

ANEZIO ALVES DE OLIVEIRA JÚNIOR

**MODELAGEM DE UMA PERNA DE ROBÔ COM
BASE NO MECANISMO DE BENNETT**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2006

ANEZIO ALVES DE OLIVEIRA JÚNIOR

**MODELAGEM DE UMA PERNA DE ROBÔ COM BASE NO
MECANISMO DE BENNETT**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho

UBERLÂNDIA – MG

2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

O48m Oliveira Júnior, Anezio Alves de, 1980-
 Modelagem de uma perna de robô com base no mecanismo de Bennett /
 Anezio Alves de Oliveira Júnior. - 2006.
 162f. : il.
 Orientador: João Carlos Mendes Carvalho.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
 Inclui bibliografia.
 1. Robótica - Teses. I. Carvalho, João Carlos Mendes. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 681.3 : 007.52

Este trabalho é dedicado a meus pais,
Anésio e Marta,
que me ajudaram a me tornar o que hoje sou
e também à mulher que Deus me deu por fiel companheira
minha amada e querida esposa,
Cristiane

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela perseverança e força que me deu para concluir esse trabalho. Também agradeço a Ele por ter me ajudado a enfrentar as adversidades que se levantaram contra mim durante essa fase de minha vida.

Agradeço à Cristiane L. S. de Oliveira, minha querida e amada esposa, que sempre me incentivou e me ajudou a encontrar forças e motivação para levar essa jornada até o fim.

Agradeço a toda minha família que sempre me incentivou em meus estudos. Em especial agradeço a meus pais, Anésio A. Oliveira e Marta M. Oliveira, pois sem o seu apoio, este trabalho não teria sido começado por mim e menos ainda teria sido concluído.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho, que sempre foi um grande amigo e companheiro nas horas difíceis de minha vida. Agradeço pela paciência que teve comigo durante minha orientação, que vem desde os tempos de iniciação científica.

Eu também não poderia deixar de agradecer ao Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda, pelo seu apoio e incentivo nessa jornada e também a meus amigos e colegas de laboratório, que sempre se dispuseram a me ajudar quando tive necessidade.

Agradeço à CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos que me foi concedida, e também à FEMEC – UFU, pela estrutura física que me foi disponibilizada para o desenvolvimento desse trabalho.

“Assim diz o Senhor: Não se glorie o sábio na sua sabedoria, nem se glorie o forte na sua força; não se glorie o rico nas suas riquezas, mas o que se gloriar glorie-se nisto: em Me conhecer e saber que Eu sou o Senhor, que faço beneficência, juízo e justiça na terra; porque destas cousas me agrado, diz o Senhor”.

Jeremias 9: 23, 24

Sumário

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
CAPÍTULO 1 – Introdução	001
CAPÍTULO 2 – Robótica	005
2.1 – Introdução	005
2.2 – Robôs móveis	011
2.3 – Robôs com pernas	016
CAPÍTULO 3 – Mecanismos	037
3.1 – Introdução	037
3.2 – Componentes de um mecanismo	041
3.3 – Tipos de mecanismo	047
3.4 – Número de graus de liberdade de um mecanismo	048
3.5 – Mecanismos de quatro barras do tipo 4R	051
3.5.1 – Mecanismo plano de quatro barras	053
3.5.2 – Mecanismo esférico de quatro barras	054
3.5.3 – Mecanismo espacial de quatro barras	054
3.6 – Mecanismo de Bennett	056

CAPÍTULO 4 – Modelagem do mecanismo de Bennett como perna de um robô móvel	061
4.1 – Introdução	061
4.2 – Modelagem cinemática	062
4.3 – Método de análise e seleção da trajetória do pé	073
4.4 – Famílias de curvas	077
4.5 – Conclusão	099
CAPÍTULO 5 – Transposição de obstáculos	101
5.1 – Introdução	101
5.2 – Procedimentos para a transposição de obstáculos	102
5.3 – Procedimentos de transposição de obstáculos pela variação do parâmetro m	112
5.4 – Procedimento de transposição de obstáculos pelo reposicionamento da perna	119
5.5 – Transposição de obstáculos pela combinação do reposicionamento da perna e da variação do parâmetro m	121
5.6 – Conclusão	122
CAPÍTULO 6 – Projeto e simulação de um protótipo	125
6.1 – Introdução	125
6.2 – Protótipo modelado	126
6.3 – Simulações gráficas	131
6.4 – Conclusão	135
CAPÍTULO 7 – Conclusão e trabalhos futuros	137
7.1 – Conclusão	137
7.2 – Trabalhos futuros	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
ANEXOS	
A – Modelo Geométrico Direto do mecanismo de Bennett	147
B – Programa de geração de trajetórias do pé	149

C – Função para a plotagem das linhas de ação do mecanismo	154
D – Cálculo da Regressão Linear Múltipla	156
E – Programa de geração da família de trajetórias da variável m	159

OLIVEIRA JR, A. A. **Modelagem de uma perna de robô com base no mecanismo de Bennett**. 2006. 162 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O objetivo desse trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma perna robótica, modelada com base em um mecanismo espacial de quatro barras do tipo 4R, denominado mecanismo de Bennett. Sabe-se que com uma configuração adequada desse mecanismo é possível descrever uma trajetória espacial, com perfil similar ao perfil de um passo, utilizando apenas um grau de liberdade. Em função disso, a perna modelada é bem mais simples do que a grande maioria das pernas que são utilizadas atualmente nos robôs móveis. Em função da necessidade de se transpor obstáculos, foram adicionados à perna dois graus de liberdade, dando a ela uma maior mobilidade. Esses graus de liberdade adicionais não comprometem o desempenho da estrutura, pois são utilizados apenas durante a transposição de obstáculos, que é uma situação na qual o robô normalmente se movimenta a velocidades mais baixas. A perna modelada, apesar de não ter tido sua configuração otimizada, apresentou resultados satisfatórios, sendo capaz de transpor obstáculos de dimensões comparativas às dimensões da perna. As simulações gráficas confirmam que as dimensões físicas da estrutura exercem grande influência sobre as dimensões de obstáculos que a perna pode transpor.

Palavras chave: perna robótica, mecanismo de Bennett, robô móvel, robótica.

