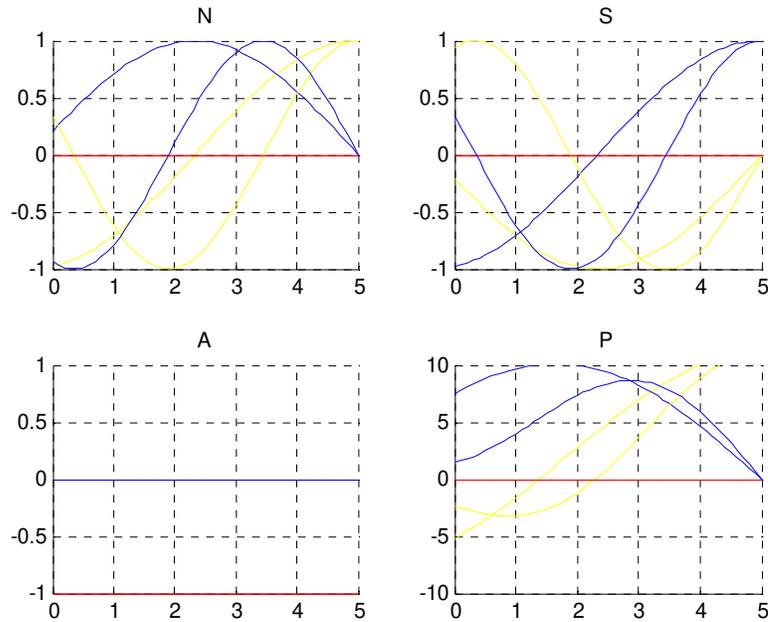
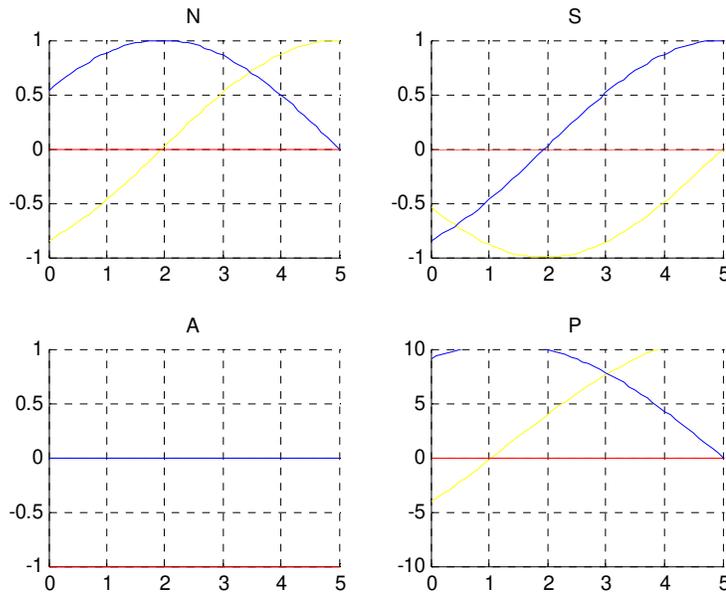


Figura 5.29: Sistemas de referência da MUC-1.

Levando em consideração as restrições mencionadas são realizadas simulações para a obtenção das matrizes N, S, A e P, para um movimento de flexão / extensão do dedo mecânico, Figura 5.30. As simulações mostram que embora o dedo mecânico não tenha um movimento igual ao do dedo biológico pode sim ser usado em tarefas de preensão. Já na Figura 5.31 são apresentadas algumas imagens do protótipo final.



a) Flexão.



b) Extensão.

Figura 5.30: Simulação de um dedo (flexão / extensão), MUC-1.



a) Mecanismo de acionamento do músculo artificial.



b) Suporte para motores.



c) Dedos.



d) Suporte mão MUC-1.



e) Interfaces de aquisição de dados e potencia.



f) Mão MUC-1.

Figura 5.31: Detalhes construtivos da MUC-1.

5.9 Comentários Finais

Este capítulo apresenta a complexidade de uma mão antropomórfica e deixa em evidencia que tentar de imitar a fisiologia humana com todas as suas características não é tarefa simples de resolver com mecanismos artificiais. Para o projeto e construção de uma mão mecânica, é fundamental entender o funcionamento de um dedo humano. Foi apresentado o esquema cinemático do mecanismo, assim como a eletrônica necessária para o controle de movimento do sistema. Em conclusão pode-se afirmar que a durabilidade, a flexibilidade e a eficácia dos músculos biológicos, são as características mais importantes e que os fazem muito melhores em comparação com os músculos artificiais (os atuadores mecânicos).

O protótipo implementado consta de um mecanismo de um grau de liberdade, composto de alavancas, *links*, um sistema de parafuso sem fim, uma placa eletrônica para o *driver* de potência com CI - L298 para controle de corrente no motor CC, uma fonte de tensão, e um sistema de aquisição de dados.

No Apêndice E deste trabalho são apresentados os projetos mecânicos em CAD da mão MUC-1.

Capítulo 6

Procedimento Experimental

Nos últimos anos, os trabalhos desenvolvidos dentro do Laboratório de Automação Integrada e Robótica (LAIR) da Unicamp, têm apresentado um forte componente relativo à validação experimental e que tem proporcionado um aumento a sua infra-estrutura, possibilitando assim o desenvolvimento de novos trabalhos de caráter experimental.

Trabalho experimental na área de robótica geralmente vem acompanhado de montagens complexas que nem sempre são possíveis de serem implementadas, principalmente devido ao alto custo envolvido. Dai a procura de soluções adequadas e ao mesmo tempo em que possam expressar, sem perdas de generalidades, um dado modelo de um sistema. Essa é uma busca constante, com o intuito da validação experimental, o que tem funcionado como um elemento motivador.

Dentro desse contexto, é apresentado uma arquitetura para integração, validação e teste de uma mão robótica dentro de um processo industrial, destacando suas principais características. Ao mesmo tempo, como mencionado nos capítulos anteriores foi desenvolvida uma infra-estrutura (*hardware* e *software*) para aquisição, processamento e controle, com a finalidade de interatuar com a mão robô.

6.1 Arquitetura Proposta

Após a realização do projeto da mão MUC-1, essa será integrada à célula automatizada do LAIR, a próxima etapa a ser realizada e a programação necessárias para o desenvolvimento das trajetórias do robô e do dispositivo mecatrônico para a realização de tarefas de prensão. As trajetórias a serem programadas podem ser interpoladas no espaço das juntas ou em relação à ferramenta terminal do robô (espaço cartesiano).

Quando as trajetórias do robô acontecem no espaço das juntas, as variáveis são conhecidas e os sistemas de coordenadas da garra ou da ferramenta terminal são simples de serem calculados, aplicando um algoritmo com a cinemática direta. Entretanto, se as trajetórias acontecerem no espaço cartesiano, o processo é mais complexo de ser calculado, onde através do conhecimento do sistema de coordenadas da garra ou da ferramenta terminal, se aplica um algoritmo com a cinemática inversa para calcular a posição e orientação em cada uma das juntas. Para a realização das diferentes tarefas se propõe a arquitetura apresentada na Figura 6.1.

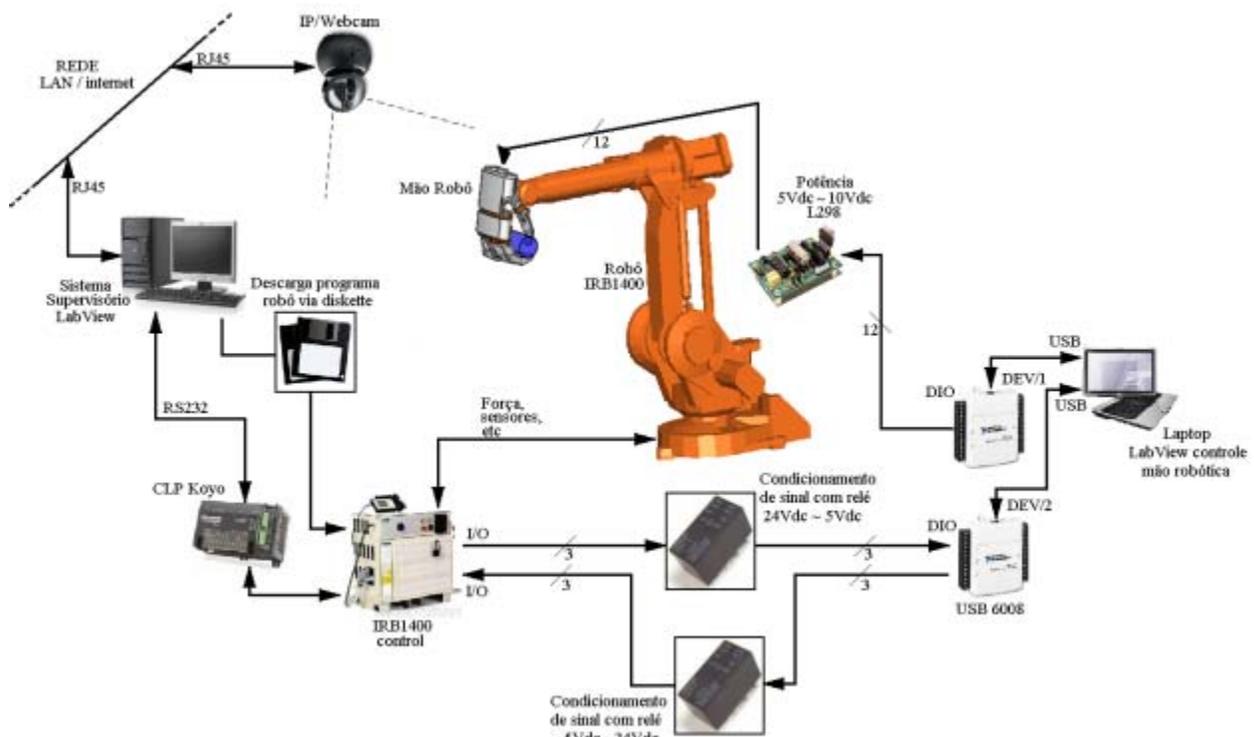


Figura 6.1: Arquitetura proposta para testes com a mão robótica.

