

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

**Uma Contribuição ao Desenvolvimento de
Manipuladores Antropomórficos com Ênfase
na Utilização de Músculos Artificiais**

Autor: Eduardo Felipe Aguiar Mendes
Orientador: Prof. Doutor Helder Aníbal Hermi
Co-orientador: Prof. Doutor Paulo R. G. Kurka

02/2007

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

Uma Contribuição ao Desenvolvimento de Manipuladores Antropomórficos com Ênfase na Utilização de Músculos Artificiais

Autor: Eduardo Felipe Aguiar Mendes

Orientador: Prof. Doutor Helder Aníbal Hermini

Co-orientador: Prof. Doutor Paulo R. G. Kurka

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2007

S.P. – Brasil

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

M522u	<p>Mendes, Eduardo Felipe Aguiar Uma contribuição ao desenvolvimento de manipuladores antropomórficos com ênfase na utilização de músculos artificiais / Eduardo Felipe Aguiar Mendes. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.</p> <p>Orientador: Helder Aníbal Hermini. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Manipuladores (Mecanismo). 2. Robótica. 3. Robôs. 4. Metal de memória de forma. 5. Músculos. 6. Braço mecânico. 7. Geometria cinemática. 8. Biomecânica. I. Hermini, Helder Aníbal. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: A contribution to the development of anthropomorphic manipulators with emphasis in the use of artificial muscles.

Palavras-chave em Inglês: Anthropomorphic manipulator, Robotic arm, Artificial muscle, SMA, Shape memory alloy, Geometric modelling, Direct kinematics modelling, Inverse kinematics modelling.

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e projeto mecânico.

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Franco Giuseppe Dedini, Jocarly Patrocínio de Souza.

Data da defesa: 26/02/2007

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

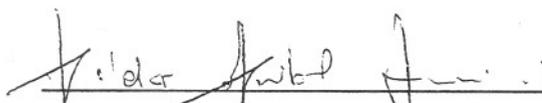
**Uma Contribuição ao Desenvolvimento de
Manipuladores Antropomórficos com Ênfase na
Utilização de Músculos Artificiais**

Autor: Eduardo Felipe Aguiar Mendes

Orientador: Prof. Doutor Helder Aníbal Hermini

Co-orientador: Prof. Doutor Paulo R. G. Kurka

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

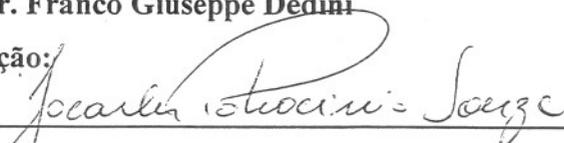


Prof. Dr. Helder Anibal Hermini, Presidente

Instituição:


Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Instituição:


Prof. Dr. Jocarly Patrocínio de Souza

Instituição:

Campinas, 26 de Fevereiro de 2007

Agradecimentos

Á todas as pessoas que me ajudaram direta e indiretamente na confecção deste trabalho, meus sinceros agradecimentos:

- Meu Orientador Helder por mostrar o caminho a ser tomado;
- Meu co-orientador Kurka pelo apoio, disposição e experiência oferecidos;
- Professores, funcionários e colegas do departamento que me ajudaram durante todo o processo;
- Maurício Oliveira de Sant'Anna, Rosangelo Wilterson A. Ferreira e Mauro Romera, da Oficina Mecânica, que me ajudaram ativamente para a realização dos experimentos;
- Silvana Custódio Ribeiro, Denise Aparecida Villela, Juliana Ribeiro de Mendonça e Luciana Fidelis, da secretaria de pós-graduação, pela orientação, apoio e prestatividade;
- Almiro Franco da Silveira Jr., do Laboratório de Automação Integrada e Robótica, pela prontidão em ajudar;
- Girlene Otaviano Costa de Rosso, secretária do DPM, por toda prestatividade;
- Marcílio Messias da Silveira, técnico do laboratório de Mecatrônica, pelo apoio e auxílio;
- Liamara Gabriela Ferreira, minha companheira, pela compreensão, apoio e auxílio durante todo o processo;
- Maria Rufina Aguiar (minha mãe) e Antonia Viola Aguiar (minha avó) por apoiar e compreender meu afastamento em diversos momentos para me dedicar aos estudos.

Resumo

Mendes, Eduardo Felipe Aguiar, Uma Contribuição ao Desenvolvimento de Manipuladores Antropomórficos com Ênfase na Utilização de Músculos Artificiais. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho visou o estudo de manipuladores à semelhança do membro superior humano. Após o estudo do membro superior humano e dos robôs antropomórficos disponíveis tanto na indústria quanto no meio acadêmico, utilizaram-se teorias de modelagem geométrica, cinemática direta e cinemática inversa para realizar o modelo de um manipulador robótico antropomórfico. A partir desse modelo desenvolveu-se um software em LabVIEW de Cinemática Direta e Cinemática Inversa de operação em tempo real. Com a intenção de verificar os acionadores mais apropriados disponíveis atualmente, um estudo de músculos artificiais se seguiu, onde se observou a maior viabilidade do músculo artificial de SMA ativado eletricamente. Um protótipo de junta acionada por músculos artificiais foi desenvolvido e controlado via computador. Como resultado deste trabalho conclui-se que há ainda muito para ser desenvolvido na área de manipuladores antropomórficos, principalmente no que diz respeito aos músculos artificiais.

Palavras Chave: manipulador antropomórfico, braço robótico, músculo artificial, sma, metal de memória de forma, modelo geométrico, modelo cinemático direto, modelo cinemático inverso.

Abstract

Mendes, Eduardo Felipe Aguiar, A Contribution to the Development of Anthropomorphic Manipulators with Emphasis in the Use of Artificial Muscles. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado).

This work sought the study of manipulators to the similarity of the human superior member. After the study of human superior member, and of anthropomorphic robotics available in the industries and in the academic middle, it was used theories of geometric modelling, direct kinematics modelling and inverse kinematics modelling to make the model of a anthropomorphic robotic manipulator. With that model it grew a software in LabVIEW of real time Direct Kinematics and Inverse Kinematics. With the intention of verifying the available most appropriate actuators, a study of artificial muscles was proceeded, where the largest viability of the artificial muscle of SMA activated electrically was observed. A joint prototype actuated by artificial muscles was developed and controlled through computer. As a result of this work it is ended that there is still a lot to be developed in the area of anthropomorphic manipulators, mainly in what it concerns the artificial muscles.

Key Words: Anthropomorphic Manipulator, Robotic Arm, Artificial Muscle, SMA, Shape Memory Alloy, Geometric Modelling, Direct Kinematics Modelling, Inverse Kinematics Modelling.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura	xiv
1 Introdução.....	1
2 Robôs Antropomórficos	4
2.1 Introdução	4
2.2 Evolução Histórica.....	4
2.3 Anatomia e Fisiologia do Membro Superior Humano.....	7
2.3.1 Estrutura Articular	8
2.3.2 Sistema Muscular.....	10
2.3.3 Análise fisiológica articular e cinesiológica da Cintura Escapular.....	13
2.3.4 Movimentos fundamentais do Cotovelo	15
2.3.5 Movimentos do Punho	16
2.4 Robôs Industriais	17
2.4.1 Classificação dos Robôs Segundo sua Estrutura Mecânica.....	17
2.4.2 Estado da Arte dos Robôs Antropomórficos Industriais	23
2.5 Robôs Acadêmicos	26
2.6 Considerações Finais	36
3 Modelagem Cinemática.....	38
3.1 Sistemas de Referência	40
3.2 Modelo Geométrico	41
3.3 Problema Cinemático Direto	42

3.3.1	Transformação Homogênea.....	45
3.3.2	Orientação da Ferramenta Terminal	53
3.4	Problema Cinemático Inverso.....	55
3.5	Modelo Cinemático do Membro Superior Humano	58
3.5.1	Modelo Cinemático Direto	61
3.5.2	Modelo Cinemático Inverso.....	62
3.6	Considerações Finais	67
4	Utilização de Músculos Artificiais em Robôs Antropomórficos	68
4.1	Arranjo Antagônico	68
4.2	Músculos Artificiais Pneumáticos	70
4.3	Músculos Artificiais de Metal de Memória de Forma (SMA).....	73
4.4	Considerações Finais	82
5	Procedimento Experimental	83
5.1	Software de Cinemática em LabVIEW	83
5.1.1	LabVIEW.....	83
5.1.2	Software de Cinemática Direta.....	84
5.1.3	Software de Cinemática Inversa	85
5.2	Implementação do SMA	87
5.3	PWM.....	90
5.3.1	Modulação por largura de pulso simples	90
5.3.2	Modulação por largura de pulso múltipla	92
5.3.3	Modulação por largura de pulso senoidal (SPWM).....	94
5.4	Controle das Juntas	97
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	109
	Referências Bibliográficas	111
	Anexo I – Algoritmos.....	116
	Apêndice A – Manual do Pistão Elétrico da <i>SCM International</i>	124

Lista de Figuras

Figura 1.	Estudos de Leonardo da Vinci para um autômato antropomórfico.....	5
Figura 2.	Relógio de água de Ctesibius	5
Figura 3.	Instrumentos de Da Vinci.....	6
Figura 4.	Carro movido a molas de Da Vinci.....	6
Figura 5.	Unimate (1), T3 (2) e Puma (3).....	7
Figura 6.	Volume de trabalho da cintura escapular humana em coordenadas angulares e cartesianas	8
Figura 7.	Sistema Articular do Membro Superior	9
Figura 8.	Posicionamento dos músculos que atuam na cintura escapular e ombro [MGH (2007)]......	11
Figura 9.	Posicionamento dos músculos que atuam no cotovelo e punho [MGH (2007)]......	12
Figura 10.	Movimentos da articulação do cotovelo.....	16
Figura 11.	Robô de Coordenadas Cartesianas	18
Figura 12.	Robô de Coordenadas Cilíndricas.....	18
Figura 13.	Robô de Coordenadas Esféricas.....	19
Figura 14.	Robô SCARA.....	20
Figura 15.	Robô Paralelo	20
Figura 16.	Robô Antropomórfico	21
Figura 17.	Catálogo de Industrias de Robótica da IFR.....	23
Figura 18.	IRB 140, da ABB	24
Figura 19.	Área de trabalho do IRB 140.....	24
Figura 20.	IRB 7600 da ABB	25

Figura 21.	IRB 7600, com capacidade para 500 kg.....	25
Figura 22.	IRB 7600, com capacidade para 150 kg.....	26
Figura 23.	7R anthropomorphic robot-arm de Tondu et al. (2005).....	27
Figura 24.	Estrutura Antropomórfica 7R com terminologia das juntas baseada na fisiologia: (a) posição anatômica; (b) posição robótica - zero.	27
Figura 25.	Desenho mecânico do ombro do robô.....	28
Figura 26.	Punho do robô: (a) junta 6 (b) transmissão por barra de balanço da junta 7 (c) junta 7 29	29
Figura 27.	Diagrama geral das partes principais do desenho mecânico do braço robótico antropomórfico	30
Figura 28.	Vistas do 7R <i>Anthropomorphic arm</i> de Tondu et al.....	31
Figura 29.	LWR III.....	32
Figura 30.	Junta do LWR [IRM (2006)].....	33
Figura 31.	Componentes do LWR.....	34
Figura 32.	Anthroform Arm da Universidade de Washington	36
Figura 33.	Ilustração de juntas e elos em um robô PUMA [Fu (1987)].	38
Figura 34.	Problema Cinemático Direto e Inverso	39
Figura 35.	Sistema de referência	40
Figura 36.	Representação de um Sistema de Coordenadas de um robô	41
Figura 37.	Notação Denavit – Hartenberg.....	43
Figura 38.	Translação de um ponto u para um ponto v	49
Figura 39.	Ilustração de rotação no plano XY	50
Figura 40.	Analogia da representação da orientação do efetuador com navegação	55
Figura 41.	Geometria Plana associada com um robô planar com três elos [Craig (2005)].	57
Figura 42.	Modelo Antropomórfico Simplificado [Hermini (2000)].	59
Figura 43.	Modelo Geométrico do Membro Superior Humano	60
Figura 44.	Representação do Braço Robótico (visto de trás) em três pontos	63
Figura 45.	Junta do Ombro no plano ZY – braço acima e abaixo do nível do ombro.....	64
Figura 46.	$m_y < o_y$: (a) $m_z > o_z$; (b) $m_z < o_z$	64
Figura 47.	Plano das 2° e 3° juntas	65

Figura 48.	Cálculo da 2° e 3° juntas (junta 4 e 6 do modelo antropomórfico, respectivamente)	65
Figura 49.	Arranjo Antagônico [Daerden e Lefeber (2002)].	69
Figura 50.	Músculo trançado McKibben	70
Figura 51.	Tensão do músculo McKibben (N) e histerese em condições isobáricas (0, 100, 200, 300, 400 e 500 kPa): (a) trança de nylon; (b) trança de fibra de vidro. [Daerden e Lefeber (2002)]	72
Figura 52.	Fotografias do Robô Antropomórfico de Tondu	73
Figura 53.	O Efeito de Memória de Forma [Soares (1997)].	75
Figura 54.	Análise Microscópica: Estrutura dos Cristais [Soares (1997)].	76
Figura 55.	Análise Macroscópica: Mudanças na forma sobre condições de carga constantes [Soares (1997)].	76
Figura 56.	(a) Transformação de fase devida à variação da temperatura [Soares (1997)]; (b) Pseudoelasticidade; (c) Memória de forma.	78
Figura 57.	Dispositivos biomédicos: (a) Stent; (b) Filtro de Simon; (c) Arcos ortodônticos.	80
Figura 58.	Software de Cinemática Direta	84
Figura 59.	Software de Cinemática Inversa – Modelo Simplificado	86
Figura 60.	Diagrama de Blocos e Algoritmo do Software de Cinemática Inversa	86
Figura 61.	Foto do pistão de SMA importado para estudos	87
Figura 62.	Primeiro protótipo para junta do cotovelo	88
Figura 63.	Testes com o primeiro protótipo no Laboratório de Mecatrônica	88
Figura 64.	Protótipo final	89
Figura 65.	Inversor de fonte de tensão em ponte completa	91
Figura 66.	Formas de onda de saída moduladas por largura de pulso simples [Ahmed (2000)]: (a) sem modulação; (b) forma de onda modulada.	92
Figura 67.	Formas de onda moduladas por largura de pulso múltipla [Ahmed (2000)]: (a) $m = 2$; (b) $m = 3$.	93
Figura 68.	Ciclo de trabalho variável com $m = 5$ fixo [Ahmed (2000)].	94
Figura 69.	Padrão de modulação por largura de pulso senoidal [Ahmed (2000)].	94
Figura 70.	Formas de onda moduladas por largura de pulso senoidal [Ahmed (2000)]: (a) $M = 1$; (b) $M = 0,5$.	96

Figura 71.	Formas de onda moduladas por largura de pulso senoidal [Ahmed (2000)]: (a) sinais de referência; (b) forma de onda da tensão de saída.	97
Figura 72.	Malha de Controle do Protótipo	98
Figura 73.	Ajuste dos ângulos via ativação por arranjo antagônico	98
Figura 74.	Estabilização da junta.....	99
Figura 75.	Circuito para controle da corrente do protótipo via PWM (Oficina Mecânica)...	100
Figura 76.	Programa de controle do ângulo da junta.....	101
Figura 77.	Diagrama de Blocos do programa de controle do ângulo da junta	101
Figura 78.	Circuito do potenciômetro.....	102
Figura 79.	Gráfico equivalente à Tabela 4.....	103
Figura 80.	Tela do software onde são realizadas as configurações e exibidos dados intermediários.....	104
Figura 81.	Experimento sendo realizado	105
Figura 82.	Visualização do potenciômetro no eixo da junta	106
Figura 83.	Visualização do contrapeso na alavanca de extensão, e das ligações com o notebook (porta paralela e placa PCMCIA da <i>National</i>)	107
Figura 84.	Equipamentos utilizados	108
Figura 85.	Experimento completo	108
Figura 86.	Colocação do algoritmo no fórmula node	118

Lista de Tabelas

Tabela 1.	Tipos de Robôs segundo sua estrutura	22
Tabela 2.	Características dos atuadores [Tondu et al. (2005)].....	29
Tabela 3.	Características das juntas	60
Tabela 4.	Correspondência entre o ângulo da junta e a tensão capturada pelo software	102

Nomenclatura

Letras Latinas

- $A_{i,i+1}$ - matriz de transformação homogênea de rotação
- \underline{a} - versor ortonormal de orientação (aproximação do efetuador)
- a_i - distância offset entre a interseção do eixo z_{i-1} com o eixo x_i até a origem o i -ésimo frame ao longo do eixo x_i (ou a menor distância entre os eixos z_{i-1} e z_i)
- C_i - corpos móveis
- C_0 - corpo fixo
- d_i - distância entre a origem do $(i-1)$ -ésimo frame de coordenadas até a interseção do eixo z_{i-1} com o eixo x_i ao longo do eixo z_{i-1} .
- F - função não linear que descreve a posição e a orientação do elemento terminal da cadeia
- L_i - vetor de translação
- \underline{n} - versor ortonormal de orientação normal às direções s e a
- o_i - sistema de referenciais locais
- p - vetor posição
- Q - vetor das coordenadas generalizadas angulares ou prismáticas das juntas
- q_i - coordenadas generalizadas das juntas
- R - referencial
- RPY - ângulos de Row, Pitch, Yall
- \underline{s} - versor ortonormal de orientação (orientação)

T_n - matriz de transformação

\underline{X} - vetor posição (X, Y, Z, ψ , θ , ϕ), onde os três primeiros termos denotam a posição cartesiana e os três últimos a orientação do órgão terminal.

$\underline{X}_{m \times 1}$ - vetor ($m \leq 6$) que representa a posição e a orientação do elemento terminal da prótese no espaço de trabalho em coordenadas cartesianas.

Letras Gregas

α_i - ângulo offset entre os eixos z_{i-1} e z_i medidos no eixo x_i

$\underline{\theta}_{n \times 1}$ - vetor que representa os graus de liberdade da junta antropomórfica, onde n representa o número de graus de liberdade da prótese.

θ_i - angulo de junta feito entre os eixos x_{i-1} e x_i no eixo z_{i-1}

Abreviações

NITINOL - liga metálica de Níquel com Titânio

SMA - shape memory alloy

Siglas

ISO - International Organization for Standardization

IFR - International Federation of Robotics

Capítulo 1

Introdução

Ao longo da história, muitos pensadores se dedicaram a criar mecanismos capazes de imitar as capacidades humanas, como por exemplo Ctesibius, Leonardo da Vinci e Nicola Tesla. Entre os motivos desta busca está a criação de próteses para seres humanos com alguma deficiência, e a criação de dispositivos que possam substituir o trabalho manual.

Com o desenvolvimento da tecnologia, surgiram vários manipuladores mecânicos capazes de emular o braço humano na manipulação de objetos e realização de tarefas diversas. Dentre as diversas configurações estruturais possíveis para o desenvolvimento de manipuladores (Robô de Coordenadas Cartesianas/Pórtico, Robô de Coordenadas Cilíndricas, Robô de Coordenadas Esféricas, Robô SCARA, Robô Paralelo e Robô Antropomórfico ou Articulado), o modelo antropomórfico é o que possui melhor mobilidade, e apresenta estrutura geométrica mais complexa. O capítulo 2 trata-se do estudo do antropomorfismo no desenvolvimento de manipuladores.

O desenvolvimento de manipuladores mecatrônicos exige, antes de qualquer coisa, a modelagem geométrica e cinemática, de forma que estes possam ser controlados automaticamente. Nesse sentido, Fu (1987) descreve que um manipulador mecânico pode ser modelado geometricamente como uma cadeia articulada com vários corpos rígidos (elos) conectados em serie por juntas revolutas ou prismáticas acionadas por atuadores. Um final desta cadeia é fixado a uma base de suporte enquanto o outro é livre e possui uma ferramenta para

manipular objetos ou realizar tarefas. O movimento relativo das juntas resulta no movimento dos corpos, que posicionam o terminal efetuator em uma orientação desejada.

A partir da descrição geométrica é possível realizar o estudo cinemático, que se divide em duas questões fundamentais: encontrar as coordenadas cartesianas e de orientação a partir do conhecimento das variáveis angulares das juntas, e o processo inverso. A essas duas questões, estudadas no capítulo 3, se dá o nome de Problema Cinemático Direto e Problema Cinemático Inverso, respectivamente. Ainda neste capítulo são demonstrados o modelo geométrico, cinemático direto e cinemático inverso de um manipulador antropomórfico. O cinemático Inverso foi desenvolvido apenas para o cálculo do vetor de posição no plano cartesiano e trata-se de um algoritmo simplificado, proposto para o caso particular.

Entre os diversos estudos realizados atualmente a respeito de atuadores mais eficientes [Davis et al. (2003)], destaca-se a tentativa de emular o músculo humano. No decorrer do capítulo 4 são estudados os dois principais tipos de músculos artificiais disponíveis na literatura e sua utilização no desenvolvimento de braços robóticos: pneumáticos e de SMA (metal de memória de forma).

Segundo Daerden e Lefebber (2002), o músculo pneumático artificial mais utilizado e publicado atualmente é o músculo McKibben [Schulte (1961)]. Trata-se um músculo trançado cilíndrico, com ambas as extremidades não só transferindo tensão da fibra, mas também obturando a saída do gás. Os materiais tipicamente usados são borracha de látex ou silicone, e fibras de Nylon.

Os metais com memória de forma (*Shape Memory Alloys* – **SMA**s) são ligas metálicas que permitem a recuperação da geometria original do corpo, ou o desenvolvimento de consideráveis forças de restituição ao se restringir a recuperação de sua forma original, após a imposição de um campo de temperatura e/ou de tensões, através de transformações de fase induzidas no material [Savi et al. (2003)].

O capítulo 5 trata dos procedimentos experimentais. Nele são descritos os Softwares de Cinemática Direta e de Cinemática Inversa, relativos ao Modelo Cinemático do Membro Superior Humano do capítulo 3. Os softwares funcionam em tempo real. No software de Cinemática Direta, é realizado o cálculo automático da matriz de orientação e das coordenadas cartesianas, assim que os ângulos das juntas vão sendo alterados. O software de Cinemática Inversa possui um algoritmo compacto, que encontra uma solução para os ângulos das juntas necessários para alcançar um determinado ponto no plano cartesiano.

Ainda no capítulo 5 é estudada a utilização de PWM (modulação por largura de pulso) para o controle dos atuadores SMA ativados eletricamente [Soares (1997)], e o sistema em malha fechada e circuito necessário para realização do controle via computador.

Capítulo 2

Robôs Antropomórficos

2.1 Introdução

O termo robô, segundo a norma 10218 da ISO (International Organization for Standardization), pode ser definido como "uma máquina manipuladora com vários graus de liberdade controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial".

Para efeito de comparação, neste capítulo serão mostrados, após a evolução histórica e o estudo do membro superior humano, os robôs atuais disponíveis tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico.

2.2 Evolução Histórica

O termo robô (robot) vem do Checo robota, que significa serviçal, escravo ou trabalhador [Pires (2005)].

Vários pensadores da história se dedicaram a criar mecanismos capazes de imitar capacidades humanas. Dentre os pensadores cujos trabalhos chegaram a nossa época, podemos citar Ctesibius, Leonardo da Vinci e Nicola Tesla.

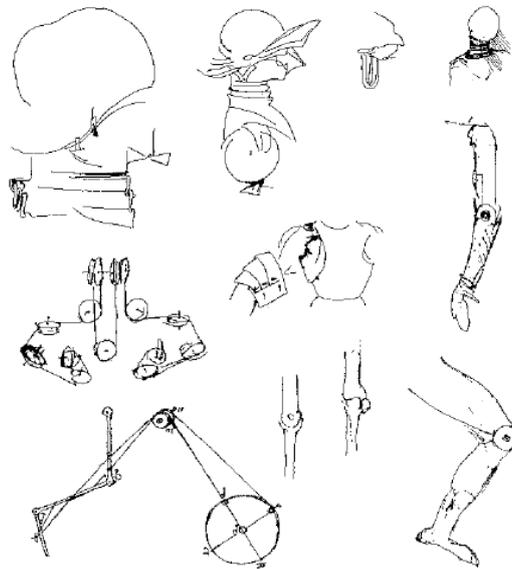


Figura 1. Estudos de Leonardo da Vinci para um autômato antropomórfico

Um dos primeiros trabalhos sobre robôs foi o relógio de água com figuras móveis, projetados pelo engenheiro grego Ctesibius (270 ac).

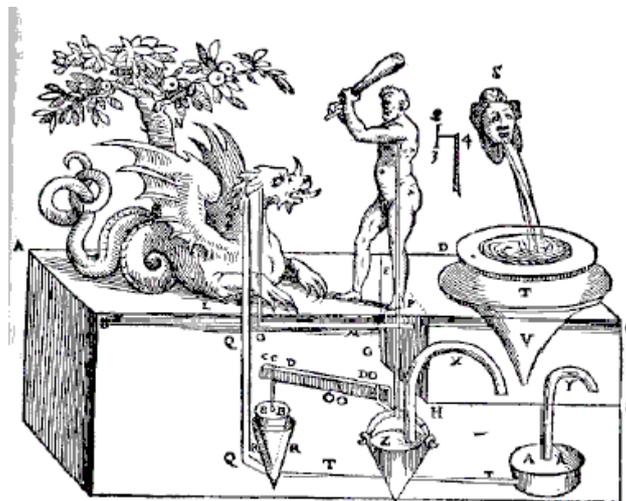


Figura 2. Relógio de água de Ctesibius

Leonardo da Vinci encontrou barreira em dois grandes problemas de sua época: falta de componentes construídos com grande precisão, e de fontes de energia suficientemente fortes para mover seus mecanismos. Mesmo assim ele mesmo projetou e desenvolveu soluções.

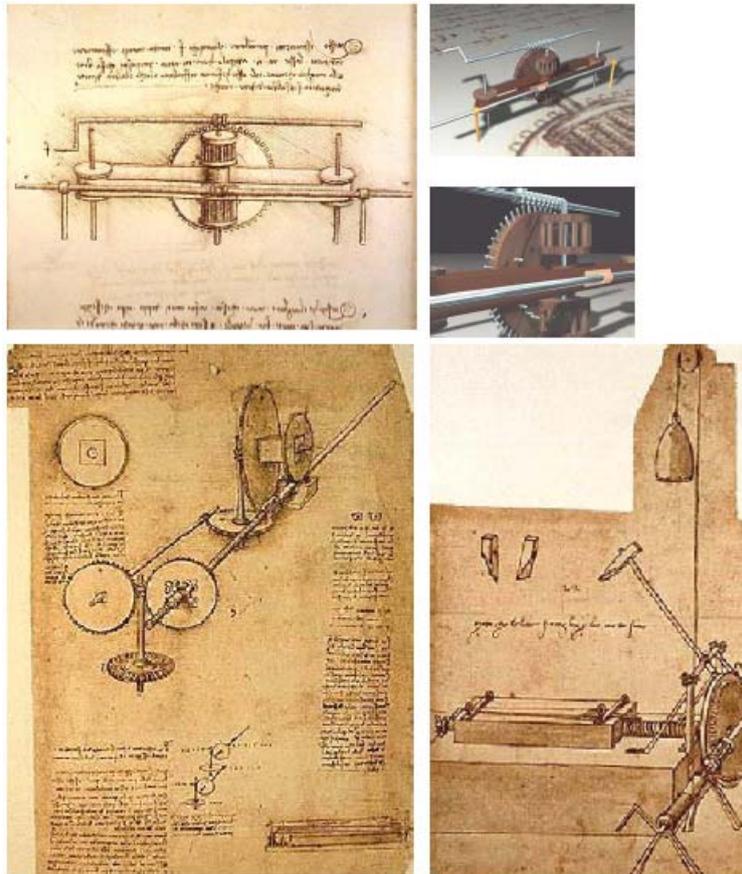


Figura 3. Instrumentos de Da Vinci

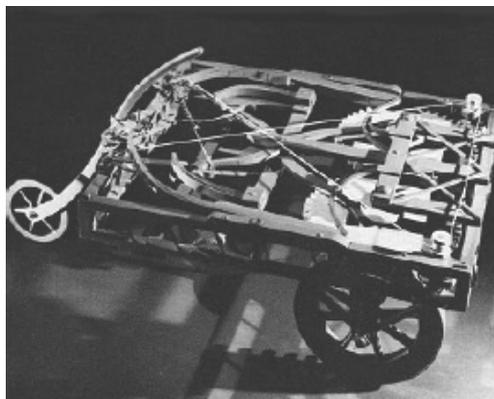


Figura 4. Carro movido a molas de Da Vinci

Com o advento de máquinas ferramenta, capazes de produzir componentes com alta precisão (Séc. XIX), a disponibilidade de várias fontes de energia para atuação, os conceitos de transmissão mecânica, motores, suspensões, e a disponibilidade de sensores, tornou-se possível desenvolver máquinas que pudessem emular o braço humano.

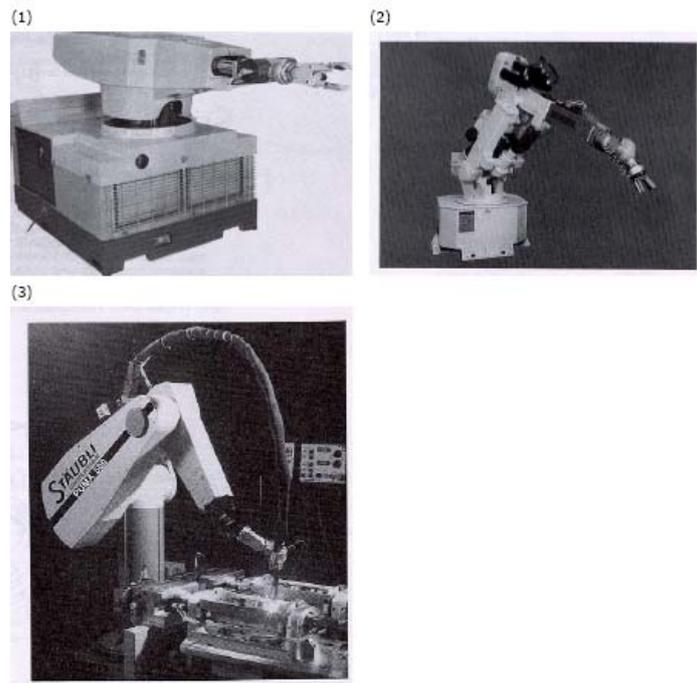


Figura 5. Unimate (1), T3 (2) e Puma (3)

2.3 Anatomia e Fisiologia do Membro Superior Humano

Dentre as configurações estruturais possíveis para o desenvolvimento de manipuladores, o modelo antropomórfico é o que possui melhor mobilidade e apresenta estrutura geométrica mais complexa (sub-capítulo 2.4.1).

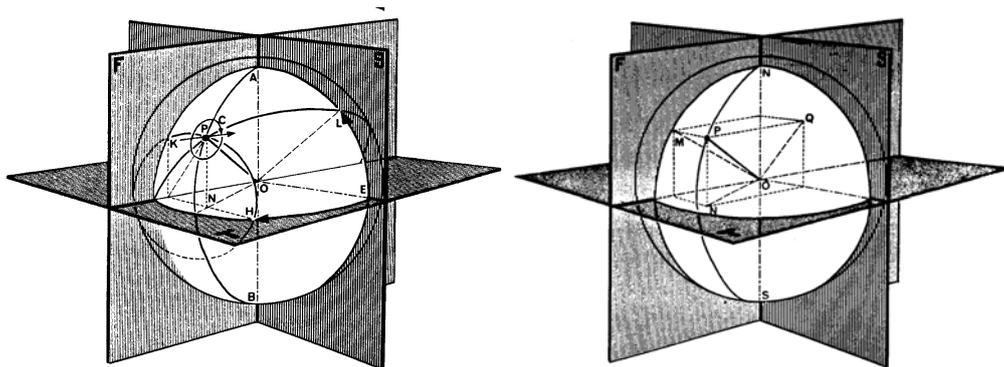


Figura 6. Volume de trabalho da cintura escapular humana em coordenadas angulares e cartesianas

O estudo das propriedades anatômicas e fisiológicas do sistema articular humano é fundamental na avaliação, programação, projeto e controle de manipuladores robóticos antropomórficos [Hermini (2000)].

Neste sub-capítulo são descritos de forma compacta as estruturas esquelética e muscular e a análise dos movimentos dos membros superiores e inferiores, levando em consideração a abordagem de parâmetros fundamentais na engenharia biocibernética.

2.3.1 Estrutura Articular

Da região da cintura escapular até a região radioulnar (Figura 7) existem cinco ossos:

A clavícula: As clavículas são dois ossos dispostos horizontalmente no alto do tórax, que formam, cada qual, a parte superior de um ombro. Cada clavícula oferece pontos de fixação para os músculos do ombro e do tórax e atua como suporte para a escápula e o úmero.

A escápula (ou omoplata): É o osso de lâmina do ombro. As escápulas situam-se na parte posterior dos ombros. Elas formam articulações imóveis com as clavículas e prendem-se à caixa torácica por músculos que permitem o movimento dos ombros. A escápula tem duas superfícies articulares: uma no acrômio, para receber a clavícula e outra no ângulo lateral, a cavidade glenóidea que recebe a cabeça do úmero.

O úmero: O úmero é o osso do braço. Na extremidade superior, o úmero une-se ao ombro; na extremidade inferior, no cotovelo, ele forma uma articulação em dobradiça com os dois ossos do antebraço, o rádio e a ulna (ou cúbito).

O rádio: Situa-se lateralmente à ulna. A extremidade proximal compreende a cabeça, que se articula com o capítulo do úmero superiormente e com a ulna medialmente. A extremidade distal articula-se com ossos do carpo e apresenta no angulo lateral o processo estilóide do rádio.

A ulna (ou cúbito): Osso medial do braço que se articula com o úmero, através do olecrano e do processo coronóide.

A região do ombro é composta por cinco articulações que formam o complexo articular do ombro. Estas cinco articulações se dividem em dois grupos, sendo o primeiro constituído pelas articulações Escápulo-Umeral e Subdeltoidiana e o segundo pelas articulações escápulo-torácica, acrômio-clavicular e esterno-costoclavicular. Em cada um dos dois grupos, as articulações são mecanicamente ligadas, funcionando todas ao mesmo tempo.