OLIVEIRA JR, A. A. **Modeling of a robotic leg based on the Bennett's linkage**. 2006. 162 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present the development of a robotic leg, based on a four-bar 4R spatial mechanism, named as Bennett's mechanism. Using an adequate configuration of this mechanism, it is possible to describe a spatial curve, which is similar to the profile of a gait, using only one degree of freedom. Due to its simplicity, the modeled leg is simpler than the legs which are currently used on the mobile robots. To make easy the obstacles transposition, another two degrees of freedom had been added to the leg, allowing it a higher mobility. These additional degrees of freedom don't compromise the performance of the structure because they are used just during the crossing of the obstacle, where the robot normally moves at lower speeds. The modeled leg, although not to have its configuration optimized, it has presented good results, being capable of crossing obstacles of considerable dimensions, comparing to its own dimensions. Graphical simulations have shown that the physical dimensions of the structure influence the dimensions of the obstacle that the leg can transpose.

Keywords: robotic leg, Bennett's mechanism, mobile robots, robotics

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

2.1: Criança autômata que desenha e escreve(http://www.automates-anciens.com/versao_%20portuguesa/quadros/quadro_portugues.htm)	006
2.2: Robô serial Kuka – KR 500-2 (KUKA ROBOT GROUP)	009
2.3: Robô paralelo produzido pela ABB – IRB 340 FlexPicker (ABB Brasil)	011
2.4: Shrimp III (BLUEBOTICS CORP, 2006)	013
2.5: MRUV-100 (HDE MANUFACTURING INC.)	013
2.6: Robô dotado de pernas com controle manual (RAIBERT, 1986)	014
2.7: Robô Asimo, construído pela Honda	015
2.8: Representação esquemática do EP-WAR2 (FIGLIOLINI; CECCARELLI, 2001)	016
2.9: Robô Hexápode RHex (MOORE, 2002)	018
2.10: Robô monópode (RAIBERT, 1986)	020
2.11: LAURON II	021
2.12: Configuração das pernas de um robô nas formas de (a) mamífero e (b) inseto	022
2.13: Esquema representativo de uma perna do ASV (SONG et al. 1984)	023
2.14: ASV – Adaptive Suspension Vehicle (www.ece.osu.edu/~klein/robotics/walker.jpg)	023
2.15: Robô AMBLER (KROTKOV; SIMMONS; WHITTAKER, 1992)	024
2.16: Montagem de uma perna do TUM (PFEIFFER; ELTZE; WEIDEMANN, 1995)	025
2.17: Estrutura da perna do TUM (PFEIFFER; ELTZE; WEIDEMANN, 1995)	026
2.18: Visualização esquemática do robô TUM – Technical University	

in Munich (PFEIFFER; ELTZE; WEIDEMANN, 1995)	026
2.19: CARL (www.cim.mcgill.ca/research/94-95AnualReport/node92.htm)	028
2.20: R-III (NELSON et al., 1997)	030
2.21: Perna com arquitetura do tipo SCARA (GRIECO et al., 1998)	032
2.22: Hexápode com pernas do tipo SCARA (GRIECO et al., 1998)	032
2.23: Hexápode pneumático (DELCOMYN; NELSON, 2000)	033
2.24: Hexápode inseto/mamífero (ZIELINSKA; HENG, 2002)	034

CAPÍTULO III

3.1 – Desenho esquemático de um odômetro romano (HARTENBERG; DENAVITT, 1964)	038
3.2: Mecanismo de Watt	039
3.3: Mecanismo plano de quatro barras com uma barra ternária	042
3.4: Fechamento por força	043
3.5: Articulações de primeira e segunda ordem	044
3.6: Tipos de articulações (pares inferiores): (a) de rotação, (b) prismática, (c) do tipo parafuso, (d) cilíndrica, (e) esférica e (f) planar (HARTENBERG; DENAVIT, 1964)	046
3.7: Mecanismo de Stephenson	048
3.8: Mecanismo sem restrição	049
3.9: Inversões do mecanismo plano de quatro barras. Menor barra: 4; Maior barra: 3. (a) manivela balancim, (b) manivela dupla, (c) manivela balancim e (d) balancim duplo	053
3.10: Mecanismo de Whitworth	054
3.11: Mecanismo esférico de quatro barras (AL-WIDYAN; ANGELES, 2003)	055
3.12: Mecanismo espacial de quatro barras – Mecanismo de Bennett (HO, 1977)	055

CAPÍTULO IV

4.1: Mecanismo de Bennett com os parâmetros utilizados para sua análise	063
4.2: Referenciais utilizados na modelagem cinemática do mecanismo de Bennett	064
4.3: Esquema geral da perna com parâmetros utilizados na modelagem Cinemática	067
4.4: Esquema geral da perna com o prolongamento segundo uma reta	067
4.5: Trajetória plotada para a configuração: $\theta_2 = 43,5^\circ$; $\theta_9 = 0$; $r_a = 2,7$; $R = 210mm$; $L = 1,2r$; $m = 50mm$; e $n = 1,8r$	069
4.6 – Sistema referencial utilizado para a geração da trajetória do passo	070
4.7: Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P para a curva plotada com a configuração: $\theta_2 = 43,5^\circ$; $\theta_9 = 0$; $r_a = 2,7$; $R = 210mm$; $L = 1,2r$; $m = 50mm$ e $n = 1,8r$	075
4.8: Trajetória plotada para a configuração: $\theta_2 = 43,5^\circ$; $\theta_9 = 0$; $r_a = 2,7$; $R = 210mm$; $L = 1,2r$; $m = 50mm$; $n = 1,8r$; $\alpha = -5,12^\circ$; $\beta = 6,88^\circ$ e $\gamma = -32,20^\circ$	077
4.9: Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P para a curva com configuração: $\theta_2 = 43,5^\circ$; $\theta_9 = 0$; $r_a = 2,7$; $R = 210mm$; $L = 1,2r$; $m = 50mm$; $n = 1,8r$; $\alpha = -5,12^\circ$; $\beta = 6,88^\circ$ e $\gamma = -32,20^\circ$	078
4.10: Curvas para o ângulo θ_2 variando de -75° até 75° , em intervalos de 10° . Plotagem para $\theta_9 = 0$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = r$; $m = 20mm$ e $n = 1,5r$	079
4.11: Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P em função da variação de θ_2 . Configuração plotada: $\theta_9 = 0$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = r$; $m = 20mm$ e $n = 1,5r$	080
4.12: Curvas para o ângulo θ_9 variando de -180° até 180° , em intervalos de 20° . Plotagem para $\theta_2 = 30^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = r$; $m = 20mm$ e $n = 1,5r$	082
4.13: Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P em função da variação de θ_9 . Configuração plotada: $\theta_2 = 30^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = r$; $m = 20mm$ e $n = 1,5r$	083
4.14: Curvas para o prolongamento L variando de $-2,5r$ até $2,5r$, em intervalos de $0,25r$. Plotagem para $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $m = 20mm$	