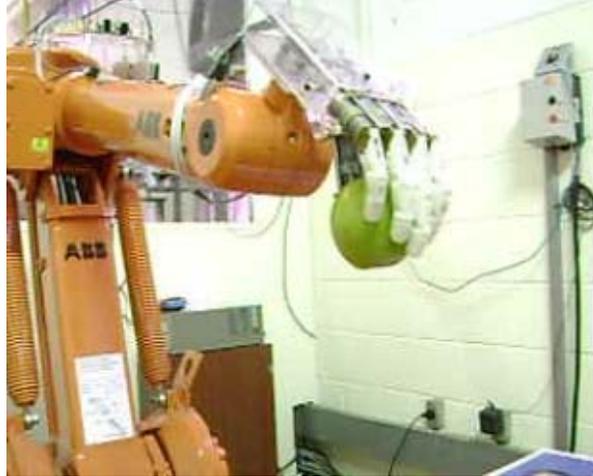
Na Figura 6.1 se distinguem os seguintes componentes:

- 1- Robô Industrial e controlador ABB IRB 1400.
- 2- Placas de aquisição de dados USB 6008 da *National Instruments*.
- 3- Placa de Potência para controle de motores.
- 4- Placa de condicionamento de sinal (5V ~24V) do sistema de aquisição de dados para o barramento de Entrada/Saída do robô.
- 5- Placa de condicionamento de sinal (24V ~5V) do barramento de Entrada/Saída do robô para o sistema de aquisição de dados.

Através da utilização da porta de comunicação Entrada/Saída, é instituído um tratamento seqüencial das informações, que estabelece um protocolo de comunicação entre o robô e dispositivos periféricos integrados na célula automatizada, dessa maneira, foi possível a integração entre o robô e o dispositivo mecatrônico MUC-1, conforme é mostrado nas Figura 6.2a e Figura 6.2b e no exemplo da Tabela 6.1, onde se apresentam os sinais lógicos utilizados.

Tabela 6.1: Lógica da programação para Test_1.

Tarefa	Descrição Tarefa	DEV2 / D03	DEV2 / D02	DEV2 / D01
0	Mão <i>stop</i> (<i>stop</i> motores)	0	0	0
1	Flexão total da mão	0	0	1
2	Extensão total da mão	0	1	0
3	Flexão Polegar Indicador + Médio	0	1	1
4	Extensão Polegar Indicador + Médio	1	0	0
5	N/A	1	0	1
6	N/A	1	0	0
7	N/A	1	1	1
Dos sinais E/S do robô		DIO3	DIO2	DIO1



a) Preensão de objeto esférico.



b) Preensão de objeto cúbico.

Figura 6.2: Integração da mão MUC-1 com o Robô ABB 1400.

Para validação experimental deste trabalho, foi utilizada essa arquitetura experimental que permitiu a geração de trajetórias do robô e a interação dos sistemas para a realização de tarefas de preensão. Os movimentos de preensão são acionados através de um sinal de comando lógico via sinais Entrada/Saída do controlador do robô. Um esquema geral da programação do sistema e apresentada na Figura 6.3, onde o programa principal está armazenado no controlador do robô é ele gerencia a execução de todas as tarefas do sistema, o programa que gerencia os movimentos de preensão da MUC-1 está num computador pessoal independente, e realizado um programa na plataforma *Labview*TM para a leitura das preensões requeridas. Foram realizados

testes de prensão de diferentes geometrias, são testados um objeto esférico (Figura 6.2a) um objeto cúbico (Figura 6.2b) e um objeto fino (Figura 6.8).

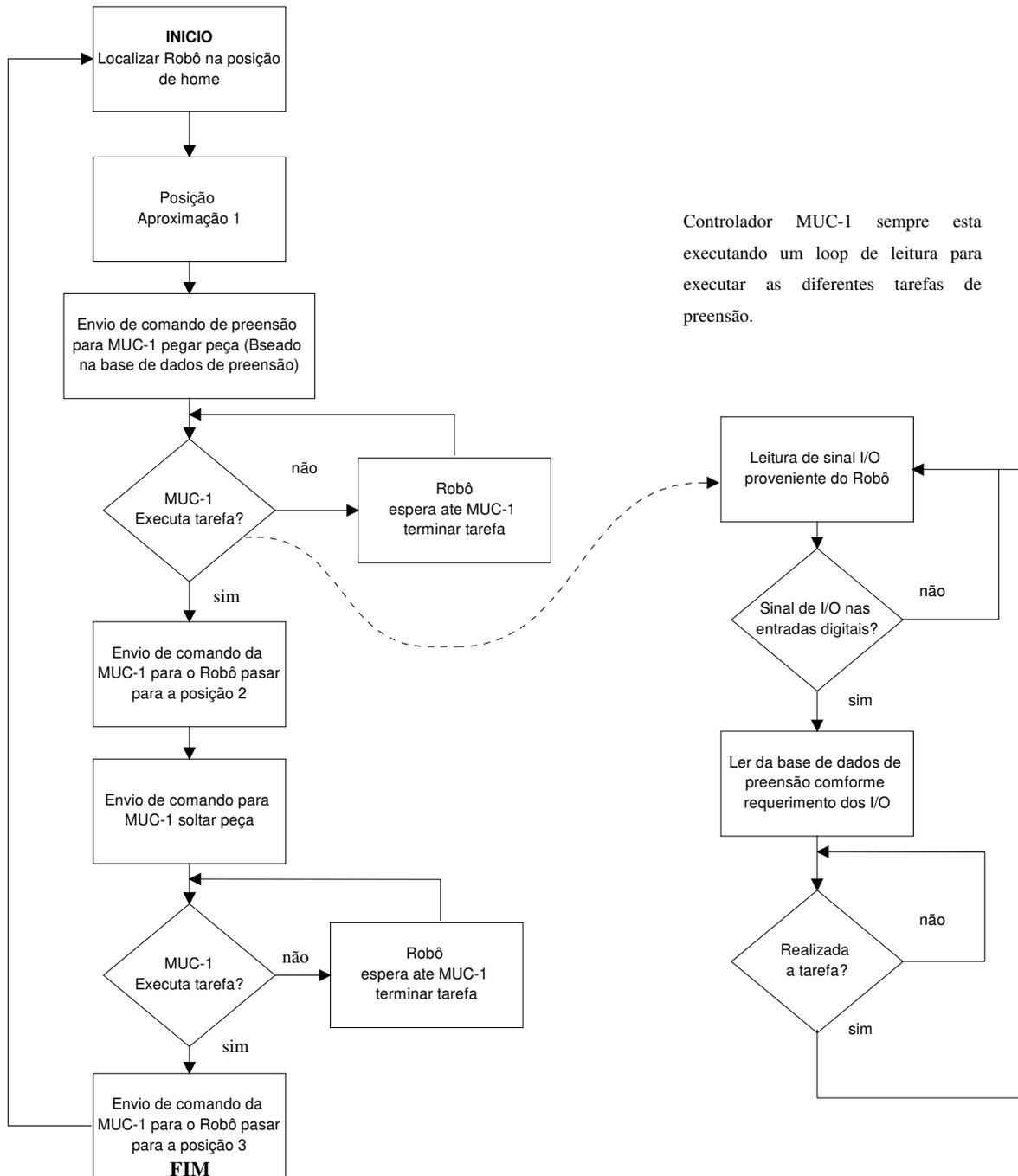


Figura 6.3: Diagrama de fluxo geral do programa para testes.

6.1 Implementação *Software* Robô ABB IRB1400

O programa do robô gerencia a seqüência de movimentos do manipulador assim como o envio de sinais Entrada/Saída para a mão MUC-1 para as tarefas de prensão. O código do programa é apresentado no apêndice C deste trabalho.

6.3 Implementação *Software* MUC-1 em Labview

Para a implementação das tarefas de prensão, foi desenvolvida uma interface em linguagem orientada a fluxo de informações em ambiente *LabView*TM. No apêndice D são apresentados os diagramas de programação do *software* utilizado com cada passo do procedimento para a geração dos movimentos da MUC-1. O código dos programas encontra-se no Anexo D, a Figura D.1 mostra a nível hierárquico cada um dos SubVi (sub instrumento virtual) implementados no programa e na Figura D.2 o esquema geral do programa desenvolvido para movimentar a mão. As figuras seguintes são explicativas do esquema geral (Figura D.3 até Figura D.8)

6.4 Teste com a MUC-1

Utilizando a arquitetura apresentada na Figura 6.1 se obtém respostas para a prensão de objetos variados, da Figura 6.4 até a Figura 6.9 apresentam alguns exemplos. São obtidas prensões de potência e precisão.



Figura 6.4: Sujeição de ferramentas (Preensão - ação)



Figura 6.5: Preensão com três dedos (Indicador, pequeno, polegar)



Figura 6.6: Preensão cilíndrico com todos os dedos



Figura 6.7: Preensão elemento cúbico com todos os dedos

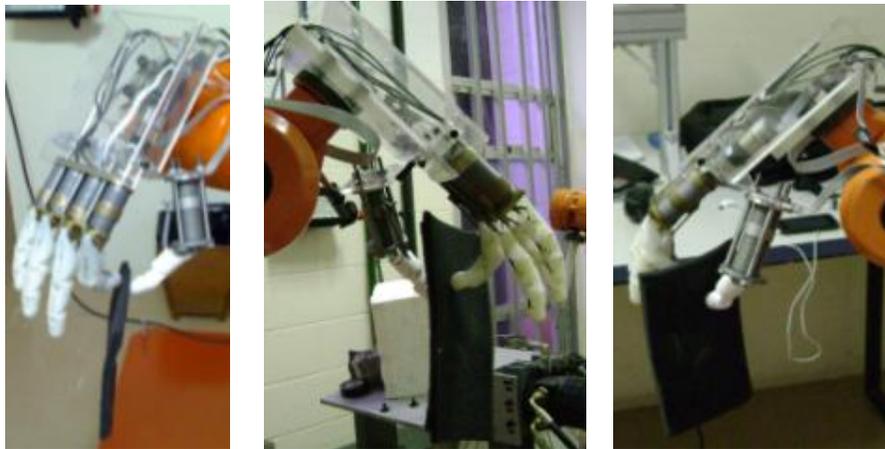


Figura 6.8: Preensão fino



Figura 6.9: Preensão de potência não preênsil (suporte)

6.4 Comentários Finais

Neste Capítulo, apresentaram-se a arquitetura para testes de funcionamento da MUC-1 em conjunto com o robô do LAIR. Dois programas para validação são implementados um para o robô manipulador e outro para a mão mecânica, sinais de Entrada/Saída são usados para estabelecer um protocolo de comunicação para sincronizar os movimentos para as tarefas a serem realizadas.

São apresentadas algumas imagens de execução de tarefas com a MUC-1 onde fica demonstrado que o dispositivo mecatrônico apresenta características antropomórficas, possui dimensões similares as da mão humana e ainda que não possua um número grande de GDL permite sim a realização de tarefas de preensão.

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas futuras

Uma grande quantidade de trabalhos na área de robótica tenta imitar modelos mais eficientes encontrados na natureza. A observação e o estudo de modelos como o ser humano, leva a desenhar formas similares em suas características funcionais e de forma. Por isso, é importante estudar o modelo anatômico da mão humana como base fundamental no desenvolvimento de projetos que envolvem manipulação de objetos e desenhos de *grippers* ou mãos mecânicas.