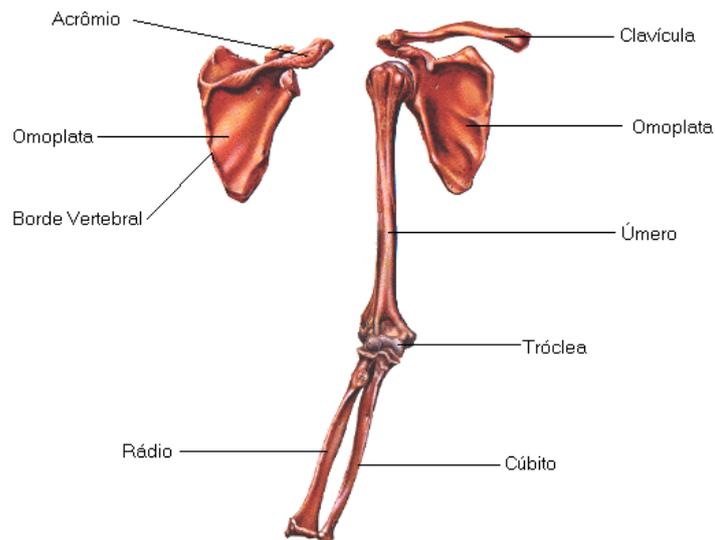


Figura 7. Sistema Articular do Membro Superior

A articulação radiocárpica e as várias articulações intercarpianas constituem a articulação do punho. Esta articulação radiocárpica está situada entre a extremidade do rádio, o escafoide, o semilunar e o piramidal. Os principais mecanismos do sistema ligamentoso do punho são o ligamento ulnocárpico palmar e o ligamento radiocárpico.

A articulação intercarpiana é uma articulação deslizante, situada entre as duas fileiras de ossos carpianos. A articulação é sustentada pelos ligamentos palmares, que unem a superfície palmar dos ossos da primeira fileira, com a superfície palmar do capitato.

2.3.2 Sistema Muscular

No projeto de um manipulador artificial de arquitetura equivalente ao sistema natural, principalmente na ação de inserção dos atuadores na estrutura, é necessário o conhecimento anatômico completo do sistema muscular dos mecanismos naturais. Devido à estrutura muscular dos membros superiores apresentar uma alta complexidade, para simplificar seu estudo organiza-se seus elementos atuadores por grupos.

Os principais músculos que atuam na articulação da cintura escapular são: trapézio, elevador da escápula, rombóide, serrátil anterior, peitoral menor e subclávio.

Os principais músculos que atuam na articulação do ombro são: deltóide, supra-espinhal, peitoral maior, coracobraquial, subescapular, grande dorsal, redondo maior, infra-espinhal, redondo menor, bíceps braquial e tríceps braquial.

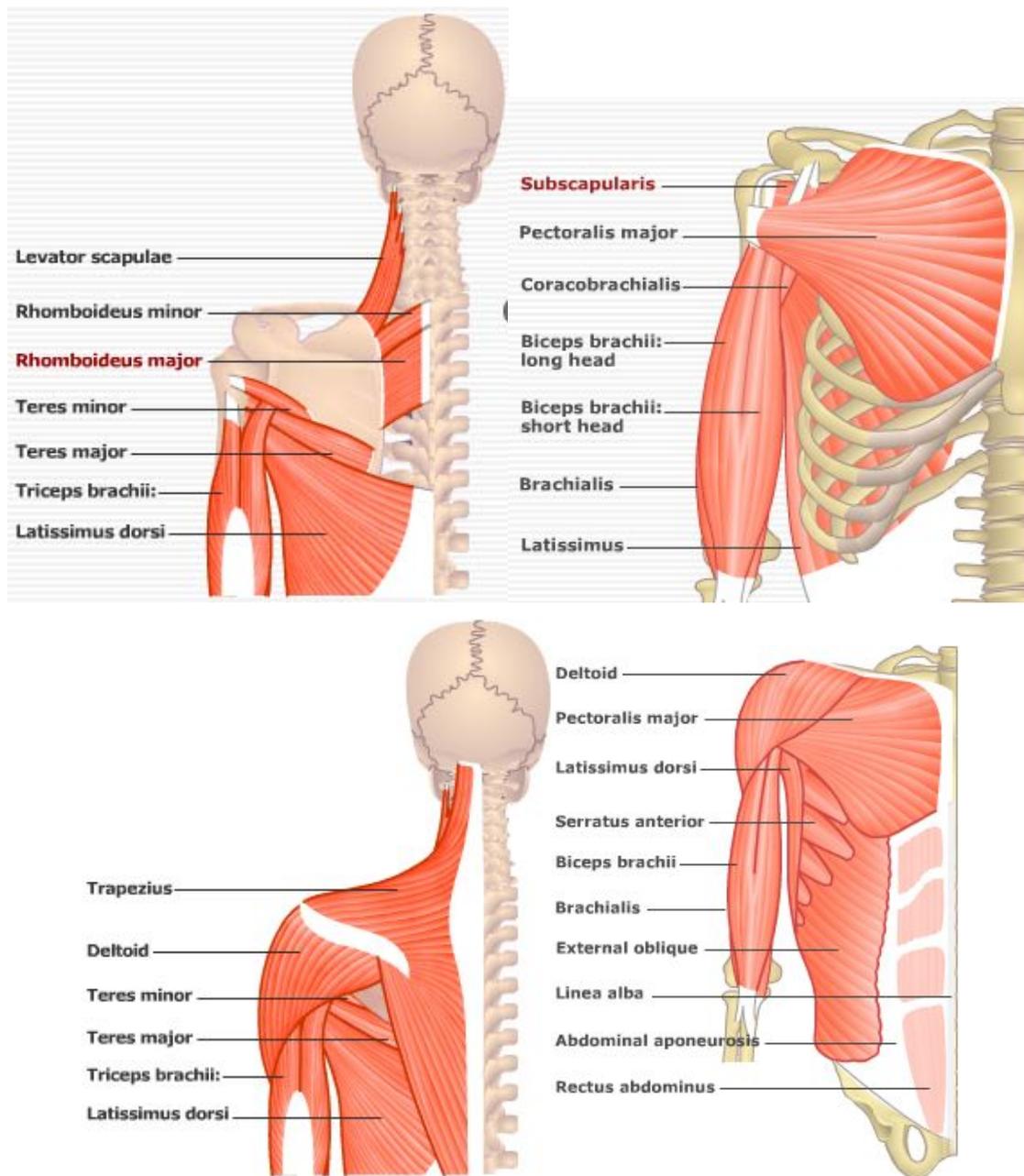


Figura 8. Posicionamento dos músculos que atuam na cintura escapular e ombro [MGH (2007)].

Os principais músculos que atuam na articulação do cotovelo e radioulnar são: bíceps braquial, o braquial, o braquiorradial, o pronador redondo, o pronador quadrado, o tríceps braquial, o ancôneo e o supinador.

Os principais músculos que atuam na articulação do punho são: flexor radial do carpo, extensor radial longo do carpo, palmar longo, extensor radial curto do carpo, flexor ulnar do carpo e extensor ulnar do carpo.

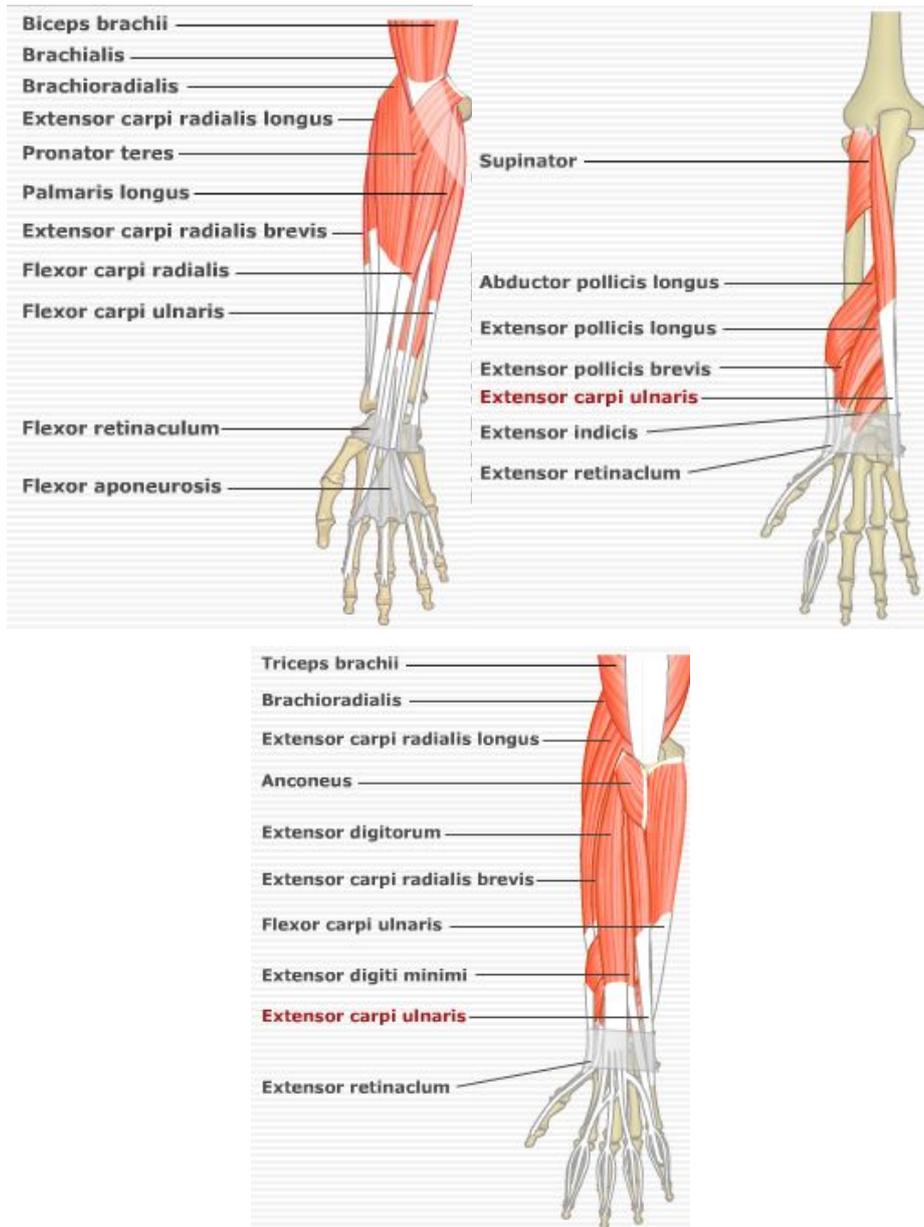


Figura 9. Posicionamento dos músculos que atuam no cotovelo e punho [MGH (2007)].

Na Figura 8 e Figura 9 de MGH (2007) são observados o posicionamento de vários dos músculos acima citados.

2.3.3 Análise fisiológica articular e cinesiológica da Cintura Escapular

Para que seja possível a confecção de um manipulador antropomórfico, há a necessidade do estudo fisiológico articular e cinesiológico do complexo natural, pois só depois desta análise que se torna possível a confecção de um projeto e o estabelecimento de parâmetros para o controle cinemático dos movimentos como também da geração de trajetórias do sistema articular artificial, para que sejam análogos funcionalmente e estruturalmente ao sistema natural.

2.3.3.1 Movimentos da cintura escapular

Todos os movimentos da cintura escapular são descritos em termos do movimento da escápula. Nesses movimentos, sempre participam as duas articulações descritas anteriormente, sendo que a maior parte destes movimentos está intimamente integrada com os movimentos do braço, aumentando grandemente a amplitude dos seus movimentos. Em suma, a escápula serve como uma base móvel, sobre a qual atua o braço [Kapandji (1987)].

2.3.3.2 Movimentos das articulações do ombro

Partindo da posição de repouso ao lado do corpo, o movimento do braço em qualquer direção que o afaste do corpo pode ser chamado de elevação. A elevação do braço para frente, a partir da posição anatômica, é denominada flexão; o movimento de retorno é a extensão. A elevação para trás, que é uma continuação de extensão, se chama hiper-extensão. A abdução é a elevação lateral do braço; a adução é o movimento de retorno. A posição terminal extrema da abdução é a mesma que da flexão, embora deva ser notado que uma rotação para cima da cintura escapular deve ser acrescentada aos movimentos da articulação do ombro, a fim de alcançar esta posição vertical. É possível elevar o braço em planos diagonais entre abdução e flexão e entre abdução e hiper-extensão, mas não existe uma terminologia uniforme para estes movimentos diagonais.

A rotação medial (interna) é a rotação do úmero em torno de seu eixo maior, de modo que sua face anterior se mova medialmente. A rotação lateral (externa) é o oposto, com a face anterior se deslocando lateralmente. Quando o braço não está na posição anatômica, torna-se necessário determinar se a rotação é lateral ou medial. Deve-se observar através do eixo maior do braço direito até a direção do cotovelo; assim toda rotação no sentido anti-horário é interna e toda rotação no sentido horário é externa.

- **Elevação do braço**

A flexão e a abdução do braço são acompanhadas pela rotação superior da cintura escapular. Durante os primeiros 30° a 60° da elevação do braço, a escápula pode permanecer estacionária, ou pode realizar a rotação superior num padrão que vai depender da natureza da posição de partida, da rapidez do movimento, da magnitude e direção das resistências e de outros aspectos variáveis da situação. Uma vez realizada a abdução de 30°, ou depois que se fez uma flexão em 60°, a relação entre a elevação do braço e a rotação da escápula para cima torna-se muito consistente, de modo que cada 2 graus de movimento da articulação do ombro, são acompanhados por 1 grau de rotação escapular.

A elevação posterior do braço (hiper-extensão) raramente se acompanha de rotação da escápula para cima, mas é geralmente acompanhada pela elevação da cintura escapular.

A flexão da articulação do ombro envolve, normalmente, uma abdução concomitante da cintura escapular, juntamente com uma rotação superior, especialmente se o movimento é de extensão ou impulsão para frente. O Serrátil anterior tem grande importância nesse movimento de impulsão ou extensão, porque é o único músculo que pode abduzir e girar para cima a cintura escapular.

- **Depressão do braço**

A extensão da articulação do ombro é, geralmente, acompanhada pela rotação para baixo e adução da cintura escapular; a adução isolada envolve, em geral, uma rotação para baixo

exclusivamente. Se a resistência consiste somente no peso da extremidade superior (com ou sem a carga de um objeto seguro na mão) e se o tronco se encontra em posição ereta, o movimento se realiza pela contração excêntrica dos rotadores superiores da cintura escapular e pelos elevadores da articulação do ombro. Se outros tipos de forças estiverem presentes, como ao se tracionar sobre uma corda horizontal, os rotadores inferiores e os adutores da cintura escapular e os extensores da articulação do ombro devem contrair-se concentricamente. Neste último exemplo, o grande dorsal também se contrai e tem uma tendência indireta em aduzir e rodar a cintura escapular para baixo a medida que estende a articulação do ombro. Na adução forçada da articulação do ombro, frente a uma resistência, a ação do grande dorsal é reforçada pela porção externa do peitoral maior. Isto provoca a adução da articulação do ombro, juntamente com a rotação inferior da cintura escapular, fazendo com que as tendências desses músculos de provocarem desvios anteriores e posteriores do braço e da articulação do ombro sejam neutralizadas.

- **Rotação do braço**

A rotação medial da articulação do braço é acompanhada pela abdução da cintura escapular enquanto que a rotação lateral é, geralmente, acompanhada pela adução da cintura escapular. Essas tendências são mais acentuadas quando a rotação é levada ao máximo.

- **Movimentos horizontais do braço**

A flexão horizontal da articulação do ombro é, geralmente, acompanhada por uma abdução da cintura escapular; a extensão horizontal é, comumente, acompanhada por uma adução da cintura escapular.

2.3.4 Movimentos fundamentais do Cotovelo

O cotovelo é um gínglimo duplo ou uma articulação em dobradiça, e realiza a junção mecânica entre o braço e o antebraço. O cotovelo executa a flexão-extensão (Figura 10 - a) e a prono-supinação (Figura 10 - b).

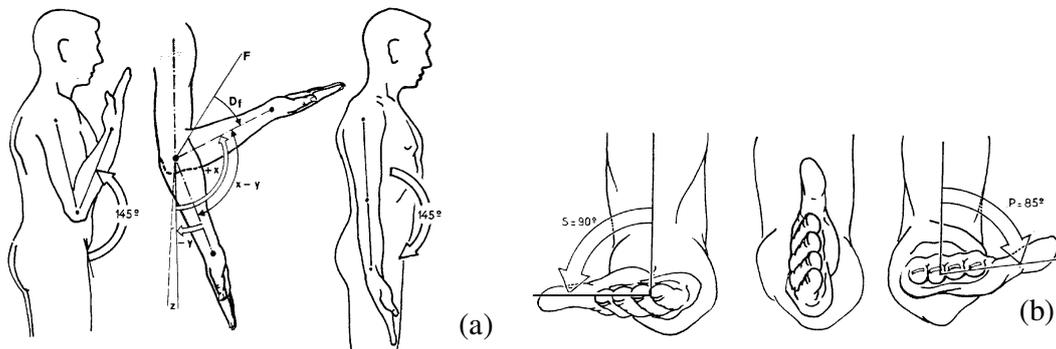


Figura 10. Movimentos da articulação do cotovelo

A Flexão que é o movimento que leva o antebraço para frente e Extensão que é o movimento que leva o antebraço para trás; Prono-supinação é o movimento de rotação do antebraço em torno de seu eixo longitudinal.

2.3.5 Movimentos do Punho

O complexo articular do punho possui dois graus de liberdade. Com a pronosupinação, rotação do antebraço sobre seu eixo longitudinal, a mão pode ser orientada sob qualquer ângulo para pegar ou sustentar um objeto. O complexo articular do punho comporta duas articulações: a radiocarpiana, que articula a glenóide antebraquial como cômulo carpiano; a mediocarpiana, que articula entre elas as duas fileiras dos ossos do carpo.

Estas articulações geram os movimentos e Abdução-Adução e Flexão-Extensão

A combinação destes movimentos gera a circundação, que é um movimento simultâneo no qual o eixo da mão descreve no espaço uma superfície cônica.

Os músculos acionados na flexão, extensão, abdução e extensão do punho são:

Flexão - O flexor radial do carpo e o flexor ulnar do carpo produzem flexão. A tendência do primeiro em realizar abdução é neutralizada pela tendência desse último em realizar adução e vice-versa.

Extensão - O extensor ulnar do carpo e o extensor radial do carpo (longo e curto considerados em conjunto) produzem a extensão. A tendência do primeiro em realizar adução é neutralizada pela tendência desse último de realizar abdução e vice-versa.

Abdução - O flexor radial do carpo e o extensor radial do carpo produzem a abdução. A tendência do primeiro em realizar flexão é neutralizada pela tendência desse último em realizar extensão e vice-versa.

Adução - O flexor ulnar do carpo e o extensor ulnar do carpo produzem adução. A tendência do primeiro em realizar flexão é neutralizada pela tendência desse último em realizar extensão e vice-versa.

2.4 Robôs Industriais

Segundo a Federação Internacional de Robótica (International Federation of Robotics - IFR), os robôs podem ser classificados, de acordo com sua estrutura mecânica em: Robô de Coordenadas Cartesianas/Pórtico, Robô de Coordenadas Cilíndricas, Robô de Coordenadas Esféricas, Robô SCARA, Robô Paralelo e Robô Antropomórfico ou Articulado, que possui maior mobilidade e é o tema do estudo.

2.4.1 Classificação dos Robôs Segundo sua Estrutura Mecânica

- **Robô de Coordenadas Cartesianas/Pórtico (Cartesian robot)**

Este tipo de robô possui três juntas prismáticas (PPP), resultando num movimento composto de três translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de

coordenadas de referência cartesiano. Uma variante deste robô é a configuração tipo pórtico (gantry). O volume de trabalho gerado é retangular.

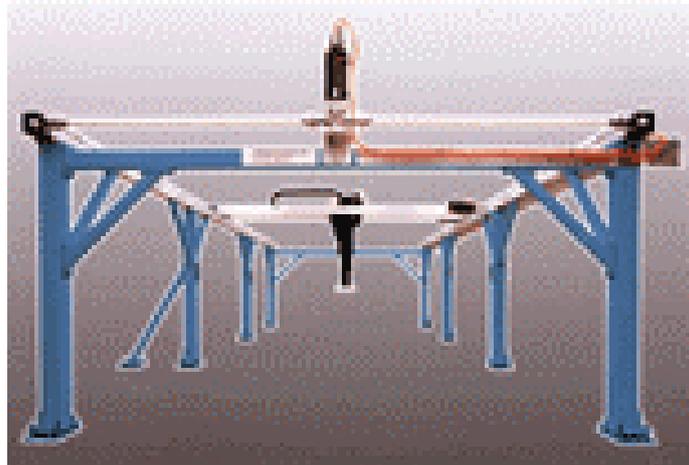


Figura 11. Robô de Coordenadas Cartesianas

- **Robô de Coordenadas Cilíndricas (Cylindrical robot)**

Nesta configuração os eixos de movimento podem ser descritos no sistema de coordenadas de referência cilíndrica. É formado por duas juntas prismáticas e uma de rotação (PPR), compondo movimentos de duas translações e uma rotação. Neste caso, o volume de trabalho gerado é cilíndrico.



Figura 12. Robô de Coordenadas Cilíndricas

- **Robô de Coordenadas Esféricas (Spherical robot)**

Neste tipo de robô os eixos de movimento formam um sistema de coordenadas de referência polar, através de uma junta prismática e duas de rotação (PRR), compondo movimentos de uma translação e duas rotações. Para esta configuração, o volume de trabalho gerado é aproximadamente uma esfera.



Figura 13. Robô de Coordenadas Esféricas

- **Robô SCARA (SCARA robot)**

É um robô que apresenta duas juntas de rotação dispostas em paralelo para obter movimento em um plano e uma junta prismática perpendicular a este plano (PRR), apresentando portanto uma translação e duas rotações. O SCARA é muito empregado em tarefas de montagem de componentes de pequenas dimensões, como placas de circuitos eletrônicos. O volume de trabalho gerado por este tipo de robô é aproximadamente cilíndrico.



Figura 14. Robô SCARA

- **Robô Paralelo (Parallel robot)**

Este robô apresenta configuração tipo plataforma e mecanismos em forma de cadeia cinemática fechada. O volume de trabalho resultante é aproximadamente semi-esférico.



Figura 15. Robô Paralelo

- **Robô Antropomórfico ou Articulado (Articulated robot)**

Na configuração dos robôs antropomórficos (ou articulados) existem ao menos três juntas de rotação. O eixo de movimento da junta de rotação da base é ortogonal às outras duas juntas de

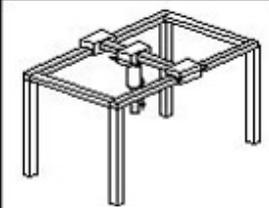
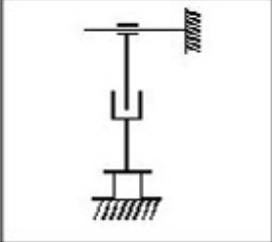
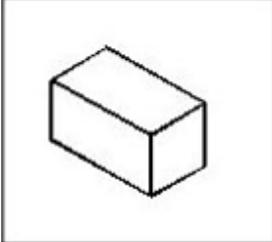
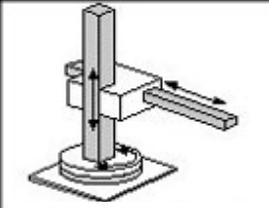
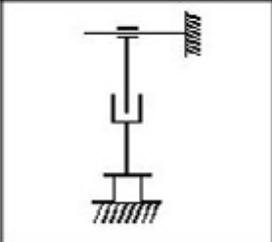
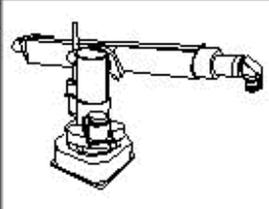
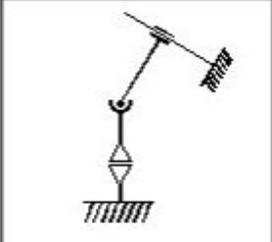
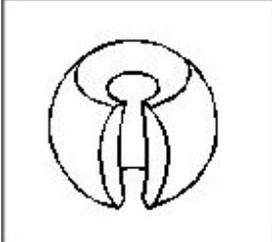
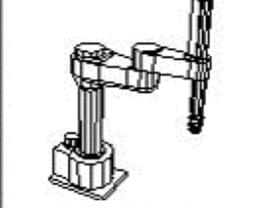
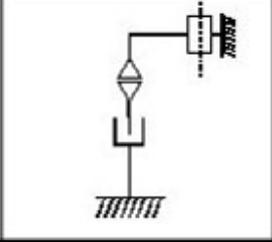
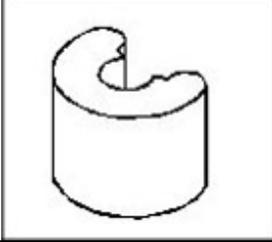
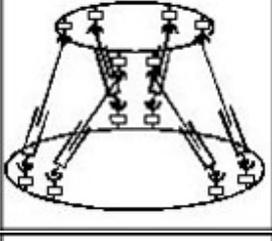
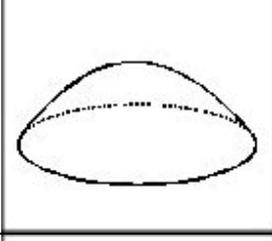
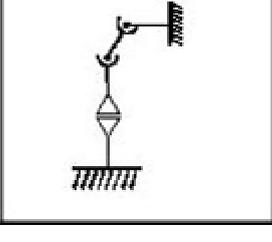
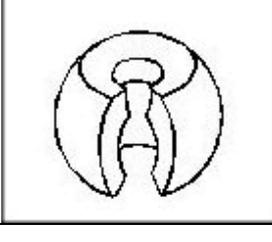
rotação que são simétricas entre si. Este tipo de configuração é o que permite maior mobilidade a robôs. Seu volume de trabalho apresenta uma geometria mais complexa em relação às outras configurações.



Figura 16. Robô Antropomórfico

Essa classificação pode ser vista resumidamente na Tabela 1.

Tabela 1. Tipos de Robôs segundo sua estrutura

Princípio	Estrutura Cinemática	Área de Trabalho
 <p data-bbox="276 580 474 611">Robô Cartesiano</p>		
 <p data-bbox="276 837 474 869">Robô Cilíndrico</p>		
 <p data-bbox="276 1095 474 1126">Robô Esférico</p>		
 <p data-bbox="276 1352 474 1384">Robô SCARA</p>		
 <p data-bbox="276 1610 474 1641">Robô Paralelo</p>		
 <p data-bbox="276 1868 474 1899">Robô Antropomórfico</p>		

2.4.2 Estado da Arte dos Robôs Antropomórficos Industriais

Atualmente inúmeras Indústrias no mundo desenvolvem robôs industriais. Dentre tantas destacam-se, como filiadas da IFR (International Federation of Robotics): ABB AUTOMATION TECHNOLOGIES ROBOTICS, COMAU S.P.A., DAIHEN CORP., DENSO WAVE INCORPORATED, FANUC LTD., FANUC ROBOTICS AMERICA INC., FANUC ROBOTICS EUROPE S.A., KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES LTD., KUKA ROBOT GROUP, STÄUBLI ROBOTICS, VALK WELDING E YASKAWA ELETRIC CORPORATION ROBOTICS AUTOMATION DIV [ABB I (2005)].

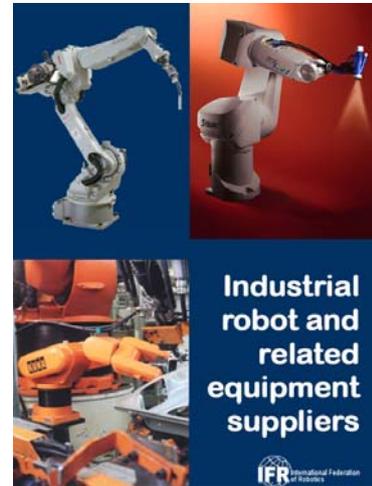


Figura 17. Catálogo de Industrias de Robótica da IFR

Os vários modelos de cada indústria variam de acordo com aplicações específicas, por isso apenas dois modelos, um de pequeno e outro de grande porte, da ABB AUTOMATION TECHNOLOGIES ROBOTICS serão exibidos como exemplos.

- **IRB 140**

Este modelo é compacto, possui aceleração rápida e é capaz de carregar até 5 kg. Possui seis graus de liberdade, tendo no primeiro grau capacidade para giro de 360°, atingindo uma grande área de trabalho [ABB II (2005)].



Figura 18. IRB 140, da ABB

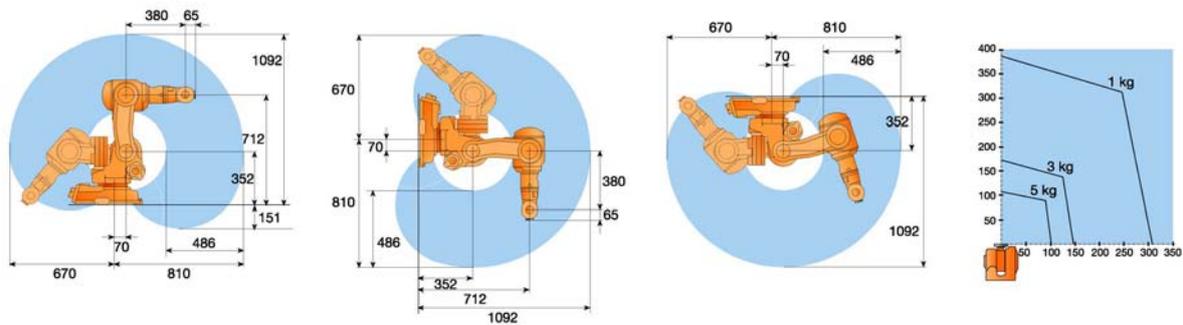


Figura 19. Área de trabalho do IRB 140

- **IRB 7600**

O IRB 7600 pertence à família Power Robot. Dependendo da sua versão, é capaz de carregar de 150 a 500 kg. Possui detecção de colisão, e sistema de parada ativo [ABB III (2005)].



Figura 20. IRB 7600 da ABB

IRB 7600-500/2.30

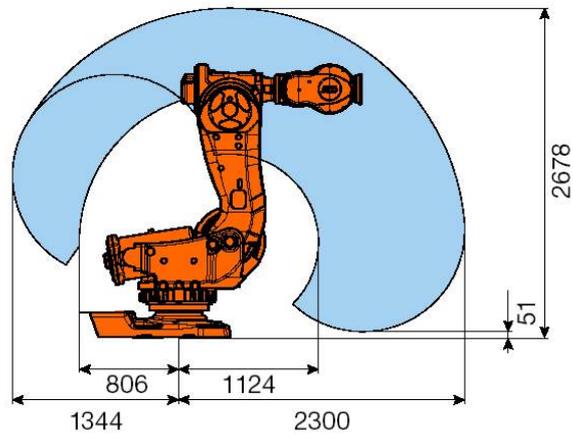


Figura 21. IRB 7600, com capacidade para 500 kg

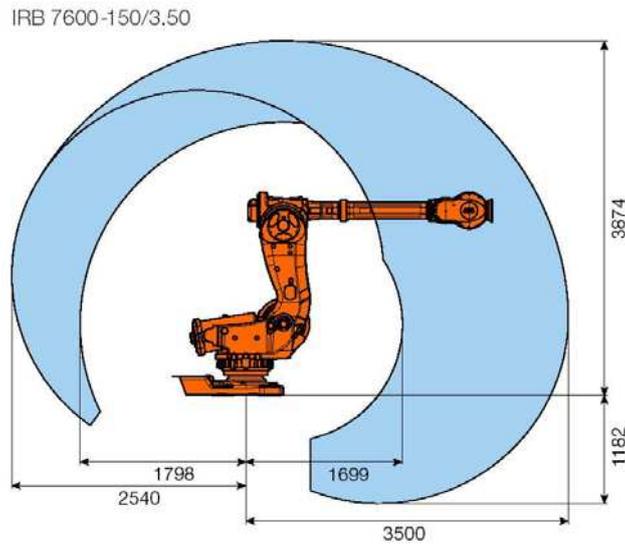


Figura 22. IRB 7600, com capacidade para 150 kg

2.5 Robôs Acadêmicos

São citados três robôs neste sub-capítulo o *7R anthropomorphic robot-arm* de Tondu et al. (2005), baseado no modelo antropomórfico, próximo ao modelo utilizado neste trabalho; o *Light-Weight Robot (LWR) III*, do Departamento de Sistemas Mecânicos do Instituto alemão DLR [IRM (2006)], que tem enfoque na tecnologia, antropomorfismo e baixo peso; e o *Anthroform Arm*, da Universidade de Washington [UW (2006)], que busca imitar exatamente o funcionamento dos músculos humanos através de músculos artificiais pneumáticos.

- *7R anthropomorphic robot-arm de Tondu et al.*

Tondu et al. (2005) desenvolveu um braço robótico com sete graus de liberdade, atuado por músculos artificiais para robôs humanóides (Figura 23), com o objetivo de estudar a utilização dos músculos artificiais McKibben (sub-capítulo 4.2) no desenvolvimento de robôs que possam operar junto com humanos de forma segura.

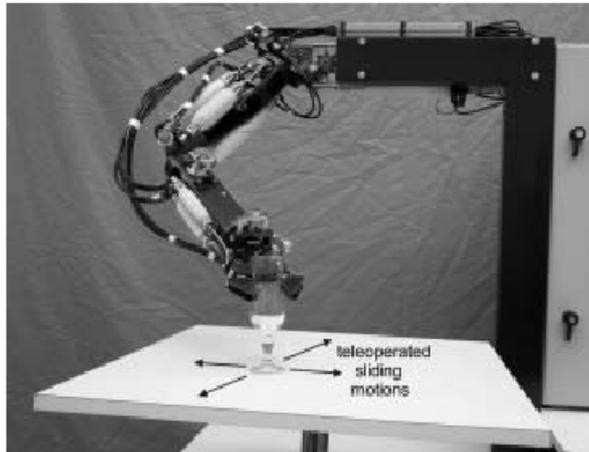


Figura 23. 7R anthropomorphic robot-arm de Tondu et al. (2005)

O modelo da estrutura do robô, baseado no membro superior humano, está descrito de acordo com a nomenclatura utilizada na fisiologia [Kapandji (1982)] na Figura 24 (b).