- e $n = 1,5r$ 084
- 4.15:** Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P em função da variação de L . Configuração plotada: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $m = 20mm$ e $n = 1,5r$ 085
- 4.16:** Curvas para o prolongamento m variando de $-90mm$ até $90mm$, em intervalos de $15mm$. Plotagem para $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = 2r$ e $n = 1,5r$ 086
- 4.17:** Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P em função da variação de m . Configuração plotada: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = 2r$ e $n = 1,5r$ 087
- 4.18:** Curvas para o prolongamento n variando de $n = -3r$ até $n = 2,5r$, em intervalos de $0,25r$. Plotagem para $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = 2r$ e $m = -30mm$ 088
- 4.19:** Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P em função da variação de n . Configuração plotada: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = 2r$ e $m = -30mm$ 089
- 4.20:** Trajetórias plotadas com $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,7$; $R = 200mm$; $L = 2r$; $m = -30mm$ e (a) $n = 1r$ e (b) $n = 3r$ 090
- 4.21:** Representação gráfica de ΔH 091
- 4.22:** Curvas para a relação r_a variando de 1,2 até 5,2, em intervalos de 0,4. Plotagem para $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r = 74,07mm$; $R = 200mm$; $L = 148,15mm$; $m = -30mm$ e $n = 148,15mm$ 092
- 4.23:** Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P em função da variação de r_a . Configuração plotada: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r = 74,07mm$; $R = 200mm$; $L = 148,15mm$; $m = -30mm$ e $n = 148,15mm$ 093
- 4.24:** Trajetória plotada para $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $L = 2r$; $m = -30mm$; $n = 2r$; $r_a = 1,8$; $\alpha = -78,02^\circ$; $\beta = 11,43^\circ$ e $\gamma = 13,83^\circ$ 094
- 4.25:** Curvas do comprimento R de $135mm$ até $300mm$, em intervalos de $15mm$. Plotagem para $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,8$; $L = 148,15mm$; $m = -30mm$ e $n = 148,15mm$ 096

- 4.26:** Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P em função da variação de R . Configuração plotada: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,8$; $L = 2r$; $m = -30mm$ e $n = 2r$ 097
- 4.27:** Trajetória escolhida com a configuração final: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$; $n = 1,8r$; $\alpha = -85,33^\circ$; $\beta = -22,24^\circ$ e $\gamma = -109,35^\circ$ 099
- 4.28:** Comportamento das coordenadas X, Y e Z do ponto P para a trajetória escolhida, plotada com a configuração final: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$ 100

CAPÍTULO V

- 5.1:** Trajetória descrita pelo pé do robô com a definição do passo. Configuração plotada: $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$ 103
- 5.2:** Representação de três ciclos de movimento consecutivos com identificação do espaço livre entre eles ($\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$) 104
- 5.3:** Posições relativas do prolongamento da perna em relação à trajetória em um ciclo de movimento ($\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$) 105
- 5.4:** Trajetórias traçadas para $\theta_9 = 0^\circ$, $\theta_9 = -30^\circ$, $\theta_9 = -45^\circ$ e $\theta_2 = 30^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$ 106
- 5.5:** Recuo da trajetória após a rotação do pé. Trajetórias plotadas para $\theta_9 = 0^\circ$, $\theta_9 = -15^\circ$, $\theta_9 = -30^\circ$, $\theta_9 = -45^\circ$ e $\theta_2 = 30^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$ 107
- 5.6:** Trajetórias traçadas para $L = 2,1r$, $L = 2,5r$, $L = 3r$, $L = 3,5r$ e $\theta_2 = 30^\circ$;

- $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$ 108
- 5.7:** Trajetórias traçadas para $n = 1,8r$, $n = 2r$, $n = 2,5r$, $n = 3r$ e $\theta_2 = 30^\circ$;
- $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$ e $m = -30mm$ 109
- 5.8:** Trajetórias traçadas para $m = -30mm$, $m = 30mm$, $m = 90mm$, $m = 150mm$
e $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$ 110
- 5.9:** Comportamento da trajetória com a variação de m : $m = -130mm$,
 $m = -80mm$, $m = -30mm$, $m = 30mm$, $m = 80mm$, $m = 130mm$
e $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$ 111
- 5.10:** Trajetórias limite para evitar colisões no início e no final da trajetória:
 $m = -105mm$, $m = -30mm$, $m = 6mm$ e $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$;
 $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$ 113
- 5.11:** Obstáculos que podem ser transpostos com a supressão de um passo.
($m = -30mm$, $m = 100mm$ e $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$;
 $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$) 114
- 5.12:** Superação de obstáculo colocado no início do passo: $m = -30mm$, $m = 6mm$
e $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$ 116
- 5.13:** Superação de obstáculo colocado no final do passo: $m = -105mm$, $m = -30mm$
e $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$ 117
- 5.14:** Superação de obstáculos colocados no início e no final do passo:
 $m = -105mm$, $m = -30mm$, $m = 6mm$ e $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$;
 $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$ 118
- 5.15:** Trajetórias plotadas para a perna rotacionada 0° , 15° e 30° ($\theta_2 = 30^\circ$;
 $\theta_9 = 0^\circ$; $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$) 120
- 5.16:** Trajetórias plotadas para a perna rotacionada de 0° , 15° e 30° . Maiores
obstáculos transponíveis para a rotação de 30° para $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_9 = 0^\circ$;
 $R = 200mm$; $r_a = 2,8$; $L = 2,1r$; $m = -30mm$ e $n = 1,8r$ 121
- 5.17:** Maior obstáculo que a perna pode transpor. Efeito combinado pela variação
de m e do reposicionamento da perna ($m = -30mm$; $m = 6mm$; e $\theta_2 = 30^\circ$;
 $\theta_9 = 0^\circ$; $r_a = 2,8$; $R = 200mm$; $L = 2,1r$ e $n = 1,8r$) 122