Neste trabalho de doutoramento inicialmente foi realizado uma análise para o projeto e posterior construção de um dedo antropomórfico para *grippers* robóticos. Durante o desenvolvimento foram delineados e cumpridos os seguintes objetivos:

Inicialmente, é realizada a implementação de um mecanismo que permite simular o movimento do dedo humano, esse mecanismo possui um GDL e utiliza um atuador. Para alcançar este objetivo, são realizadas as seguintes tarefas:

- Estudo e implementação de um mecanismo de um GDL.
- Análise cinemática e dinâmica do mecanismo do dedo robô.
- Implementação de um circuito eletrônico para o controle do atuador.
- Implementação de elementos de *software* e *hardware* para medição da força.
- Bancada para testes.

Todo o trabalho é direcionado a implementação final de MUC-1, que é uma mão antropomórfica constituída de cinco dedos com estrutura modular que preservam a mesma arquitetura.

Inicialmente são estudados vários trabalhos relacionados ao tema, conforme tabela comparativa descrita no Capítulo 1. Estes trabalhos tem por objetivo a implementação de *grippers* e mãos robóticas, alguns deles foram realizados para atribuir a um dispositivo (robô humanóide), a possibilidade de manipular objetos com a mesma destreza da mão humana, é observado que elas possuem elevados números de GDL e que estão dotadas de elementos sensores que lhes permitem ter sensações do mundo externo, por exemplo: posição e temperatura, para o desenvolvimento de próteses de mão (CUNHA, 1999), ou com sensores de posição e força para *grippers* robóticos, todos estes desenvolvimentos tem sido realizados com a finalidade de melhorar a interação com os objetos que são manipulados. Cada um destes avanços pode ser vistos em robôs humanóides tales como: *Wabot-1; Asimo E Cog. Mãos Avançadas Como; Stanford / Jpl Hand, Utah / Mit, Hitachi, DLR, Robonaut*, e que foram estudadas no Capítulo 1.

Do estudo do estado da arte se conclui que o desenvolvimento de mãos robóticas é um tema que segue em constante desenvolvimento e sobre ele se investem esforços acadêmicos e econômicos importantes. Este trabalho de revisão bibliográfica permitiu identificar que essas mãos geralmente possuem mais de 1 GDL, o que dificulta sua construção, a faz custosa e de difícil montagem, em alguns dos casos possuem retroalimentação do mundo exterior com sensores para medição de força, isto com a finalidade de implementar sistemas de controle em laço fechado e assim melhorar a interação com os objetos que são manipulados ademais em sua maioria utilizam atuadores elétricos de tipo motor DC, o que também facilita a estratégia de controle.

Conseqüentemente a utilização de poucos atuadores (como no caso deste trabalho) faz com que o desenho de uma mão completa seja mais simples, assim como a implementação da estratégia de controle, o fato de dotar o dedo com sensores para medição de força, possibilita o projeto de um sistema de controle em malha fechada.

A utilização de *softwares* de modelagem e simulação mecânica além de programas de simulação eletrônica fazem a tarefa de desenho mais simples, diminuindo a margem de erro, isto não significa só a simulação e suficiente para elaborar um bom desenho mecânico, embora este seja um complemento fundamental ao trabalho desenvolvido em forma manual.

Da análise estrutural se conclui que o material selecionado para a construção (*TeflónTM*) preenche os requerimentos necessários para ser utilizado na montagem de *grippers* robóticos devido a suas boas características mecânicas para suportar as cargas as quais estará submetido, é de fácil usinagem, baixo peso e é de baixo custo, o que é também um fator importante na hora de fazer o projeto de uma garra para fins industriais ou de uma prótese com fins médicos.

No desenho do dedo verifica-se que o mecanismo desenvolvido possui um projeto simples e de fácil implementação, e embora a geometria das falanges fosse complexa, o uso das técnicas de prototipagem rápida tornam mais segura à fabricação das peças, diminuindo consideravelmente os erros e redução de tempo no processo de fabricação. Foi comprovado que o dedo cumpre todos os objetivos inicialmente propostos, com comportamento funcional similar ao de um dedo humano, e com características antropomórficas (forma, dimensões e função).

Com a vantagem de ter desenvolvido um dedo como elemento modular de uma mão robótica é construída a MUC-1, que é um dispositivo mecatrônico tipo *grripper* antropomórfico de cinco dedos. Esta mão é comparada com outras mãos descritas na literatura e seus índices de antropomorfismo, nível de sensoriamento e mecânico avaliados. São estudados os movimentos de preensão humanos com a finalidade de gerar uma estratégia de preensão, mais para garantir que um objeto pode ser segurado se estudam os principais elementos físicos e geométricos de preensão. Assim é elaborada uma estratégia para levar a MUC-1 a atingir algumas formas pré-estabelecidas de preensão de objetos. Para realização de testes de validação de MUC-1 ela é utilizada como um *grripper* anexo ao elemento terminal de um robô industrial para execução de tarefas de preensão.

Para a continuidade deste trabalho são propostas algumas sugestões para o aprimoramento do dispositivo mecatrônico, tais como:

- Aumento do número de graus de liberdade para a realização de mais opções de prensão;
- Otimização da interface eletrônica e sensoriamento para que se reduza qualquer tipo de ruído em sinais eletrônicos, minimizando assim problemas de *hardware* eletrônico, e atingir também o aumento de possibilidades de aquisição de outras variáveis (temperatura, posição, rugosidade, etc.);
- Melhorar os processos de fabricação para diminuir as folgas dos componentes mecânicos;
- Implementação de controle de força;
- Estudo entre as folgas nas engrenagens (*backlash*) existente no redutor de velocidade;
- Adição de sensores para proteção do sistema;
- Aperfeiçoamento do *software* para aumento de tarefas;
- Estudo de viabilidade de utilização de MUCI como dispositivo protético humano;
- Possibilidade de testar diferentes trajetórias para tarefas de prensão particulares.

Referências

- Al-Fahed Nuseirat, A.M. Hamdan, A.M.A. Hamdan, H.M.A.: “Stability and Modal Control of an Object Grasped by a Multifingered Robot Hand”. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* , Volume 79 Issue 7, Pages 473 - 479. 1999.
- An KN, Chao EY, Cooney WP 3rd, Linscheid RL.: “Normative Model of human hand for biomechanical Analisis”. *Journal of biomechanics* , Vol 12, pp775-788, 1979.
- Avilés, Oscar Fernando. Rosário, João Mauricio.Uribe, Álvaro Joffre. Lara, Fabian.: “Mão Mecanica MUC-I”. *Proc. 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications*. 2008.
- Becker, J.C.Thakor, N. V. Gruben, K. V. (1986). “A Study of Humand Hand Tendon Kinematics with applications to Robot Hand Design”. *IEEE* , 1540, 1545. 1986.
- Bekey, G. A. Tomovic, R. Zeljkovic, I. “Control Architecture for the Belgrade/USC Hand. Dextrous Robot Hands “, SpringerVerlag, NY. 1990.
- Bekey,G.A. Liu, Huan. Tomovic, R. and Karplus, W.J.: “Knowledge-based control of grasping in robot hands using heuristics from human motor skills”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* , 9(6), 709–722. 1993.
- Bergamasco, M. Scattareggia, M. S.: “The Mechanical Design of the MARCUS Prosthetic Hand”. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication* , 95-100. 1995.
- Biagiotti, L. Lotti, F. Melchiorri, C. Vassura, G.: “Design Aspects for Advanced Robot Hands”. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* , Tutorial Course, 1-16. 2002.

- Biagiotti, L. Lotti, F. Melchiorri, C. Vassura, G.: "Mechatronic design of innovative finger for Anthropomorphic robot hand". Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation , pp 3187-3192. 2003.
- Biagiotti, L. Lotti, F. Melchiorri, C. Vassura, G.: "New Directions on Robotics Hands Design for Space Applications". 2004.
- Biagiotti, L. Lotti, F. Melchiorri, C. Vassura, G.: "How far is the Human Hand?, A review on Anthropomorphic Robotic End-Effectors". DEIS (University of Bologna). 2004.
- Bicchi, Antonio . Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Towards Simplicity. Ieee Transactions On Robotics And Automation. 2000
- Bicchi, Antonio. Kumar, Vijay. "Robotic Grasping and Contact: A Review". Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2000
- Bicchi, Antonio: "Machine hand design for dexterity, robustness of grasp, and interaction with humans". MIT PRESS. 2000
- Borst, C. Fischer, M. Hirzinger, G. "Calculating hand configurations for precision and pinch grasps". Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, 1553-1559. 2002.
- Borst, Ch. Fischer, M. Haidacher, S. Liu, H. Hirzinger, G. DLR Hand II: "Experiments and Experiences with an Anthropomorphic Hand". 2003.
- Brook, N. Mizrahi, J. Shoham, M. Dayan, J.: "A biomechanical model of index finger dynamics". Med. Eng, Phys , 17, 54-63. 1995.
- Buchholz, B. Armstrong, T.: "A Kinematic Model of the Human Hand torso Evaluate its Prehensile Capabilities". Biomechanics Journal , 25, 149-162. 1992.
- Caffaz, A and Cannata, G: "The design and development of the dist-hand dextrous gripper". In Proc. IEEE int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA98, 1998.
- Calle Trujillo, Gabriel. Durango Idárraga, Sebastián. Mesa, Leonardo de Jesús. Ramírez, Juan Carlos. Jaramillo, Sebastián.: "Solución de Mecanismos usando Clasificación Estructural Según Assur y Assur Toolbox 1.01., Herramienta De Ingeniería Asistida Por Computador Para La Solución De Mecanismos Planos". Universidad Autónoma de Manizales. 2006.
- Carrozza, M. Persichetti, A. Laschi, A. Vecchi, F. Vacalebri, P. Tamburrelli, V. Lazzarini, R. Dario, P. : "A Novel Wearable Foot Interface for Controlling Robotic Hands". 2005