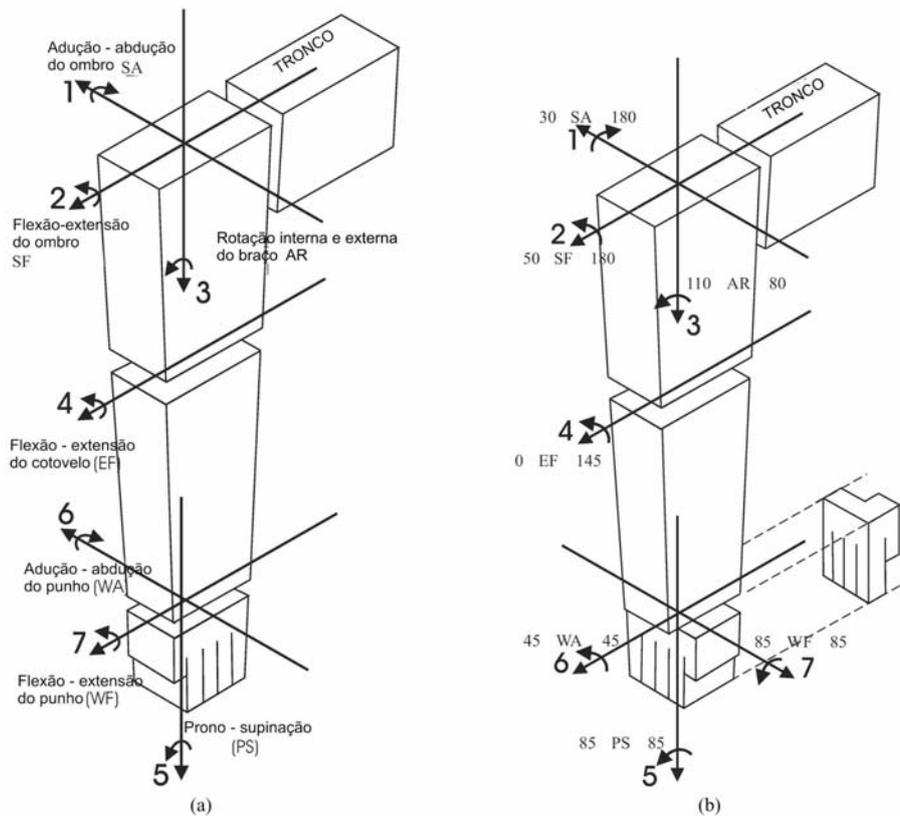


Figura 24. Estrutura Antropomórfica 7R com terminologia das juntas baseada na fisiologia: (a) posição anatômica; (b) posição robótica - zero.

O objetivo de seu estudo foi o desenvolvimento de um braço robótico com tamanhos similares à biometria humana e faixa de trabalho das juntas similares ao modelo antropomórfico (Figura 24), juntamente com a minimização do peso do robô. A diminuição do peso combinada com a similaridade das juntas é um elemento essencial para o funcionamento seguro de robôs em ambientes humanos.

As juntas de ombro θ_1 e θ_2 impõem as restrições de dimensão de músculo mais difíceis porque os atuadores das juntas correspondentes têm que desenvolver os torques de motor mais altos para operar o braço contra a gravidade. Fazer estas duas juntas atuarem independentemente também é uma grande dificuldade. A Figura 25 ilustra a solução adotada.

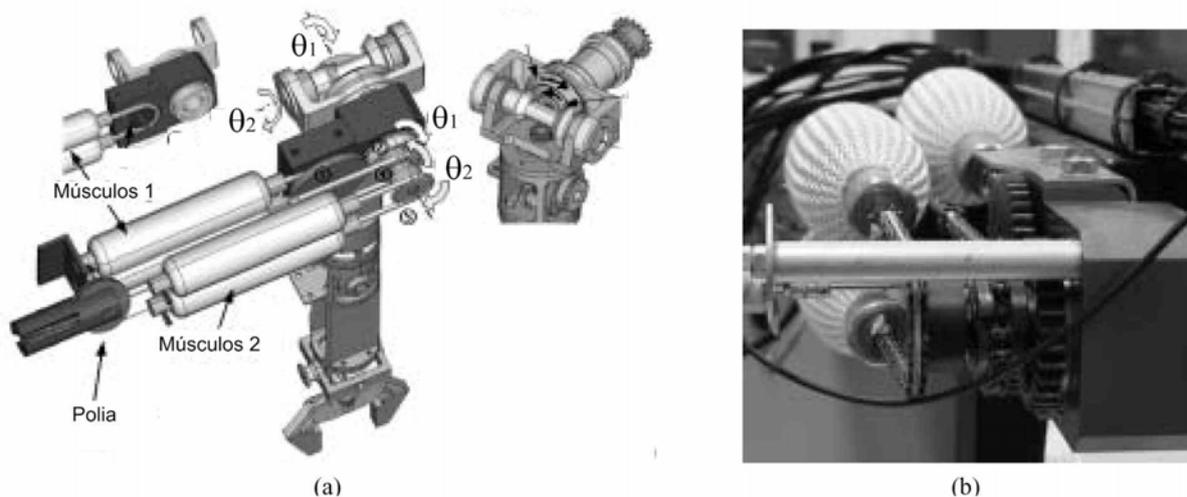


Figura 25. Desenho mecânico do ombro do robô

O par de músculos da junta 1 é preso à base e controla um par de engrenagens acionada pela polia do atuador, que amplia o movimento angular. Em oposição, a junta 2 contrai suas duas terminações simultaneamente. Quando os músculos da junta 2 são controlados, ambos agem em polias gerando o correspondente deslocamento angular oposto ($-\theta_2'$ e $+\theta_2'$). Conseqüentemente a junta 2 pode mover-se independentemente, e quando não se move, seu sistema impede que haja movimento ao mover a junta 1. É importante notar que o sistema da junta 2 gera um torque

equivalente ao de uma junta com um final fixo, porém a sua faixa de trabalho é dividida por dois, o que no caso pôde ser compensado pelo aumento dos músculos.

A flexão-extensão e abdução-adução do punho não apresentam grandes restrições em relação a torque e faixa de trabalho. A junta 6 (Figura 26 (a)) é dirigida diretamente pelo seu par de músculos, e a junta 7 é dirigida diretamente por uma barra de balanço que faz o papel da polia dos outros atuadores, como ilustrado na Figura 26 (b) e (c). Essa solução deu ao punho compactação de acordo com o desejado. A Tabela 2 sintetiza as características dos músculos e transmissões.

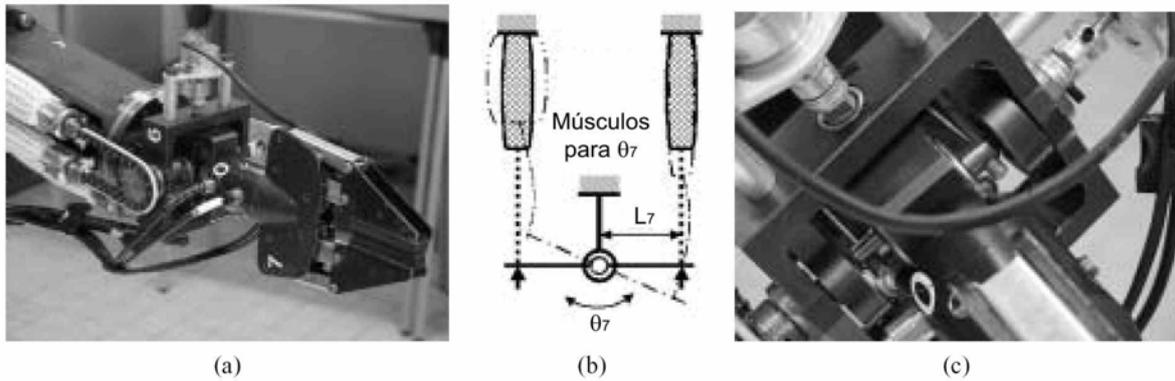


Figura 26. Punho do robô: (a) junta 6 (b) transmissão por barra de balanço da junta 7 (c) junta 7

Tabela 2. Características dos atuadores [Tondu et al. (2005)]

Joint Number	Muscle Characteristics			Pulley-Chain System Characteristics		Transmission System Characteristics		Estimated Joint Range (deg)	Estimated Peak Torque (N.m)
	l_0 (mm)	r_0 (mm)	α_0 (deg)	ε_0	R (mm)	Mode	m_v		
1	195	12	17	0.11	20.5	Cylindrical gear	1.5	$[0^\circ-180^\circ]$	61
2	230	12	17	0.15	23	Double bevel gear in opposition	1.5	$[0^\circ-100^\circ]$	67
3	140	8.5	20	0.15	18	Bevel gear	1.5	$[-100^\circ,+100^\circ]$	18
4	195	8.5	19	0.10	14.5	Direct drive	1	$[0^\circ,+150^\circ]$	25
5	120	7	23	0.08	12.5	Bevel gear	2	$[-90^\circ,+90^\circ]$	5
6	120	7	23	0.07	12.5	Direct drive	1	$[-35^\circ,+35^\circ]$	10
7	120	7	23	0.11	17.5	Direct drive by cross-bar	1	$[-45^\circ,+45^\circ]$	13

A Figura 27 ilustra o protótipo resultante, que possui 351 mm de braço entre os eixos, e 307 mm de antebraço, também entre eixos. A base de suporte dos músculos do ombro possui 350 mm. A mão é uma garra simples de dois dedos atuada por um cilindro pneumático de efeito duplo.

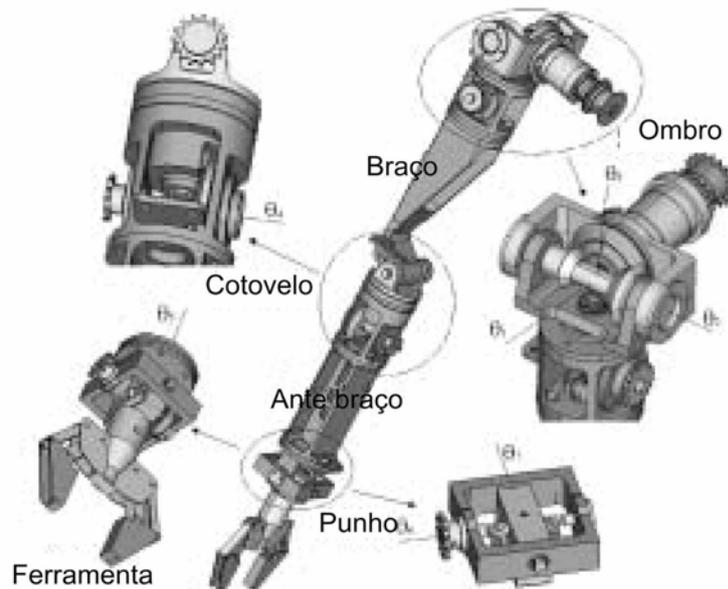


Figura 27. Diagrama geral das partes principais do desenho mecânico do braço robótico antropomórfico

A Figura 28 mostra o braço robótico final de vários ângulos. A massa total do robô é de 10 kg, sendo 6 kg das partes móveis (sem contar a base fixa). A massa da interface pneumática, que é basicamente a massa dos 14 conversores I/P que alimentam os músculos e do conversor I/P da ferramenta terminal, é de 10 kg. Os conversores foram presos na lateral da base do robô. O tamanho dos conversores I/P representa um problema pois cada um tem em torno de 500 cm^3 . Espera-se porém o desenvolvimento de conversores comerciais menores no futuro. O fornecimento de ar do experimento vem do sistema da Universidade. Uma opção para mobilidade é a inclusão no robô de um tanque de alta pressão, embora a energia do robô seria limitada pelo seu alto consumo de ar. O consumo pode ser futuramente diminuído pelo pré-enchimento dos músculos [Davis et al. (2003)] ou por re-processamento do ar entre os dois músculos.

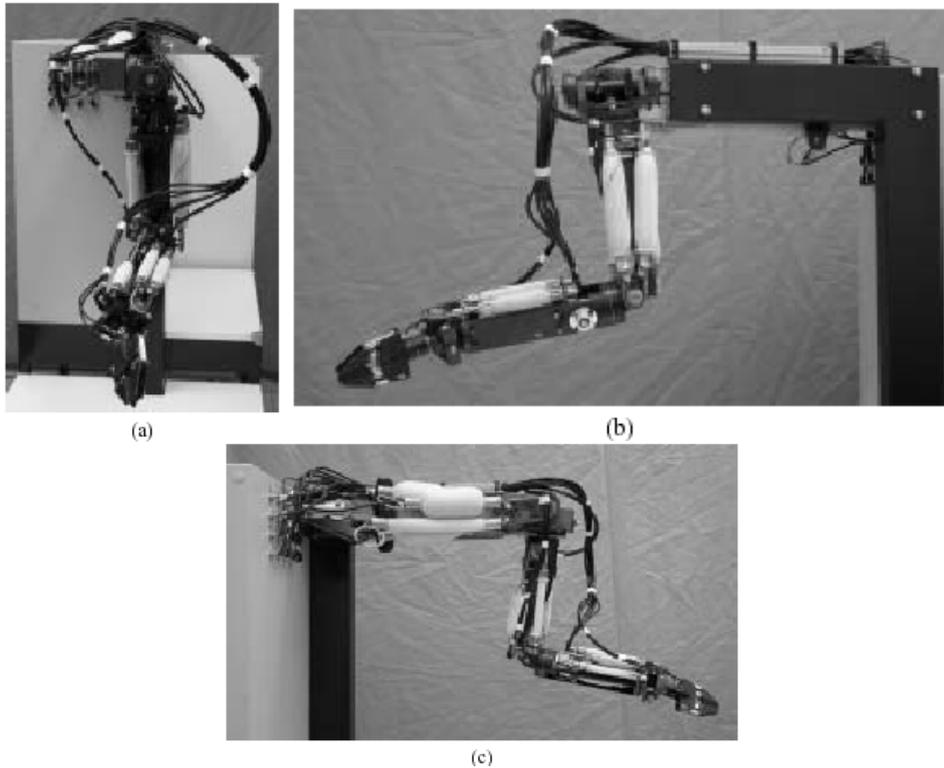


Figura 28. Vistas do 7R Anthropomorphic arm de Tondu et al.

- ***Light-Weight Robot (LWR) III***

O Departamento de Sistemas Mecânicos do instituto alemão DLR tem papel especial no campo de robótica aplicada. Foram desenvolvidas três gerações de robôs de peso leve. A última versão tem, como seus antecessores, uma razão de carga-para-peso excelente. O robô tem massa de 13.5 kg e pode controlar cargas até 15 kg. Buscando desenvolver um robô com uma razão de carga / peso de pelo menos 1 para 1 desde os anos noventa, alcançaram esse objetivo com o LWR III.

A obtenção de uma estrutura extremamente leve foi possível aperfeiçoando partes cruciais. O robô está composto de caixas de câmbio e motores de produção própria, freios de segurança com pesos reduzidos, eletrônica e sensores. O robô leve da terceira geração é um sistema modular. As juntas individuais estão conectadas por estruturas de fibra de carbono. Semelhante ao braço humano o robô tem sete graus de liberdade. Isto conduz a uma flexibilidade mais alta e áreas de trabalho com menos restrições comparado a robôs industriais.

Todos aparatos eletrônicos, incluindo os conversores de potência, são integrados no braço, não necessitando das comuns prateleiras externas. Os sensores integrados do robô são uma novidade tecnológica. Cada junta é equipada com um sensor de posição de motor, um sensor de posição de junta e um sensor de torque da junta. Os algoritmos de controle avançados possibilitam movimentos livres de vibração e movimentos dinâmicos. Além de modo de posição e velocidade o robô pode ser usado no modo de torque controlado.

As juntas individuais são isoladas galvanicamente. Elas se comunicam por um sistema de fibra ótica, alocada internamente.

Além de aplicações espaciais há muitas possibilidades terrestres para utilização do robô de peso leve e sua tecnologia.

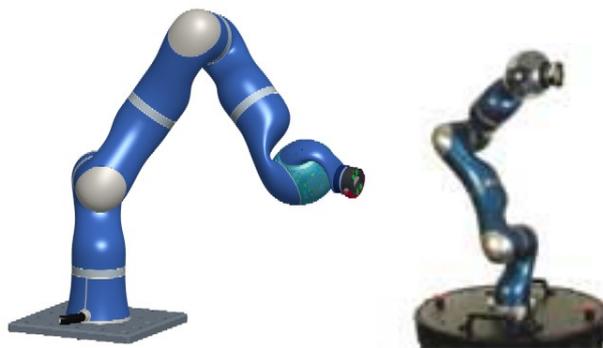


Figura 29. LWR III

Cinemática: A 3ª geração do LWR é construída como um braço destro clássico com 7 juntas revolutas para capacidades de manipulação boa em uma área de trabalho variável com obstáculos imprevisíveis. Como o braço é dedicado para funcionar com a mão artificial DLR II para pesquisas em habilidades humanas, suas cinemáticas são semelhantes a um braço humano. Neste contexto a primeira combinação de roll-pitch-roll pode ser vista como ombro e braço superior, seguida por pitch-roll para o cotovelo e antebraço e pode ser concluída por uma combinação de pitch-pitch com interseção de eixos no pulso. Para aplicações que usam ferramentas ou garras, principalmente, uma configuração alternativa com pulso de pitch-roll é provida no design mecânico.

Juntas: O robô é feito de juntas inteligentes com eletrônica embarcada, que estão conectados por linhas de alimentação, um circuito de emergência e um cabo óptico para transferência de dados. A estrutura de robô consiste em elos (ver capítulo 3) de estruturas diferentes, feitas de compósitos de fibra de carbono. As juntas consistem em:

- um motor sem escovas *DLR DC @RoboDrive* com conversor de potencia integrado e freio de emergência eletromagnético;
- engrenagem para direção harmônica.;
- sensor de torque no lado externo da engrenagem;
- sensor de posição no motor e no lado externo da engrenagem;
- dispositivos eletrônicos para fornecimento de energia, controle da junta e movimento e conversor de frequência para o controle de retorno da junta;



Figura 30. Junta do LWR [IRM (2006)]

Motor: Para operar o LWR é utilizado um motor DC sem escovas, que foi desenvolvido especialmente para esta tarefa pela DLR. Foram aperfeiçoados todos os parâmetros que formam estes motores para a operação de controle e para leveza. Como as exigências de torque diminuem juntamente com o comprimento do braço, três tipos diferentes de motores são utilizados (85, 70 e 50 mm).

Engrenagens: Para o LWR, tipos e tamanhos diferentes de unidades de engrenagem de Direção Harmônica são utilizados devido à sua alta relação torque versus peso. A relação da engrenagem é 1:160 (J5: 1:100), que permite torque de saída de 200 (165), 100 (70) e 40 (30) Nm máximos (gama medida), e velocidade angular de mais que 1,9 rad/seg para a junta.



Figura 31. Componentes do LWR

Sensor de torque: Cada junta no LWR é equipada com um sensor de torque em seu lado de saída, entre a engrenagem e a estrutura, que utiliza *strain gages*. A faixa de trabalho medida foi de (+/-) 165 Nm para os eixos 1 e 2, 70 Nm para os eixos 3, 4 e 5, e 30 Nm para os eixos 6 e 7.

Sensor de posição: Cada junta contém dois sensores de posição diferentes. Um sensor incremental com resolução alta no lado de motor, para comutação do motor e controle de junta, e outro sensor absoluto (potenciômetro) no lado da engrenagem para referência do ângulo da junta. O sinal analógico do sensor de posição da junta é convertido com ADC de 12 bits e processado com um *Ubicom SX Microcontroller*.

Provisão de Energia: Cada junta tem sua própria unidade de provisão de energia. A unidade prove energia à placa do controlador, para o conversor de potência e todos os sensores. A placa de energia foi desenvolvida pelo *Fraunhofer Institute of Integrated Systems and Device Technology (IISB)* em Erlangen (Alemanha).

Placa de Controle do Motor e Junta: A placa do controlador contém dois DSPs. O controlador de junta roda em tempo de ciclo de 330 μ s em um DSP de ponto flutuante

TMS320VC33 para TI. Este DSP é responsável pela comunicação com o controlador de robô pelo cabo de fibra ótica, memorizar e calibrar os dados de sensor e o cálculo de comandos atuais para o controlador de motor. O controlador de motor, um DSP56F807 de *Freescale / Motorola*, calcula a posição e velocidade do motor rodando em tempo de ciclo de 25us, e mede temperaturas, correntes de motor e sinais dos cabos. O primeiro desenvolvimento da placa foi realizado pelo *Fraunhofer IZM department Micro-Mechatronic*, no “Bayerischen Kompetenzwerk für Mechatronik”.

Conversor de força: O conversor foi desenvolvido para três motores de fase. Duas correntes de fase e a voltagem de ponte são galvanicamente isoladas. Além do motor, o freio de segurança é controlado pela placa do conversor de energia.

Tensão de entrada	48V
Corrente máxima do motor	15A
Frequência	40kHz
Componentes externos	freio de segurança

Estrutura: A estrutura do elo do robô é um exoesqueleto feito de um compósito de fibra de carbono. As pré-formas são postas em um negativo, encharcado com resina de epóxi e finalmente pressionado para eliminar resina de excesso e reduzir peso. Com esta técnica, elos de forma leve e estável podem ser produzidos, com as fibras colocadas otimamente, para carregar pesos esperados. A técnica par construir estas estruturas foi fornecida por *HighTex GmbH* de *Dresden* (Alemanha).

- ***Anthroform Arm***

A Universidade de Washington está desenvolvendo uma réplica mecânica do braço humano com a finalidade de estudar propriedades biomecânicas e neurais de baixo nível do braço, e controle relativo à postura espinhal [UW (2006)].

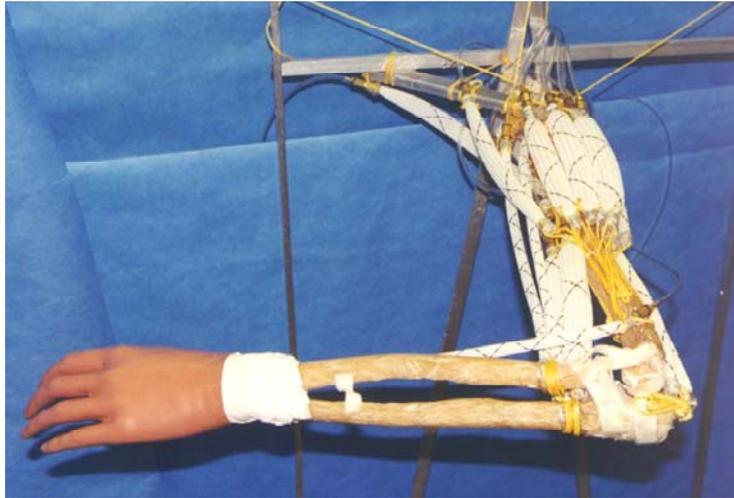


Figura 32. Anthroform Arm da Universidade de Washington

O *Anthroform Arm* é construído de uma variedade de subsistemas que emulam, para o melhor grau possível, as estruturas correspondentes do braço humano e sistema nervoso central.

Os componentes de esqueleto são construídos com fibra de vidro, usando moldes feitos com ossos de cadáver humanos. Juntas de substituição cirúrgicas (aço cirúrgico) são usadas para o cotovelo e juntas de ombro. São presos ligamentos de tecido em ambos os lados das juntas a locais biomecanicamente precisos.

Músculos Artificiais McKibben (sub-capítulo 4.2) são usados para simular os músculos do braço; estes também são fixos a locais biomecanicamente precisos.

Foram desenvolvidas réplicas funcionais de músculos *spindles* para sentir a posição de cotovelo. Como os humanos, este sensor contém elementos ativos que alteram suas funções de saída baseado na posição.

2.6 Considerações Finais

No início deste capítulo foi citada brevemente a evolução histórica dos estudos relacionados à utilização de manipuladores semelhantes ao membro superior humano.

Depois foram abordadas as principais características anatômicas, fisiológicas e cinesiológicas dos membros superiores do corpo humano, visando o conhecimento estrutural e funcional destas estruturas para que se possa efetuar a reprodução de suas funções. É importante observar que são fundamentais os estudos da anatomia e da fisiologia humana para que seja possível a implementação do controle dos movimentos dos manipuladores antropomórficos a partir do modelamento cinemático direto e inverso da estrutura articular humana.

Por fim foi descrito o estado da arte dos manipuladores antropomórficos disponíveis no meio industrial e acadêmico.

Capítulo 3

Modelagem Cinemática

Segundo Fu (1987), um manipulador mecânico pode ser modelado como uma cadeia articulada com vários corpos rígidos (elos) conectados em serie por juntas revolutas ou prismáticas dirigidas por atuadores. Um final desta cadeia é fixado a uma base de suporte enquanto o outro é livre e possui uma ferramenta para manipular objetos ou realizar tarefas. O movimento relativo das juntas resulta no movimento dos corpos, que posicionam a ferramenta terminal em uma orientação desejada.

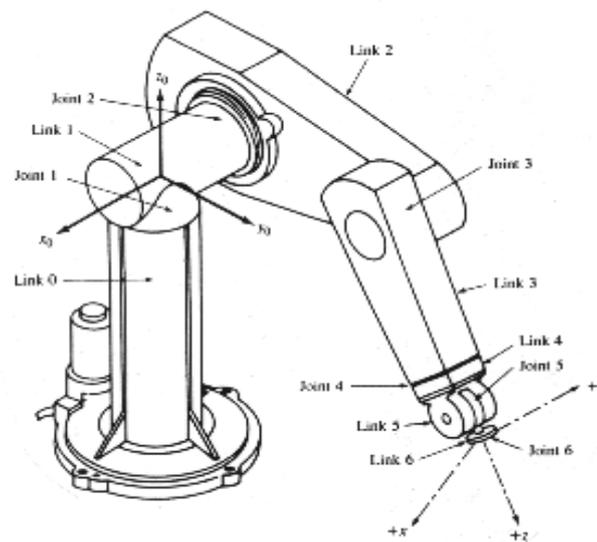


Figura 33. Ilustração de juntas e elos em um robô PUMA [Fu (1987)].

Em muitas operações robóticas é importante conhecer a descrição espacial da ferramenta terminal, em relação a um sistema de coordenadas fixo. A modelagem cinemática de um robô objetiva o estudo geométrico do movimento com relação à sua base de coordenadas fixa sem se ater às forças e momentos que o causam.

O estudo cinemático se divide em duas questões fundamentais:

1. **Problema Cinemático Direto:** Para um dado manipulador com o vetor de ângulo das juntas $q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))^T$ e os parâmetros geométricos dos elos, onde n é o número de graus de liberdade, qual a posição e orientação do terminal efetuator do manipulador com relação a um sistema de coordenadas de referência?
2. **Problema Cinemático Inverso:** Dada a posição e orientação do terminal efetuator e os parâmetros geométricos dos elos com relação a um sistema de coordenadas de referência, é possível ao manipulador alcançar essa posição e orientação? E em caso positivo, quais configurações podem satisfazer essa condição.

Como na maioria das aplicações de um manipulador robótico, as tarefas são dadas referencialmente a um sistema de coordenadas, o problema cinemático inverso é o mais utilizado.

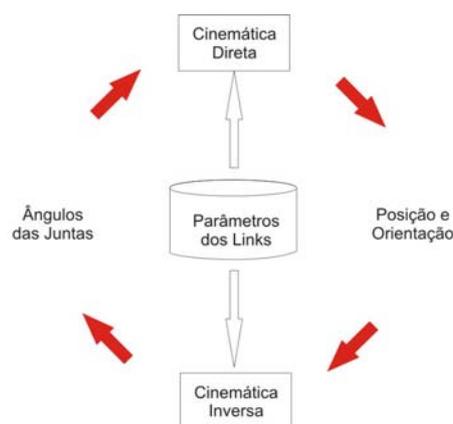


Figura 34. Problema Cinemático Direto e Inverso

O relacionamento entre esses dois problemas é ilustrado na Figura 34 em um diagrama simples. Os parâmetros dos elos são, basicamente, as distâncias entre o centro de uma junta e outra.

3.1 Sistemas de Referência

Segundo Rosário (2002), 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.

Para representar a situação relativa dos vários corpos da cadeia, é fixado a cada elemento C_i um referencial R . É possível 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 ao sistema de coordenadas de origem da base (Figura 35) por $o_i = o_{i-1} + A_{i-1}^i * L_i$, sendo A_{i-1}^i a representação das matrizes de transformação homogênea de rotação (sub-capítulo 3.3.1.3) e L_i o vetor de translação de uma origem a outra.

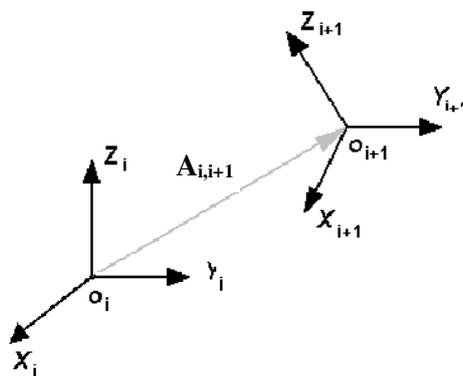


Figura 35. Sistema de referência

Qualquer rotação no espaço pode ser decomposta em um grupo de rotações elementares ao longo dos eixos X, Y e Z. A matriz de rotação elementar usada na equação de transformação é associada com a rotação elementar do referencial correspondente em relação ao seu anterior. Este procedimento matemático pode ser estendido para toda extensão do modelo. Assim sendo, a

relação entre matriz de orientação de um ponto de interesse e a base pode ser obtida por

$$A_1^i = A_1^2 * A_2^3 * \dots * A_{i-1}^i.$$

O posicionamento cartesiano o_i de um corpo rígido no espaço (obtido por $o_i = o_{i-1} + A_{i-1}^i * L_i$) fornece o seu vetor posição (x_i, y_i, z_i) , e A_{i-1}^i representa a matriz de orientação, podendo ser expressa através de componentes angulares associados às três direções de rotação correspondentes aos eixos de referência do sistema de coordenadas (pôr exemplo Roll, Pitch, Yaw - RPY ou quartenions).

3.2 Modelo Geométrico

O modelo geométrico de um robô expressa a posição e orientação de seu elemento terminal em relação a um sistema de coordenadas fixo a base do robô (Figura 36) em função de suas coordenadas generalizadas (coordenadas angulares no caso de juntas rotacionais) [Rosário (2002)].

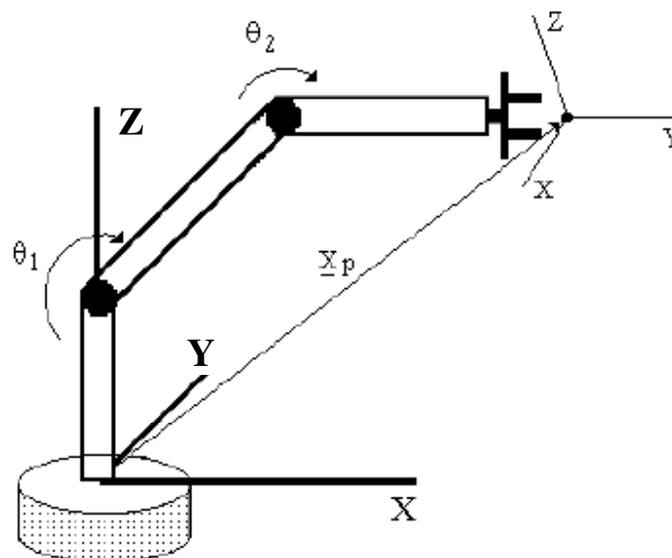


Figura 36. Representação de um Sistema de Coordenadas de um robô

O modelo geométrico é representado por $X_p = f(\theta)$, sendo $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ o vetor das posições angulares das juntas e $X_p = (x, y, z, \psi, \theta, \phi)$ o vetor de posição, onde os três primeiros termos denotam a posição cartesiana e os três últimos a orientação do elemento terminal.

3.3 Problema Cinemático Direto

Vetores e matrizes são utilizados para descrever e representar a localização dos elos de um braço robótico com respeito a um ponto de referência fixo. Como cada elo do manipulador pode ser rotacionado ou transladado com relação à suas coordenadas de referência, novos sistemas referenciais derivados são estabelecidos ao longo dos eixos de cada junta. O problema cinemático direto pode ser reduzido a encontrar uma matriz de transformação T que relacione os sistemas de coordenadas derivados com o sistema de coordenadas referencial. Uma matriz de rotação 3×3 é utilizada para descrever as operações de rotação dos sistemas de coordenadas derivados. As coordenadas homogêneas são então utilizadas para representar vetores de posição no espaço tridimensional, e as matrizes de rotação são expandidas para matrizes de transformação homogêneas 4×4 (sub-capítulo 3.3.1) para incluir as operações de translação do *frame* de coordenadas derivado. Essa representação matricial dos elos para descrever a geometria espacial de um manipulador robótico foi usado pela primeira vez por Denavit e Hartenberg (1955). A principal vantagem de utilizar a representação Denavit – Hartenberg dos elos é a seu algoritmo universal para derivar as equações cinemáticas de um manipulador robótico. Eles propuseram uma forma sistemática e generalizada de representar cinematicamente qualquer manipulador antropomórfico que possua juntas prismáticas ou revolutas.

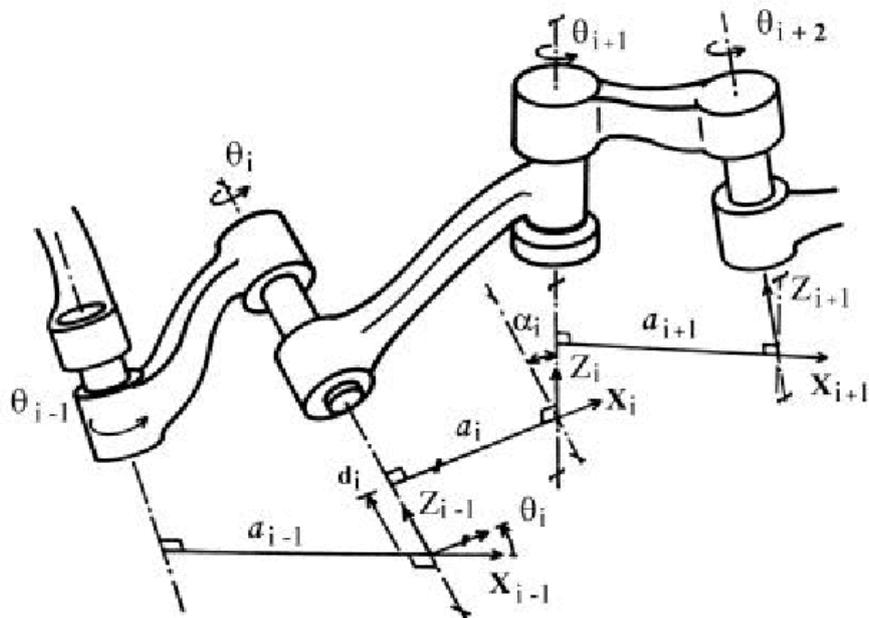


Figura 37. Notação Denavit – Hartenberg

Na Figura 37 pode-se verificar dois elos conectados por uma junta com duas superfícies deslizantes uma sobre a outra. Um eixo de uma junta estabelece a conexão de dois elos. Estes eixos de juntas devem ter duas normais conectadas neles, uma para cada um dos elos. A posição relativa destes dois elos conectados (elo $i-1$ e elo i) é dada por d_i , que é a distância medida ao longo do eixo da junta entre suas normais. O ângulo de junta q_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 elos adjacentes. Eles determinam a posição relativa de elos vizinhos.