CAPÍTULO VI

6.1: Proximidade entre a biela móvel e a biela fixa do mecanismo de Bennett durante seu movimento	125
6.2: Representação 3D do protótipo da perna	127
6.3: Posição de operação da perna: (a) vista lateral e (b) vista frontal	128
6.4: Posição inicial do prolongamento da perna na biela móvel do mecanismo de Bennett	130
6.5: Obstáculo mais alto transponível com a perna reposicionada por uma rotação de 30° e $m = 46mm$	131
6.6: Vista superior da transposição de um obstáculo por dois pés diferentes	133
6.7: Transposição de um obstáculo pelo reposicionamento da perna	134

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO II

α – ângulo de rotação da perna do robô TUM

β – ângulo entre o primeiro e o segundo segmento das pernas do robô TUM

γ – ângulo entre o segundo e o terceiro segmento das pernas do robô TUM

φ – ângulo de posicionamento em relação à longitudinal do corpo do robô TUM

ψ – ângulo de posicionamento em relação à vertical do corpo do robô TUM

CAPÍTULO III

a_i – comprimentos das barras de um mecanismo genérico

a, b, c e d – comprimentos das barras de um mecanismo genérico

f – máximo número de variáveis independentes de um corpo rígido

g – número total de articulações de um mecanismo

n_i e $i = 1, 2$ e 3 – Barras de um mecanismo

n – número de barras de um mecanismo

u – número de movimentos restritos por uma articulação

A, A^*, B, B^* – articulações de rotação genéricas de um mecanismo esférico

C – articulação cilíndrica

E – articulação planar

F_i e $i = 1$ e 2 – Forças simbólicas

H – articulação do tipo parafuso

J_i – número de articulações com i graus de liberdade

M – mobilidade de um mecanismo

P – articulação prismática

R – articulação de rotação

R_i e $i = 1, 2, 3$ e 4 – articulações de rotação de um mecanismo genérico

S – articulação esférica

α – ângulo entre as articulações do mecanismo de Bennett

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, – ângulos auxiliares

β – ângulo entre as articulações do mecanismo de Bennett

θ – ângulo de entrada do mecanismo de Bennett

φ e ψ – ângulos de entrada e saída de um mecanismo esférico

ϕ – ângulo de saída do mecanismo de Bennett

CAPÍTULOS IV, V E VI

a_i – comprimentos das barras do mecanismo de Bennett

$\cos_{dir}$ – cosenos diretores

d – comprimento característico do pé

m – prolongamento da perna segundo a direção x

n – prolongamento da perna segundo a direção z

$q1$ – acionamento da perna

$q2$ – reposicionamento da perna

$q3$ – variação da variável m

r – menor barra do mecanismo de Bennett

r_a – relação entre o comprimento das barras do mecanismo de Bennett

sse – soma dos quadrados dos desvios

A – Obstáculo genérico

$A1, A2$ – variáveis auxiliares

B – Obstáculo genérico

$B1, B2$ – variáveis auxiliares

$C1, C2$ – variáveis auxiliares

E_i e $i = 1$ até 4 – eixos do mecanismo de Bennett

I – matriz identidade

L – prolongamento da perna segundo a direção y

P – extremidade do prolongamento da perna

R_i e $i = 1$ até 8 – referenciais do modelo cinemático do mecanismo de Bennett

R'_i e $i = 1, 3, 5$ e 7 – referenciais auxiliares do modelo cinemático do mecanismo de Bennett

R – maior barra do mecanismo de Bennett

T_{ij} – matrizes homogêneas de transformação de coordenadas

α – ângulo de rotação sucessiva em torno de z

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4,$ – ângulos entre articulações do mecanismo de Bennett

β – ângulo de rotação sucessiva em torno de x

γ – ângulo de rotação sucessiva em torno de y

θ_1 – ângulo de entrada do mecanismo de Bennett

θ_2 e θ_3 – ângulos entre as articulações do mecanismo de Bennett

θ_4 – ângulo de saída do mecanismo de Bennett

θ_9 – ângulo de posicionamento do pé

σ – desvio padrão

σ^2 – variância

ΔH – desnível do passo

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Desde o início do desenvolvimento dos robôs industriais foram sendo estudados também os robôs móveis. Inicialmente, apenas com rodas e/ou esteiras e mais tarde com pernas. A idéia principal que motivou o desenvolvimento de um robô móvel era possibilitar que o robô se locomovesse no chão de fábrica e aplicasse suas habilidades onde houvesse maior necessidade. Uma outra razão que impulsionou o desenvolvimento dessas estruturas foi a idéia de se substituir o ser humano em suas tarefas em ambientes muito insalubres. A idéia inicial era levar o robô até sua estação/ambiente de trabalho.

No entanto, após inúmeras pesquisas, percebeu-se que essa não é uma tarefa tão simples assim como apresentam os diretores de cinema e escritores de ficção científica, sobretudo para os robôs com pernas, que são parte do objeto de interesse desse trabalho. Na verdade, fazer com que um robô se locomova sobre pernas ainda é uma tarefa muito complexa de forma que, mesmo com toda a tecnologia que se dispõe atualmente, os robôs móveis dotados de pernas são muito limitados, principalmente no que diz respeito à sua velocidade de operação.

A principal razão para os robôs com pernas se locomoverem a baixas velocidades, diz respeito à arquitetura utilizada na confecção de suas pernas. Essas pernas são baseadas em uma estrutura serial, também denominada de estrutura antropomórfica. A principal razão disso é que esse tipo de arquitetura robótica foi a primeira a ser desenvolvida, sendo baseada no corpo humano. Assim, os robôs móveis com pernas, baseadas nesse tipo de estrutura, apresentam os mesmos problemas/limitações apresentados pelas estruturas seriais, mas com

um agravante: o elevado número de pernas multiplica o número de graus de liberdade do robô. Apesar da estrutura serial das pernas de um robô ser simplificada, possuindo de dois a três graus de liberdade por perna, o número final de graus de liberdade a serem controlados é muito grande, limitando a velocidade de operação dessas estruturas, sobretudo em ambientes muito acidentados.

Com o passar do tempo, os robôs móveis vêm sendo cada vez mais utilizados nas mais diversas aplicações, desde a exploração espacial até tarefas mais corriqueiras, como a limpeza de edifícios.

Neste trabalho é apresentada uma nova arquitetura para a utilização como pernas de robôs móveis. A estrutura da perna é baseada no mecanismo espacial de quatro barras, denominado mecanismo de Bennett. Sabe-se que, com uma configuração adequada dos parâmetros desse mecanismo é possível descrever uma curva espacial com um perfil similar ao perfil de um passo, utilizando para isso, apenas um grau de liberdade. Utilizar uma perna com um número de graus de liberdade reduzido permite que o controle do robô móvel seja feito em tempo real, mesmo quando ele se move a grandes velocidades. Na verdade, esse é o maior objetivo deste trabalho: modelar uma perna robótica para ser utilizada em robôs móveis, que possibilite o controle ser feito em tempo real quando esse robô se move a grandes velocidades.