- Cassemiro, Edna R.: “Metodologia Para Desenvolvimento De Dispositivos Biomecânicos Para Aplicação Em Próteses Antropomórficas”. Universidade Estadual de Campinas - FEM. 2002.
- Castro, Daniel. Marques, Lino. Nunes, Urbano . Almeida, A.T.: “Tactile Force Control Feedback in a Parallel Jaw Gripper”. 1997.
- Causey, Greg C. Quinn, Roger.: “Gripper Design Guidelines for Modular Manufacturing”. theProceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation . 1988.
- Coelho Jr, J.A. Grupen, R. A.: “A Control Basis for Learning Multifingered Grasps”. Journal of Robotics Systems , 14, 545-557. 1997.
- Craig, J.J. Raibert, M.H.: “A systematic method of hybrid position/force control of a manipulator”. Computer Software and Applications Conference, 1979. Proceedings. COMPSAC 79. The IEEE Computer Societyapos;s Third International , 446-451. 1979.
- Cuadrado, J. Naya, M. Ceccarelli, M. Carbone, G.: “An Optimum Design Procedure for Two Finger Grippers: A case of study”. 2001.
- Cunha, F. L. Cura, V. O. Dymnikov, V. I. Cliquet Jr, A.: “Uma Revisão Crítica Das Transmissões E Atuadores Para Próteses Antropomórficas Para Membros Superiores”. In: XIII Congreso Argentino De Bioingeniería & Ii Jornadas De Ingeniería Clínica . 2001.
- Cunha, Fransergio Leite da “Mão de São Carlos, uma Protese Multifunção para Membros Superiores, um estudo dos mecanismos, atuadores e sensores”. Escola Politecnica USP. 2002.
- Cutkosky, M.: “On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks”. Robotics and Automation, IEEE Transactions on , Volume: 5, 269-279. 1989.
- Dario, P. Laschi, C. Menciassi, A. Guglielmelli, E. Carrozza, M. Zecca, M. Zollo, L. Teti, G. Beccai, L. Vecchi, F. Roccella, S.: “A Human-like Robotic Manipulation System Implementing Human Models of Sensory-Motor Coordination”. 2003.
- Drăgulescu, D. Perdereau, V. Drouin, M. Ungureanu, L and Menyhardt, K.: “3D active workspace of human hand anatomical model”. in: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/6/1/15> . 2007.

- Drăgulescu, Doina. Ungureanu, Loredana. Stanciu, Antonius.: “Modeling the Motion of the Human Middle Finger”. 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence . 2005.
- Fujii, S. Nishikawa, D and Yoko, H.: “Development of a Prosthetic Hand Using Adaptable Control Method for Human Characteristics”, volume 5, pages 360–376. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 1998.
- Fukaya, Naoki. Toyama, Shigeki. Asfour, Tamim. Dillmann, Rüdiger.: “Design of the TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand”. 2000.
- García-Córdova, Francisco. Martínez Alvarez, José J. Saltarén Pazmiño, Roque J. Guerrero González, Antonio. López Coronado, Juan.: “Diseño Mecatrónico de un Dedo Antropomorfo Parte II: Electrónica y Control”. 2001.
- Gazeau, J.P. Zegloul, S. Arsicualt, M. and Lallemand, J.P.: “The LMS hand: force and position controls in the aim of the manipulation of objects”. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA01, Seoul, Korea, 2001.
- Hasser, C.J. Cutkosky, M.R.: “System Identification of the Human Hand Grasping a Haptic Knob”. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS 2002), part of IEEE Virtual Reality 2002.
- Hermini, H.A.: “Modelagem, Implementação e Controle de Sistemas Biomecânicos envolvendo Aspectos Cinemáticos”. Universidade Estadual de Campinas FEM. 2000.
- Hong Zhang Paul.: “Hybrid control of robot manipulators”. Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on , Volume: 2, 602-607. 1985.
- Iberall, T. Sukhatme, G. Beattie, D. and Bekey, G.: “Control Philosophy and Simulation of a Robotic Hand as a Model for Prosthetic Hands”. Intelligent Robots and Systems apos;93, IROS apos;93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on , Volume 2, 824-831. 1993.
- Iberall, T. Sukhatme, G. Beattie, D. and Bekey, G.: “Control philosophy and simulation of a robotic hand as a model for prosthetic hands”. in Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS '93, , pages 824–831. 1993

- Iberall, Thea.: “The nature of human prehension: Three dextrous hands in one”. Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on , Volume: 4, 396-401. 1987.
- Jacobsen, S. Iversen, E. Knutti, D. Johnson, R. Biggers, K.: “Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand”. Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on , 3, pp 1520-2532. 1986.
- Jimmy, W. Soto, M. Gini, G.: “Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process”. Proceedings Of World Academy Of Science, Engineering And Technology, Volume 20. 2007
- Kapandji I.A. *Fisiologia Articular*. Editora Manole LTDA, São Paulo, S.P., 1987.
- Kawasaki, Haruhisa. Komatsu, Tsuneo. Uchiyama, Kazunao.: “Dexterous Anthropomorphic Robot Hand With Distributed Tactile Sensor: Gifu Hand II”. IEEE/Asme Transactions On Mechatronics , 7, 296-303. 2002.
- Kyberd, P.J. Holland, O.E. Chappel, P.H. Smith, S. Tregidgoi, R. Bagwell, P.J. Snaith, M.: “MARCUS: A two degree of freedom hand prosthesis with hierarchical grip control”, IEEE Trans Rehab Eng , 3(1), 70–76. 1995.
- Kyberd, Peter. Evans, Mervyn. Winkel, Stefan.: “An Intelligent Anthropomorphic Hand, with Automatic Grasp”. Robotica , volume 16., pp. 531–536. 1998.
- Laschi, Cecilia. Dario, Paolo. Chiara, Maria. Carozza, Guglielmelli, Eugenio. Teti, Giancarlo Taddeucci, Davide. Leoni, Fabio. Massa, Bruno. Zecca, Massimiliano. Lazzarini, Roberto. “Grasping and manipulation in humanoids robotics”. 2000.
- Lee, K and Shimoyama, I.: “A skeletal framework artificial hand actuated by pneumatic artificial muscles”. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Light, C. M. and Chappell, P. H.. The development of an advanced multi-axis myoprosthesis and controller. In MEC99, pages 70–76, 1999.
- Li, Jianfeng. Zhang, Yuru. Zhang, Qixian. Gruver, W.A.: “An algorithm for the kinematics of dexterous manipulation”. Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on , Volume: 6, 792-797. 1999.

- Lin, Li-Ren. Huang, Han-Pang.: “Mechanism design of a new multifingered robot hand”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation , 1471-1476. 1996.
- Lin, J. Radwin, R. G. Richard, T. G.: “Dynamic biomechanical model of the hand and arm in pistol grip power handtool usage”. Ergonomics, 2001 , 44, 295-312. 2001.
- Liu, H. Meusel, P. Butterfass, P. Hirzinger, G.: “DLR’s Multisensory Articulated Hand Part I: Hard- and Software Architecture”. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1998.
- Liu, H. Meusel, P. Butterfass, P. Hirzinger, G.: “DLR’s multisensory articulated Hand Part II: The Parallel Torque/Position Control System”. Proceedings of the IEEE [nternational Conference on Robotics \& Automation , 2087-2093. 1998.
- Lovchik, C.S. Diftler, M.A.: “The robonaut hand: A dextrous robot hand for space”. Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation , 2, pp 907-912. 1999.
- Marcincin, J. N. Smrcek, J.: “Biomechanical grippers: important elements of biomechanical robots”. Industrial Robot , 24, 234-238. 1997.
- Mason, M. Salisbury, J.: ”Robot Hands and the Mechanics of Manipulation”. The MIT Press Series in Artificial Intelligence. 1985.
- Muñoz, L. Doersam, Th.: “Simple controllers for dexterous hand”. 1996. Disponivel en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.31.8331>
- Napier, J. R.: “The prehensile movements of the human hand”. The Jourbal of bone and joint surgery, London, England. 1956.
- Nguyen, Van-Duc. :“Constructing Force-Closure Grasps”. IJRR , pp.3-16. 1998.
- Nguyen, Van-Duc.: “Constructing Stable Grasps in 3D”. Proc. IEEE, ICRA , pp.234-239. 1987.
- Ocampo,G. Rondón, J.: “Diseño y Construcción de una Mano Robot de Cuatro Dedos que Imite los Modelos Prensiles Humanos”. Universidad Militar Nueva Granada. 2004.
- Okada, T.: “Computer control of multijointed finger system for precise object handling. In International Trends in Manufacturing Technology - Robot Grippers”, 1986.
- Okamura, A.M. Smaby, N. Cutkosky, M.R.: “An overview of dexterous manipulation. Robotics and Automation”, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on , Volume: 1, 255-262. 2000.

- Okamura, A.M. Turner, M.L. Cutkosky, M.R.: “Haptic Exploration of Objects with Rolling and Sliding”. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation , 3, 2485-2490. 1997.
- Ottobock quality for Life in <http://www.ottobock.com/>
- Parada Puig, Jorge Eduardo. Nava Rodriguez, Nestor Eduardo and Ceccarelli, Marco.: “A Methodology for the Design of Robotic Hands with Multiple Fingers”. International Journal of Advanced Robotic Systems, , Volume 5. 2008.
- Paromtchik, I. E. Damm, M. Matioukhina, L. I.: “A Variable Structure Force Controller for Robotic Manipulators”. IFAC Robot Control 1994, L. Sciavicco, C. Bonivento and F. Nicolò Eds , Vol. 1, pp. 419-424. 1995.
- Pedreño-Molina, J. Guerrero-González, A. Guerrero-González, J. López-Coronado, J.: “Control de Agarre y Posicionamiento en una Plataforma Robot con Sensores Tactiles”. Universidad Politecnica de Cartagena. 2004.
- Penisi, O. Ceccarelli, M. Carbone, G.: “Clasificación de Mecanismos en Pinzas Industriales de dos Dedos”. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica”, 7, 59-75. 2003.
- Sá, C.E.: “Implementação de métodos numéricos para a resolução do problema cinemático inverso de manipuladores robóticos com ênfase em controle de posição”. UNICAMP. 1996.
- Schulz, S. C.: “A New Ultralight Anthropomorphic Hand”. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. p.p. 2437- 2441 vol.3. 2001
- Schulz, S. Pylatiuk, C. Bretthauer, G.: “A New Ultralight Anthropomorphic Hand”. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2001
- Schulz, S. Pylatiuk, C. Reischl, M. Martin, J. Mikut, R. Bretthauer, G.: “A hydraulically driven multifunctional prosthetic hand”. Robotica , 23, pp 293-299. 2005
- Shadow, Robot Company.: “Design of a Dextrous Hand for advanced CLAWAR applications”. 2003. Shadow hand webpage. <http://www.shadow.org.uk/>.
- Silva, N. Da Silva, J. Rosário, J. : “Construção estrutural de próteses antropomórficas utilizando prototipagem rápida”. 16Th Brazilian Congress of Mechanical Engineering , 1, 196-204. 2001.