Um elo i poderá estar conectado a no máximo dois outros elos (elo $i-1$ e elo $i+1$). Assim, dois eixos de junta são estabelecidos em ambos terminais de conexão. O significado dos elos, do ponto de vista cinemático, é que eles 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 torção do elo i . Eles determinam a estrutura do elo i .

Assim sendo, quatro parâmetros: a_i , α_i , d_i , θ_i são associados com cada elo do manipulador. No momento, em que estabelecemos uma convenção de sinais para cada um destes parâmetros, estes constituem um conjunto suficiente para determinar a configuração cinemática de cada elo do manipulador. Note que estes quatro parâmetros aparecem em pares:

- (a_i, α_i) que determinam a estrutura do elo e os parâmetros da junta;
- (d_i, θ_i) que determinam a posição relativa de elos vizinhos.

A representação Denavit - Hartenberg resulta em uma matriz de transformação homogênea 4×4 representando cada sistema de coordenadas do elo na junta com respeito ao sistema de coordenadas do elo prévio.

Um sistema de coordenadas cartesianas ortonormal (x_i, y_i, z_i) pode ser estabelecido para cada elo no seu eixo de junta, onde $i = 1, 2, \dots, n$ ($n =$ número de graus de liberdade) mais o frame de coordenadas da base. Assim, uma junta rotacional tem somente 1 grau de liberdade, cada frame de coordenadas (x_i, y_i, z_i) do braço do robô corresponde à junta $i + 1$ e é fixo no elo i .

Quando o acionador ativa a junta i , o elo i deve mover-se com relação ao elo $i-1$. Desde então o i -ésimo sistema de coordenadas é fixo no elo i , ele move junto com o elo i . Assim, o n -ésimo frame de coordenadas move com a mão (elo n). As coordenadas da base são definidas como o frame de coordenadas 0 (x_0, y_0, z_0) que é também o frame inercial de coordenadas do braço do robô.

Todo frame de coordenadas é determinado e estabelecido baseado em três regras:

1. O eixo z_{i-1} é colocado ao longo do eixo de movimento da junta i .
2. O eixo x_i é normal ao eixo z_{i-1} , e apontando para fora dele.
3. O eixo y_i completa o sistema.

Por estas regras, temos ainda que:

1. É livre a escolha da colocação do frame de coordenadas em qualquer parte da base de suporte, enquanto que a posição do eixo z_0 é a do eixo de movimento da primeira junta.
2. O último frame de coordenadas (n-ésimo frame) pode ser posto em qualquer parte da mão, enquanto que o eixo x_n é normal ao eixo z_{n-1} .

A representação D-H de um elo rígido depende em quatro parâmetros associados com cada elo. Estes quatro parâmetros descrevem completamente uma junta prismática ou revoluta.

Referindo-se à Figura 37, estes quatro parâmetros são definidos como se segue:

- θ_i é o ângulo de junta feito entre os eixos x_{i-1} e x_i no eixo z_{i-1} .
- d_i é a distância entre a origem do (i-1)-ésimo frame 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 frame 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 e que muda quando o elo i se move (ou rotacional) com respeito ao elo $i-1$. Para uma junta prismática, θ_i , a_i e α_i são os parâmetros da junta, enquanto d_i é a variável de junta.

O sub-capítulo 3.3.1 descreve o conceito de matrizes de rotação, que é amplamente utilizado para o modelo cinemático direto. No sub-capítulo 3.3.2 é descrito as formas de representação da orientação da ferramenta terminal.

3.3.1 Transformação Homogênea

Em um espaço Linear, os elementos são vetores considerados como entidades envolvidas em operações lineares. No entanto, em vários problemas (como por exemplo em robótica), se está

interessado em fatos geométricos associados com as posições mútuas entre objetos, relegando a segundo plano as operações lineares. Isso leva ao uso do conceito de ESPAÇO AFIM, onde os elementos são PONTOS, e não vetores [Alves (1988)].

Definição 1: ESPAÇO AFIM. Um conjunto U associado a um espaço linear L é dito um ESPAÇO AFIM se os seguintes axiomas são observados:

- a) Para qualquer ponto $A \in U$ e qualquer vetor $v \in L$, existe um único ponto $B \in U$, tal que $\overline{AB} = v$.
- b) Se $\overline{AB} = v_1$, $\overline{BC} = v_2$, então $\overline{AC} = v_1 + v_2$.

Definição 2: COORDENADAS AFIM. Escolha um ponto arbitrário (origem) do espaço afim, $O \in U$, e uma base para o espaço linear L , $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Tome um ponto arbitrário $M \in U$. Defina o vetor $\overline{OM} \in L$. Expandindo \overline{OM} em termos da base escolhida,

$$\overline{OM} = v_1 * e_1 + v_2 * e_2 + \dots + v_n * e_n \quad (1)$$

Os coeficientes desta expressão $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, representam as COORDENADAS AFIM do ponto M (referidas ao sistema escolhido, com a origem O e a base $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$).

Definição 3: COORDENADAS HOMOGENEAS. Considere o espaço afim n -dimensional U . Suponha dado um sistema de coordenadas afim, com a origem O e base $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Sendo $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ as coordenadas afim de um ponto arbitrário, M , diz-se que $\{x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}\}$, com $x_{n+1} \neq 0$, são as COORDENADAS HOMOGENEAS do ponto M se,

$$\frac{x_1}{x_{n+1}} = v_1, \frac{x_2}{x_{n+1}} = v_2, \dots, \frac{x_n}{x_{n+1}} = v_n \quad (2)$$

Neste texto, o espaço linear é tridimensional. Portanto, um ponto V , neste espaço será representado em coordenadas homogêneas, por,

$$V = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde

$$\begin{aligned} \frac{x}{w} &= v_1 \\ \frac{y}{w} &= v_2 \\ \frac{z}{w} &= v_3 \end{aligned} \quad (4)$$

e w é o fator de escala real e não nulo.

3.3.1.1 Transformações

Um conjunto de pontos $M(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ será chamado ESPAÇO PROJETIVO, P_n , de dimensão n , se as duas condições abaixo se mantêm:

- a) Qualquer conjunto ordenado $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ determina um ponto $M(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ se pelo menos um dos números x_1, x_2, \dots, x_{n+1} é não nulo. Se todos forem nulos, o conjunto não determina qualquer ponto.
- b) Se λ é um escalar não nulo, $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ e $(\lambda x_1, \dots, \lambda x_{n+1})$ determinam um, e somente um ponto em P_n . Conjuntos não proporcionais determinam pontos distintos em P_n .

Os números x_1, x_2, \dots, x_{n+1} são chamados, como já foi visto antes, coordenadas homogêneas do ponto M , no espaço projetivo P_n .

Dada a relação

$$\lambda * X' = T * X \quad (5)$$

Onde $\lambda \neq 0$, $T_{(n+1)} X_{(n+1)}$ é uma matriz não singular, então partindo-se do conjunto de números componentes de X , (x_1, \dots, x_{n+1}) , pode-se determinar X' , (x'_1, \dots, x'_{n+1}) .

Duas interpretações podem ser dadas à equação (5). A primeira é que um mesmo ponto (x_1, \dots, x_{n+1}) recebeu, agora, um novo conjunto de coordenadas. A segunda interpretação é que a base não mudou, e o ponto (x_1, \dots, x_{n+1}) foi transformado em outro ponto (x'_1, \dots, x'_{n+1}) .

A segunda interpretação caracteriza uma transformação biunívoca no espaço projetivo. Qualquer transformação deste tipo no espaço projetivo, P_n , é chamada TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA. Como X e X' são vetores representativos de pontos no espaço projetivo, e são especificados por coordenadas homogêneas, esta transformação é conhecida como TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEA.

Neste texto, o espaço projetivo é o R^3 , e a matriz transformação homogênea, T , é uma matriz 4×4 .

Considere um ponto $u \in R^3$. Este ponto pode ser transformado em outro $v \in R^3$, através de uma transformação homogênea via equação (5), para $\lambda = 1$,

$$v = H * u \quad (6)$$

e vice-versa,

$$u = H^{-1} * v \quad (7)$$

3.3.1.2 Translação

É possível transladar um ponto nas direções X, Y Z, individualmente e em uma direção arbitrária. Para transladar um ponto u em uma direção arbitrária, basta usar a equação (6), com

$$T = \text{trans}(x_0, y_0, z_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

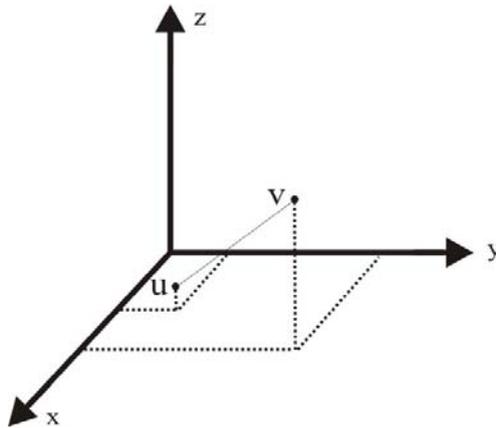


Figura 38. Translação de um ponto u para um ponto v

A quarta coluna da equação (8) representa a origem de um segundo sistema de coordenadas cartesianas, XYZ, em relação ao primeiro $X_0Y_0Z_0$, que pode ser chamado BASE. As três primeiras colunas representam as direções dos eixos do sistema XYZ em relação aos eixos da base. E outras palavras, uma matriz de transformação homogênea pode representar um sistema XYZ em relação a outro $X_0Y_0Z_0$. O fato de as três primeiras colunas terem os valores numéricos dados na equação (8) significa que os eixos X, Y e Z, no sistema XYZ possuem o mesmo sentido e direção que os eixos X_0, Y_0 e Z_0 , da base, respectivamente. Uma matriz identidade de dimensão 4×4 indica que o sistema XYZ e a base são coincidentes, isto é, para $x_0=y_0=z_0=0$, indica que o sistema XYZ está superposto à base.

3.3.1.3 Rotação

Considerando que os pontos **u** e **v** representados na Figura 39 possuem representação no plano $u(x_u, y_u)$ e $v(x_v, y_v)$, respectivamente, e que o ponto **u** foi transformado no ponto **v**, através de um rotação em torno da origem, de um ângulo θ , no sentido anti-horário, tem-se que

$$r = \sqrt{x_u^2 + y_u^2} = \sqrt{x_v^2 + y_v^2} \quad (9)$$

$$x_u = r * \cos \theta_1 \quad (10)$$

$$y_u = r * \text{sen } \theta_1 \quad (11)$$

e

$$x_v = r * \cos (\theta_1 + \theta) \quad (12)$$

$$y_v = r * \text{sen } (\theta_1 + \theta) \quad (13)$$

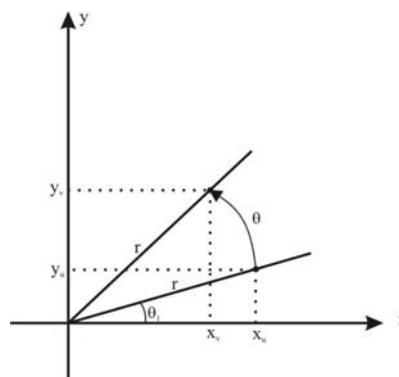


Figura 39. Ilustração de rotação no plano XY

Desenvolvendo as equações (12) e (13), e usando as equações (10) e (11), tem-se que

$$x_v = r * \cos \theta_1 * \cos \theta - r * \text{sen } \theta_1 * \text{sen } \theta \quad (14)$$

ou

$$x_v = x_u * \cos \theta - y_u * \text{sen } \theta \quad (15)$$

$$y_v = r * \text{sen } \theta_1 * \cos \theta + r * \cos \theta_1 * \text{sen } \theta \quad (16)$$

ou

$$y_v = y_u * \cos \theta + x_u * \text{sen } \theta \quad (17)$$

As equações (15) e (17) podem ser escritas, então,

$$x_v = (\cos \theta) * x_u + (-\text{sen } \theta) * y_u \quad (18)$$

$$y_v = (\text{sen } \theta) * x_u + (\cos \theta) * y_u \quad (19)$$

ou na forma vetorial,

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} \quad (20)$$

Observando a Figura 39, nota-se que a rotação foi executada em torno do eixo Z que é perpendicular à página. Neste caso (espaço tridimensional), as equações (18) e (19) podem ser reescritas,

$$x_v = (\cos \theta) * x_u + (-\text{sen } \theta) * y_u + (0) * z_u \quad (21)$$

$$y_v = (\text{sen } \theta) * x_u + (\cos \theta) * y_u + (0) * z_u \quad (22)$$

$$z_v = (0) * x_u + (0) * y_u + (1) * z_u \quad (23)$$

ou na forma vetorial,

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{bmatrix} \quad (24)$$

ou ainda, em coordenadas homogêneas,

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Com raciocínio semelhante, evolui-se as matrizes de rotação para os eixos X e Y, que resumindo são:

$$\text{Rot}(\theta, X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ 0 & \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\text{Rot}(\theta, Y) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\text{Rot}(\theta, z) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

3.3.1.4 Transformações Relativas

A relação que existe entre dois sistemas de coordenadas no espaço tridimensional é expressa através de uma matriz transformação homogênea que pode ser de translação, rotação, ou uma combinação das duas.

Quando existe mais de dois sistemas de coordenadas, sendo T_0^1 a relação da referência 1 com a base, e T_1^2 a relação da referência 2 com a referência 1, a matriz transformação homogênea da Base para a referência 2 é $T_0^2 = T_0^1 * T_1^2$, que pode ser estendido para um sistema n de referências,

$$T_0^n = T_0^1 * T_1^2 * T_2^3 * \dots * T_{n-1}^n \quad (29)$$

ou, em geral,

$$T_p^n = T_p^{p+1} * T_{p+1}^{p+2} * \dots * T_{n-1}^n \quad (30)$$

3.3.2 Orientação da Ferramenta Terminal

Para um robô com n graus de liberdade, aloca-se um sistema de coordenadas em cada junta e calcula-se a matriz de transformação homogênea que relaciona o último sistema de referência com a base. No efetuador é alocado o último sistema de referência da cadeia cinemática, que pode relacioná-lo com a base através de uma matriz de transformação homogênea. Essa matriz de transformação homogênea T_0^n descreve a posição e orientação do efetuador com respeito à base, sendo a sub-matriz superior esquerda 3 x 3 a descrição da orientação. Essa sub-matriz de rotação é equivalente a matriz de rotação R_0^n . Para um robô com n graus de liberdade, a matriz homogênea é dada pela equação (31), onde \mathbf{p} é o vetor posição (x, y, z), \mathbf{a} é a direção de aproximação do efetuador, \mathbf{s} indica a orientação, e \mathbf{n} uma direção normal às direções \mathbf{s} e \mathbf{a} , completando a orientação.

$$T_0^n = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

A orientação do terminal efetuator pode ser descrita também de forma mais simplificada utilizando principalmente os conceitos de Ângulos de Euler e Ângulos Roll, Pitch e Yall.

Ângulos de Euler descrevem qualquer possível orientação em termos de uma rotação ϕ em torno do eixo z, uma rotação θ em torno do eixo y, e finalmente, uma rotação ψ em torno do novo eixo z [Paul (1981)].

$$\text{Euler}(\phi, \theta, \psi) = \text{Rot}(z, \phi) * \text{Rot}(y, \theta) * \text{Rot}(z, \psi) \quad (32)$$

Como em qualquer caso de seqüência de rotações, a ordem é importante.

$$\text{Euler}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\text{sen} \phi & 0 \\ \text{sen} \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen} \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen} \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \psi & -\text{sen} \psi & 0 \\ \text{sen} \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Para especificar a orientação do efetuator pelos ângulos “roll” (balanço), “pitch” (mergulho) e “yall” (guinada), em analogia com navegação, basta especificar a ordem das rotações.

$$\text{RPY}(\phi, \theta, \psi) = \text{Rot}(\phi, z) * \text{Rot}(\theta, y) * \text{Rot}(\psi, x) \quad (34)$$

$$\text{RPY}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\text{sen} \phi & 0 \\ \text{sen} \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen} \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen} \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\text{sen} \psi \\ 0 & \text{sen} \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\text{RPY}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \text{sen} \theta \text{sen} \psi - \text{sen} \phi \cos \psi & \cos \phi \text{sen} \theta \cos \psi + \text{sen} \phi \text{sen} \psi \\ \text{sen} \phi \cos \theta & \text{sen} \phi \text{sen} \psi \text{sen} \psi + \cos \phi \cos \psi & \text{sen} \phi \text{sen} \theta \cos \psi - \cos \phi \text{sen} \psi \\ -\text{sen} \theta & \cos \theta \text{sen} \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \quad (36)$$

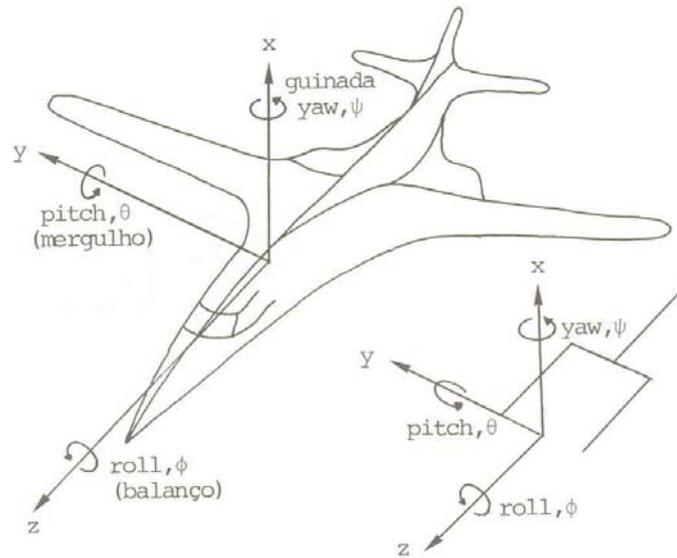


Figura 40. Analogia da representação da orientação do efetuador com navegação

A Figura 40, de Alves (1988), ilustra os ângulos *roll*, *pitch*, *yall* para um manipulador, em analogia com a navegação.

Segundo Rosário (2002), os ângulos *roll*, *pitch*, *yall* também podem ser encontrados a partir da matriz de transformação homogênea (31) com a utilização da função atan2, sendo

$$\phi = ATAN2\left[\frac{n_x}{n_y}\right], \theta = ATAN2\left[\frac{-n_z}{\cos \phi * n_x + \sin \phi * n_y}\right] \text{ e } \psi = ATAN2\left[\frac{\sin \phi * a_x - \cos \phi * a_y}{-\sin \phi * s_x + \cos \phi * s_y}\right].$$

3.4 Problema Cinemático Inverso

Robôs controlados por computadores são, geralmente, controlados em relação ao espaço de variações das juntas, enquanto objetos a serem manipulados são expressos em um sistema de coordenadas base. Para controlar a posição e orientação do efetuador, com o objetivo de alcançar o objeto, a solução cinemática inversa é a mais importante. Em outras palavras, dadas a posição e orientação do efetuador (seja como XYZφθψ ou em forma de matriz transformação homogênea T_0^n) e os parâmetros dos elos e juntas, é necessário encontrar os ângulos das juntas $\mathbf{q}=(q_1,q_2,q_3,\dots,q_n)$ do robô que posicionam o efetuador da forma desejada.

Em geral, o problema cinemático inverso pode ser resolvido por vários métodos. Em Fu (1987), são detalhados os métodos da Técnica da Transformada Inversa por Solução de Ângulos de Euler, e Aproximação Geométrica. Já Craig (2005) discorre sobre o método Algébrico versus Geométrico, Solução Algébrica por Redução Polinomial, e Solução de Pieper quando três eixos se cruzam. Rosário (2002) prevê a utilização da matriz Jacobiana. Neste sub-capítulo, apenas a Solução Geométrica será percorrida, pois seu estudo serviu de base para o modelo cinemático inverso (sub-capítulo 3.5).

Craig (2005) define a solução por aproximação geométrica por uma tentativa de decompor a geometria espacial do braço em vários problemas geométricos planos. Para muitos manipuladores, particularmente quando $\alpha_i = 0$ ou ± 90 (ver Figura 37), isso pode ser feito facilmente. Os ângulos das juntas podem ser resolvidos utilizando-se ferramentas da geometria plana. Lee e Ziegler (1984) utilizaram esta técnica para obter modelos cinemáticos inversos de manipuladores Puma.

A Figura 41 mostra o triângulo formado por L_1 e L_2 (1° e 2° elos), e a linha que liga a origem da base com a origem do 3° referencial. A linha tracejada mostra outra possível configuração para o triângulo, que leva à mesma posição o 3° referencial. Considerando um triângulo sólido, pode-se aplicar a “lei de cossenos” para resolver θ_2 :

$$x^2 + y^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(180 + \theta_2) \quad (37)$$

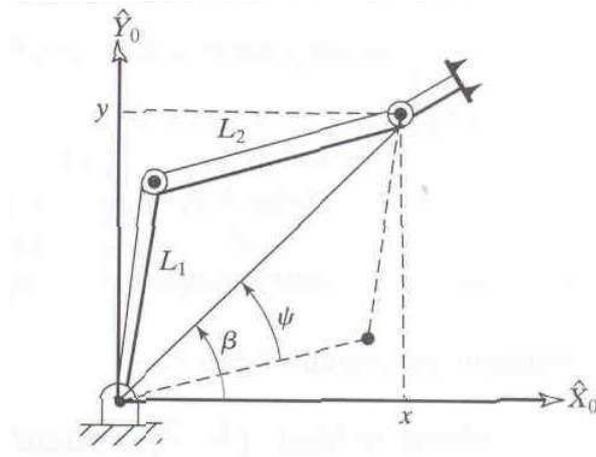


Figura 41. Geometria Plana associada com um robô planar com três elos [Craig (2005)].

Como $\cos(180+\theta_2) = -\cos(\theta_2)$, então

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{-2L_1L_2} \quad (38)$$

Para esse triângulo existir, então $\sqrt{x^2 + y^2}$ precisa ser menor ou igual a soma do tamanho dos elos. Essa condição deve ser checada pelo algoritmo para verificar a existência de soluções. Assumindo que existe solução, essa equação é resolvida para o valor de θ_2 entre 0 e -180 graus. Para a segunda solução, da linha tracejada, é encontrada por simetria.

Para resolver θ_1 , encontra-se os ângulos ψ e β indicados na Figura 41. Como β pode ser em qualquer quadrante, dependendo do sinal de x e y , então é necessário utilizar a função arco tangente de dois argumentos:

$$\beta = \text{Atan2}(y,x) \quad (39)$$

A função Atan2 pode ser encontrada em Paul et al. (1981).

Para encontrar ψ , aplica-se a lei de cossenos novamente:

$$\cos \psi = \frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1 \sqrt{x^2 + y^2}} \quad (40)$$

O arco cosseno precisa ser resolvido de forma que $0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$, para que

$$\theta_1 = \beta \pm \psi \quad (41)$$

Essas considerações são típicas quando se utiliza aproximação geométrica. O sinal + de (41) é utilizado quando $\theta_2 < 0$ e – quando $\theta_2 > 0$.

Como os ângulos em um plano se somam, então a soma dos ângulos das três juntas precisam ser a orientação do último elo:

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \phi \quad (42)$$

Para completar a solução essa equação é resolvida por θ_3 de acordo a orientação desejada.

3.5 Modelo Cinemático do Membro Superior Humano

Hermeni (2000) simplificou o membro superior humano em um modelo geométrico 9R (9 graus de liberdade, todos revolutos), iniciando-se das juntas internas da clavícula, até o pulso. Seu modelo é exibido na Figura 42.

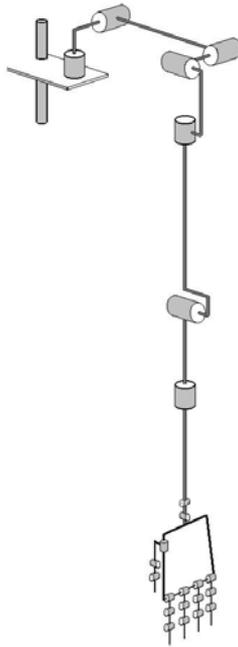


Figura 42. Modelo Antropomórfico Simplificado [Hermini (2000)].

Kapandji (1982) estabeleceu, em seu estudo da fisiologia das juntas, a configuração zero para o membro superior humano, utilizado freqüentemente na modelagem de robôs antropomórficos. Em seu modelo, Kapandji definiu o primeiro movimento do ombro como adução - abdução, e o segundo como flexão-extensão. Diferentemente da considerada posição anatômica, a posição inicial da mão tem a palma voltada para o corpo.

A configuração de Kapandji é utilizada neste trabalho, assim como também em Hermini (2000) e em Tondu et al. (2005). A Figura 24, de Tondu, exibe a analogia entre o considerado zero anatômico e o posição zero de Kapandji. Essa configuração pode ser vista também na Figura 42.

Para estudo e desenvolvimento dos softwares de cinemática direta e inversa em LabVIEW (sub-capítulo 5.1) foi utilizado neste trabalho um modelo que vai da junta interna da clavícula até o punho, baseado no modelo do membro superior humano de Hermini (2000), ficando como exibido na Figura 43.

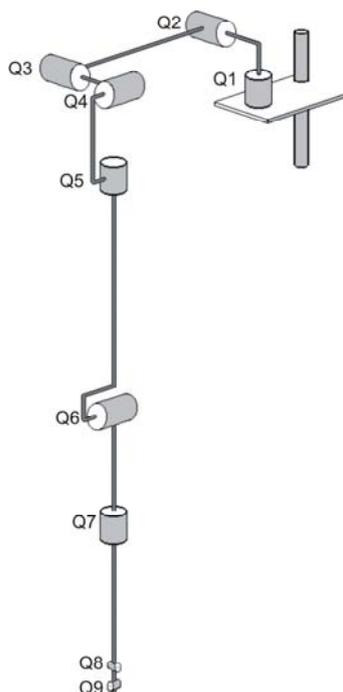


Figura 43. Modelo Geométrico do Membro Superior Humano

Os limites angulares de cada junta, à semelhança do membro superior humano, estão estipulados na Tabela 3.

Tabela 3. Características das juntas

Junta	Eixo	Descrição	Mín (°)	Máx (°)
1	Z	flexão-extensão da junta interna do ombro	0	-5
2	X	abdução-adução da junta interna do ombro	0	30
3	X	abdução-adução do braço	0	140
4	Y	flexão-extensão do braço	0	90
5	Z	rotação do cotovelo	0	-90
6	Y	flexão-extensão do cotovelo	0	155
7	Z	rotação do punho	0	-180
8	X	flexão-extensão do punho	0	170
9	Y	abdução-adução do punho	0	55

3.5.1 Modelo Cinemático Direto

O modelo Cinemático Direto foi desenvolvido utilizando os conceitos de modelagem cinemática direta do sub-capítulo 3.3 e de matrizes de rotação do sub-capítulo 3.3.1.

A técnica consiste em, primeiro especificar as matrizes de orientação para cada elo usando as equações (26), (27) ou (28), reescritas abaixo, para rotação da junta em torno de X, Y ou Z respectivamente. No modelo geométrico utilizado (Figura 43) tem-se seqüencialmente rotação em Z, X, X, Y, Z, Y, Z, X e Y, caracterizando, respectivamente, flexão-extensão da junta interna do ombro, abdução-adução da junta interna do ombro, abdução-adução o braço, flexão-extensão do braço, rotação do cotovelo, flexão-extensão do cotovelo, rotação do punho, flexão-extensão do punho e abdução-adução do punho.

$$Rot(\theta, X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ 0 & \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Rot(\theta, Y) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$Rot(\theta, z) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} n_{xi} & s_{xi} & a_{xi} \\ n_{yi} & s_{yi} & a_{yi} \\ n_{zi} & s_{zi} & a_{zi} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Vale lembrar que a matriz de orientação do último elo A_{n-1}^n é a matriz de orientação da ferramenta terminal, que pode ser utilizada para obtenção dos ângulos “roll”, “pitch” e “yall”

(sub-capítulo 3.3.2). A escolha da metodologia “roll”, “pitch” e “yall” em detrimento da técnica de Ângulos de Euler é que esta se assemelha com o modelo do membro superior humano, enquanto a dos Ângulos de Euler é adequada para a maioria dos manipuladores robóticos industriais, que possuem as últimas juntas girando em torno de Z, Y e Z novamente. Essa configuração pode ser visualizada na Figura 33, que ilustra o manipulador puma.

Encontradas as matrizes de orientação de cada elo, o próximo passo é estabelecer pontos dentro do modelo para origem dos sistemas referências locais. O último ponto se encontra no fim da cadeia cinemática, indicando a posição x, y e z do efetuador.

$$O_i = O_{i-1} + A_{i-1}^i * Li \quad (44)$$

Os pontos base são encontrados utilizando a equação (44), onde L_i representa o comprimento dos elos i , e

$$O_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (45)$$

A matriz transformação homogênea, que faz relação entre o sistema de referência local estabelecido no último elo e o sistema referencial fixo (base), como já demonstrado no sub-capítulo 3.3.1.4, pode ser encontrada pela equação (29), a baixo reescrita para o modelo antropomórfico:

$$T_0^9 = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3 * A_3^4 * A_4^5 * A_5^6 * A_6^7 * A_7^8 * A_8^9 \quad (46)$$

3.5.2 Modelo Cinemático Inverso

Encontrar os valores da juntas de um robô, principalmente quando há um grande número de graus de liberdade como neste trabalho, é um trabalho exaustivo. É necessário encontrar todas as alternativas possíveis e escolher dentre estas a mais adequada. Baseando-se na técnica de

aprofundamento geométrico explicada no sub-capítulo 3.4, foi utilizada neste trabalho uma alternativa para o caso particular, capaz de encontrar apenas uma opção para os ângulos das primeiras juntas do robô antropomórfico, relativas ao posicionamento no plano cartesiano.

Essa técnica se mostrou eficiente quando aplicada experimentalmente no software desenvolvido (sub-capítulo 5.1). Vários testes realizados comparando o software de cinemática direta e o de cinemática inversa chegaram, inversamente (ver Figura 34), aos mesmo números.

Um braço antropomórfico pode ser considerado como ligações entre três pontos no espaço cartesiano (Figura 44). O ponto $\mathbf{o}=(x_o,y_o,z_o)$ representa o ombro e também a origem do braço, o ponto $\mathbf{c}=(x_c,y_c,z_c)$ representa o cotovelo e o ponto $\mathbf{m}=(x_m,y_m,z_m)$ a mão ou o terminal efetuator.

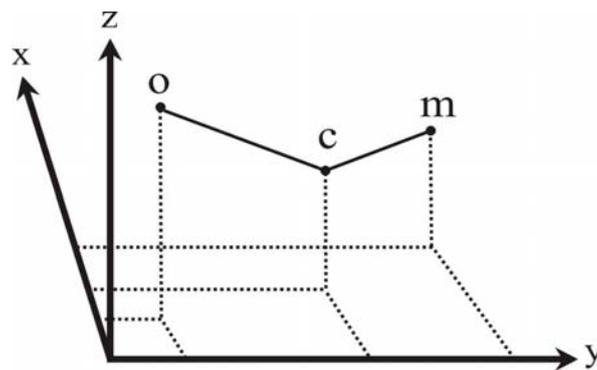


Figura 44. Representação do Braço Robótico (visto de trás) em três pontos

O processo inicia-se pelo movimento da junta 3, responsável pela abdução-adução do braço (ver Figura 43 e Tabela 3). Este deve ser alinhado com o ponto a ser alcançado, $\mathbf{m} = \mathbf{p}=(x_p,y_p,z_p)$ - (tamanho do atuador), para que seja formado um plano bidimensional entre as outras juntas e o ponto \mathbf{m} . A distância entre \mathbf{p} e \mathbf{m} será responsável pelo encaixe do braço com as articulações do punho, depois deste calculado em relação aos ângulos “roll”, “pitch” e “yall”.

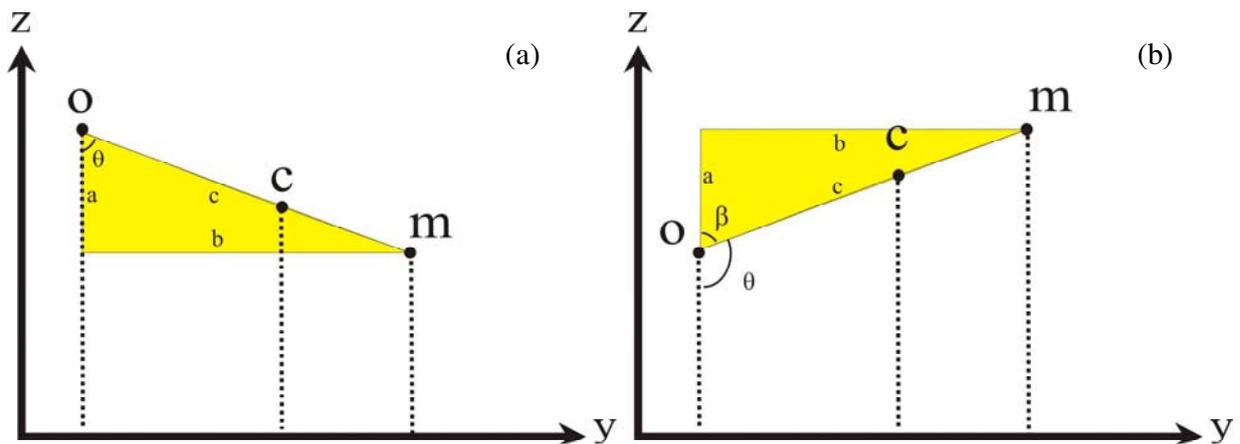


Figura 45. Junta do Ombro no plano ZY – braço acima e abaixo do nível do ombro

O alinhamento pode ser feito ajustando seu ângulo de acordo com a equação (47), sobre a projeção dos pontos no plano ZY (Figura 45), lembrando que a é o absoluto da diferença entre o_z e m_z , b é o absoluto da diferença entre o_y e m_y , e $c = \sqrt{a^2 + b^2}$.

$$\theta = \text{acos} \left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2 \cdot a \cdot c} \right) \quad (47)$$

Caso m_z seja maior que o_z , ou seja, o ponto m esteja acima do nível do ombro, como na Figura 45 – (b), θ_4 é igual a 180 menos o resultado da equação (47). Caso m_y seja menor que o_y , o inverso ocorre, para que o braço se alinhe com o ponto cruzando o ponto zero o . A idéia pode ser melhor visualizada na Figura 46.