A perna proposta possui três graus de liberdade, apesar de poder executar seu movimento com apenas um. A razão desses dois graus de liberdade extras é a necessidade de se transpor eventuais obstáculos durante o caminhar do robô.

De forma a organizar e descrever as atividades desenvolvidas, este trabalho foi dividido em sete capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No segundo capítulo é apresentado um breve histórico sobre a robótica, passando pela robótica industrial e pela robótica móvel, dando um enfoque maior para a robótica móvel sobre pernas, assunto principal deste trabalho. Neste mesmo capítulo também é apresentada uma revisão bibliográfica sobre robôs com pernas.

No terceiro capítulo, já entrando no contexto de mecanismos, é apresentado um histórico da evolução dos mecanismos, culminando no surgimento da cinemática, definida por Ampère como sendo uma “ciência que estuda os mecanismos e os métodos de criá-los”. Neste capítulo são apresentados os principais componentes dos mecanismos, como também os tipos de mecanismo de quatro barras do tipo 4R.

No quarto capítulo é apresentado o modelo cinemático da perna robótica baseada no mecanismo de Bennett. Também são apresentadas famílias de trajetórias geradas para diversas configurações da estrutura. Essas famílias de trajetórias são utilizadas para auxiliar a determinação da configuração final do mecanismo para a perna robótica.

Uma vez determinada essa configuração do mecanismo, torna-se necessário a definição de uma forma de se transpor e/ou evitar obstáculos. Isto é apresentado no quinto capítulo, onde são apresentadas duas formas principais de se modificar a trajetória do pé do robô, de forma a permitir que o mesmo possa superar/evitar obstáculos.

No sexto capítulo são apresentadas características e particularidades da estrutura, algumas comprovadas pela simulação do modelo computacional da perna proposta. Neste capítulo fica evidente a importância de se fazer simulações gráficas de modelos antes de se construir os protótipos.

No sétimo e último capítulo são apresentadas as conclusões finais do trabalho. Logo após esse capítulo estão a bibliografia e os anexos, onde estão anexados os programas em MatLab[®], utilizados nesse trabalho.

CAPÍTULO II

ROBÓTICA

2.1 – Introdução

O ser humano sempre buscou desenvolver dispositivos que facilitassem suas tarefas, sempre procurando imaginar e construir mecanismos e/ou dispositivos capazes de imitar, em certo grau, alguma capacidade humana. Leonardo da Vinci, nos séculos XV e XVI, foi um dos que muito estudou a anatomia humana e animal. Como ele também era engenheiro, acabou construindo e/ou projetando uma série de mecanismos com movimentos similares aos do ser humano, mesmo que ainda muito primitivos (PAZOS, 2002). Essa curiosidade é uma característica inerente ao ser humano, de forma que já nasce com ele.

O homem, desde a antiguidade, sempre foi fascinado por seres extraordinários, como os seres totalmente mecânicos, ou até mesmo os próprios deuses que eram cultuados na época. Havia pessoas que se dedicavam quase que exclusivamente à criação de dispositivos autômatos ou semi-autômatos. Como exemplos desse fascínio, pode-se citar a construção de brinquedos bem elaborados, como os relatos de um cachorro mecânico construído no Egito, e a animação de estátuas com energia hidráulica. No Egito, esse tipo de animação era, muitas vezes, feito sob orientação dos sacerdotes, que acabavam atribuindo o movimento de uma estátua ao poder de determinada divindade, cativando as pessoas por sua falta de conhecimento e pelo seu fascínio a respeito desse assunto, tornando-as vítimas de sua própria ignorância (PAZOS, 2002).

Pelos relatos, a energia hidráulica foi uma das primeiras formas de energia utilizada para animar, ou mesmo automatizar, mecanismos. Heron de Alexandria foi um dos destaques

no estudo de dispositivos movidos através de energia hidráulica e de vapor. Desde então, a energia hidráulica tornou-se cada vez mais presente na vida da população, sendo utilizada como força motriz para muitas tarefas cotidianas, bem como na construção de dispositivos mais trabalhosos, como é o caso dos relógios hidráulicos construídos por povos como, por exemplo, os gregos (ALBUS, 1981, PAZOS, 2002 e HARTENBERG; DENAVIT, 1964).

Com o passar dos anos esses dispositivos foram sendo cada vez mais aprimorados, principalmente em função de diversos estudos e pesquisas feitas na área de mecanismos, ocasionando o surgimento de dispositivos relativamente complexos, e que despertavam ainda mais a imaginação do ser humano. Dentre essas novas invenções surgiram tocadores de flauta, tocadores de órgão, e até mesmo, em Londres, uma boneca que escrevia e desenhava com razoável precisão, Fig. 2.1. Essas bonecas automatizadas, que foram construídas por volta de 1770 por Pierre Jaquet-Droz, ainda existem e encontram-se expostas no “Musée d’Art et d’Histoire” em Neuchâtel, na Suíça, e até hoje funcionam e são operadas ocasionalmente. Esses dispositivos consistiam, em sua maioria, em máquinas cujos movimentos eram controlados por sistemas de cames e molas (ALBUS, 1981).



Figura 2.1: Criança autômata que desenha e escreve (http://www.automates-anciens.com/versao_%20portuguesa/quadros/quadro_portugues.htm).

Nessa época o cenário industrial já era praticamente outro, pois a máquina a vapor estava modificando todo o sistema de produção. As grandes oficinas de artesanato (onde, parte delas, já havia entrado em vigor a divisão sistematizada do trabalho) estavam entrando cada vez mais em decadência, principalmente em função da maior capacidade de produção (não necessariamente maior produtividade) alcançada pela utilização de máquinas (HUBERMAN, 1986). Essas máquinas eram operadas manualmente, sendo que foram se tornando automatizadas de maneira gradativa, com o decorrer do tempo, em função dos avanços tecnológicos alcançados.

Esse avanço tecnológico contínuo sofrido pelo cenário industrial, juntamente com o desejo do ser humano de facilitar a realização de trabalhos que são repetitivos, desgastantes física ou mentalmente e/ou que às vezes são até mesmo nocivos à saúde, acabou por gerar uma série de máquinas e equipamentos cada vez mais complexos e, dentro de certos limites, autônomos. Essas novas máquinas fizeram com que novamente despertasse no ser humano o desejo de se construir uma máquina com habilidade igual ou superior à do ser humano, começando a surgir daí a idéia de robô.