- Silva, N., Da Silva, J. Rosário, J. Lima, C. Erig, C.: “Estudo, Desenvolvimento e Processo de Fabricação de Próteses Antropomórficas Ativas destacando a Prototipagem Rápida e a Usinagem”. 16Th Brazilian Congress of Mechanical Engineering , 1, 166-173. 2001.
- Silva, N.C. Da Silva, J.V.L. Gouveia, M, Rosário, J.M.: “Fast Development of Antropomorphic Prothese usig Rapid Prototyping CAD Systems”. 2nd Brazilian Congress on Computational Mechanics. 2001
- Speeter, T. H.: “Primitive based control of the Utah/MIT dextrous hand”. In International Conference on Robotics \& Automation, , pages 866–877. 1991.
- Stergiopoulos, Panagiotis. Fuchs, Philippe. Lurgeau, Claude.: “Design of a 2-Finger hand Exoskeleton for VR Grasping Simulation”. Euro Haptics. 2003.
- Taylor, G. L. Schwartz, R. J.: “The Anatomy and Mechanics of the Human Hand”. Artificial Limbs , Vol.2, pp.22-35. 1955.
- Townsend, W.T.: “Mcb - industrial robot feature article- barrett hand grasper”, Industrial Robot: An International Journal, 27(3), 2000.
- Vardy, Andrew: “Articulated Human Hand Model with Inter-Joint Dependency Constraints”. 1998.
- Weston B Griffin, Ryan P Findley, Michael L Turner and Mark R Cutkosky.: “Calibration and Mapping of a Human Hand for Dexterous Telemanipulation”. ASME IMECE Conference Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems Symposium. 2000.

Bibliografia consultada

- Anderson, M.: “Modelagem de Articulações para Humanos Virtuais Baseada em Anatomia”. Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informatica, Programa de Posgraduação em Computação. 2001.
- Ashutosh Saxena, Justin Driemeyer, Andrew Y. Ng.: “Robotic Grasping of Novel Objects using Vision”. The International Journal of Robotics Research , Vol. 27, 157-173. 2008.
- Ashutosh Saxena, Lawson L.S. Wong and Andrew Y. Ng.: “Learning grasp strategies with partial shape information”. AAA. 2008.
- Borst, Ch. Fischer, M. Hirzinger, G.: “Grasping the Dice by Dicing the Grasp”. Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems , 3692-3697. 2003.
- Carroza, M. C. Dario, P. Lazzarini, R. Massa, B. Zecca, M. Roccella, S. Sacchetti, R.: “An actuator system for a novel biomechatronics prosthetic hand”. 2000.
- Carrozza, M. Massa, B. Micera, S. Lazzarini, R. Zecca, M. Dario, P.: “The Development of a Novel Prosthetic Hand—Ongoing Research and Preliminary Results”. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics , 7, 108-114. 2002.
- Carrozza, M. Massa, B. Micera, S. Zecca, M. Dario, P. A “Wearable” Artificial Hand for Prosthetics and Humanoid Robotics Applications”. Proceedings of the IEEE –RAS International Conference on Humanoid Robots. 2001.
- Caurin, G. Albuquerque, A. Mirandola, A.: ”Manipulation Strategy for an Anthropomorphic robotic hand”. Proceedings of 2004/RSJ Internatinal Conference on Intelligent Robots and Systems , pp 1656-1661. 2004.
- Ceccarelli, Marco. Nava Rodriguez, Nestor Eduardo. Carbone, Giuseppe.: “Design and tests of a three finger hand with 1-DOF articulated fingers”. Robotica , 00, pp 1-14. 2005.
- Ceccarelli, Marco. Nava Rodríguez, Nestor Eduardo. Carbone, Giuseppe.: “Optimal Design of Driving Mechanism in a 1 DOF Antropomorphic Finger”. Proceeding of CK2005, International Workshop on Computational Kinematics , pp 1-16. 2005.
- Ciocarlie, Matei. Goldfeder, Corey. Allen, Peter.: “Dexterous Grasping via Eigengrasps: A Low-dimensional Approach to a High-complexity Problem”. RSS 2007 Workshop Robot Manipulation: Sensing and Adapting to the Real World. 2007.

- Ciocarlie, Matei. Lackner, Claire. Allen, Peter.: “Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks”. IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. 2007.
- Ciocarlie, Matei. Miller, Andrew and Allen, Peter.: “Grasp Analysis Using Deformable Fingers”. IROS . 2005.
- Córdova, J. G.: “Estudio Y Desarrollo De Primitivas Motoras Para Manipulación Con Manos Robóticas Antropomorfas”. XXII Jornadas de Automática. 2001.
- Cuijpers, R.H. Jeroen, B. J. S. Brenner, E.: “On the Relation Between Object Shape and Grasping Kinematics”. J Neurophysiol , 2598–2606. 2004.
- Dario, P. Carrozza, M. Menciassi, A. Micera, S. Zecca, M. Cappiello, G. Sebastiani, F. Freschi, C.: “On the development of a cybernetic hand prosthesis”. Third IARP International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, IARP2002 . 2002.
- Dario, Paolo. Laschi, Cecilia. Carrozza, Maria Chiara. Guglielmelli, Eugenio. Teti, Giancarlo. Massa, Bruno. Zecca, Massimiliano. Taddeucci, Davide. Leoni, Fabio.: “An Integrated Approach for the Design and Development of a Grasping and Manipulation System in Humanoid Robotics”. 2003.
- Dechev, N. Cleghorn, W.L. Naumann, S.: “Multi-Fingered, Passive Adaptive Grasp Prosthetic Hand: Better Function and Cosmesis”. Proceedings of the 17th Canadian Congress of Applied Mechanics. 1999.
- Doersam, Th. Hammerschmidt. O. Muñoz, A.: “A study of multifingered gripper control”. 1997.
- Ekvall, S and Kragic, D.: “Interactive Grasp Learning Based on Human Demonstration”. In IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004.
- El Koura, George. and Singh, Karan.: “Handrix: Animating the Human Hand”. Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. 2003.
- Featherstone, R. Thiebaut, S.S. Khatib, O.: “A general contact model for dynamically-decoupled force/motioncontrol”. Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on , Volume: 4, 3281-3286. 1999.
- Folgheraiter, Michele. Gini, Giuseppina. Perkowski, Marek. Pivtoraiko, Mikhail.: “Blackfingers a Sophisticated Hand Prosthesis”. 2002.

- Goldenberg, A.: "Analysis of Force Control Based on Linear Models". Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on , Vol 2, 1348-1353. 1992.
- Goldenberg, A.: "Implementation Of Force And Impedance Control In Robot Manipulators". Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference on , vol.3. 1988.
- Goldfeder, Corey. Allen, Peter K. Lackner, Claire. Pelossof, Raphael.: "Grasp Planning via Decomposition Trees". IEEE Int. Conference on Robotics and Automation. 2007.
- Gongliang Guo, William Gruver, Xikang Kian.: "A robotic hand mechanism with rotating fingertips and motor tendon actuators". IEEE , 1023, 1028. 1991.
- Gongliang Guo, William Gruver, Xikang Qian.: "A New Design for a Dextrous Robotic Hand Mechanism". IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics , 35-38. 1992.
- Gow, D. J. Douglas, W. Geggie, C. Monteith, E. Stewart, D.: "The development of the Edinburgh modular arm system". Proceedings Instn Mechanical Engineers , 215, 291-298. 2001.
- Gu, Yi. Weng, Xinhua. Yang, Ruqing and Song, Tao.: "Kinematic Design of a Radius-Variable Gripper with 1-D.O.F. used in High-voltage Hot-line Cleaning Robot". International Journal of Advanced Robotic Systems, , Vol. 5. 2008.
- Han, L. Trinkle, J. Li, Z.: "Grasp Analysis as linear Matrix Inequality Problems". Technical report, Texas A & M University, Tech No. CS98 -020 . 1998.
- Ishikawa, Yasuhiro. Yu, Wenwei. Yokoi, Hiroshi. Kakazu, Yukinori.: "Development of Robots Hands with an Adjustable Transmitting Mechanism". Intelligent Engineering System Through Neural Networks , 10, 631-636. 2000.
- Jingzhou Yang, Esteban Peña Pitarch, Karim Abdel-Malek, Amos Patrick, Lars Lindkvist.: "A multi-fingered hand prosthesis". Elsevier, Mechanism and Machine Theory , 39, pp 555-581. 2004.
- Karthikeyan Duraisamy, Obiajulu Isebor, Alba Perez, Marco P Schoen, D Subbaram Naidu.: "Kinematic Synthesis for Smart Hand Prosthesis". The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. , 1135-1140. 2006.

- Kawasaki Haruhisa, Mori Tetsuya, Yoshikawa Keisuke, Ito Satoshi.: “Anthropomorphic Robot Hand "Gifu Hand III" and Grasping Reflex”. Nippon Robotto Gakkai Gakujutsu Koenkai Yokoshu , 20, in CD Rom. 2002.
- Kragic, Danica. Miller, Andrew T. and Allen, Peter K.: “RealTime Tracking Meets Online Grasp Planning”. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, 2001 . , 3, 2460-2465. 2004.
- Kurillo, Gregorij. Bajd, Tadej. Kamnik, Roman.: “Static Analysis of Two-Fingered Grips”. Journal of Automatic Control , 12, 38-45. 2002
- Lalibertéy, Thierry. Birgleny, Lionel. Gosselin, Clément M.: “Underactuation in robotic grasping hands”. Machine Intelligence & Robotic Control , 4, 1-11. 2002
- Lane, David. Davies, Bruce. Robinson, Graham. O’Brien, Desmond. Sneddon, Jim. Seaton, Euan. Elfstrom, Anders.: “The AMADEUS Dextrous Subsea Hand:Design, Modeling, and Sensor Processing”. IEEE Journal of Oceanic Engineering , 24, 96-111. 1999.
- Lotti, F. Vassura, G.: “A Novel Approach to Mechanical Design of Articulated Fingers for Robotic Hands”. 2002.
- Lotti, F. Vassura, G.: “Sviluppo di Soluzioni Innovative per la Struttura Meccanica di Dita Articolare per Mani Robotiche”. Associazione Italiana per l’Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) XXXI Convegno Nazionale . 2002.
- Lotti, F.Tiezzi, P. Vassura, G.Biagiotti, L. Melchiorri, C.: “UBH 3: an anthropomorphic hand with simplified endo-skeletal structure and soft continuous fingerpads”. 2004.
- Lynch, K. Mason, M.: “Dynamic Nonprehensile Manipulation Controllability Planning and Experiments”. International Journal of Robotics Research. 1997.
- L298 DATASHEET, Disponivel em: www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/2/9/8/L298.shtml
- Mas Sanso, Ramon. Thalmann, Daniel.: “A Hand Control and Automatic Grasping System for Synthetic Actors”. Computer Graphics Forum , 13, 167-177. 1994.
- Massa, B. Roccella, S. Carrozza, M. C. Dario, P.: “Design and Development of an Underactuated Prosthetic Hand”. Proceedings of the 2002 IEEE, International Conference on Robotics & Automation , pp 3374-3379. 2002.