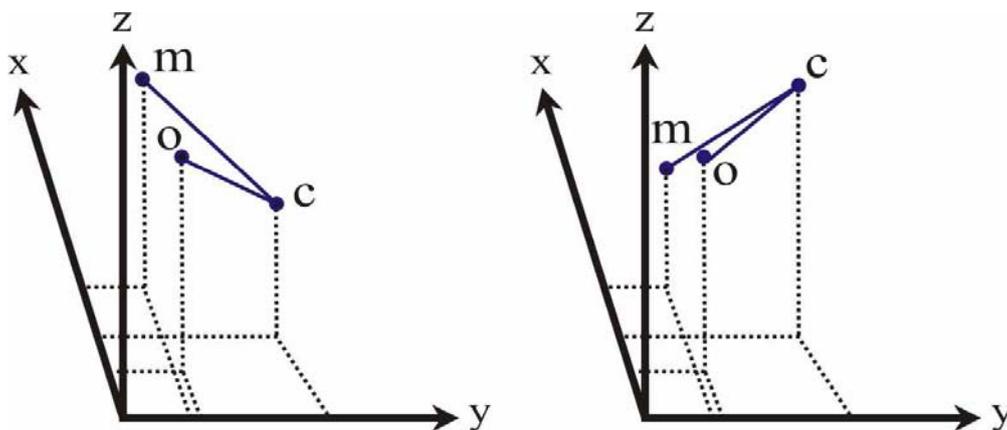


Figura 46. $m_y < o_y$: (a) $m_z > o_z$; (b) $m_z < o_z$.

Com o alinhamento da junta de abdução-adição do ombro com o ponto **m**, cria-se um plano bidimensional entre as outras duas juntas e o ponto. A esse novo plano atribui-se, para facilitar o entendimento, os eixos **v** e **w** (Figura 47).

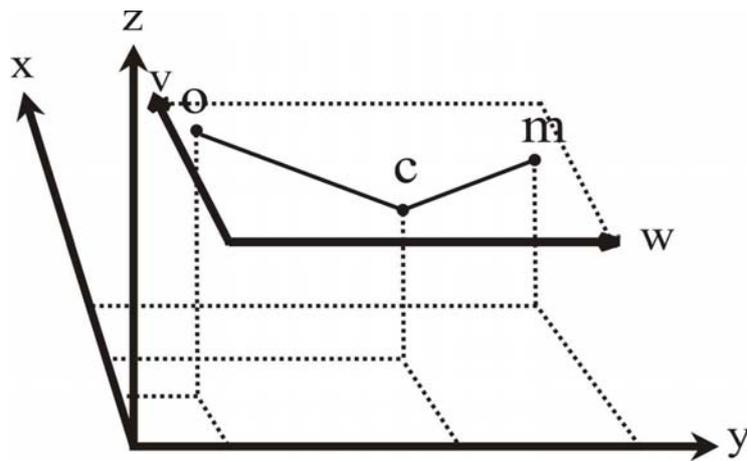


Figura 47. Plano das 2° e 3° juntas

A segunda junta, representando a junta 4 do modelo antropomórfico, pode se calculada facilmente no novo plano v,w, por geometria plana (Figura 48).

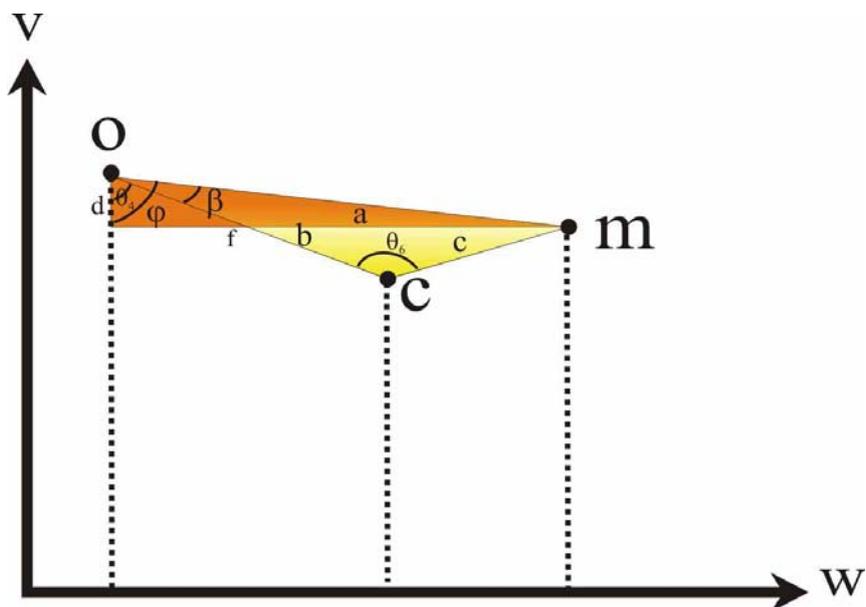


Figura 48. Cálculo da 2° e 3° juntas (junta 4 e 6 do modelo antropomórfico, respectivamente)

Na Figura 48, **a** representa a distância entre o ponto **o** e o ponto **m**, que é igual a (48), **b** é igual ao tamanho do braço (distância entre ombro e o centro do eixo de flexão-extensão do cotovelo), **c** é igual ao tamanho do antebraço (distância entre o centro do eixo de flexão-extensão do cotovelo e ponto onde os três últimos eixos se cruzam, no punho), **d** é o absoluto da diferença de o_x e m_x , e **f** é o absoluto da diferença entre o_y e m_y .

$$a = \sqrt{(o_x - m_x)^2 + (o_y - m_y)^2 + (o_z - m_z)^2} \quad (48)$$

Definidos as dimensões dos dois triângulos, temos que,

$$\theta_4 = \beta - \varphi \quad (49)$$

exceto quando $m_y < o_y$, ou seja, o braço precisa cruzar na frente do ombro (ver Figura 46).

Para esse caso

$$\theta_4 = 180 - \beta - \varphi \quad (50)$$

Sendo que

$$\beta = \text{acos}((a^2 + b^2 - c^2) / (2 * a * b)) \quad (51)$$

$$\varphi = \text{acos}((a^2 + d^2 - f^2) / (2 * a * d)) \quad (52)$$

A terceira junta, ou junta 6 do modelo antropomórfico pode também ser definida, baseando-se nos triângulos da Figura 48, por

$$\theta_6 = \text{acos}((b^2 + c^2 - a^2) / (2 * b * c)) \quad (53)$$

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi realizado uma revisão dos conceitos de modelagem matemática de manipuladores. Com base nesses conceitos foram desenvolvidos o modelo cinemático direto e o modelo cinemático inverso simplificado de um manipulador antropomórfico. Esses modelos são utilizados no capítulo 5 para o desenvolvimento de softwares em LabVIEW.

O Modelo Cinemático Inverso foi desenvolvido apenas para o cálculo do vetor de posição no plano cartesiano e trata-se de um algoritmo simplificado, proposto para o caso particular.

Capítulo 4

Utilização de Músculos Artificiais em Robôs Antropomórficos

Para atender às exigências futuras de atuadores automáticos estão sendo desenvolvidos sistemas de atuação modernos, incluindo [Davis et al. (2003)]:

- Variações de atuadores dirigidos pneumaticamente;
- Atuadores piezelétricos;
- Atuadores de Efeito de Memória de Forma;
- Novos Líquidos Hidráulicos baseados em fluidos *eletro-rheological*;
- Atuadores poliméricos.

Entre os diversos estudos realizados atualmente a respeito de atuadores mais eficientes, destaca-se a tentativa de emular o músculo humano. No decorrer deste capítulo, dois tipos de músculos artificiais citados com frequência serão exibidos: pneumáticos, e de SMA (metal de memória de forma).

4.1 Arranjo Antagônico

Músculos artificiais são dispositivos de contração e conseqüentemente podem gerar movimento em somente uma direção. Exatamente como na musculatura esquelética, dois atuadores precisam ser utilizados para gerar um movimento bidirecional: um em cada direção.

Enquanto um faz o movimento ou carrega um peso, o outro age como um freio para parar no local desejado. Para realizar o movimento contrário, os músculos alternam de função. Esta conexão oposta dos músculos geralmente é chamada de arranjo antagônico, e pode ser usada para movimento linear ou rotativo, como é exibido na Figura 49 [Daerden e Lefeber (2002)].

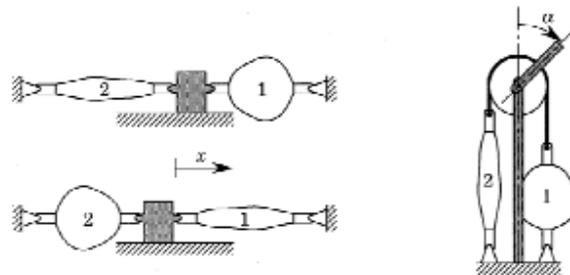


Figura 49. Arranjo Antagônico [Daerden e Lefeber (2002)].

Os atuadores clássicos e essencialmente elétricos dos robôs industriais são caracterizados por uma estrutura compacta e globalmente simétrica ao redor do eixo de rotação do atuador. Em comparação, os músculos artificiais antagônicos mostram tamanho e características mecânicas muito diferentes [Tondu et al. (2005)]:

- O comprimento do músculo é um fator importante porque a faixa de trabalho do atuador da junta depende diretamente disso; este fator é ainda mais significativo porque a contração máxima do músculo é limitada. Porém, como no sistema muscular humano, é possível integrar os músculos artificiais ao longo das ligações da estrutura robotizada.
- O eixo de rotação é perpendicular ao plano dos dois músculos do atuador e situado a uma extremidade do par de músculos (Figura 49). Por conseguinte, o atuador de músculo artificial não mostra a simetria nos eixos, peculiar à maioria dos atuadores revolutos.

Devido à característica não clássica do atuador, o *design* do robô precisa ser adaptado, com o objetivo de encontrar o correto acordo entre dimensões e performances dinâmicas aceitáveis.

Outro problema encontrado na utilização de músculos artificiais é seu comportamento dinâmico. É bem sabido que juntas de um manipulador são influenciadas por efeitos dinâmicos de outras juntas e pelo efeito estático da gravidade. Nos robôs industriais clássicos, esses efeitos geralmente são diminuídos pela utilização de redutores. Essa estratégia não pode ser utilizada em robôs antropomórficos, caso contrário seria perdido a similaridade com o modelo natural.

4.2 Músculos Artificiais Pneumáticos

A tecnologia pneumática tem uma longa história de sucesso, e atualmente cilindros pneumáticos são amplamente encontrados em processos de manufatura onde são necessários movimentos seguros, rápidos, simples e de baixo custo. Entretanto, cilindros têm problemas com precisão em controle de posição, velocidade e aceleração. Os Atuadores de Músculo Pneumático (pMA) Trançados formam um desenvolvimento interessante do princípio que oferece performance poder / peso maior e controle preciso de posição, movimento e força. Isso faz deles uma fonte interessante de atuadores alternativos, porém há dificuldades com modelagem de erros e baixas larguras da banda. [Davis et al. (2003)].

Segundo Daerden e Lefeber (2002), o músculo pneumático artificial mais utilizado e publicado atualmente é o músculo McKibben [Schulte (1961)]. Trata-se um músculo trançado cilíndrico, com ambas as extremidades não só transferindo tensão da fibra, mas também obturando a saída do gás. Os materiais tipicamente usados são borracha de látex ou silicone, e fibras de Nylon. A Figura 50 mostra sua estrutura e operação.

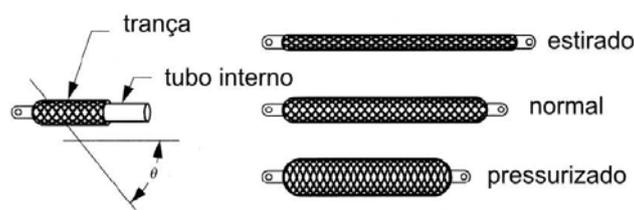


Figura 50. Músculo trançado McKibben

Pela alteração do ângulo das fibras, o diâmetro do músculo é alterado. Considerando l_s como o tamanho de cada fibra da trança, e N o número de envolvimentos dela em torno do tubo, é possível deduzir o volume do diafragma:

$$V = \frac{l_s^3}{4\pi N^2} \cos \theta \sin^2 \theta \quad (54)$$

O máximo volume é assim atingido a um ângulo nas fibras de $54,7^\circ$.

A tensão pode ser relacionada ao ângulo da textura por

$$F = \frac{\pi D_{\max}^2 P}{4} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (55)$$

sendo D_{\max} o diâmetro do músculo com o ângulo da trança a 90° , que é o caso limitado. Definindo contração por

$$\varepsilon = 1 - \frac{l}{l_0} \quad (56)$$

com l colocado para o comprimento atual do músculo, e l_0 o comprimento normal do músculo, tensão também pode ser relacionada com contração:

$$F = \frac{\pi D_0^2 P}{4} \left(\frac{3}{\tan^2 \theta_0} (1 - \varepsilon^2) - \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \right) \quad (57)$$

com D_0 e θ_0 para o diâmetro e o ângulo da trança normalmente, respectivamente. A faixa de trabalho de contração-extensão depende do limite mínimo do ângulo da fibra.

As expressões de tensão podem ser expandidas para levar em consideração o atrito entre as fibras e os tubos e entre as próprias fibras, e a deformação do tubo interno. O atrito e a

deformação não elástica do diafragma aparecem como histerese e pressão *threshold*, enquanto deformação lateral elástica abaixa tensão. A força necessária para alongar ou comprimir o tubo, considerando seu comprimento inicial, pode ser modelada como uma força de mola passiva agindo em paralelo com a força ativa calculada por

$$F = -p \frac{dV}{dl} \quad (58)$$

A força passiva vai aumentar tensão para $l > l_0$ e diminuir para $l < l_0$.

O *range* (faixa de trabalho) de pressão operacional típico dos Músculos McKibben é 100-500 kPa. O limite máximo de pressão permitido é determinado pela força do tubo: pressão muito alta pode fazer com que o tubo inche pelos vãos da malha, e conseqüentemente estoure.

Quanto maior a pressão, maior energia pode ser transferida, mas igualmente maior a pressão de *threshold* devido ao aumento da dureza do diafragma. Como resultado disso, forças pequenas não podem ser geradas.

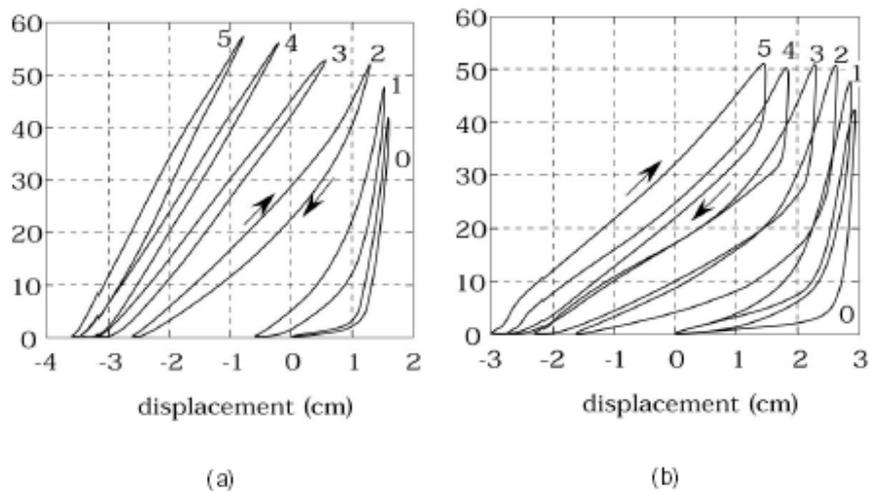


Figura 51. Tensão do músculo McKibben (N) e histerese em condições isobáricas (0, 100, 200, 300, 400 e 500 kPa): (a) trança de nylon; (b) trança de fibra de vidro. [Daerden e Lefeber (2002)]

O Músculo Artificial McKibben é um atuador pneumático que exibe muitas das propriedades encontradas em um músculo real. Suas características primárias, flexibilidade e leveza, fazem dele ideal para aplicações como braços robóticos bioinspirados e projetos de próteses motorizadas. O dispositivo foi desenvolvido primeiro para uso em membros artificiais em 1950 e, mais recentemente, foi comercializado nos anos 80 por *Bridgestone Rubber Company* do Japão e nos anos 1990 pelo *Shadow Robot Group* da Inglaterra para aplicações automáticas. Versões do atuador também estão disponíveis na *Images Company*, e atualmente na Festo. Entre os atributos mais atraentes do atuador é uma força muito alta em relação ao peso, ideal para robôs móveis.

Utilizando músculos artificiais McKibben em arranjo antagônico (sub-capítulo 4.1), B. Tondu desenvolveu um Robô Antropomórfico com sete graus de liberdade, baseado no membro superior humano [Tondu et al. (2005)]. Seu robô, assim como o *Anthroform Arm*, da Universidade de Washington, também baseado em músculos artificiais pneumáticos, estão descritos no sub-capítulo 2.5.

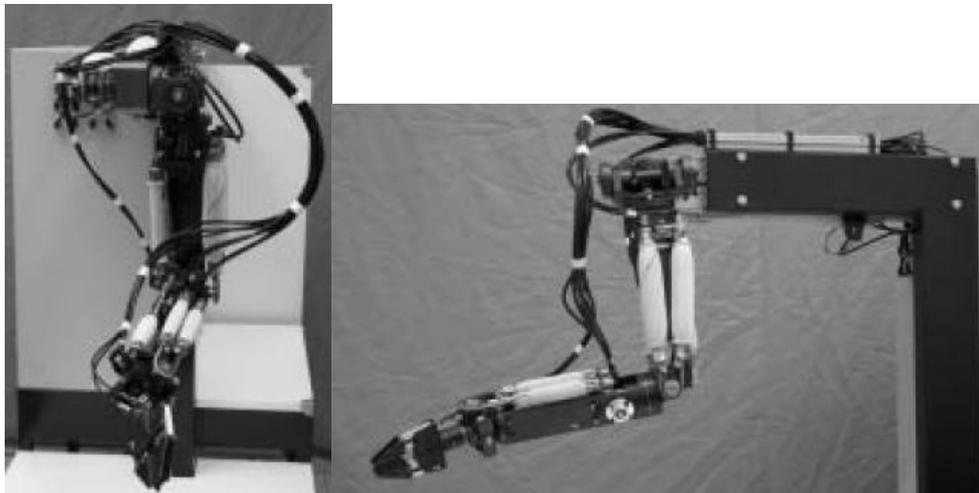


Figura 52. Fotografias do Robô Antropomórfico de Tondu

4.3 Músculos Artificiais de Metal de Memória de Forma (SMA)

Os metais com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMAs*) são ligas metálicas que permitem a recuperação da geometria original do corpo ou o desenvolvimento de consideráveis

forças de restituição ao se restringir a recuperação de sua forma original, após a imposição de um campo de temperatura e/ou de tensões através de transformações de fase induzidas no material [Savi et al. (2003)].

As ligas com memória de forma apresentam três fenômenos fundamentais: a pseudoelasticidade, a memória de forma (Shape Memory Effect - SME) e a transformação de fase devida à variação de temperatura. De fato, o efeito de memória de forma pode ser obtido de duas formas: de uma via (one-way) ou reversível (two-way).

Atuadores baseados em SMA tem uma ótima relação força/peso, o que favorece sua utilização em aplicações que necessitam grandes forças aliadas a baixos pesos.

O efeito de memória de forma é encontrado em certas ligas metálicas, como por exemplo Ni-Ti (Níquel-Titânio) e Cu-Zn-Al. Esse efeito é associado a transformações internas do metal, conhecidas como transformação martensítica termoelástica, que permite ao metal transformar energia térmica em energia cinética. Trata-se de um tipo de transformação nas estruturas dos cristais que ocorrem no tratamento térmico de aços para dar-lhes dureza e força.

A liga que possui maior sucesso é a de Níquel-Titânio, que foi descoberta no *Naval Ordnance Laboratory*, nos estados unidos, e pode reverter sua deformação por volta de 10% quando aquecida acima do *Austenite finish* (A_f) (Figura 53).

Existem duas fases bem distintas no SME: A Fase Martensítica e a Fase Austenítica. Na fase martensítica a liga é facilmente deformada sob stress (Figura 53). Desde que este não exceda um certo montante (normalmente por volta de 6 a 10% para NiTi), a forma original pode ser totalmente recuperada após aquecimento, quando a liga entra na fase austenítica (transformação contrária da fase martensítica). Uma importante característica relacionada a esse fenômeno é que o stress de deformação abaixo da temperatura *Martensite finish* (M_f) é consideravelmente menor que o stress de recuperação. Essa é uma das mais valiosas propriedades no desenvolvimento de atuadores baseados em SMA [Soares (1997)].

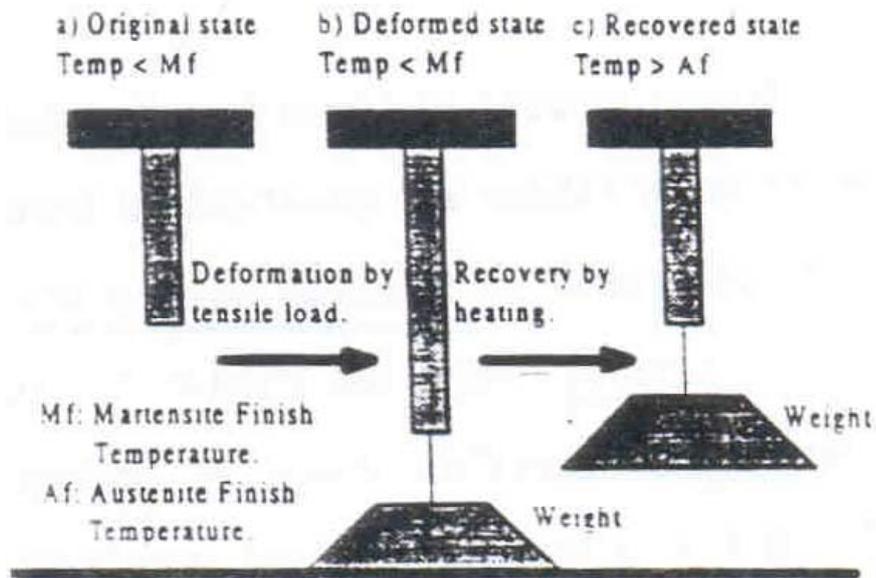


Figura 53. O Efeito de Memória de Forma [Soares (1997)].

O fenômeno de transformações da fase martensítica é responsável pelas propriedades dos SMAs. Estas transformações são processos não-difusivos envolvendo fases sólidas que ocorrem a velocidades muito elevadas. Atribui-se a causa dessas transformações à diferença de energia livre entre as estruturas constituintes envolvidas no processo, o que induz modificações nas ligações químicas, tornando as transformações de fase de caráter essencialmente cristalográfico.

Essas transformações apresentam como principais características a não-dependência do tempo, forte dependência da temperatura e a propriedade de reversibilidade. Outra característica importante é que o material pode ser submetido a esse processo repetidas vezes, sem perda das propriedades.

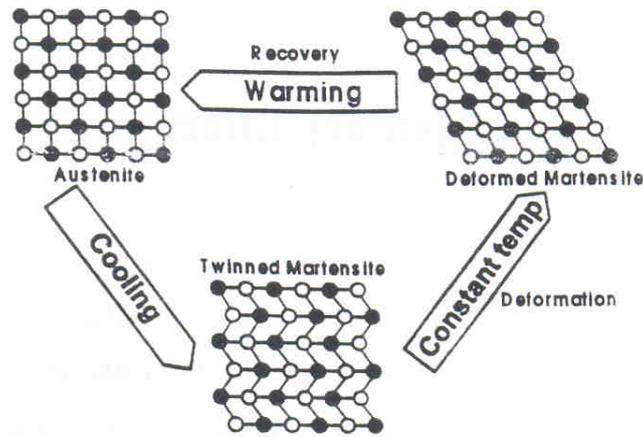


Figura 54. Análise Microscópica: Estrutura dos Cristais [Soares (1997)].

A Figura 54 ilustra a transformação microscópica do SMA. Ela pode ser dividida em duas fases distintas: Uma fase de alta temperatura chamada austenítica, e uma fase de baixa temperatura, chamada martensítica. Quando aquecido à fase austenítica, a liga volta a sua forma original.

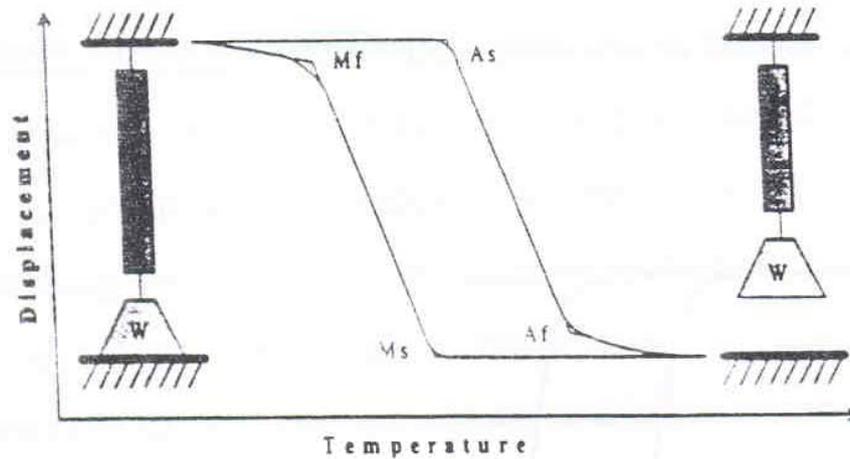


Figura 55. Análise Macroscópica: Mudanças na forma sobre condições de carga constantes [Soares (1997)].

A Figura 55 ilustra um simples experimento utilizando um fio de sma. Quando o material está na fase austenítica de temperatura alta, e considerando que a carga está abaixo do limite máximo, o fio apresenta seu tamanho original. Quando é resfriado, ele entra no estado *twinned martensite* e a tensão da carga alonga o fio. Aumentando a temperatura novamente acima de A_f o fio recupera sua forma original.

As principais características associadas ao comportamento termomecânico das SMAs são:

- **Transformação de fase devida à variação de temperatura:**

Uma amostra de SMA a uma temperatura elevada e livre de tensões apresenta uma microestrutura austenítica. A Figura 56 (a) apresenta o fenômeno de transformação de fase devida à variação de temperatura, mostrado através da curva deformação-temperatura. Partindo do ponto **D**, com o decréscimo da temperatura, a estrutura cristalina experimenta uma transformação de fase martensítica (trecho **AB**) e conseqüente uma auto-acomodação destes cristais martensíticos. Este processo se inicia em $T = M_s$ (ponto **A**) e se desenvolve até que a temperatura $T = M_f$ (ponto **B**), abaixo da qual a martensita é estável, seja alcançada. Elevando-se a temperatura a partir do ponto **B**, ao atingir A_s (ponto **C**), observa-se uma transformação de fase inversa (trecho **CD**) que persiste até que a temperatura A_f seja alcançada (ponto **D**). Este fenômeno pressupõe três regiões distintas. Duas delas relacionadas aos trechos lineares que correspondem à expansão térmica das fases austenítica e martensítica e uma região onde há um laço de histerese relacionada aos trechos de transformação de fase. A área compreendida por este laço representa a energia dissipada durante o processo.

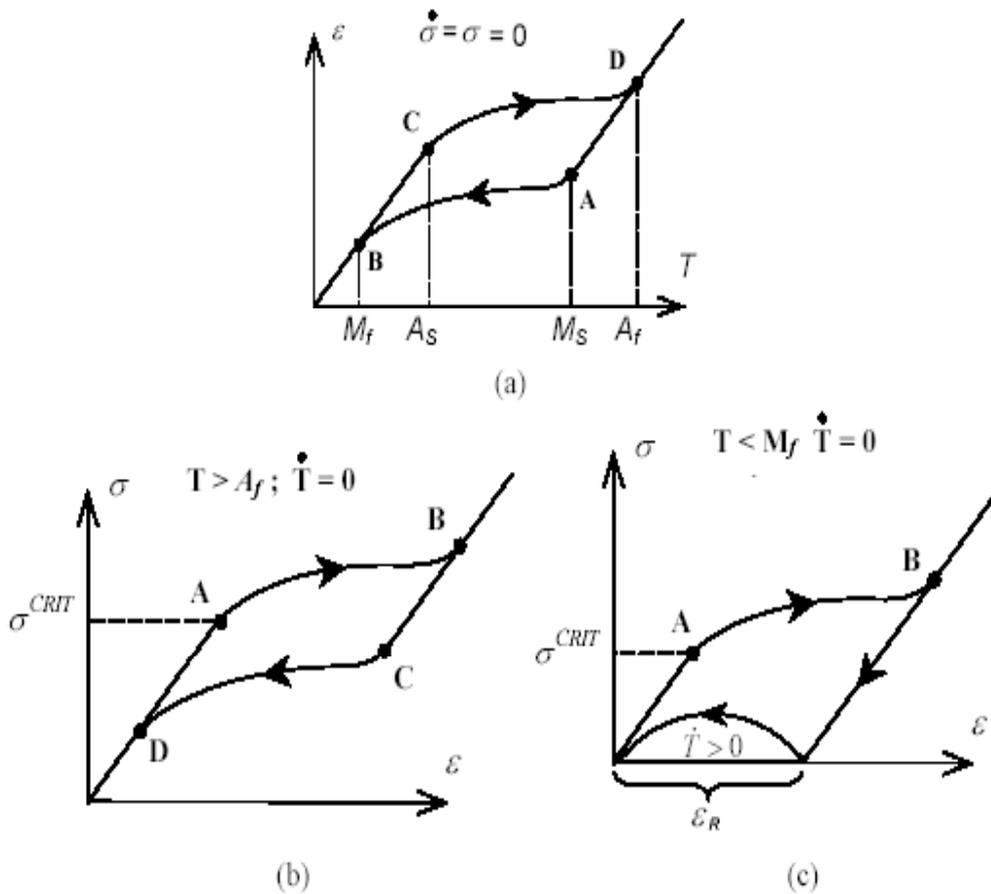


Figura 56. (a) Transformação de fase devida à variação da temperatura [Soares (1997)]; (b) Pseudoelasticidade; (c) Memória de forma.

- **Pseudoelasticidade:**

Considere agora uma amostra a uma temperatura superior a A_f . Nesta situação a fase austenítica é estável. De acordo com a Figura 56 (b), que mostra uma curva tensão-deformação para uma temperatura constante $T > A_f$ com a aplicação de um carregamento, o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica seja alcançada (ponto **A**), quando então dá-se início uma transformação de fase $A \Rightarrow M^+$ (trecho **AB**). O material passa por uma autoacomodação devido à tensão aplicada, induzindo a formação de uma variante de martensita (M^+) que se conclui no ponto **B**. Ao descarregar-se a amostra, o material experimenta uma transformação inversa $M^+ \Rightarrow A$ (trecho **CD**), já que para $T > A_f$ a martensita é uma fase

instável na ausência de tensões. É importante destacar mais uma vez o aparecimento de um laço de histerese, região compreendida entre os pontos **A**, **B**, **C** e **D**. Vale ressaltar que existe um limite à recuperação dessas deformações, representado pelo limite elástico da fase produto obtida após a transformação a partir de onde o material passa a se comportar plasticamente e a deformação não mais pode ser recuperada.

- **Memória de forma:**

Neste ponto, considere uma amostra de **SMA** com uma estrutura martensítica, obtida a partir do resfriamento de uma amostra a uma temperatura inferior a M_f . A Figura 56 (c) mostra a curva tensão-deformação para esta amostra submetida a um carregamento termomecânico. Com a aplicação de um carregamento tem-se uma resposta elástica até que uma tensão crítica seja alcançada (ponto **A**), dando início a um processo de reorientação da martensita resultando em uma única variante (no caso, martensita associada à tração, M^+). Durante este processo de reorientação a tensão não se desenvolve muito em comparação com a deformação alcançada (trecho **AB**). A partir do ponto **B** a liga volta a apresentar um comportamento elástico. Ao descarregar a amostra não há uma nova conversão em diversas variantes, pois esta única variante resultante é termodinamicamente estável para $T < A_s$, havendo apenas uma recuperação elástica. A deformação residual resultante pode então ser recuperada através do aquecimento da amostra acima de A_f . Assim o material retorna à fase austenítica, assumindo a configuração geométrica original e apresentando o efeito de memória de forma.

- **Memória de forma reversível:**

O efeito de memória de forma reversível é obtido após submeter uma liga com memória de forma a um processo de treinamento que permite associar uma forma a cada fase, em função da variação de temperatura. Existem dois processos de treinamento para ligas com memória de forma denominados ciclos de **SME** (*shape memory effect cycling*) e treinamento através do aparecimento de martensita não-maclada (treinamento **SIM** ou *stress-induced martensite training*). O processo de ciclos de **SME** é baseado no processo de plastificação da martensita após o processo de reorientação e consiste na aplicação de um carregamento até que o limite de

escoamento da fase produto seja superado para temperatura constante e $T < M_f$. Por outro lado, o processo de treinamento **SIM** é obtido a partir do fenômeno de pseudoelasticidade (para $T > A_f$) e também consiste em carregar o material acima do limite de escoamento da fase produto. Os dois processos de treinamento pressupõem deformações plásticas consideráveis. Existe um limite para a deformação plástica imposta ao material, assim como um determinado número de ciclos para que o material apresente este comportamento. Estudos experimentais mostram que para uma liga *Nitinol* policristalina, a deformação total imposta ao material deve estar entre 10 e 20%.

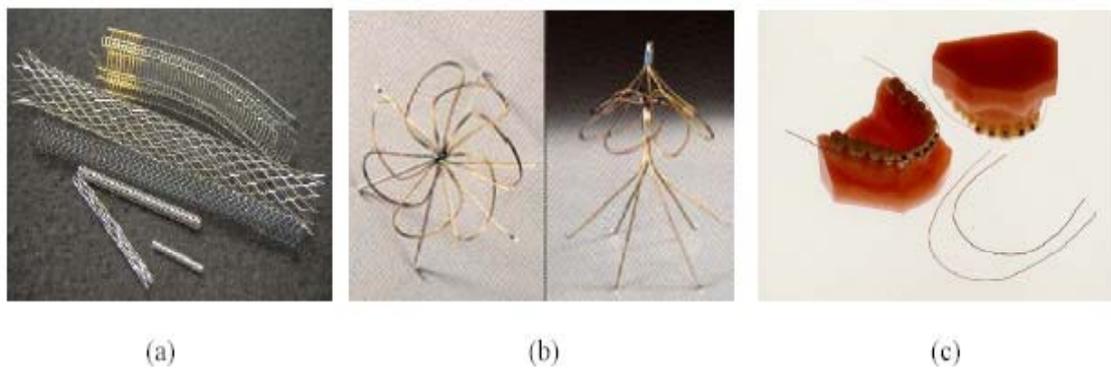


Figura 57. Dispositivos biomédicos: (a) Stent; (b) Filtro de Simon; (c) Arcos ortodônticos.

Devido às suas singulares características, as ligas com memória de forma têm instigado uma série de pesquisas em diversos campos do conhecimento, motivando o surgimento de diversas aplicações. As propriedades termomecânicas associadas à boa biocompatibilidade motivam diversas aplicações biomédicas. Dentre as aplicações médicas e odontológicas pode-se destacar dispositivos auto-expansíveis para aplicações cardiovasculares, aparatos cirúrgicos, dispositivos para acelerar a recuperação de ossos, aparelhos ortodônticos e limas endodônticas. A Figura 57 mostra alguns destes dispositivos.