A palavra robô vem da palavra checa *robota*, que quer dizer trabalhador que exerce um *serviço escravo*. Essa palavra foi cunhada pela primeira vez por um escritor checo, Karel Capek que, em 1921, escreveu uma peça de teatro intitulada “Rossum’s Universal Robots”, onde um cientista cria seres humanóides perfeitos para realizarem todo trabalho físico feito pelos homens. Mais tarde, esses humanóides se rebelam e destroem toda a raça humana. Ainda outro escritor de ficção científica, Isaac Asimov, é considerado como sendo o primeiro a ter usado a palavra robótica, como sendo a ciência que estuda os robôs (ALBUS, 1981 e PAZOS, 2002).

Foi Isaac Asimov que estabeleceu as três leis éticas fundamentais da robótica, que são:

- 1 – Um robô não deve nunca prejudicar um ser humano nem através da ação direta, nem através da inação.*
- 2 – Um robô deve sempre obedecer aos seres humanos, a menos que isso entre em conflito com a primeira lei.*
- 3 – Um robô deve sempre se proteger de danos, a menos que isso entre em conflito com a primeira ou com a segunda lei.*

Apesar de termos atualmente alguns exemplos de extrapolações feitas inicialmente pela literatura, principalmente a respeito da tecnologia do futuro, que se tornaram realidade e estão presentes em nossa atualidade, como a invenção do submarino descrito por Julio Verne em

seu livro “Vinte mil léguas submarinas”, a robótica ainda está muito longe de chegar ao que foi previsto por esses escritores. Uma das razões para isso é que, após muita pesquisa científica a respeito da idéia de se construir robôs andróides, percebeu-se que um sistema do nível de um andróide seria de uma complexidade enorme.

Em função disso, diversas simplificações dos modelos idealizados de um robô foram feitas. Inicialmente, considerou-se que não havia a necessidade de que o robô se locomovesse para que realizasse suas tarefas e assim, o robô passou a ser fixo. Essa simplificação certamente não comprometeria o desempenho do robô já que, nessa época, a produção em série, implantada inicialmente por Henry Ford, já estava presente nas grandes plantas industriais e, nesse modo de produção, o ser humano fica praticamente estático em frente a uma esteira enquanto as peças caminham. Pensando dessa forma, concluiu-se ainda que não seria necessário que houvesse nada além de braços e mãos mecânicos, tão ágeis o quanto possível, ao longo da linha de produção para que as tarefas fossem realizadas com êxito.

Assim, a intenção de se construir um sistema que seja capaz de realizar as mesmas tarefas realizadas pelo homem, com destreza igual ou até mesmo superior, motivou o desenvolvimento inicial de uma estrutura robótica baseada no braço humano, de onde se origina o nome estrutura serial ou antropomórfica. Os robôs com esse tipo de estrutura são também denominados de robôs manipuladores. Essa estrutura é composta por um conjunto de segmentos ligados uns aos outros, seqüencialmente, por articulações, sendo que um desses segmentos é preso a uma base fixa. Nesse tipo de estrutura cada articulação é associada a um acionador. Na Fig. 2.2 é apresentado um exemplo de um robô serial industrial da marca Kuka. Esse robô pesa aproximadamente 2350 Kg.

No entanto, após inúmeras pesquisas, notou-se que essa configuração de estrutura robótica possui limitações importantes, principalmente no que diz respeito à velocidade de operação, apesar de apresentarem um volume de trabalho muito grande quando comparado com o volume utilizado pelo robô. Essas limitações das estruturas seriais são devidas, principalmente, a dois tipos de problemas: um problema estrutural e outro relativo ao controle. Quanto a esses problemas destacam-se:

- *A elevada robustez dos segmentos e articulações:* como a estrutura é montada de forma seqüencial, os segmentos e os acionadores mais próximos à base devem sempre suportar seus próprios pesos, mais o peso de toda a cadeia cinemática que está à sua frente. Isso faz com que seja necessário que os acionadores tenham mais potência.

Desta forma, de maneira a garantir uma deformação mínima dos segmentos da estrutura bem como uma precisão aceitável da mesma para a tarefa robotizada, a robustez dos segmentos e das articulações deve aumentar à medida que se aproxima da base do robô, o que eleva em muito o peso total do robô.

- *Erros cumulativos:* nesse tipo de estrutura robótica, em função do tipo da montagem serial das articulações e segmentos, os erros existentes em cada articulação e segmento são somados ao longo da cadeia cinemática, comprometendo a precisão do robô.



Figura 2.2: Robô serial Kuka – KR 500-2 (KUKA ROBOT GROUP).

- *Modelo cinemático inverso complicado:* o modelo cinemático desse tipo de estrutura constitui-se basicamente de equações trigonométricas altamente acopladas, pois se trata da transformação de movimentos de rotação dos atuadores, em um movimento de translação e rotação do elemento terminal do robô, descritos geralmente em coordenadas cartesianas. Assim, grande parte dos sistemas de comando, faz o controle do robô pelo método ponto-a-ponto, discretizando a trajetória do elemento terminal do robô. Considerando uma trajetória contínua para o elemento terminal, a resolução das equações do movimento não poderia ser feita em tempo real.

- *Baixas velocidades de operação:* em função dos problemas supramencionados, principalmente a alta inércia e a dificuldade de resolução do modelo cinemático, as velocidades de operação das estruturas seriais são relativamente baixas.

Em face das limitações apresentadas pelas estruturas seriais, tornou-se necessária a busca de uma solução para essas limitações. Uma outra alternativa de solução que tem sido estudada é o desenvolvimento de um novo tipo de estrutura robótica em substituição às estruturas seriais, denominadas de estruturas robóticas paralelas.

As estruturas paralelas têm esse nome devido ao aparente paralelismo que apresentam entre os segmentos e em oposição às estruturas seriais. Elas consistem basicamente em uma cadeia cinemática onde a base e o elemento terminal, também denominado de plataforma móvel, são interligados por segmentos articulados, também denominados de pernas. Esse tipo de estrutura pode ser mais vantajoso que as estruturas seriais, principalmente porque, na maioria das vezes, os acionadores podem estar fixados na base do robô, o que diminui consideravelmente a inércia das partes móveis, possibilitando a operação a grandes velocidades. Outra vantagem das estruturas paralelas diz respeito a seu modelo cinemático inverso, que é relativamente fácil de se resolver. Além disso, em função de serem estruturas hiperestáticas, possuem grande capacidade de carga e os erros de cada articulação/segmento deixam de ser aditivos. No entanto, uma desvantagem das estruturas paralelas, frente as estruturas seriais, é que, geralmente, a relação entre o volume de trabalho e o volume ocupado pela estrutura é bem menor.