- Miller, A. Allen, P. Santos, V. Valero-Cuevas, F.: "From robotic hands to human hands: a visualization and simulation engine for grasping research". *Industrial Robot: An International Journal* , pp 55-63. 2005.
- Miller, A. Allen, P. Santos, V. Valero-Cuevas, F.: "From robotic hands to human hands: a visualization and simulation engine for grasping research". *Industrial Robot: An International Journal* , pp 55-63. 2005.
- Miller, A. T. and Allen, P. K.: "GRASPIT Aversatile Simulator for Robotic Grasping".
- Miller, A. T. Knoop, S. Christensen, H. I. Allen, P.K.: "Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives". *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* , pp 1824-1829. 2003.
- Miller, A.T. Allen, P.K.: "Examples of 3D Grasp Quality Computations". *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation* , 1240-1246. 1999.
- Miller, A.T. Allen, P.K.: "GraspIt!: A Versatile Simulator for Grasp Analysis". *Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition* , 1251-1258. 2000
- Miller, A.T.: "GraspIt!: A Versatile Simulator for Robotic Grasping". PhD thesis, Columbia University. 2001.
- Mirza, Khalid. Hanes, Mark. and Orin, David.: "Dynamic Simulation for Multiplecontact Power Grasp for Dexterous Hands". *Robotics and Manufacturing* , 4, 59-62. 1992.
- Mishra, B. Schwartz, J.T. Sharir, M.: "On the existence and Synthesys of Multifinger Positive Grips". *Algorithmica* , 2, 541-558. 1987.
- Montambault, S. Gosselin, C.: "Analysis of Underactuated Mechanical Grippers". *Journal of Mechanical Design ASME* , 123, 367-374. 2001.
- Montana, D.: "Contact stability for two-fingered grasps". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* , Vol. 8, 421-430. 1992.
- Montana, D.: "The condition for contact grasp stability". *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on* , vol.1, 412-417. 1991.
- Nava Rodríguez, Nestor Eduardo. Carbone, Giuseppe. Ceccarelli, Marco.: "Optimal design of driving mechanism in a 1-DOF anthropomorphic finger". *Mechanism and Machine Theory* , 41, pp 897-911. 2006.
- Nuseirat, Al-Fahed. Al-Musili, A.M. Ar, S.M.: "Optimum Grasp and Coordinated Manipulation by Articulated Multifingered Gripper". *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and*

- Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik , Volume 81 Issue 3, 185-196. 2001.
- O'Toole, Kevin T. and McGrath, Mark M.: "Mechanical Design and Theoretical Analysis of a Four Fingered Prosthetic Hand Incorporating Embedded SMA Bundle Actuators". International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences Volume 1 Number 2. 2008.
- Ogahara, Yoichi. Kawato, Yusuke. Takemura, Kenjiro. Maeno, Takashi.: "A Wire-Driven Miniature Five Fingered Robot Hand using Elastic Elements as Joints". Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems , pp 2672-2677. 2003.
- Payandeh, Shahram. Saif, Mehrdad.: "Force and position control of grasp in multiple robotic mechanisms". Journal of Robotic Systems , Volume 13 Issue 8, Pages 515 - 525. 1998.
- Pelossof, Raphael. Miller, Andrew. Allen, Peter. Jebara, Tony.: "An SVM Learning Approach to Robotic Grasping". Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation , pp. 3215-3218. 2004.
- Pollard, N. Gilbert, R.: "Tendon Arrangement and Muscle Force Requirements for Humanlike Force Capabilities in a Robotic Finger". Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2002.
- Pollard, N. Zordan, V.: "Physically Based Grasping Control from Example". Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. 2005.
- Pollard, N.: "Closure and Quality Equivalence for Efficient Synthesis of Grasps from Examples". International Journal of Robotic Research , 23, 595-613. 2004.
- Pollard, N.: "Synthesizing Grasp from Generalized Prototypes". IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation. 1996.
- Ponce, Jean. Sullivan, Steve. Sudsang, Attawith. Boissonnat, Jean-Daniel and Merlet, Jean-Pierre.: "On Computing Four-Finger Equilibrium and Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects". The International Journal of Robotics Research , 11-35. 1997.
- Pons,J.L. Ceres, R. Pfeiffer, F.: "Multifingered dextrous robotics hand design and control: a review". Robotica , 17, 661-674. 1999.
- Prattichizzo, D. Bicchi, A.: "Dynamic Analysis of Mobility and graspability of general manipulation systems". IEEE Trans. Robotics Automat.1997.

- Raparelli, T. Mattiazzo, G. Mauro, S. Velardocchia, M.: "Design and development of a pneumatic anthropomorphic hand". *Journal of Robotic Systems* , Vol. 17, 1-15. 1999.
- Roccella, S. Canozza, M. Cappiello, G. Zecca, M. Miwa, H. Itoh, K. Matsumoto, M.: "Design, fabrication and Preliminary Results of a Novel Anthropomorphic Hand for Humanoid Robotics: RCH-1.". *Proceedings 01 2004 IEEWRSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* , pp 266-271. 2004.
- Rosnowski, Grzegorz. Drzewiecki, Marek.: "A new approach to the prosthetic finger design". *TCSET* , pp 545-547. 2004.
- Sancho-Bru, J. Pérez-González, A. Vergara, M. Giurintano, D.: "A 3D Biomechanical Model of the Hand for Power Grip". *Transactions of the ASME* , 125, 78-83. 2003.
- Shouche, M.S. Genceli, H. Nikolaou, M.: "Effect of On-line Optimization Techniques on Model Predictive Control and Identification". *Manual*. 2002.
- Tegin, Johan and Wikander, Jan.: "Robotic Grasping - Simulating Control". *Mekatronikmöte*. 2005.
- Ungureanu, Loredana. Drăgulescu, Doina.: "Modeling a Human Finger as an Automatic System". *2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence*. 2005.
- Valero-Cuevas, F.J.: "A mathematical approach to the mechanical capabilities of limbs and fingers". *Progress in Motor Control*. 2006.
- Valero-Cuevas, F.J.: "Applying principles of robotics to understand the biomechanics, neuromuscular control and clinical rehabilitation of human digits". *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation* , 270-275. 2000.
- Vande Weghe, Michael. Rogers, Matthew. Weissert, Michael. Matsuoka, Yoky.: "The ACT Hand: Design of the Skeletal Structure". *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation* , pp 3375-3379. 2004.
- Vaz, A. Hirai, S. : "Modeling a Hand Prosthesis with Word Bond Graph Objects". 2004.
- Vinet, R. Lozac'h, Y. Beaudry, N. Drouin, G. (1995).: "Design methodology for a multifunctional hand prosthesis". *Journal of Rehabilitation Research and Development* , 32, 316-324. 1995.

- Volpe, R. Khosla, P.: “An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators”. *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on* , vol.2. 1992.
- Wege, A. Hommel, G.: “Development and Control of a Hand Exoskeleton for Rehabilitation of Hand Injuries”. 2003.
- Yamano, Ikuo. Takemura, Kenjiro. Maeno, Takashi.: “Development of a Robot Finger for Five-fingered Hand using Ultrasonic Motors”. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems* , pp 2648-2653. 2003.
- Zeng. Ganwen, Hemami. Ahmad.: “An overview of robot force control”. *Robotica* , volume 15, pp 473 – 482. 1997.
- Zhang, Hong. Tanie, Kazuo. Maekawa, Hitoshi.: “Dextrous Manipulation Planning by Grasp Transformation”. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* , 3055-3060. 1996.
- Zhang, Y. Han, Z. Zhang, H. Shang, X. Wang, T. Guo, W. Gruver, W.: “Design and Control of the BUAA Four-Fingered Hand”. *Proceedings of the 2001 IEEE, International Conference on Robotics 8, Automation* , pp 2517-2522. 2001
- Žlajpah, Leon.: “Simulation of Robotic Manipulators”. *15th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2006)* . 2006.

Apêndice A

Relação Artigos Publicados

Avilés, Oscar F. Rosário, João Mauricio. Uribe, Álvaro. Niño, Paola. Gutierrez, Ricardo.: “*Anthropomorphic Grippers - Modelling, Analysis and Implementation*”, in Recent advances in Control Systems, Robotics and Automation- Third edition ISBN: 978-88-901928-6-9 , **Aceito para publicação em 2009.**

Avilés, Oscar F. Rosário, João Mauricio. Uribe, Álvaro. Niño, Paola. Gutierrez, Ricardo.: “*Anthropomorphic Grippers - Modelling, Analysis and Implementation*”, in International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing ISSN 1828 - 6984. **Aceito para publicação em 2009.**

Uribe, Álvaro. Rosário, João Mauricio. Avilés Sánchez, Oscar. Niño, Paola Suarez.: “*Virtual Environment for Visualization and Movement Control of an Anthropomorphic Gripper*”, in Recent advances in Control Systems, Robotics and Automation- Third edition ISBN: 978-88-901928-6-9. **Aceito para publicação em 2009.**

Uribe, Álvaro. Rosário, João Mauricio. Avilés Sánchez, Oscar. Niño, Paola Suarez.: “*Virtual Environment for Visualization and Movement Control of an Anthropomorphic Gripper*”, in International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing ISSN 1828 - 6984. **Aceito para publicação em 2009.**

Avilés, Oscar F. Rosário, João M. Joffre, Álvaro. and Lara, Fabian.: “*Five Fingered Anthropomorphic Hand Design: Muc- 1*”, 7th Brazilian Conference on Dynamics, Controls and Applications, DINCON 2008, UNESP Campus Presidente Prudente.

Avilés, Oscar, Rosário, João Mauricio. Uribe, Álvaro. Niño, Paola.: “*Diseño De Un Sistema Mecatrónico Antropomórfico De Cinco Dedos*”, XIII Congreso Latinoamericano de Control Automático | VI Congreso Venezolano de Automatización y Control, Venezuela 2008.