As aplicações de engenharia são numerosas. O uso dos SMAs pode ajudar a resolver importantes problemas na área aeroespacial. Micro-manipuladores e atuadores robóticos têm sido empregados com a finalidade de reproduzir o movimento suave de músculos humanos.

O uso dos SMAs como atuadores para o controle de flambagem e vibrações de estruturas flexíveis é normalmente feito através de fibras de SMAs imersos em matrizes compósitas com a finalidade de alterar as propriedades mecânicas de estruturas.

Soares (1997) utilizou fios de SMA para desenvolver uma prótese de membro superior para crianças.

As principais vantagens da utilização do SMA são:

- Ótima relação força/peso e força/volume;
- Absolutamente silencioso, e pode ser liso;
- Possibilidade de controle de força e posição. Em algumas aplicações é possível utilizar o retorno de resistência do SMA, eliminando a necessidade de sensores externos de posição;
- Não influenciável pelo ambiente, com exceção da temperatura.

As principais desvantagens são:

- Baixo nível de deformação para muitas aplicações;
- Necessidade de proteção contra sobrecarga, e sobreaquecimento;
- Sensibilidade a mudanças da temperatura ambiente;
- Baixa eficiência: por volta de 5 % enquanto a de um motor DC é de 60 a 75 %;
- Dificuldade de alcançar resposta em alta frequência, devido à dificuldade de resfriamento do material, que pode trabalhar a mais de 100° Celsius;

- Necessidade de uma força para deformar novamente a liga em casos em que não está sendo usado o arranjo antagônico. Isso pode ser resolvido utilizando molas, porém ocorre uma diminuição do poder do atuador;
- Histerese: Pode ser um problema para muitas aplicações porque a deformação e recuperação seguem dois caminhos diferentes, que também dependerão de outros aspectos, como o stress aplicado em cada ciclo específico.

Os elementos de SMA podem ter diversas formas, como de fio, mola, garras ou qualquer outra adequada para o caso específico. Diversos autores discorreram sobre as ligas utilizáveis, modo de treinamento e tratamento térmico adequado entre outras características, para desenvolver fios ou molas de SMA adequados às suas aplicações. Para esse trabalho foram importados pistões de SMA (Figura 61) comerciais da *SCM International*.

4.4 Considerações Finais

Após discorrer sobre as formas de utilização dos músculos artificiais, dois principais tipos foram descritos, os músculos pneumáticos e os de SMA. O SMA se mostrou mais adequado para utilização nos experimentos. A sua escolha em detrimento aos músculos artificiais pneumáticos, amplamente citados na literatura, se deve ao fato de estes necessitarem de grandes aparatos e instalações, como por exemplo, os cilindros de ar comprimido e compressores.

Capítulo 5

Procedimento Experimental

5.1 Software de Cinemática em LabVIEW

5.1.1 LabVIEW

Os softwares relativos ao modelo Cinemático Direto e Inverso foram desenvolvidos em LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), da National Instruments. Uma ferramenta de software industrial para desenvolvimento de testes, medições e controle de sistemas, que foi introduzida em 1986. Possui a flexibilidade das linguagens de programação, combinada com ferramentas de desenvolvimento específicas para diversas áreas da engenharia e matemática.

Esta linguagem de programação gráfica utiliza ícones de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com a linguagem de programação baseada em texto, onde instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW® utiliza a programação por “fluxo de dados”, onde o dado determina a execução. O Ambiente de desenvolvimento apresenta basicamente três componentes, sendo eles uma tela inicial que serve como uma interface do usuário, um diagrama de bloco que contém os códigos gráficos, e ícones que identificam o instrumento virtual utilizado.

O LabVIEW utiliza uma linguagem de programação chamada G. Essa linguagem possui diretivas como PASCAL e C, porém ao invés de utilizar comandos na forma de texto para gerar

as linhas de código usa uma linguagem de programação gráfica, ou seja, o programa é feito na forma de diagrama de blocos.

Por utilizar uma estrutura de programação orientada pelo fluxo de dados e hierárquica, o LabVIEW® torna simples a implementação de sistemas complexos que englobam aquisição e manipulação de dados, ou ainda o controle de equipamentos através do computador. Além disso, inclui diversas bibliotecas compostas por componentes, contendo funções para aplicações específicas (algoritmos de análise estatística, processamento e geração de sinais, etc.).

5.1.2 Software de Cinemática Direta

O Software de Cinemática Direta foi desenvolvido sobre o Modelo Cinemático Direto do sub-capítulo 3.5.1. O software funciona em tempo real, com o cálculo automático da matriz de orientação e das coordenadas cartesianas assim que os ângulos das juntas vão sendo alterados. Na Figura 58 pode-se verificar a tela do programa.

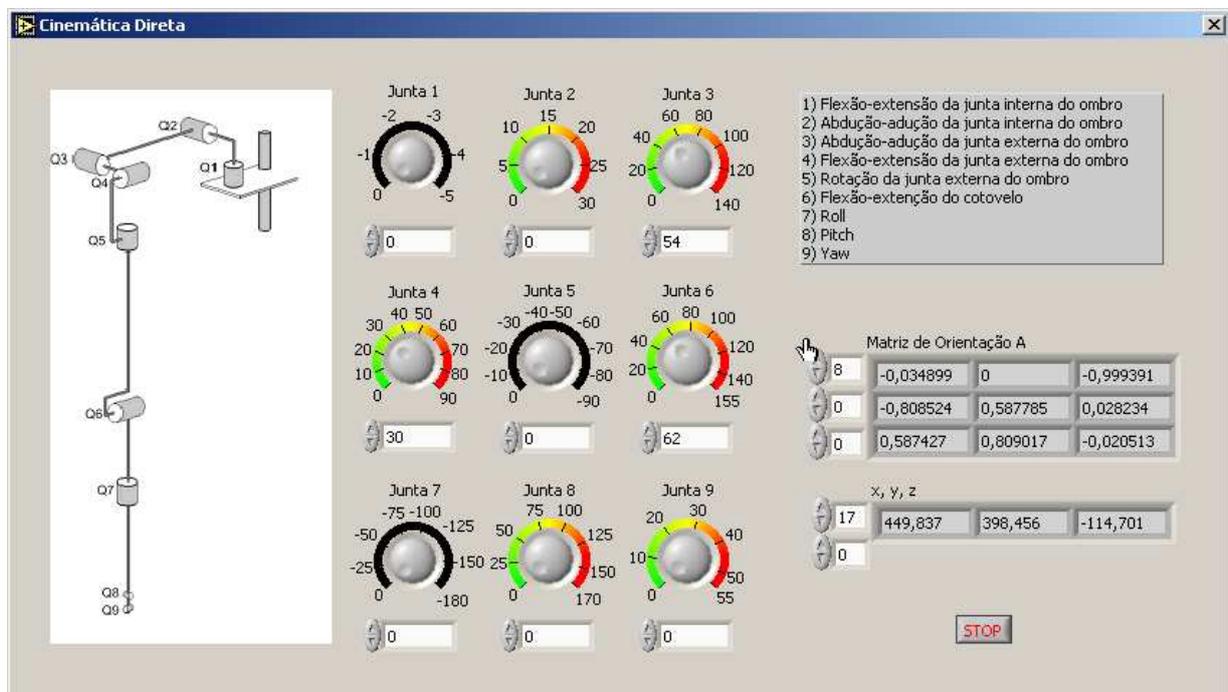


Figura 58. Software de Cinemática Direta

Como explicado no sub-capítulo anterior, no LabVIEW os programas são escritos em forma de blocos e entre estes blocos existem alguns em que é possível a escrita de sentenças matemáticas, que são calculadas da mesma forma que nos blocos específicos. A principal vantagem da utilização destes blocos é a facilidade na montagem das funções e na sua futura visualização, pois em funções matemáticas complexas são utilizadas e re-utilizadas várias variáveis numéricas que acabam virando muitos blocos e muitas ligações quase inteligíveis.

A princípio parece contraditório utilizar uma ferramenta de blocos e escrever as funções em sentenças, porém o principal motivo da escolha do LabVIEW é que ele possui a facilidade de controle (através destes blocos) de hardwares externos, o que permite a extensão dos softwares para o controle do protótipo.

Neste trabalho, para a escrita dos algoritmos mais complexos foram utilizados os *Formula Nodes*, que executam todas as operações do LabVIEW, com sintaxe semelhante à linguagem C. No Anexo I estão os algoritmos completos dos *formula nodes* dos dois softwares.

5.1.3 Software de Cinemática Inversa

No software de Cinemática Inversa são realizados os cálculos explicados no modelo do sub-capítulo 3.5.2. A tela do software foi capturada na Figura 59. A Figura 60 contém o Diagrama de Blocos completo do Software de Cinemática Inversa, com o algoritmo do *Formula Node* comentado. Como já comentado no sub-capítulo da modelagem Cinemática Inversa do Membro Superior Humano, o algoritmo proposto é bastante compacto.

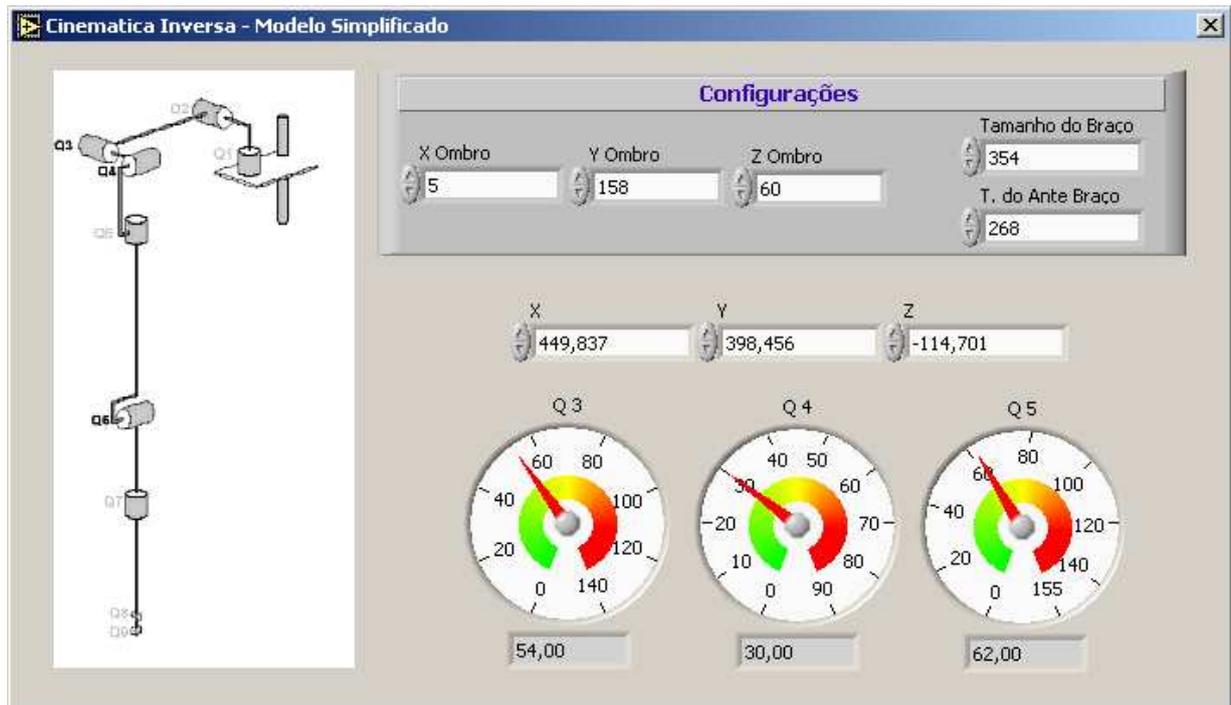
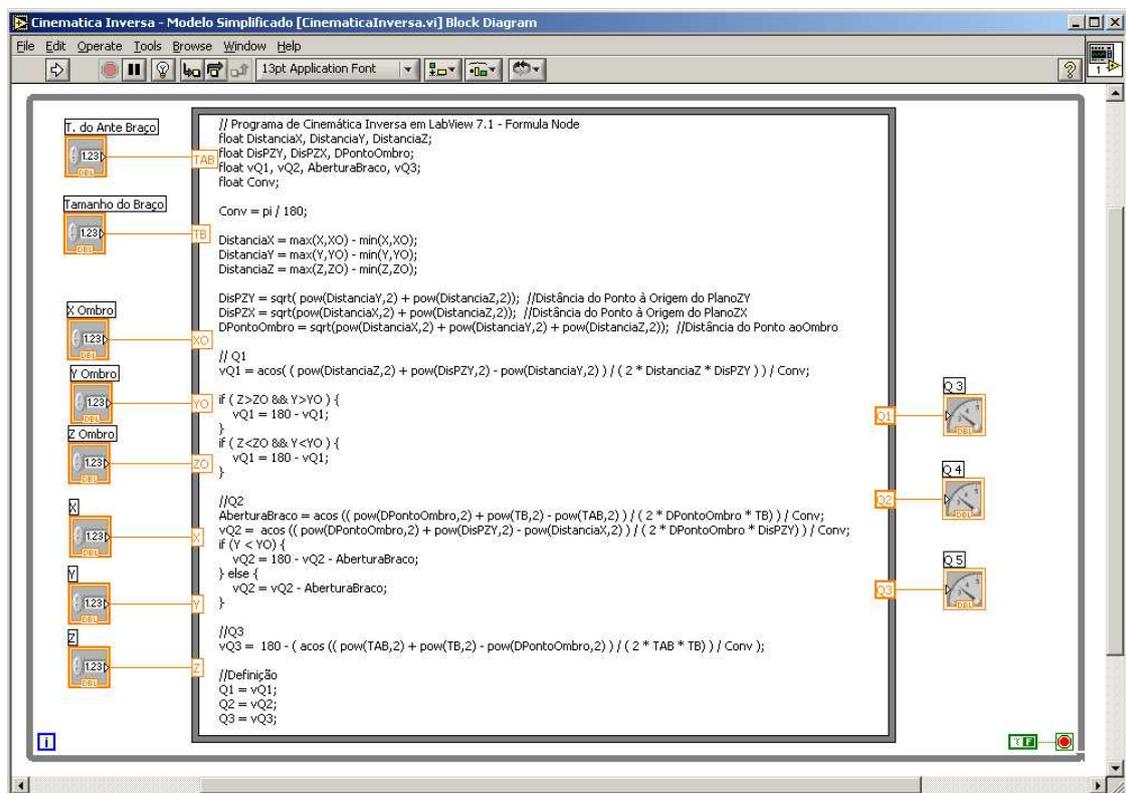


Figura 59. Software de Cinemática Inversa – Modelo Simplificado



5.2 Implementação do SMA

Dentre os músculos artificiais disponíveis na literatura o SMA se mostrou mais adequado atualmente para a utilização em robôs antropomórficos. A sua escolha em detrimento aos músculos artificiais pneumáticos, amplamente citados na literatura, se deve ao fato de estes necessitarem de grandes aparatos e instalações, como por exemplo os cilindros de ar comprimido e compressores.

Para realização de testes diversos com o material no desenvolvimento de juntas antropomórficas foram importados quinze pistões elétricos de SMA da *SCM International*. Uma foto do pistão pode ser verificada na Figura 61. O manual que acompanha os pistões, com as especificações mecânicas e elétricas deste se encontra no Apêndice A.



Figura 61. Foto do pistão de SMA importado para estudos

Utilizando esses pistões foi desenvolvido o primeiro protótipo para ensaios mecânicos e visualização do funcionamento elétrico (Figura 62).



Figura 62. Primeiro protótipo para junta do cotovelo

A Figura 63 retrata os ensaios realizados com o primeiro protótipo no Laboratório de Mecatrônica, com uma fonte de 3 amperes. O protótipo demonstrou funcionalidade, apresentando baixa velocidade de resfriamento, conforme previsto pelas desvantagens do sub-capítulo 4.3. Isso se deve ao fato da temperatura da liga atingir 95° Celsius para contração. Este primeiro protótipo também teve seu desempenho (em relação à velocidade de resposta) comprometido pelo alto nível de atrito das suas juntas.



Figura 63. Testes com o primeiro protótipo no Laboratório de Mecatrônica

O desenvolvimento e estudo do primeiro protótipo permitiram a montagem de um novo, definitivo, da junta de flexão-extensão do cotovelo, em tamanho real. O protótipo final pode ser visto na Figura 64. Este foi desenvolvido na Oficina do Departamento de Projeto Mecânico,

utilizando cilindros de fibra de vidro nos elos, e acrílico nas peças das juntas de fixação dos músculos.



Figura 64. Protótipo final

Para a escolha do material foram levados em consideração principalmente o peso e a resistência. Tanto a fibra de vidro quanto o acrílico atendem a estes dois requisitos, e o formato cilíndrico dos elos permitiu ainda maior aproveitamento destas propriedades da fibra de vidro.

O problema do atrito foi resolvido utilizando 2 rolamentos nas juntas. O protótipo final foi desenvolvido, à semelhança do primeiro, com um sistema de alavanca para a extensão do braço. Cada pistão de SMA possui capacidade para levantar 400 g (ver Apêndice A), e é capaz de aumentar seu comprimento, quando em temperatura ambiente, em até 2,5 cm, por deformação. Para cada movimento do braço (flexão e extensão) foram colocados seis pistões, sendo duas

fileiras paralelas de três pistões em série. Com essa configuração são obtidos o dobro da capacidade de carga (800 g) e o triplo de capacidade de extensão (7,5 cm).

5.3 PWM

Em muitos desenhos de atuadores de SMA ativados eletricamente, a operação é controlada pela variação da largura do pulso (PWM) da corrente fornecida aos elementos SMA [Soares (1997)]. Isso se deve ao fato de, embora o potenciômetro usado no controle de corrente dissipe pequena potência pois a corrente nele é menor, este tipo de controle ainda tem um problema: a potência dissipada pelo dispositivo que controla a corrente principal é elevada. Esta potência depende da corrente e da queda de tensão no dispositivo e, da mesma forma, em certas posições do ajuste pode ser maior que a própria potência aplicada ao dispositivo. Na eletrônica moderna, o rendimento com pequenas perdas e a ausência de grandes dissipadores que ocupem espaço é fundamental, principalmente quando circuitos de alta potência estão sendo controlados. Desta forma, este tipo de controle de potência linear não é conveniente, sendo requisitadas outras configurações de maior rendimento como as que fazem uso das tecnologias PWM (a abreviação de Pulse Width Modulation ou Modulação de Largura de Pulso) [Ghirardello (2006)] .

Os três métodos mais utilizados para modulação por largura de pulso enquadram-se no seguinte grupo [Ahmed (2000)]:

1. modulação por largura de pulso simples;
2. modulação por largura de pulso múltipla;
3. modulação por largura de pulso senoidal.

5.3.1 Modulação por largura de pulso simples

Neste método de controle de tensão a forma de onda da tensão de saída consiste em um único pulso a cada semiciclo da tensão de saída requerida. Para uma dada frequência ($f = 1/T$) a largura do pulso t_w pode variar, a fim de controlar a tensão de saída AC. A forma de onda da tensão de saída de um inversor monofásico em porte (Figura 65) sem modulação é mostrada na

Figura 66 (a). As chaves S_1 e S_4 estão ligadas em um semiciclo e as S_2 e S_3 no outro semiciclo, de modo a produzir a tensão máxima de saída.

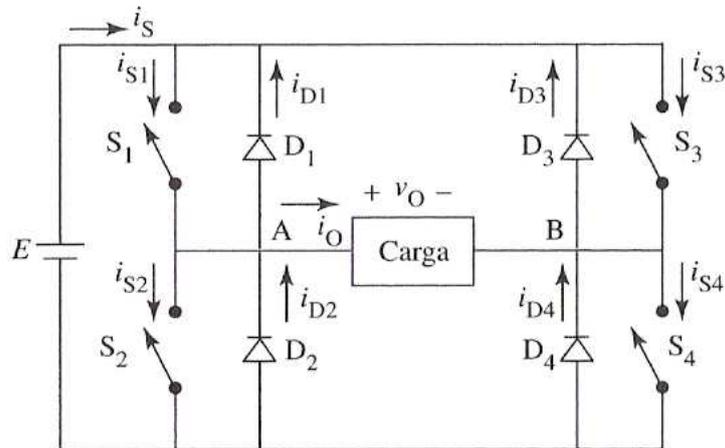


Figura 65. Inversor de fonte de tensão em ponte completa

Obtém-se o controle da tensão com a variação da fase de S_3 e de S_4 em relação a S_1 e S_2 . A Figura 66 (b) mostra a forma de onda da tensão de saída quando o intervalo de condução de S_3 e de S_4 está adiantada por um ângulo $\delta = 90^\circ$. Essa tensão é obtida com a adição das duas tensões de onda quadrada, deslocadas em fase uma em relação à outra. A tensão de saída consiste em pulsos alternados com uma largura de $180^\circ - \delta = 90^\circ$.

A tensão de saída pode ser ajustada de maneira linear, de seu máximo (retardo de 0°) a zero (retardo de 180°), com o adiantamento de uma fase ou com o retardo da passagem para o estado *desligado* de um par de chaves em relação ao outro.

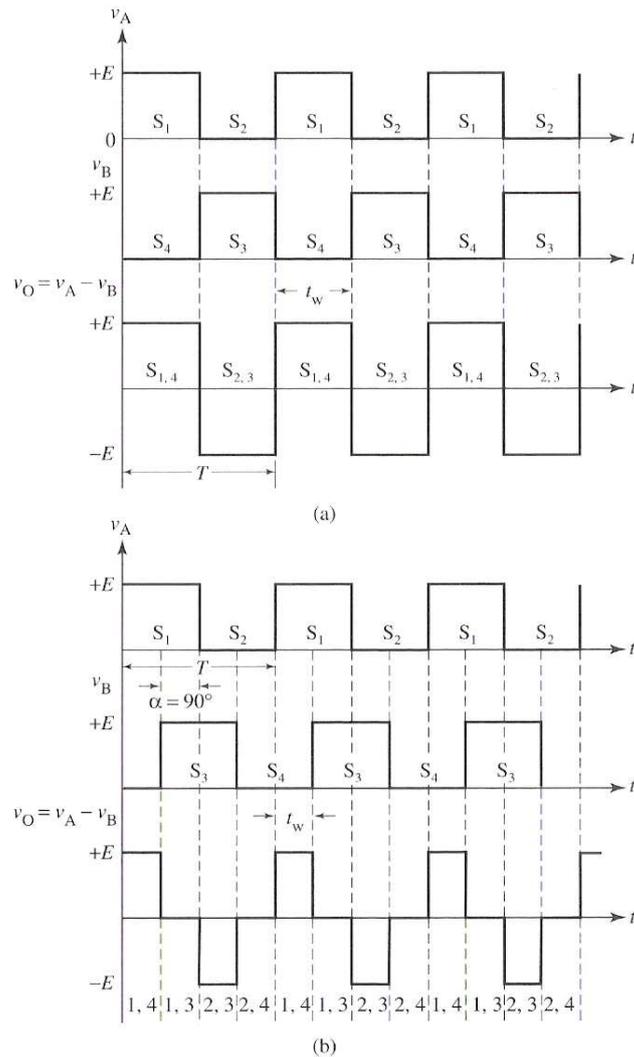


Figura 66. Formas de onda de saída moduladas por largura de pulso simples [Ahmed (2000)]: (a) sem modulação; (b) forma de onda modulada.

5.3.2 Modulação por largura de pulso múltipla

Em vez de reduzir a largura do pulso para controlar a tensão, a saída do inversor pode ser rapidamente chaveada passando para os estados *ligado* e *desligado* por diversas vezes durante cada semiciclo para fornecer um trem de pulsos de amplitude constante.

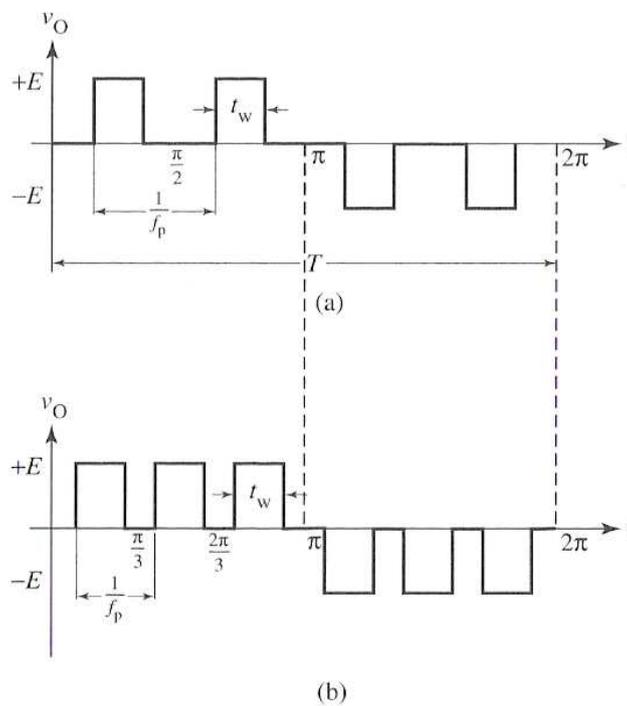
A Figura 67 mostra a idéia da modulação por largura de pulso múltipla. A forma de onda da tensão de saída consiste em m pulsos para cada semiciclo da tensão de saída requerida. Se f for a frequência de saída do inversor, a frequência dos pulsos (f_p) de saída será dada por:

$$f_p = 2 f m \quad (59)$$

Portanto, o número de pulsos por ciclo é:

$$2m = f_p / f \quad (60)$$

A Figura 67 (a) mostra a forma de onda da tensão de saída para $m = 2$. A largura do pulso t_w deve ser menor do que $\pi / 2$. Na Figura 67 (b), para $m = 3$ fica claro que $t_w < \pi / 3$. Em geral a largura do pulso $t_w \leq \pi / m$.



**Figura 67. Formas de onda moduladas por largura de pulso múltipla [Ahmed (2000)]: (a) $m = 2$;
(b) $m = 3$.**

Uma abordagem alternativa de controle da amplitude da tensão de saída é manter m constante e variar a largura do pulso t_w (ver Figura 68).

5.3.3 Modulação por largura de pulso senoidal (SPWM)

Na modulação por largura de pulso senoidal (*sinusoidal pulse-width modulation – SPWM*) a tensão de saída é controlada pela variação dos períodos nos estados *ligado* e *desligado*, de modo que os períodos *ligados* (largura do pulso) sejam mais longos no pico da onda. A Figura 69 mostra um padrão geral de SPWM.

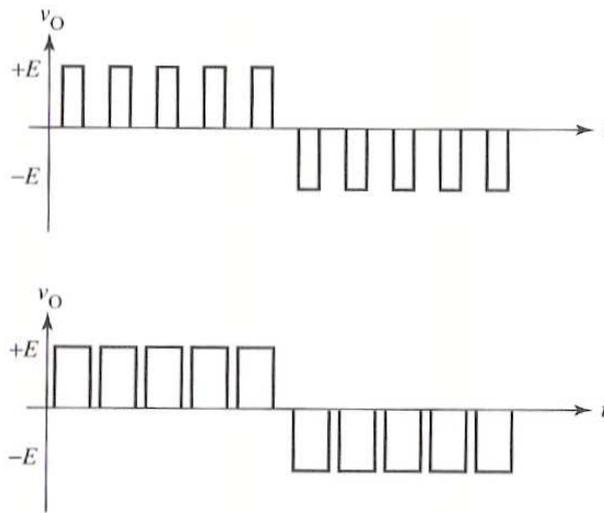


Figura 68. Ciclo de trabalho variável com $m = 5$ fixo [Ahmed (2000)].

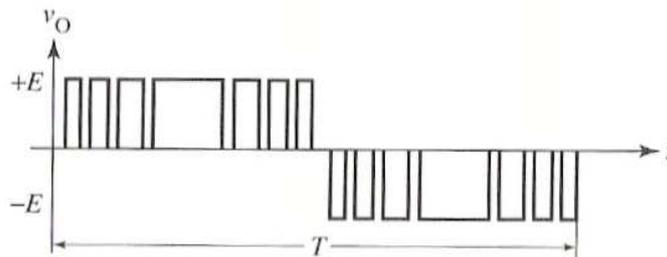


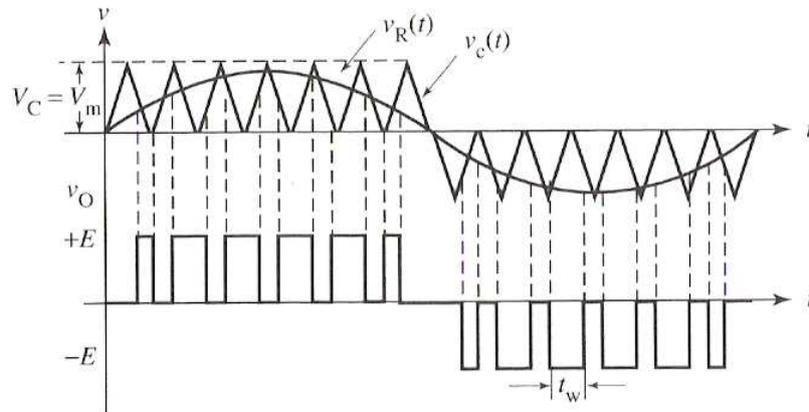
Figura 69. Padrão de modulação por largura de pulso senoidal [Ahmed (2000)].

Os tempos de chaveamento são determinados como na Figura 70 (a). $v_R(t)$ é uma onda senoidal de modulação de *referência*, com amplitude V_m e frequência f_m , igual à frequência

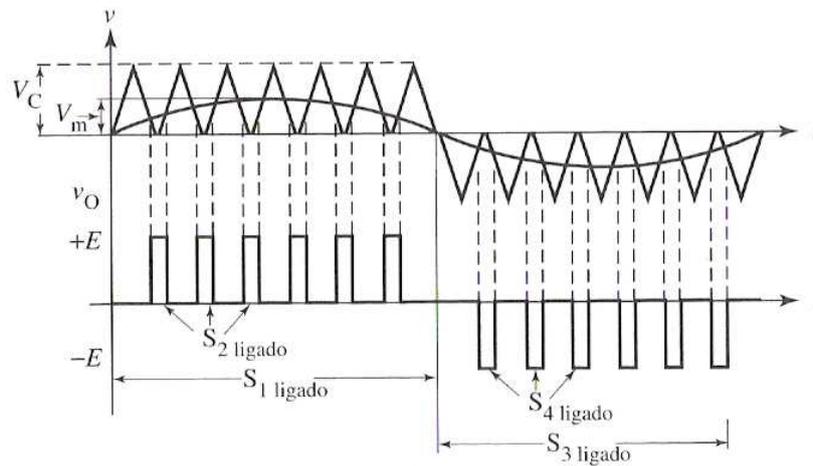
desejada na saída do inversor. Um portador de alta frequência com onda triangular $v_c(t)$, com amplitude V_c e frequência f_c é comparada à onda senoidal de referência. Os pontos de chaveamento são determinados pela interseção das ondas de $v_c(t)$ e de $v_R(t)$. A largura do pulso t_w é determinada pelo tempo durante o qual $v_c(t) < v_R(t)$ no semiciclo positivo de $v_R(t)$ e $v_c(t) > v_R(t)$ no semiciclo negativo de $v_R(t)$.

Os dois parâmetros de controle que regulam a tensão de saída são a relação de funcionamento do chopper e o índice de modulação. A relação de frequência f_c/f_m é conhecida como relação N da portadora de funcionamento do chopper. Ela determina o número de pulsos em cada semiciclo da tensão de saída do inversor. A relação V_m/V_c é denominada índice de modulação M ($0 \leq M \leq 1$) e determina a largura dos pulsos e, portanto, o valor RMS da tensão de saída do inversor. O ajuste de M costuma ser feito pela variação da amplitude da onda de referência, enquanto a amplitude da onda portadora se mantém fixa. A frequência de saída do inversor muda com a variação da frequência da onda de referência. Na Figura 70 (a), $N = 6$ e $M = 1$. A tensão máxima de saída ocorre com $M = 1$; quando $M = 0,5$, a saída cai à metade (Figura 70 (b)).

Em vez de utilizar uma onda portadora triangular com um deslocamento (*offset*), de modo a torna-la alternada (como mostra a Figura 70), pode-se utilizar uma portadora triangular sem deslocamento. Nesse caso, uma onda portadora triangular de frequência f_c e uma onda senoidal de modulação de referência com frequência f_m (a mesma requerida para a frequência de saída do inversor) são empregadas para regular a tensão de saída. A variação da amplitude da onda senoidal de referência altera a largura do pulso e controla a magnitude eficaz da forma de onda de saída.



(a)



(b)

Figura 70. Formas de onda moduladas por largura de pulso senoidal [Ahmed (2000)]: (a) $M = 1$; (b) $M = 0,5$.

A onda portadora e a onda senoidal de referência são mostradas na Figura 71 (a). A forma de onda da tensão de saída v_o é apresentada na Figura 71 (b). Observe que o número de pulsos na saída, em um ciclo completo, é seis. Há também seis ondas portadoras de tensão nesse período. Portanto a frequência de repetição do pulso do inversor é a mesma da frequência da portadora.

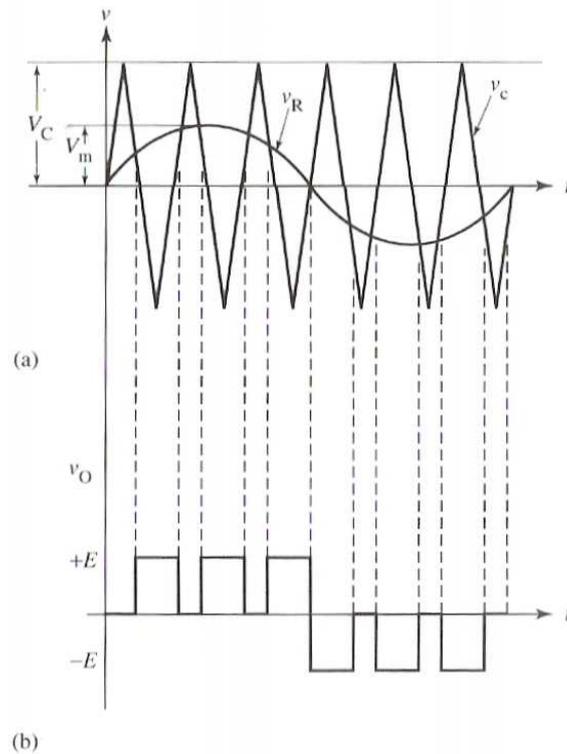


Figura 71. Formas de onda moduladas por largura de pulso senoidal [Ahmed (2000)]: (a) sinais de referência; (b) forma de onda da tensão de saída.