Essa nova arquitetura robótica vem sendo muito estudada atualmente, e a cada dia novas estruturas têm surgido, como as estruturas apresentadas por Stewart (1965) e por Ceccarelli (1997). Para exemplificação, um robô de arquitetura paralela é apresentado na Fig. 2.3. Trata-se de um robô ABB, o IRB 340 FlexPicker, que possui aproximadamente 130 Kg. Essa estrutura possui quatro graus de liberdade, sendo três graus de liberdade de translação e um de rotação.

Apesar das vantagens significativas que as estruturas paralelas tem sobre as seriais, as estruturas seriais ainda são as estruturas robóticas mais utilizadas pela indústria. No entanto, as aplicações envolvendo a utilização de estruturas paralelas vêm crescendo de forma cada vez mais expressiva, sendo aplicadas em manipuladores, simuladores de movimento, punhos, brinquedos, entre outros.



Figura 2.3: Robô paralelo produzido pela ABB – IRB 340 FlexPicker (ABB Brasil).

2.2 – Robôs móveis

Os primeiros robôs industriais sempre eram fixados ao longo da linha de produção. No entanto, paralelamente ao desenvolvimento desses robôs, foram surgindo e sendo desenvolvidos os robôs móveis. Uma das idéias principais para o desenvolvimento dos robôs móveis, entre outras, era a idéia de se ter um equipamento que tivesse a possibilidade de se locomover no chão de fábrica e aplicar suas habilidades onde houvesse maior necessidade, ou ainda que pudessem explorar ambientes inóspitos e/ou insalubres para o ser humano, podendo até mesmo haver a possibilidade de exploração de ambientes ainda não atingidos pelo homem, como o espaço.

Segundo o IFToMM, The International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science, um robô móvel pode ser formalmente definido como sendo um “robô que é montado em uma plataforma que move sob controle automático”. Entretanto, segundo Kelly (1996), pode-se definir um robô móvel, de uma forma mais ampla e geral, como sendo simplesmente um robô que tem uma mobilidade em relação ao ambiente no qual ele está inserido. Graças a essa mobilidade apresentada pelo robô, o equilíbrio passa a ser um dos principais problemas para a robótica móvel. O equilíbrio pode ser dividido em dois tipos: *equilíbrio estático* e *equilíbrio dinâmico*, sendo que o equilíbrio estático relaciona-se à

habilidade do robô em manter uma configuração somente a partir de forças de reação, enquanto que o equilíbrio dinâmico consiste na habilidade do robô manter uma configuração a partir de forças de reação e forças de inércia. (ANGELES, 2003 e RAIBERT, 1986).

Segundo Kelly (1996), os robôs móveis podem ser classificados quanto: à *habilidade de locomoção no ambiente* (para ambientes internos ou externos); *ao tipo de locomoção* (com rodas, pernas ou esteiras); *ao tipo de direcionamento* (síncrono, tipo Ackerman, etc...); à *flexibilidade do corpo* (corpo único, multi-corpos flexíveis ou rígidos); à *finalidade de uso* (para ensino, pesquisa, indústria, robôs de serviço, etc...); à *forma* (antropomórfico, tipo inseto, etc...); *ao ambiente em que está inserido* (espacial, submarino, etc...); *ao nível de autonomia* (teleoperado, totalmente autônomo, etc...).

Quanto ao tipo de locomoção, os robôs móveis podem se locomover sobre pernas, sobre rodas ou ainda sobre esteiras. Uma característica dos robôs com rodas e/ou esteiras, é que eles se movem deixando um rastro contínuo ao longo do caminho que percorrem, enquanto que robôs com pernas deixam apenas suas pegadas, o que é um fator ecológico muito positivo para os robôs com pernas (BÜHRLE; CORDES, 1996), principalmente quando se trata de robôs de grandes dimensões, como é o caso do robô estudado por Lee e Orin (1988). Apesar disso, os robôs com rodas ou esteiras são mais vantajosos frente aos robôs com pernas no que diz respeito ao equilíbrio, tanto estático quanto dinâmico, pois, geralmente, em situações normais de operação, a projeção do centro de massa está naturalmente localizada dentro do polígono formado pelos pontos de apoio do robô no chão. Para o projeto de robôs com pernas essa é uma condição que sempre deve ser levada em conta quando se deseja que o robô esteja equilibrado estaticamente.

Os robôs com rodas ou esteiras não conseguem se locomover com muita destreza em terrenos muito acidentados, sem contar que geralmente eles não conseguem transpor obstáculos com muita facilidade. Robôs com rodas ou esteiras são excelentes para se movimentarem apenas em superfícies planas e pouco acidentadas (RAIBERT, 1986). A Fig. 2.4 apresenta um exemplo de robô com rodas, denominado Shrimp III, e na Fig. 2.5, um robô com esteiras, denominado MRUV-100.

No início do surgimento dos robôs móveis, o controle muitas vezes era feito de forma manual ou seja, o robô era operado por um agente especialmente treinado para isso. A Fig. 2.6 apresenta um exemplo de um robô móvel operado manualmente. Essa estrutura foi construída pela General Electric em 1968, sob o comando de Ralph Mosher (RAIBERT, 1986), e só se

movimentava em linha reta (MAHAJAN; FIGUEROA, 1997). Foi uma das primeiras estruturas robóticas a se movimentar sobre pernas.



Figura 2.4: Shrimp III (BLUEBOTICS CORP, 2006).