- Avilés, O. F. Rosário, J. M. Hermini, H.A.: “*Modelling and Design of a prehension System for Robotic grippers Applications*”, International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing. Issue 4. ISSN 1828 - 6984. 2007
- Avilés, O. F. Rosário, J. M. Hermini, H.A.: “*Modelling and Design of a prehension System for Robotic grippers Applications*”, in Recent advances in Control Systems, Robotics and Automation- Second edition. ISBN: 978-88-901928-3-8. 2007
- Avilés S, Oscar. Rosário, João Mauricio. Simanca, Pedro. Niño, Paola A.: “*Development of a Prehension System For Robotics Gripper Application*”, 23rd ISPE International Conference on CAD/CAM, ROBOTICS & Factories of the Future, CARS & FOF 07, Bogotá, 2007
- Avilés, Oscar. Rosário, João Mauricio. Niño, Paola A: “*Mecanismo de Preensão Direcionado a Aplicações de Grippers Robóticos ou Mãos Antropomórficas*”, 6o Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications, DINCON 2007, UNESP – Campus de São José do Rio Preto, SP, Brazil, 2007.
- Avilés, Oscar. Simanca, Pedro. Niño, Paola.: “*Diseño y Construcción de un Dedo para Grippers Robóticos*”, 8^{vo} congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM 8, Perú. 2007.
- Avilés, Oscar. Rosário, João Mauricio. Niño, Paola A.: “*Mecanismo de Preensão Direcionado a Aplicações de grippers Robóticos ou Mãos Antropomórficas*”, Memories of 6th Brazilian conference on Dynamics, Control and their applications, 21-25 May. 2007

Apêndice B

Cálculo da Cinemática de um dedo (*Matlab*TM)

```
% Graficos das matrizes de transformação
% Para uma mão real

function simulacion()
clear all; close all;
%-----
%                               definição dos ângulos em graus
%-----
t=0:0.1:5;
n=length(t);
%q1=zeros(1,n);
q1=-pi/2:pi/(n-1):pi/2;           %angulo entre -90 e 90
%q2=zeros(1,n);
q2=-pi/12:pi/(6*(n-1)):pi/12;    %angulo entre -15 e 15 graus
%q3=zeros(1,n);
q3=-pi/12:pi/(6*(n-1)):pi/12;    %angulo entre -15 e 15 graus
%q4=zeros(1,n);
q4=-pi/12:pi/(6*(n-1)):pi/12;    %angulo entre -15 e 15 graus
q5=0:pi/(2*(n-1)):pi/2;          %angulo entre 0 e -90
q6=0:(11*pi)/(18*(n-1)):11*pi/18; %angulo entre 0 e 110 graus
q7=0:pi/(2*(n-1)):pi/2;          %angulo entre 0 e -90

for i=1:n;

[nx(i),ny(i),nz(i),sx(i),sy(i),sz(i),ax(i),ay(i),az(i),px(i),py(i),pz(i)]=eq_
dedo_medio(q1(i),q2(i),q3(i),q4(i),q5(i),q6(i),q7(i));
end

subplot(2,2,1);hold on;plot(t,nx,'y');plot(t,ny,'r');plot(t,nz,'b');
grid; axis([0 5 -1 1]);title('N');
subplot(2,2,2);hold
on;plot(t,sx,'y');plot(t,sy,'r');plot(t,sz,'b');title('S');
grid; axis([0 5 -1 1]);
subplot(2,2,3);hold
on;plot(t,ax,'y');plot(t,ay,'r');plot(t,az,'b');title('A');
grid; axis([0 5 -1 1]);
subplot(2,2,4);hold
on;plot(t,px,'y');plot(t,py,'r');plot(t,pz,'b');title('P');
grid; axis([0 5 -10 10]);
```

```

% Função para o calculo geral da posição da ponta do dedo medio.
function
[nx,ny,nz,sx,sy,sz,ax,ay,az,px,py,pz]=eq_dedo_medio(q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7)
%-----
%           definição das varaiaveis todas as medidas em metros
%-----
p=0.1;
f1m=5;
f2m=3.5;
f3m=2.5;

%Direção do vetor unitário N
nx = cos(q1)*[cos(q2)*cos(q3+q4)*cos(q5+q6+q7)-
sin(q2)*sin(q5+q6+q7)]+sin(q1)*sin(q3+q4)*cos(q5+q6+q7);
ny = sin(q1)*[cos(q2)*cos(q3+q4)*cos(q5+q6+q7)-sin(q2)*sin(q5+q6+q7)]-
cos(q1)*sin(q3+q4)*cos(q5+q6+q7);
nz = sin(q2)*cos(q3+q4)*cos(q5+q6+q7)+cos(q2)*sin(q5+q6+q7);

%Direção do vetor unitário S
sx = cos(q1)*[-cos(q2)*cos(q3+q4)*sin(q5+q6+q7)-sin(q2)*cos(q5+q6+q7)]-
sin(q1)*sin(q3+q4)*sin(q5+q6+q7);
sy = sin(q1)*[-cos(q2)*cos(q3+q4)*sin(q5+q6+q7)-
sin(q2)*cos(q5+q6+q7)]+cos(q1)*sin(q3+q4)*sin(q5+q6+q7);
sz = -sin(q2)*cos(q3+q4)*sin(q5+q6+q7)+cos(q2)*cos(q5+q6+q7);

%Direção do vetor unitário A
ax = -cos(q1)*cos(q2)*sin(q3+q4)+sin(q1)*cos(q3+q4);
ay = -sin(q1)*cos(q2)*sin(q3+q4)-cos(q1)*cos(q3+q4);
az = -sin(q2)*sin(q3+q4);

%Vetor de posição respeito do frame de referencia.
px =
(cos(q1)*cos(q2)*cos(q3+q4)+sin(q1)*sin(q3+q4))*(f3m*cos(q5+q6+q7)+f2m*cos(q5
+q6)+f1m*cos(q5))+p*(cos(q1)*cos(q2)*cos(q3)+sin(q1)*sin(q3))+cos(q1)*sin(q2)
*(-f3m*sin(q5+q6+q7)-f2m*sin(q5+q6)-f1m*sin(q5));
py = [sin(q1)*cos(q2)*cos(q3+q4)-
cos(q1)*sin(q3+q4)]*[f3m*cos(q5+q6+q7)+f2m*cos(q5+q6)+f1m*cos(q5)]+p*[sin(q1)
*cos(q2)*cos(q3)-cos(q1)*sin(q3)]+sin(q1)*sin(q2)*(-f3m*sin(q5+q6+q7)-
f2m*sin(q5+q6)-f1m*sin(q5));
pz =
sin(q2)*(cos(q3+q4)*(f3m*cos(q5+q6+q7)+f2m*cos(q5+q6)+f1m*cos(q5))+p*cos(q3))
-cos(q2)*(-f3m*sin(q5+q6+q7)-f2m*sin(q5+q6)-f1m*sin(q5));

```

Apêndice C

Código de Programação implementado no Robô ABB

```
%%%  
  VERSION:1  
  LANGUAGE:ENGLISH  
%%%  
MODULE OSFER5  
  CONST jointtarget pos0:=[[-30,0.04,21.36,90.63,-88.07,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  CONST      robtarget      p20:=[[903.96,-598.65,848.5],[0.634192,0.713654,-0.044255,-0.294177],[-1,1,-  
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  CONST      robtarget      p10:=[[919.97,-607.9,1203.49],[0.682234,0.689732,-0.172569,-0.170432],[-  
1,1,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  CONST      robtarget      p2:=[[709.28,292.65,584.2],[0.923869,-1.4E-05,0.382709,-1.5E-05],[0,0,-  
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  PERS tooldata mao:=[TRUE,[[227.918,9.23821,-10.9193],[1,0,0,0]],[5,[85,0,65],[1,0,0,0],0.01,0.01,0.01]];  
  CONST      robtarget      ini:=[[955.01,554.78,1194.96],[0.706952,0.000148,0.707262,-0.000163],[0,-  
1,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  CONST      robtarget      p1:=[[1013.81,12.87,819.88],[0.806993,-0.000294,0.590561,0.000937],[0,0,-  
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  !#####  
  PROC inicial()  
    MoveAbsJ [[120,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v500,z50,mao;  
  ENDPROC  
  !#####  
  PROC Pos_1()  
    MoveAbsJ [[0,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v100,z50,mao;  
  ENDPROC  
  !#####  
  PROC Peg_obj1()  
    MoveAbsJ [[0,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v300,z50,mao;  
    ! MoveJ p1,v100,z50,mao;  
  ! MoveJ p1,v100,z50,mao;  
    MoveL Offs(p2,216,-100,400),v200,z0,mao;  
    MoveL Offs(p2,216,-100,300),v200,z0,mao;  
    MoveL Offs(p2,216,-100,60),v100,z0,mao;  
    WaitTime 1;  
    Set DO10_1;  
    Set DO10_2;  
  ! Set DO10_3;  
    WaitUntil DI10_1=1;  
    Reset DO10_1;
```

```

Reset DO10_2;
! Reset DO10_3;
MoveL Offs(p2,216,-100,300),v200,z0,mao;
! MoveAbsJ [[0,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v300,z50,mao;
ENDPROC
!#####
PROC LEVA_OBJ1()
! MoveAbsJ [[0,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v300,z50,mao;
MoveL Offs(p2,216,-400,300),v100,z0,mao;
MoveL Offs(p2,216,-400,60),v100,z0,mao;
WaitTime 1;
! Set DO10_1;
! Set DO10_2;
Set DO10_3;
WaitUntil DI10_1=1;
! Reset DO10_1;
! Reset DO10_2;
Reset DO10_3;
MoveL Offs(p2,216,-400,300),v200,z0,mao;
MoveAbsJ [[0,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v300,z50,mao;
ENDPROC
!#####
PROC APERTO_MAO()
MoveAbsJ [[-40,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v300,z50,mao;
MoveL p10,v200,z50,mao;
MoveL p20,v200,z50,mao;
WaitTime 1;
Set DO10_1;
! Set DO10_2;
! Set DO10_3;
WaitUntil DI10_1=1;
Reset DO10_1;
! Reset DO10_2;
! Reset DO10_3;
MoveL Offs(p20,0,0,20),v200,z10,mao;
MoveL Offs(p20,0,0,-20),v200,z10,mao;
MoveL Offs(p20,0,0,20),v200,z10,mao;
MoveL Offs(p20,0,0,0),v200,z10,mao;
WaitTime 1;
! Set DO10_1;
! Set DO10_2;
Set DO10_3;
WaitTime 2;
! Reset DO10_1;
! Reset DO10_2;
Reset DO10_3;
ENDPROC
!#####

```

```

PROC TRAZ_OBJ1()
  MoveAbsJ [[30,0,0,0,-45,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v300,z50,mao;
ENDPROC
!#####
! INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL
!#####
PROC main()
! MoveL p2,v100,z50,mao;
! MoveL p10,v200,z50,mao;
! MoveL p20,v200,z50,mao;
IF DI10_3=1 AND DI10_4=1 AND DI10_5=0 THEN
  inicial;
ENDIF
!-----
IF DI10_3=1 AND DI10_4=0 AND DI10_5=0 THEN
  Peg_obj1;
ENDIF
!-----
IF DI10_3=0 AND DI10_4=1 AND DI10_5=0 THEN
  LEVA_OBJ1;
ENDIF
!-----
IF DI10_3=1 AND DI10_4=1 AND DI10_5=1 THEN
  APERTO_MAO;
ENDIF
ENDPROC
ENDMODULE