5.4 Controle das Juntas

Para realização do controle dos ângulos das juntas de um manipulador antropomórfico de nove graus de liberdade é necessário um sistema em malha fechada (Figura 72), que compare os ângulos das juntas dados pelo computador (calculado pelo programa de cinemática inversa a partir das coordenadas cartesianas e da orientação da ferramenta) com os ângulos obtidos via transdutor (ângulo real) e, a partir daí, com as diferenças angulares de cada junta, ative cada acionador antagônico (sub-capítulo 4.1).

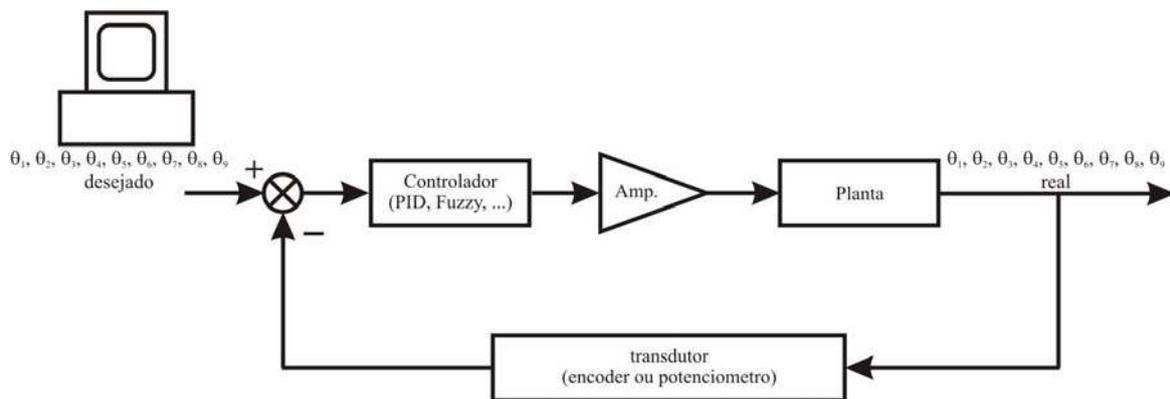


Figura 72. Malha de Controle do Protótipo

O controlador deverá, para cada junta, controlar os conjuntos de pistões antagônicos separadamente, direcionando energia para o lado do erro. Se o ângulo real da junta for maior que o ângulo desejado, então o controlador deverá suprimir a energia dos acionadores que fazem a flexão e direcioná-la para o acionador que faz a extensão (ou abdução-adução), conforme Figura 73 (a), e quando o ângulo real alcançar o desejado, por PWM (sub capítulo anterior) fornecer energia suficiente somente para que este mantenha a contração atual. A Figura 73 (b) ilustra o processo contrário, com ângulo real menor que ângulo desejado.

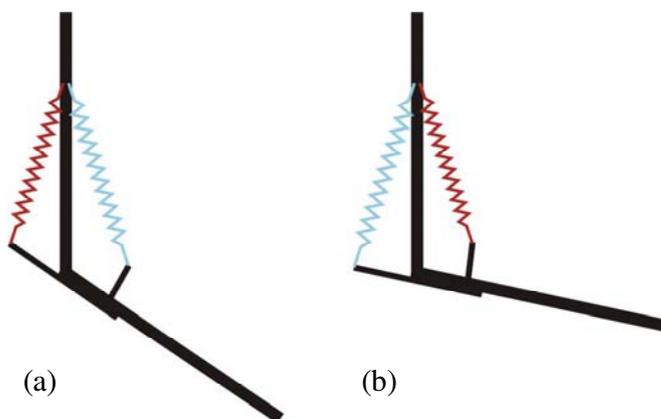


Figura 73. Ajuste dos ângulos via ativação por arranjo antagônico

Para manter o ângulo atual independentemente de condições externas e cargas sendo aplicadas, o controlador deverá diminuir a corrente média (por PID, Fuzzy ou outras técnicas atuais) até o ponto em que o ângulo comece a ultrapassar o limite inferior desejado, momento então que vai estabilizar (Figura 74).

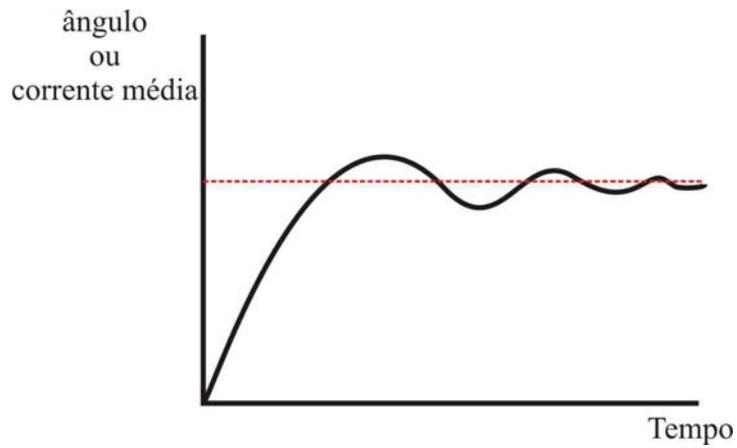


Figura 74. Estabilização da junta

Para a realização do controle de corrente do protótipo (descrito no sub-capítulo 5.2) via PWM foi desenvolvido pela Oficina do Departamento Mecânico o circuito eletrônico da Figura 75. Um mosfet é aberto via porta paralela, fornecendo e suprimindo aos pistões de SMA a corrente vinda de uma fonte de 4,2 amperes, e 12 volts.

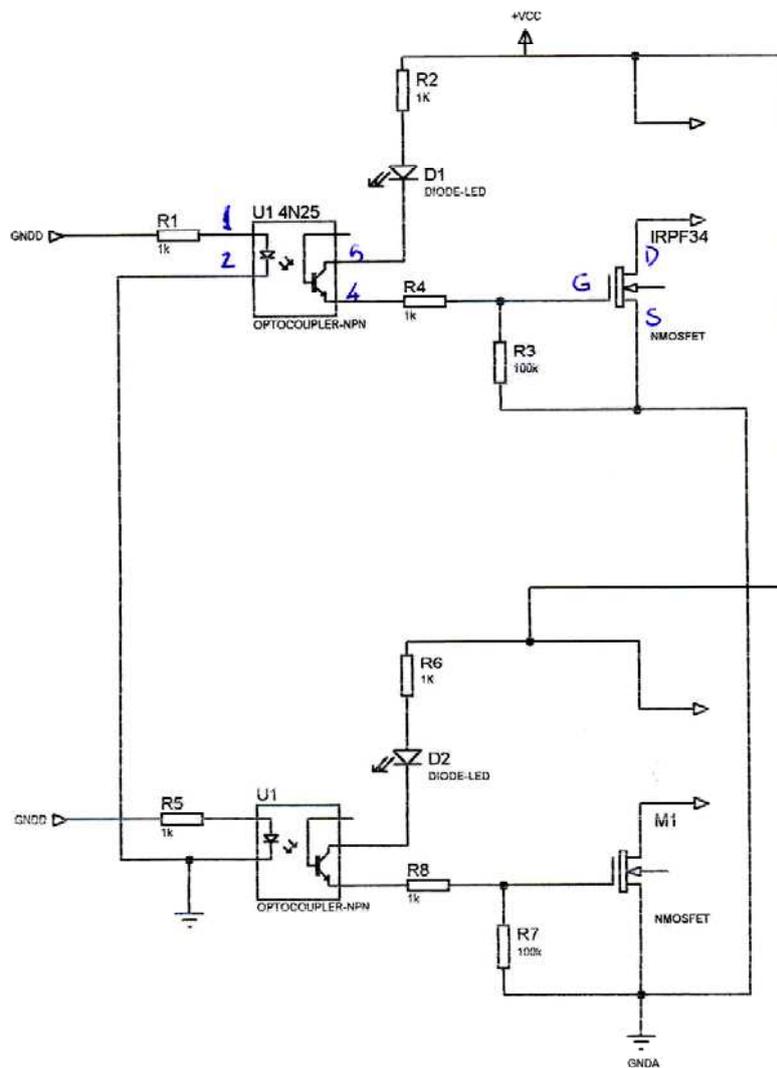


Figura 75. Circuito para controle da corrente do protótipo via PWM (Oficina Mecânica)

Para chaveamento do circuito da Figura 75 foi desenvolvido um novo programa em LabVIEW. O programa basicamente compara o ângulo da junta com o ângulo desejado fornecido pelo usuário, e direciona de acordo com o erro a corrente para um dos lados do acionador antagonístico.

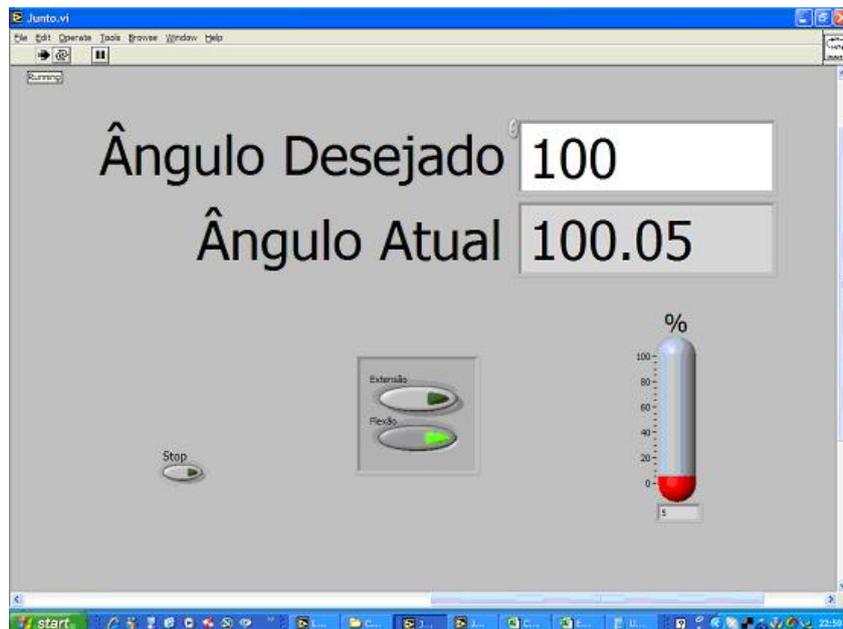


Figura 76. Programa de controle do ângulo da junta

Na Figura 76 é visualizada a tela do programa em LabVIEW, e a Figura 77 contém o diagrama de blocos completo do programa.

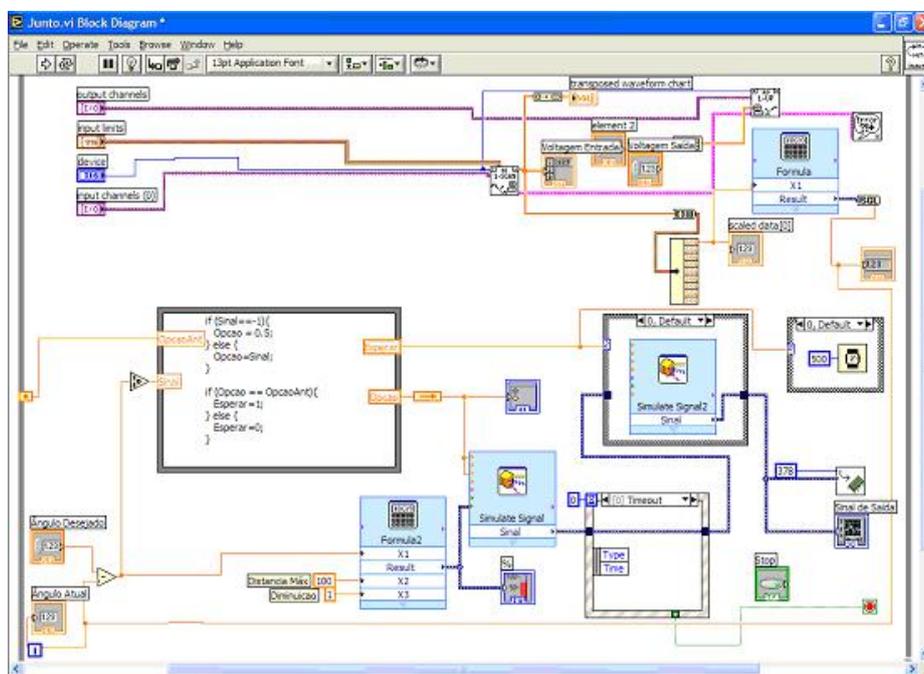


Figura 77. Diagrama de Blocos do programa de controle do ângulo da junta

Para a aquisição do ângulo da junta foi utilizado um potenciômetro de 1 k fixo no eixo da junta. Com uma placa PCMCIA da *National* ligada a um Notebook, foi utilizado uma saída analógica configurada no programa para 5 volts fixos, passando pelo potenciômetro e voltando para uma entrada analógica (Figura 78).

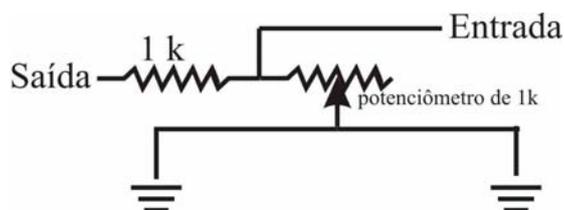


Figura 78. Circuito do potenciômetro

Utilizando um transferidor e a tensão capturada pelo programa foram obtidos os dados exibidos na Tabela 4, e plotados na Figura 79.

Tabela 4. Correspondência entre o ângulo da junta e a tensão capturada pelo software

Ângulo	Voltagem
0	0,0244140
22,5	0,3594140
45	0,6201170
67,5	0,8764650
90	1,1303710
112,5	1,3012700

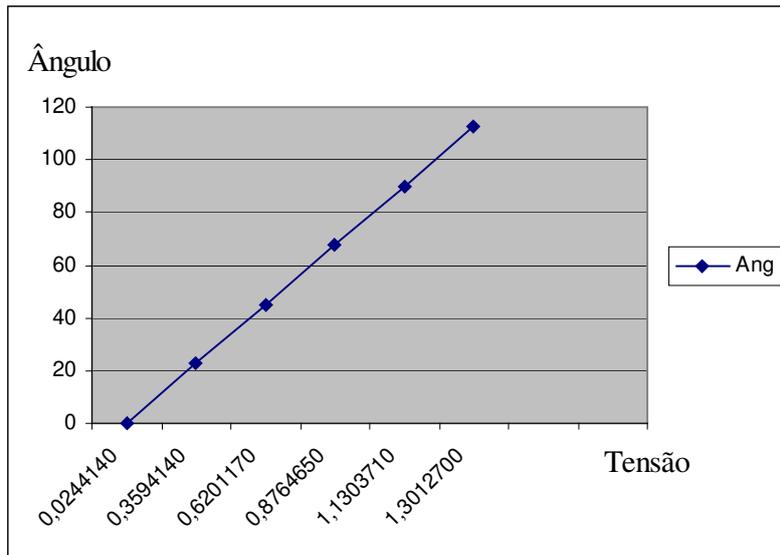


Figura 79. Gráfico equivalente à Tabela 4

Conforme pode ser observado na Figura 79, nos 120 primeiros ângulos o potenciômetro apresenta comportamento linear. Um pouco mais adiante se verificou uma curva, porém ela não foi levada em consideração, pois para o protótipo essa faixa é suficiente.

Utilizando uma técnica iterativa alimentada com a Tabela 4 foi obtida a seguinte expressão, utilizada para conversão do valor em voltagem para ângulos:

$$\hat{\text{Ang}} = -5,905284145 + 86,6907377784 * \text{Volt} \quad (61)$$

A Equação (61) foi utilizada no programa e se mostrou adequada.

No programa existe ainda uma outra tela onde são realizadas as configurações e visualizados dados intermediários, como por exemplo a tensão captada pela entrada analógica. Esta tela é mostrada na Figura 80.

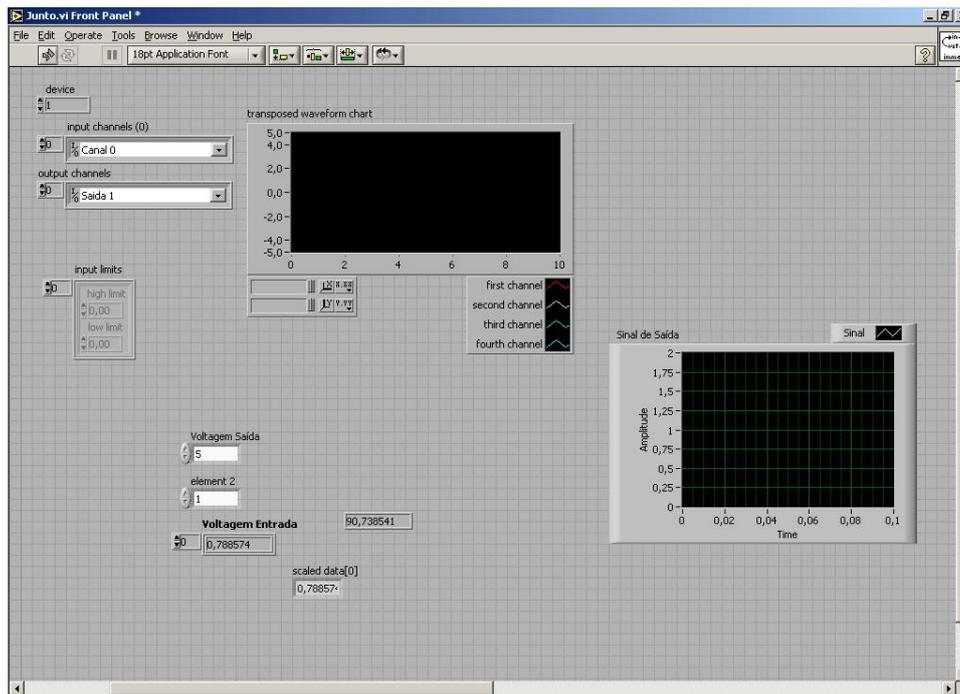


Figura 80. Tela do software onde são realizadas as configurações e exibidos dados intermediários

O software é pré-configurado, conforme Figura 80, para as entradas e saídas específicas configuradas na placa da *National*, e para a voltagem de saída de 5 Volts.

O algoritmo roda em um *loop*, interrompido apenas pelo botão “STOP”. A cada volta a placa *National* é acessada para verificação da tensão de entrada. A interface retorna um *array* de informações que é decomposto para retirada apenas da tensão. Essa tensão é exibida no indicador “Voltagem Entrada” (Figura 80) e levada também a um bloco de fórmulas que executa a equação (61). Como resultado deste bloco é obtido o ângulo real da junta, que é apresentado no indicador “Ângulo Atual” (Figura 76), e subtraído do ângulo desejado pelo usuário (campo “Ângulo Desejado” da Figura 76). O sinal do resultado desta subtração é utilizado para definir qual lado do acionador antagonico será ativado. Essa função compara o lado selecionado com o lado ativado no *loop* anterior para, no caso de inversão, esperar 500 milissegundos. Isso é feito para evitar que por algum problema de atraso do circuito, os dois lados possam ser ativados simultaneamente, ultrapassando o limite de capacidade da fonte. De acordo com o lado selecionado um valor é passado para o bloco que ativa a porta paralela do computador. No pino 1 de saída paralela foi ligado o circuito de flexão do braço, e no pino 2 o circuito de extensão. O

sinal enviado para o pino específico da paralela é gerado por um bloco simulador de sinal, que faz o papel de PWM (sub-capítulo anterior). Esse bloco mantém ativado (3 volts) o pino selecionado na porcentagem de tempo obtida pelo bloco de fórmula que o alimenta. O adequado para essa aplicação é a utilização de técnicas Fuzzy ou PID, porém para o teste da planta foi utilizada uma operação simples, que diminui a porcentagem conforme o ângulo real se aproxima do desejado. Essa diminuição ocorre no decorrer do último ângulo (de 89° a 90°, por exemplo).

Na Figura 81 pode-se observar o software sendo testado diretamente na planta. O protótipo da Figura 64 foi fixado a uma estrutura rígida que simula o ombro.



Figura 81. Experimento sendo realizado

Ao protótipo final foi adicionado, além da fiação, o potenciômetro no eixo da junta (Figura 82) e um contrapeso de ferro na alavanca de extensão para balancear o ante-braço e eliminar seu peso (Figura 83). Desta forma foi possível diminuir a força necessária para a flexão e habilitar o levantamento de pequenas cargas.

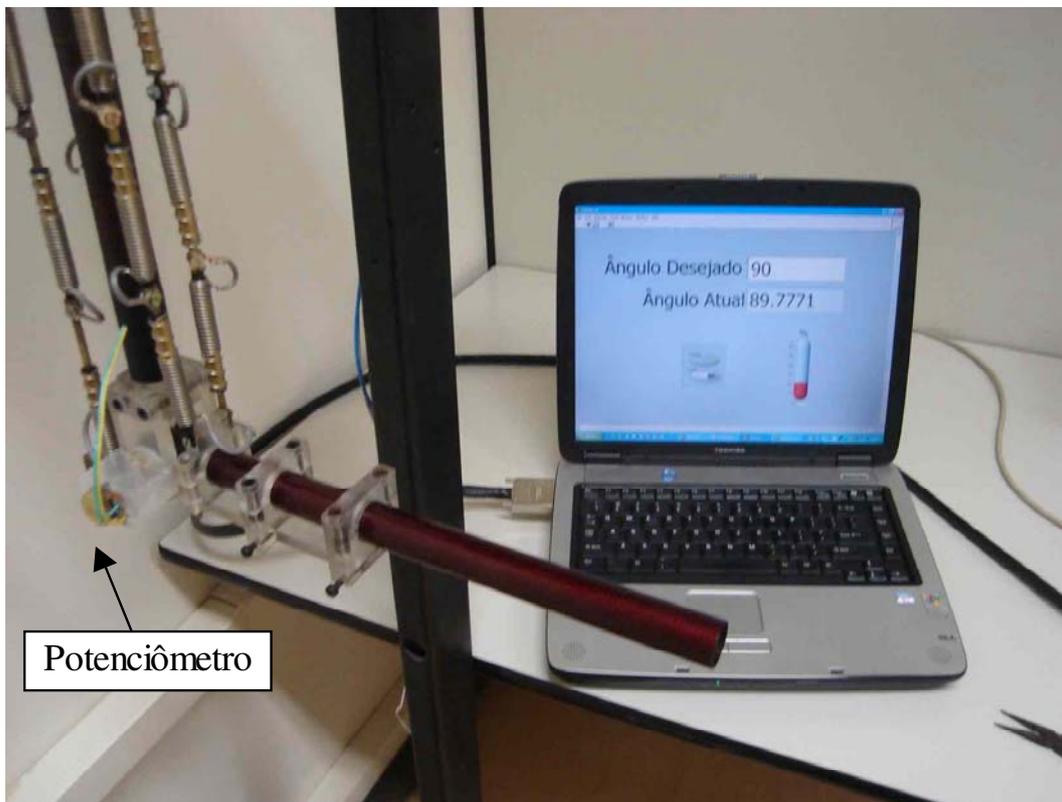


Figura 82. Visualização do potenciômetro no eixo da junta

Apesar de o software ter funcionamento simplificado, o fato de o controle em malha fechada utilizar como variável de retorno o ângulo do braço (e não a corrente ou temperatura do SMA, entre outras variáveis) faz com que o sistema se reajuste a variações na carga. Se após a estabilização da planta para o ângulo desejado é aplicada uma nova carga, ela instantaneamente reajusta as porcentagens (PWM) para alcançar novamente o ângulo. Quando a carga é retirada o mesmo ocorre.

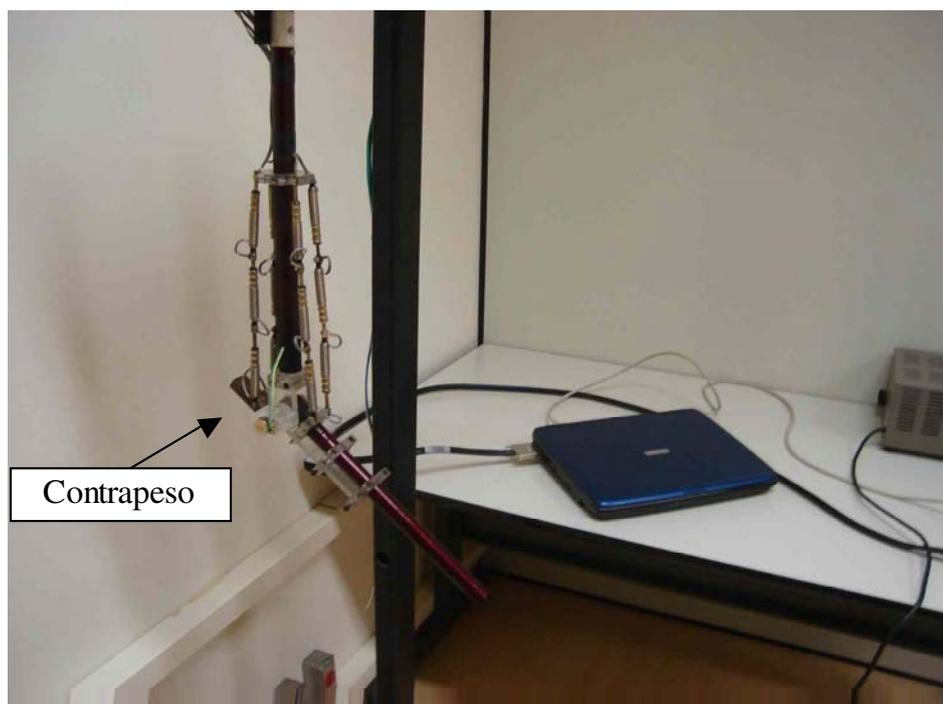


Figura 83. Visualização do contrapeso na alavanca de extensão, e das ligações com o notebook (porta paralela e placa PCMCIA da *National*)

No fundo da Figura 84 é visto o notebook com o software de controle. À direita, uma fonte com capacidade de até 5 amperes, utilizada para o aquecimento dos pistões de SMA. À esquerda está a caixa de *boners* (conexão dos cabos) da *National*, ligada à placa PCMCIA do notebook. Ao centro, na caixa preta, está o circuito de chaveamento. Este circuito é ligado ao computador por um cabo de impressora, à fonte por dois fios de alimentação, à caixa da *National* por um cabo de rede, e ao protótipo por um chicote contendo um cabo de rede para o potenciômetro e 4 cabos de energia (2 terra e 2 alimentação) para os pistões.

A estrutura de cabeamento está superdimensionada por questões de praticidade, estética e possibilidade de expansão. Do cabo de impressora que liga o computador ao circuito são utilizados somente 3 fios (1 terra). Da placa da *National* são utilizados também apenas uma entrada e uma saída analógicas. Do cabo de rede que liga a caixa da *National* ao circuito são utilizados um fio para terra, um para a entrada e outro para a saída analógicas. No cabo de rede que acompanha o chicote para o protótipo são usados apenas dois fios, que se encontram no potenciômetro fixado ao eixo da junta.

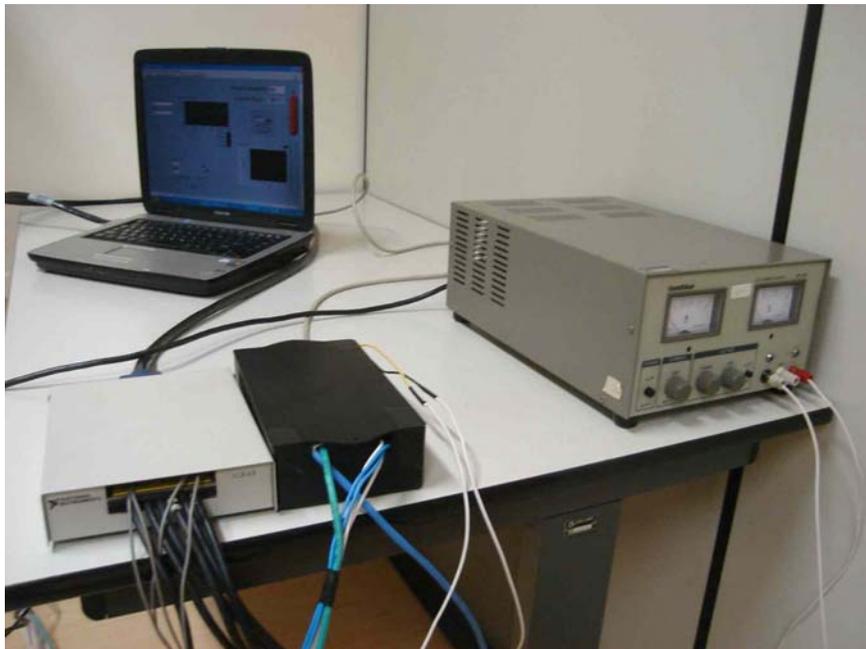


Figura 84. Equipamentos utilizados

Por fim, na Figura 85 é exibido o experimento completo.



Figura 85. Experimento completo

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Para o desenvolvimento de manipuladores robóticos mais eficientes e leves é necessário um aperfeiçoamento no sentido de aproximação ao membro superior humano. Nesse intento, modelos geométricos mais próximos ao modelo antropomórfico e juntas melhor acionadas são uma necessidade importante. Os modelos atuais, principalmente em escala comercial, estão muito longe destas características desejadas. Muitos estudos estão sendo realizados, e ainda há campo para novas pesquisas.

Outro campo ainda aberto para pesquisas é a Modelagem Cinemática Inversa. Nesse trabalho foi proposto um algoritmo específico para a configuração modelada, que satisfaz a localização dos ângulos necessários para o posicionamento no plano cartesiano.

Para uma maior aproximação dos manipuladores, mecânica e eletronicamente, ao modelo antropomórfico, é necessário também o estudo de acionadores mais compactos, silenciosos e eficientes. Vários estudos têm sido realizados para a criação de músculos artificiais, porém estes ainda apresentam baixa eficiência e algumas limitações, discutidas no decorrer do trabalho.

Os músculos artificiais de SMA, que possuem a vantagem em relação aos pneumáticos de não necessitarem de cilindros e compressores, sofrem limitações de velocidade de resposta devido principalmente à demora de resfriamento. Entre as soluções possíveis estariam a procura

de formas de resfriamento rápidas e sem utilização de grandes aparatos, ou a criação de ligas que necessitem de menor temperatura para iniciar a contração.

Principais campos para pesquisas futuras:

- Materiais resistentes e leves para a estrutura mecânica dos manipuladores;
- Criação de manipuladores aproximados ao membro superior humano;
- Criação de algoritmos de Cinemática Inversa menos complexos que os atuais;
- Criação de acionadores compactos, eficientes e silenciosos;
- Aperfeiçoamento dos músculos artificiais atuais;
- Criação de ligas de SMA que contraíam em menores temperaturas;
- Estudo de formas de resfriamento compactas e eficientes;
- Modelagem dinâmica, com desenvolvimento de algoritmo compacto e eficiente.

Referências Bibliográficas

[ABB I (2005)] ABB. Articulated robots. Disponível em : <<http://www.abb.com/global/seapr/seapr035.nsf/lupPrintUNID/35F4B7B9337F2B3BC1256AF0004AAA81?OpenDocument&r=2>>. Acessado em: 28/10/2005

[ABB II (2005)] ABB. Data sheet IRB 140. Disponível em: <<http://www.abb.com>>. Acessado em: 28/10/2005

[ABB III (2005)] ABB. Datasheet IRB 7600. Disponível em: <<http://www.abb.com>>. Acessado em: 28/10/2005

[Ahmed (2000)] Ahmed, Ashfaq. Eletrônica de Potência. Prentice Hall, 2000. 479 p.

[Alves (1988)] Alves, João Bosco da Mota. *Controle de Robô*. Campinas: Cartgraf, 1988, 185 p.

[Ashrafiuon (2006)] Ashrafiuon, Hashem, Eshraghi, Mojtaba, Elahinia Mohammad h. Position Control of a Three-link Shape Memory Alloy Actuated Robot. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, v 17, 2006.

[Brock I (1991)] Brock, David L. Review of Artificial Muscle based on Contractile Polymers. Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. A.I.Memo No. 1331, 1991.

[Brock II (1991)] Brock, David L. Dynamic Model and Control of an Artificial Muscle based on Contractile Polymers. Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. A.I.Memo No. 1331, 1991.

[Craig (2005)] Craig, J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and control. Pearson Prentice Hall, 2005, 400 p.

[Daerden e Lefeber (2002)] Daerden, F., Lefeber, D. Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering, v. 47, (1), pp. 10–21, 2002.

[Davis et al. (2003)] Davis, S., Tsagarakis, N., Canderle, J., and Caldwell, D. G. Enhanced modeling and performance in braided pneumatic muscle actuators. International Journal of Robotics Research, v. 22, (3–4), pp.213–227, 2003.

[Denavit (1955)] Denavit, J., Hartenberg, R.. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. ASME J. on Applied Mechanics, 1955.

[Fu (1987)] Fu, K.S.; Gonzales, R.C.; Lee, C.S.G.. Robotics - Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill Book Inc., 1987, 580 p.

[Ghirardello (2006)] Ghirardello, Ariovaldo. Eletrônica Industrial: Apostila sobre Modulação PWM. Colégio Politec, 2006.

[Hermini (2000)] Hermini, H. A. Modelagem, implementação e controle de sistemas biomecânicos envolvendo aspectos cinemáticos. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 412 p. Tese (Doutorado).

[IFR I (2005)] International Federation of Robotics. Classification of industrial robots by mechanical structure. Disponível em: <<http://www.ifr.org>>. Acessado em : 29/10/2005.

[IFR II (2005)] International Federation of Robotics. Industrial robot and related equipment suppliers. Disponível em: <<http://www.ifr.org>>. Acessado em : 29/10/2005.

[IRM (2005)] Institute Of Robotics and Mechatronics. LWR Robot System. Disponível em: <http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-417/557_read-758/>. Acessado em 18/10/2005.

[ISO (1992)] International Organization for Standardization. ISO 10218; *Manipulating Industrial Robots – Safety*. France: ISO Publications, 1992.

[Kapandji (1982)] Kapandji, I. A. Physiology of the Joints, Volume 1, Upper Limb, 5th edition. Edinburgh: Churchill Livingstone, 1982.

[Lee e Ziegler (1984)] Lee, C.S.G., Ziegler, M. Geometric Approach in Solving Inverse Kinematics of PUMA Robots. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v. AES-20, (6), 1984.

[MGH (2007)] An Online Examination of Human Anatomy and Physiology. Mc Graw Hill – Higher Education. Disponível em: <<http://www.getbodysmart.com>>. Acessado em: 10/05/2007.

[Paul (1981)] Paul, P. Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control. The Mit Press, 1981, 279 p.

[Paul et al. (1981)] Paul, R. P., Shimano, B. E., Mayer, G. Kinematic Control Equations for Simple Manipulators. IEEE Trans. Systems, Man, Cybern., v. SMC-11, (6), pp. 449-455, 1981.