```

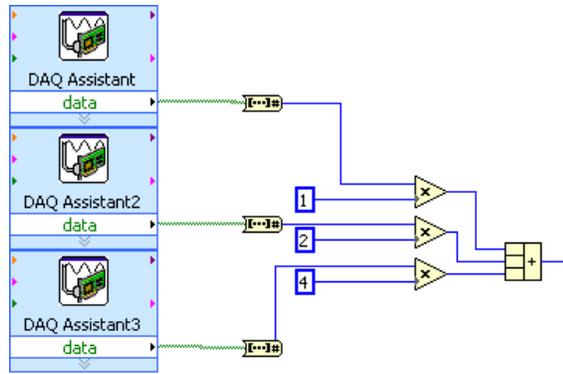



Figura D.3: Aquisição dos sinais E/S provenientes do robô

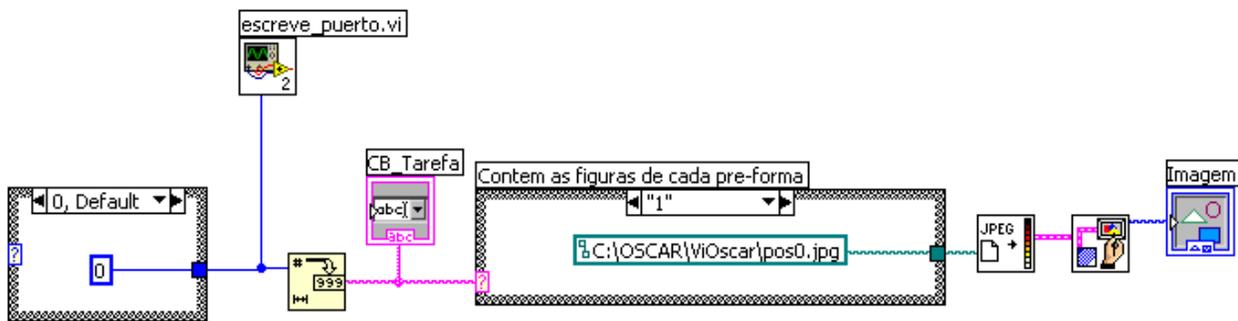


Figura D.4: Seleção imagem a ser apresentada segundo E/S

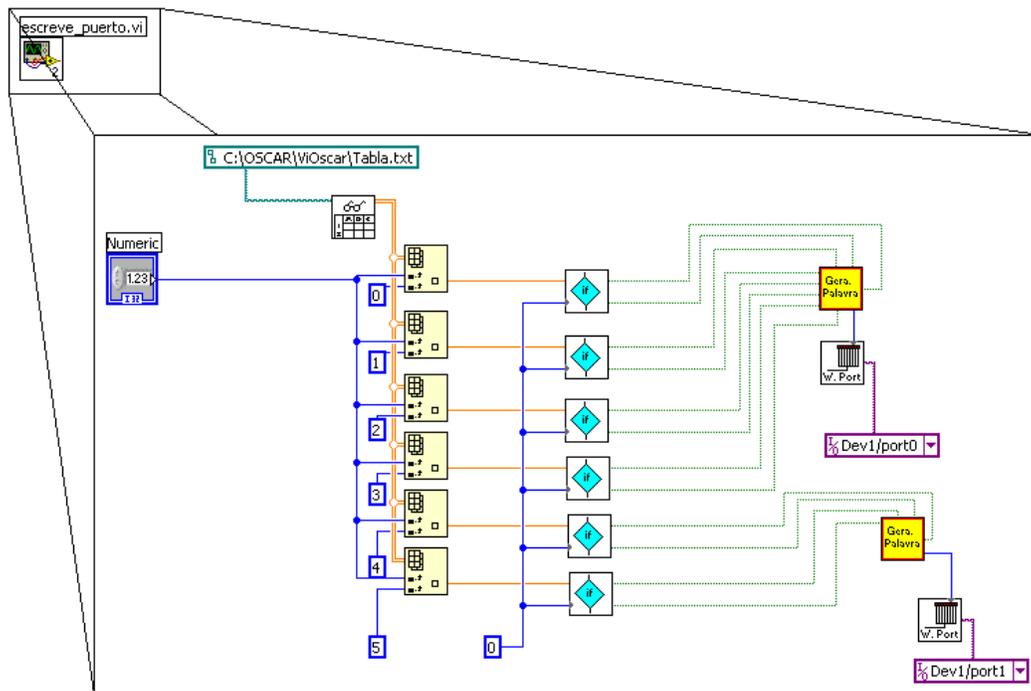


Figura D.5: Escrita na porta digital da palavra obtida da tabela de pré formas

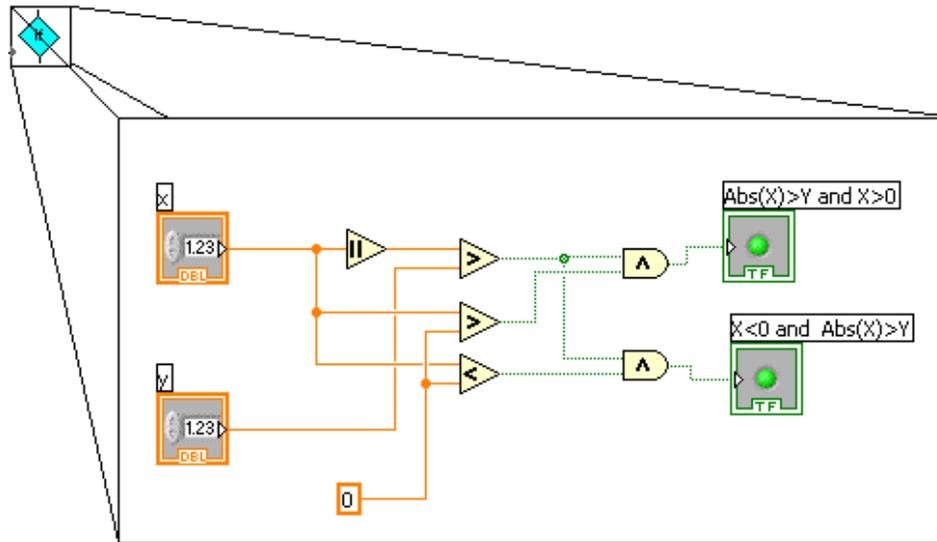


Figura D.6: Controle sentido de giro do motor

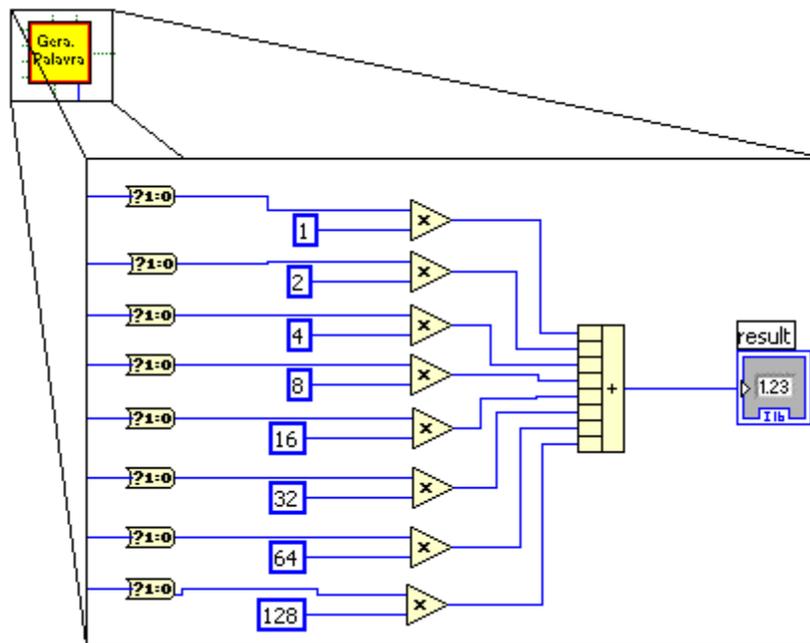


Figura D.7: Formação da palavra de controle para o *Digital Port*

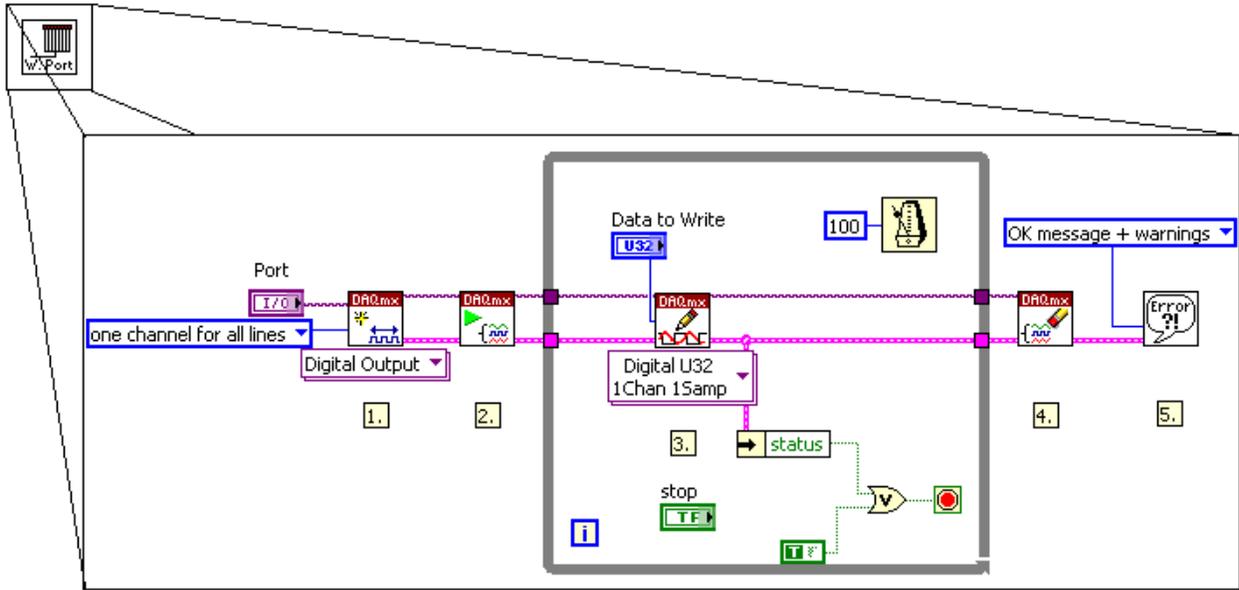


Figura D.8: Escrita no *Digital Port*

Apêndice E

PLANOS