[Pires (2005)] Pires, J. Norberto. Das Máquinas Gregas à Moderna Robótica Industrial. Disponível em: <http://robotics.dem.uc.pt/norberto/publico/gregosxxi_final.pdf>. Acessado em: 05/11/2005

[Plettenburg (2005)] Plettenburg, Dick H. Pneumatic Actuators: a Comparison of Energy-to-Mass Ratio's. In: 9th International Conference on Rehabilitation Robotics. Proceedings of the 2005 IEEE, pp. 545 – 549, 2005.

[Rosário (2002)] Rosário, João Mauricio. Modelagem e Controle de Robôs. In: Romano, Vitor Ferreira. (Org.). Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

[Rosário (2005)] Rosário, João Maurício. Princípios de Mecatrônica. Editora Pearson Prentice Hall, 2005. 356 p. ISTN 857605010-2.

[Rachid (1993)] Rashid, Muhammad H. Spice for Power Eletronics and Eletric Power. Prentice Hall, 1993. 394 p.

[Sanvidotti (2006)] Sanvidotti, Marcos José. Uma contribuição para a modelagem e implementação de controle mioelétrico de próteses ativas de membros superiores. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 93 p. Dissertação (Mestrado)

[Savi et al. (2003)] Savi, M. A., Paiva, A., Pacheco, P. M. C. L., Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma, Série Arquimedes, Anais do DINCON – São José dos Campos – SP – Brasil, v. 2, pp.2388-2417, 2003.

[Schulte (1961)] Schulte, H. F. The characteristics of the McKibben artificial muscle In: The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, Publication 874, National Academy of Sciences - National Research Council, Washington DC, Appendix H, pp. 94-115, 1961.

[Soares (1997)] Soares, Alcimar Barbosa. Shape Memory Alloy Actuators for Upper Limb Prostheses. Edinburgh: University of Edinburgh, 1997, 203 p. Tese (Doutorado).

[Spence (1991)] Spence, A. P. Anatomia Humana Básica: 2º edição. New York: Editora Manole Ltda, 1991. 713 p.

[Tondu e Lopez (2000)] Tondu, B., Lopez, P. Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators. IEEE Control Systems Magazine, pp. 15-38, 2000.

[Tondu et al. (2005)] Tondu, B., Ippolito, S., Guiochet, J., Daidie, A. A Seven-degrees-of-freedom Robot-arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles for Humanoid Robots. The International Journal of Robotics Research, v. 24, (4), pp. 257-274, 2005.

[UW (2006)] Universidade de Washington. Biologically Based Robotics: Anthroform Arm. Acessado em: http://brl.ee.washington.edu/Research_Past/Biologically_Based/Project_01_Arm/Anthroform_Arm.html. Acessado em 16/10/2006.

Anexo I – Algoritmos

Neste anexo são exibidos os códigos fonte dos algoritmos dos fórmula nodes, componente do LabVIEW que permite realizar funções através de linguagem escrita, com sintaxe semelhante à da linguagem C.

Algoritmo de calculo da Matriz de Orientação do software de Cinemática Direta:

```
int32 x;
float A [9] [3] [3];

A[x][0][0]=Nx0 * C[x] + Sxo * S[x];
A[x][0][1]=-Nx0 * S[x] + Sxo * C[x];
A[x][0][2]=Axo;
A[x][1][0]=Ny0 * C[x] + Syo * S[x];
A[x][1][1]=-Ny0 * S[x] + Syo * C[x];
A[x][1][2]=Ayo;
A[x][2][0]=Nz0 * C[x] + Sz0 * S[x];
A[x][2][1]=-Nz0 * S[x] + Sz0 * C[x];
A[x][2][2]=Azo;
for (x=1; x!=9; x+=1){
    if ( Seq [x] == 0){ //em torno do eixo x

        A[x][0][0]=A[x-1][0][0];
```

```

A[x][0][1]=A[x-1][0][1] * C[x] + A[x-1][0][2] * S[x];
A[x][0][2]=-A[x-1][0][1] * S[x] + A[x-1][0][2] * C[x];

A[x][1][0]=A[x-1][1][0];
A[x][1][1]=A[x-1][1][1] * C[x] + A[x-1][1][2] * S[x];
A[x][1][2]=-A[x-1][1][1] * S[x] + A[x-1][1][2] * C[x];

A[x][2][0]=A[x-1][2][0];
A[x][2][1]=A[x-1][2][1] * C[x] + A[x-1][2][2] * S[x];
A[x][2][2]=-A[x-1][2][1] * S[x] + A[x-1][2][2] * C[x];
}
if (Seq [x] == 1) { //em torno do eixo y
A[x][0][0]=A[x-1][0][0] * C[x] - A[x-1][0][2] * S[x];
A[x][0][1]=A[x-1][0][1];
A[x][0][2]=A[x-1][0][0] * S[x] + A[x-1][0][2] * C[x];

A[x][1][0]=A[x-1][1][0] * C[x] - A[x-1][1][2] * S[x];
A[x][1][1]=A[x-1][1][1];
A[x][1][2]=A[x-1][1][0] * S[x] + A[x-1][1][2] * C[x];

A[x][2][0]=A[x-1][2][0] * C[x] - A[x-1][2][2] * S[x];
A[x][2][1]=A[x-1][2][1];
A[x][2][2]=A[x-1][2][0] * S[x] + A[x-1][2][2] * C[x];
}
if ( Seq [x] == 2) { //em torno do eixo z
A[x][0][0]=A[x-1][0][0] * C[x] + A[x-1][0][1] * S[x];
A[x][0][1]=-A[x-1][0][0] * S[x] + A[x-1][0][1] * C[x];
A[x][0][2]=A[x-1][0][2];

A[x][1][0]=A[x-1][1][0] * C[x] + A[x-1][1][1] * S[x];
A[x][1][1]=-A[x-1][1][0] * S[x] + A[x-1][1][1] * C[x];

```

$$A[x][1][2]=A[x-1][1][2];$$

$$A[x][2][0]=A[x-1][2][0] * C[x] + A[x-1][2][1] * S[x];$$

$$A[x][2][1]=-A[x-1][2][0] * S[x] + A[x-1][2][1] * C[x];$$

$$A[x][2][2]=A[x-1][2][2];$$

}

}

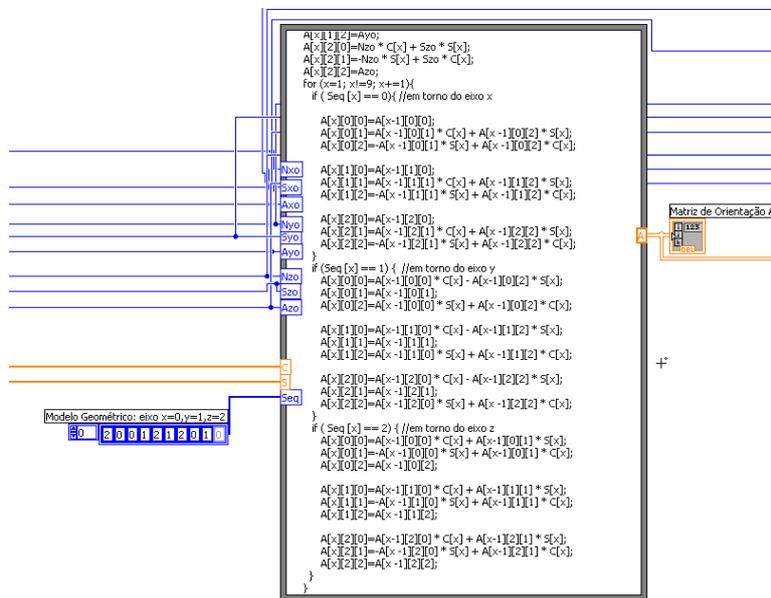


Figura 86. Colocação do algoritmo no fórmula node

Algoritmo de calculo das coordenadas cartesianas do software de Cinemática Direta:

float O [18] [3]; // O[x] [0] = x, ..1]=y, ..2] = z;

O[0][0]=0;

O[0][1]=0;

O[0][2]=0;

O[1][0]=O[0][0];

$$O[1][1]=O[0][1];$$

$$O[1][2]=O[0][2];$$

*//Ponto 2: O2=O1+R0*L1*

$$O[2][0] = O[1][0] + Lx[0] * Nxo;$$

$$O[2][1] = (O[1][1] + Lx[0] * Nyo);$$

$$O[2][2] = O[1][2] + Lx[0] * Nzo;$$

*//Ponto 3: O3=O2+R0*L2*

$$O[3][0] = O[2][0] + Ly[1] * Sxo;$$

$$O[3][1] = (O[2][1] + Ly[1] * Syo);$$

$$O[3][2] = O[2][2] + Ly[1] * Szo;$$

*//Ponto 4: O4=O3+R0*L3*

$$O[4][0] = O[3][0] + Lz[2] * Axo;$$

$$O[4][1] = (O[3][1] + Lz[2] * Ayo);$$

$$O[4][2] = O[3][2] + Lz[2] * Azo;$$

*//Ponto 5: O5=O4+R01*L4*

$$O[5][0] = O[4][0] + A[0][0][0] * Lx[3];$$

$$O[5][1] = (O[4][1] + A[0][1][0] * Lx[3]);$$

$$O[5][2] = O[4][2] + A[0][2][0] * Lx[3];$$

*//Ponto 6: O6=O5+R02*L5*

$$O[6][0] = O[5][0] + A[1][0][1] * Ly[4];$$

$$O[6][1] = (O[5][1] + A[1][1][1] * Ly[4]);$$

$$O[6][2] = O[5][2] + A[1][2][1] * Ly[4];$$

*//Ponto 7: O7=O6+R02*L6*

$$O[7][0] = O[6][0] + A[1][0][0] * Lx[5];$$

$$O[7][1] = (O[6][1] + A[1][1][0] * Lx[5]);$$

$$O[7][2] = O[6][2] + A[1][2][0] * Lx[5];$$

*//Ponto 8: O8=O7+R03*L7*

$$O[8][0] = O[7][0] + A[2][0][1] * Ly[6];$$

$$O[8][1] = (O[7][1] + A[2][1][1] * Ly[6]);$$

$$O[8][2] = O[7][2] + A[2][2][1] * Ly[6];$$

*//Ponto 9: O9=O8+R04*L8*

$$O[9][0] = O[8][0] + A[3][0][2] * Lz[7];$$

$$O[9][1] = (O[8][1] + A[3][1][2] * Lz[7]);$$

$$O[9][2] = O[8][2] + A[3][2][2] * Lz[7];$$

*//Ponto 10: O10=O9+R04*L9*

$$O[10][0] = O[9][0] + A[3][0][1] * Ly[8];$$

$$O[10][1] = (O[9][1] + A[3][1][1] * Ly[8]);$$

$$O[10][2] = O[9][2] + A[3][2][1] * Ly[8];$$

*//Ponto 11: O11=O10+R05*L10*

$$O[11][0] = O[10][0] + A[4][0][2] * Lz[9];$$

$$O[11][1] = (O[10][1] + A[4][1][2] * Lz[9]);$$

$$O[11][2] = O[10][2] + A[4][2][2] * Lz[9];$$

*//Ponto 12: O12=O11+R06*L11*

$$O[12][0] = O[11][0] + A[5][0][2] * Lz[10];$$

$$O[12][1] = (O[11][1] + A[5][1][2] * Lz[10]);$$

$$O[12][2] = O[11][2] + A[5][2][2] * Lz[10];$$

*//Ponto 13: O13=O12+R07*L12*

$$O[13][0] = O[12][0] + A[6][0][2] * Lz[11];$$

$$O[13][1] = (O[12][1] + A[6][1][2] * Lz[11]);$$

$$O[13][2] = O[12][2] + A[6][2][2] * Lz[11];$$

```

//Ponto 14: O14=O13+R08*L13
O[14][0] = O[13][0] + A[7][0][2] * Lz[12];
O[14][1] = (O[13][1] + A[7][1][2] * Lz[12]);
O[14][2] = O[13][2] + A[7][2][2] * Lz[12];

```

```

//Ponto 15: O15=O14+R08*L14
O[15][0] = O[14][0] + A[7][0][2] * Lz[13];
O[15][1] = (O[14][1] + A[7][1][2] * Lz[13]);
O[15][2] = O[14][2] + A[7][2][2] * Lz[13];

```

```

//Ponto 16: O16=O15+R09*L15
O[16][0] = O[15][0] + A[8][0][2] * Lz[14];
O[16][1] = (O[15][1] + A[8][1][2] * Lz[14]);
O[16][2] = O[15][2] + A[8][2][2] * Lz[14];

```

```

//Ponto 17: O17=O16+R09*L16
O[17][0] = O[16][0] + A[8][0][2] * Lz[15];
O[17][1] = (O[16][1] + A[8][1][2] * Lz[15]);
O[17][2] = O[16][2] + A[8][2][2] * Lz[15];

```

Algoritmo de calculo das coordenadas cartesianas do software de Cinemática Direta:

```

// Programa de Cinemática Inversa em LabView 7.1 - Formula Node
float DistanciaX, DistanciaY, DistanciaZ;
float DisPZY, DisPZX, DPontoOmbro;
float vQ1, vQ2, AberturaBraco, vQ3;
float Conv;

Conv = pi / 180;

```

$DistanciaX = \max(X, XO) - \min(X, XO);$

$DistanciaY = \max(Y, YO) - \min(Y, YO);$

$DistanciaZ = \max(Z, ZO) - \min(Z, ZO);$

$DisPZY = \sqrt{\text{pow}(DistanciaY,2) + \text{pow}(DistanciaZ,2)}; //Dist\^ancia do Ponto \grave{a} Origem do PlanoZY$

$DisPZX = \sqrt{\text{pow}(DistanciaX,2) + \text{pow}(DistanciaZ,2)}; //Dist\^ancia do Ponto \grave{a} Origem do PlanoZX$

$DPontoOmbro = \sqrt{\text{pow}(DistanciaX,2) + \text{pow}(DistanciaY,2) + \text{pow}(DistanciaZ,2)}; //Dist\^ancia do Ponto aoOmbro$

// Q1

$vQ1 = \text{acos} ((\text{pow}(DistanciaZ,2) + \text{pow}(DisPZY,2) - \text{pow}(DistanciaY,2)) / (2 * DistanciaZ * DisPZY)) / Conv;$

$\text{if} (Z > ZO \ \&\& \ Y > YO) \{$

$\quad vQ1 = 180 - vQ1;$

$\}$

$\text{if} (Z < ZO \ \&\& \ Y < YO) \{$

$\quad vQ1 = 180 - vQ1;$

$\}$

//Q2

$AberturaBraco = \text{acos} ((\text{pow}(DPontoOmbro,2) + \text{pow}(TB,2) - \text{pow}(TAB,2)) / (2 * DPontoOmbro * TB)) / Conv;$

$vQ2 = \text{acos} ((\text{pow}(DPontoOmbro,2) + \text{pow}(DisPZY,2) - \text{pow}(DistanciaX,2)) / (2 * DPontoOmbro * DisPZY)) / Conv;$

$\text{if} (Y < YO) \{$

$\quad vQ2 = 180 - vQ2 - AberturaBraco;$

$\}$ else {

$\quad vQ2 = vQ2 - AberturaBraco;$

}

//Q3

$vQ3 = 180 - (\text{acos} ((\text{pow}(TAB,2) + \text{pow}(TB,2) - \text{pow}(DPontoOmbro,2)) / (2 * TAB * TB)) / Conv);$

//Definição

$Q1 = vQ1;$

$Q2 = vQ2;$

$Q3 = vQ3;$

Apêndice A – Manual do Pistão Elétrico da *SCM International*

A seguir o manual que acompanha os pistões de SMA da *SCM International*.

Instrucciones

Pistón Eléctrico es el único actuador lineal totalmente eléctrico que se acorta en su longitud con gran velocidad . El secreto de su comportamiento se basa en la su construcción con aleaciones metálicas con memoria (Shape Memory Alloy, SMA).

Cuando circula una corriente eléctrica , un resorte de SMA se calienta produciéndose un acortamiento en su longitud. Este se acorta 19mm, pudiendo realizar fuerzas hasta los 450 gramos , con un peso propio de solo 10 gramos !!!.

Esta publicación lo introducirá en como activar los pistones eléctricos y utilizarlos para generar movimientos. Los pistones eléctricos abren la puerta a una nueva forma de crear acciones con energía eléctrica.

Aleaciones Metálicas con Memoria (SMA).

Los metales SMA pueden tomar diferentes formas o fases a diferentes temperaturas. El material mas utilizado es el Nitinol, el cual consiste en una aleación de Níquel y Titanio. A temperaturas bajas puede ser deformado fácilmente. Pero al tomar alta temperatura (por medio de un calentador externo o por circulación de una corriente eléctrica) el metal cambia a una forma mas dura , ejerciendo una fuerza estable.

Estos materiales generalmente se los encuentra en forma de alambres (Alambres Musculares®) en un amplio rango de diámetros. Los alambres pueden ser fácilmente entrenados y darle forma de resortes, bobinas, etc... Una vez entrenado, este puede ser enfriado, deformándose y recobrar la forma inicial al ser calentado. Los resortes pueden ser encontrados en una amplia gama de tamaños, estos pueden ser contraídos o expandidos cuando se enfrían (temperatura ambiente), volviendo a su forma original al calentarse .

Energía de actuación.

Los Pistón Electricos son activados por el calor producido por la corriente eléctrica, el tiempo de contracción varia con la corriente aplicada. A mayor corriente, más rápido se calienta y más rápido se contraen. Corrientes mayores a los 10 amperes, pueden hacer activar el pistón en menos de un segundo. El uso de altas corrientes requiere de tenerse la precaución de proteger el resorte interno de SMA de sobrecalentamientos.

Temperaturas sobre los 300 grados centígrados pueden causar danos permanentes sobre el resorte de SMA con la perdida de la memoria de forma. Corrientes menores a los 2 amperios generalmente no calentaran al resorte SMA como para que este actúe.

Formas de energizar el pistón.

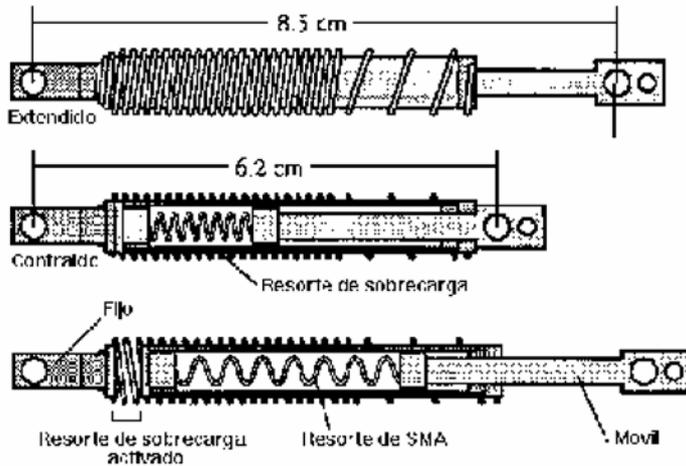
La corriente eléctrica para energizar los pistones pueden provenir de varios tipos de fuentes. Algunas baterías , como ser la Polaroid Polapulse P100 (provista en diferentes Kits de pistones), celdas recargables de nickel-cadmio, que pueden producir altas corrientes con periodos razonables de tiempo. También fuentes de tensión pueden producir corrientes altas y continuas

Pistón Eléctrico

SCM International

2

Características Técnicas



Físicas

Longitud relajado	100 mm
Longitud contraído	76 mm
Diámetro máximo	9 mm
Recorrido neto (sin carga)	23 mm
Recorrido neto (con 450g de carga)	19 mm
Masa:	
Fuerza operativa (en contracción)	450 gramos
Fuerza de sobrecarga:	650 gramos
Fuerza de reset:	250 gramos

Eléctricas:

Resistencia eléctrica total:	0.2 ohm
Corriente máxima:	5 amperes
Corriente mínima:	2 amperes
Corriente típica:	4 amperes

Tiempo para activarse a 4 amperes en aire estanco a 21°C

Tiempo para iniciar la contracción:	2.5 segundos
Tiempo para llegar al 90% de la contracción:	6.0 segundos
Tiempo para reset después de 10 minutos energizado:	
Tiempo para iniciar la relajación:	3.0 segundos
Tiempo para llegar al 90% de la relajación:	7.0 segundos
Ciclos por minuto típico:	1-2 ciclos por minuto

Térmicas:

Temperatura final de contracción:	90°C
Temperatura final de relajación:	65°C

SCM International, Inc. POBOX 9793 . Reno , NV . 89507 . USA

E-mail de ventas habla hispana: clientes@SCMStore.com. Electronic's Store Web site: www.SCMStore.com . 2

Proyecto 1. Pistón Eléctrico alimentado por una batería.

Este proyecto demuestra como energizar en su forma básica un Pistón Eléctrico con una batería , y utilizarlo para levantar un peso venciendo la fuerza de la gravedad.

Construcción

Corte dos cables de 1/2 mm y pélelos en sus extremos, y conéctelos al Pistón Eléctrico , uno al extremo del Pistón y otro al resorte de protección de sobrecarga.

Cuelgue el Pistón Eléctrico en una base de madera (como se ve en la figura). Agarre una plomada o peso por medio de un clip al extremo del pistón.

Como funciona ?

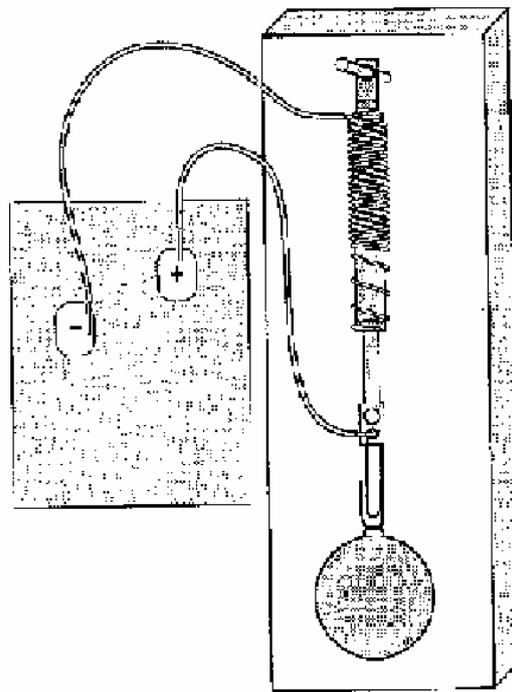
Conecte los terminales del Pistón a la batería, uno al positivo y otro al negativo. El Pistón Eléctrico se contraerá levantando el peso . Desconecte entonces la batería.

Variaciones:

Use esta contracción lineal para hacer trabas para puertas o paneles, abridores de puertas automáticas para mascotas, etc...

Listado de Componentes:

- 1 Pistón Eléctrico
- 1 Batería Polapulse
- 2 Cables aislados
- 1 Peso de 450g
- 1 Clip para papel
- 1 Base de madera



Proyecto 2. Pistones en oposición

Dos pistones eléctricos y una llave doble inversora hacen un dispositivo que puede moverse en dos direcciones.

Este sistema requiere de una pausa desde que un Pistón a terminado de ser energizado hasta ser energizado el Pistón en oposición. Bajo temperatura ambiente requiere de 30 segundos para que el pistón se enfríe.

Pistón Eléctrico

SCM International

5

El circuito usa un circuito de reloj de bajo costo con alarma para activar el pistón y tirar del pin. Fabrique la base de madera o de plástico a su conveniencia. Este circuito puede ser construido fácilmente por medio de un reloj de bajo costo con alarma.

Cuidadosamente habrá la parte trasera del reloj. Para conectar el reloj al driver de potencia, localice y conecte los cables a los siguientes puntos: 1. El terminal positivo de la batería , y 2. la salida de alarma. La mayoría de los relojes trabajan a 1.5 o 3 voltios. Con un tester o voltímetro localice el positivo en la tarjeta en zonas cercanas a la pila o batería.

El sonador de alarma será un disco plateado cerca de la parte trasera del reloj. En el circuito del reloj busque un pequeño resorte o una pequeña aleta metálica que toque el sonador cuando el reloj se encuentra serrado. Este será entonces la salida del circuito de alarma.

Conecte el tester a ambos puntos de testeo y realice mediciones con el alarma activada. Podrá observar variaciones de 0 a 1.5v o 3v, dependiendo del reloj.

Conecte las salidas del reloj al driver y chequeando que al estar activa la alarma se encienda el led rojo.

Como trabaja:

Cuando se activa, el pistón tirara del pin librando la carga. Al desconectarse la energía el pistón se relajara y el pin podrá ser reseteado. El reloj digital contiene electrónica sofisticada en un tamaño reducido. La señal que normalmente alimenta al sonador, provee una pequeña señal al pin 2 de U1 (optoacoplador).

La señal permite que circule corriente entre los pines 4 y 5 de U1 haciendo que el led brille.

Proveyendo una tensión positiva a la base de Q1. Con el gate positivo, fluiría corriente entre el source y drain , por consiguiente se energizara el Pistón Eléctrico.

La resistencia R1 limita la corriente del led. R2 pone la base de Q1 a tierra cuando la alarma esta inactiva.

Listado de Componentes:

- 1 Pistón Eléctrico
- 1 Base de madera o plástica (14 x 2 x 2 cm)
- 1 Pin de 1.5 mm de diámetro x 3 cm de largo
- 1 Tornillo, #4-40 x 1/4"
- 1 Tuerca, #4-40 hexagonal
- Cables aislados
- 1 Reloj digital con alarma
- 1 Optoaislador , 4N25
- 1 Zócalo de 3x2 , DIP
- 1 R1 - Resistencia de 1K Ω
- 1 R2 - Resistencia de 100K Ω
- 1 Q1 - Transistor IRFZ30 . MOSFET, PNP
- 1 led rojo
- 1 Polapulse P100

SCM International, Inc. POBOX 9793 . Reno , NV . 89507 . USA

E-mail de ventas habla hispana: clientes@SCMStore.com. Electronic's Store Web site: www.SCMStore.com . 5

Proyecto 4. Control de pistones con BASIC Stamp.

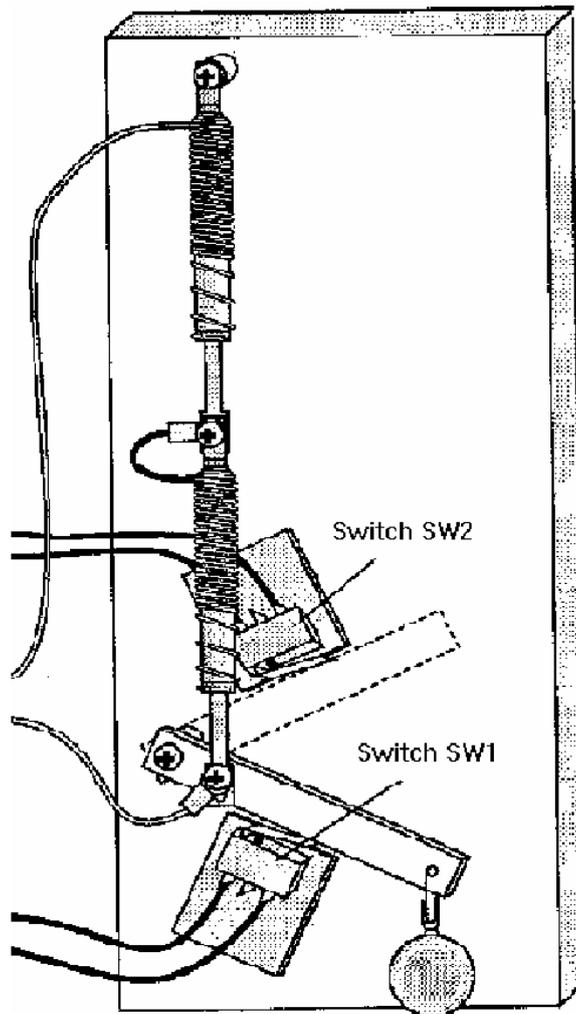
Este proyecto provee una forma sofisticada de medir y controlar la operación de un pistón eléctrico y hacerlo ciclar a su máxima velocidad. Las Basic Stamps son microcomputadoras que forman las bases para un sistema de bajo costo, flexible y fácil de programar que puede activar un pistón basándose en condiciones de entradas y comunicándose con una computadora por medio de RS232.

Construcción:

Utilice cualquier método de ensamblado electrónico para construir el circuito de la figura. Utilizando un conector de 14 pines en línea podrá montar la BASIC Stamp y removerla cuando ya no le sea útil o la requiera para utilizarla en otro proyecto sin tener que desoldarla. Construya el mecanismo teniendo en cuenta que Ud. pueda ajustar la posición de los switches.

Como funciona:

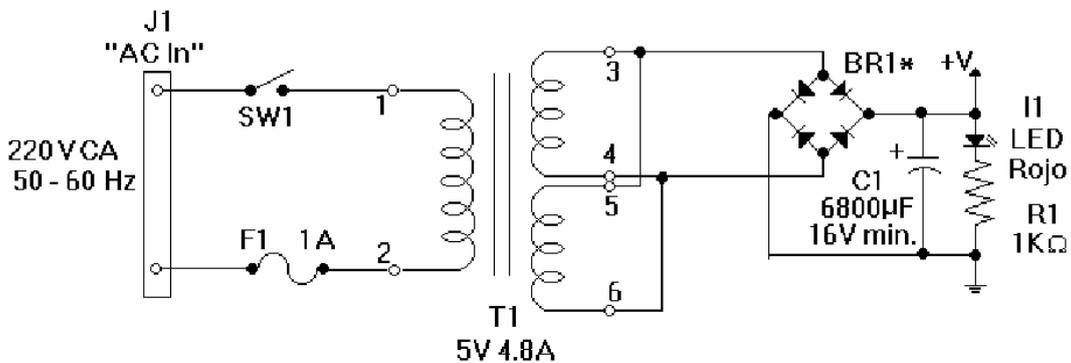
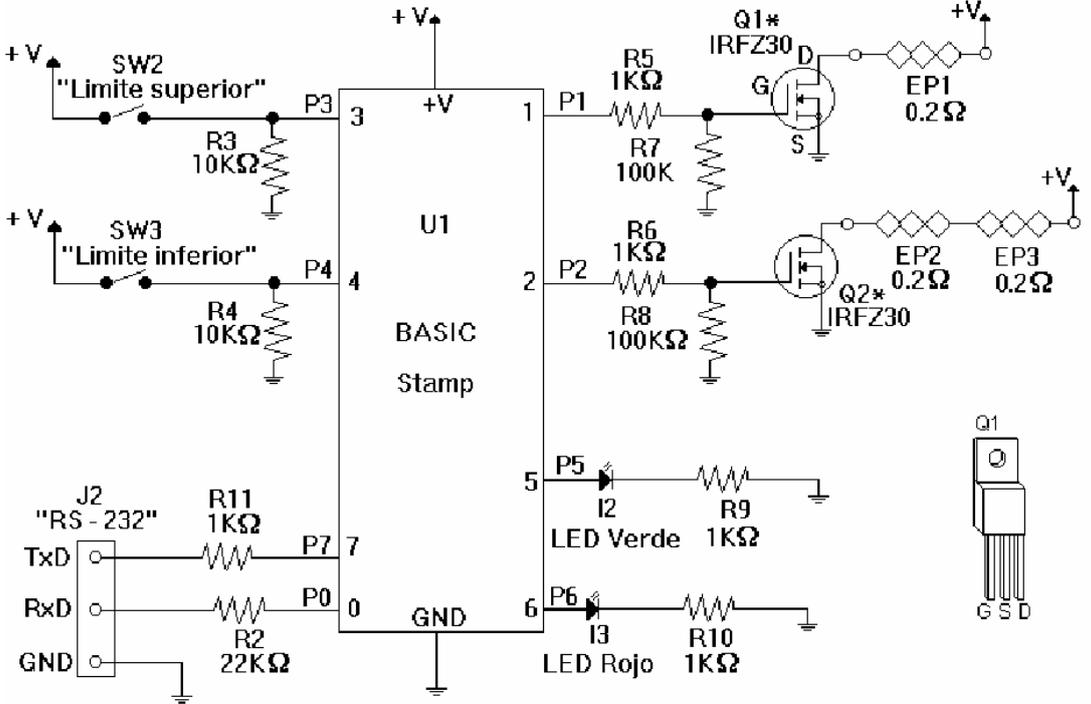
En este dispositivo, el controlador activa el pistón que se contrae para levantar el brazo y la masa pendiente. Cuando el brazo llega al tope máximo, cerrara el switch superior. El controlador detectara el cierre del switch y desalimentará el pistón, el cual comenzara a enfriarse y relajarse. Cuando el pistón este totalmente extendido el brazo cerrara el switch inferior. El controlador reportara automáticamente el tiempo de relajación y el periodo completo (en segundos) vía RS232 a una computadora la cual podrá tener corriendo Cyber Comm u otro programa de comunicaciones. Luego el controlador repetirá el ciclo.



Pistón Eléctrico

SCM International

7



* Use disipadores de calor de aluminio en BR1, Q1 y Q2.

Variantes:

Por medio de Cyber Comm podrá almacenar en disco los valores adquiridos y de esta manera luego podrá analizar como vario la respuesta del pistón frente a diferentes condiciones externas. Realice mediciones poniendo el montaje del pistón en una heladera o freezer. Para mayor información de las Basic Stamp solicite nuestro catalogo. Construya un circuito con mas drivers para comandar mas pistones eléctricos. Agregue sensores de posición para poder comandar al pistón con control de posición.

SCM International, Inc. POBOX 9793 . Reno , NV . 89507 . USA
E-mail de ventas habla hispana: clientes@SCMStore.com. Electronic's Store Web site: www.SCMStore.com . 7

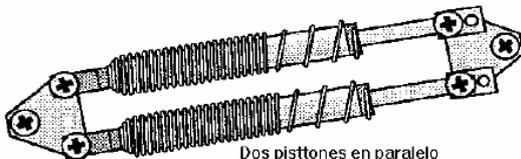
Al comprar la Basic Stamp solicite el software para esta aplicación. Nosotros le entregaremos los fuentes para que Ud. pueda modificarlo fácilmente para crear sus aplicaciones.

Buena suerte y felices descubrimientos !!!

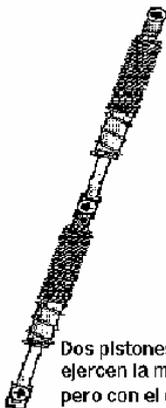
Especificaciones de las baterías Polapulse P100

Tamaño: 9.5 cm x 7.7 cm x 0.5 cm.
Peso: 27 gramos.
Tensión: 6 voltios nominal, 6.3 volt a circuito abierto.
Rango de temperatura: -7°C a 54°C.
Corriente de descarga (carga 0.1Ω):
15 amperes instantáneo.
8.5 amperes después de 30 segundos.
4.5 amperes después de 60 segundos.
Resistencia interna: 0.5Ω

Conceptos importantes:



Dos pistones en paralelo
ejercen el doble de fuerza.



Dos pistones en serie
ejercen la misma fuerza
pero con el doble de recorrido.