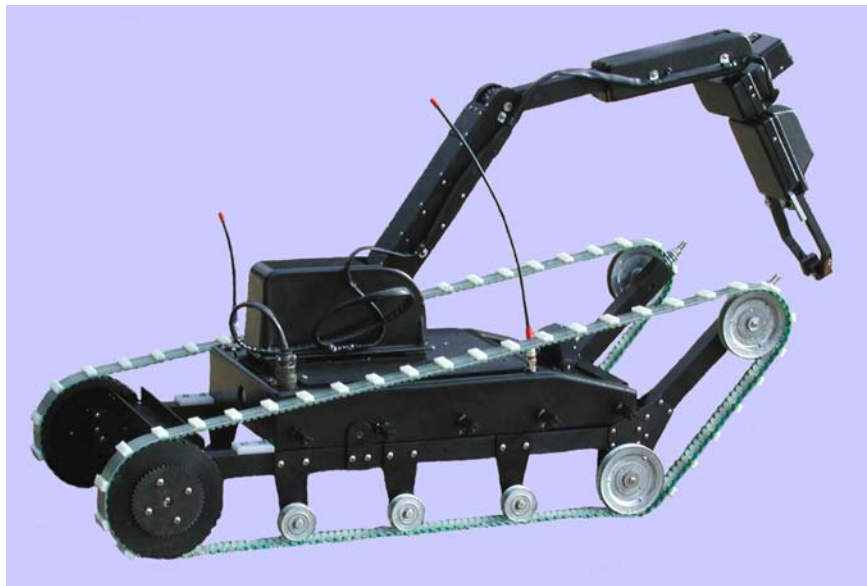


Figura 2.5: MRUV-100 (HDE MANUFACTURING INC.).

Com a evolução dos robôs móveis, que são sistemas eletromecânicos relativamente complexos, o controle foi gradativamente deixando de ser puramente manual, passando a ser cada vez mais automatizado, de forma que, hoje em dia, sempre se procura fornecer ao robô o maior grau de autonomia possível, fazendo com que o próprio robô tome algumas decisões

durante seu movimento, geralmente sobre situações inicialmente previstas. Nessa área, têm sido realizados vários estudos teóricos e experimentais com o objetivo de desenvolver equipamentos autônomos, com o menor nível possível de intervenção humana, para a inspeção, manutenção e o transporte, permitindo não só aumentar a eficiência do processo, mas também reduzir o risco de acidentes devido a falhas e operações inadequadas.

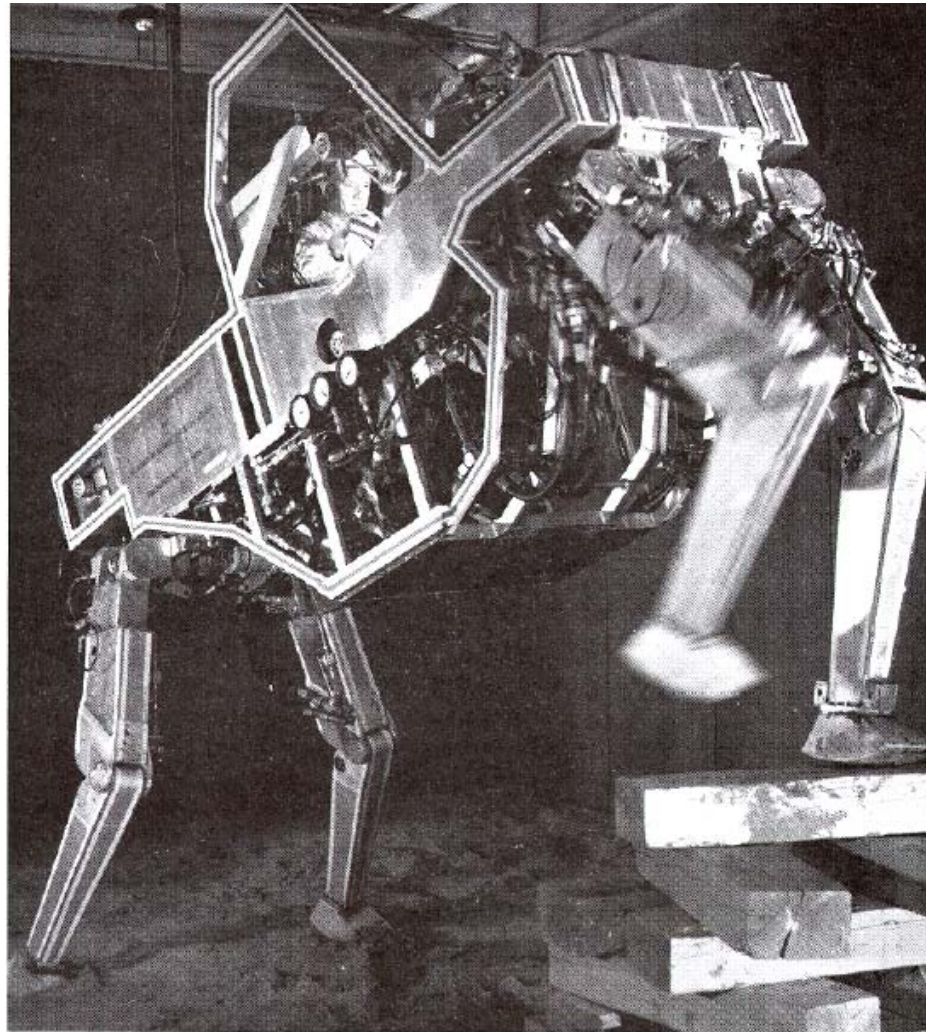


Figura 2.6: Robô dotado de pernas com controle manual (RAIBERT, 1986).

Toda essa evolução tecnológica fez com que os robôs móveis se tornassem cada vez mais presentes em nosso dia a dia, sendo que, atualmente, já existem robôs que interagem constantemente com os seres humanos, como os robôs que executam pequenas tarefas tais como o transporte de pequenos objetos e também os robôs que fazem limpeza. Até mesmo a construção de robôs humanóides têm evoluído bastante, sendo que grande parte desse processo evolutivo deve-se aos esforços dos japoneses nessa área. Surgiram até mesmo robôs

que se tornaram bastante conhecidos, tanto no meio científico quanto entre os apaixonados por robótica. Um exemplo clássico de um humanóide bastante evoluído é o Asimo, Fig. 2.7, desenvolvido e construído pela Honda. Geralmente, os robôs modernos, principalmente os que interagem com os seres humanos, são providos de câmeras de vídeo, sonares, giroscópios, dispositivos de segurança, entre outros, sempre fazendo uso da mais alta tecnologia disponível (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004).



Figura 2.7: Robô Asimo, construído pela Honda.

No entanto, apesar de toda essa evolução, os robôs humanóides ainda possuem muitas limitações. Geralmente conseguem apenas caminhar em superfícies planas, ou quando muito transpor obstáculos simples. Um dos motivos dessa limitação, tanto em relação à habilidade quanto à velocidade de operação, diz respeito à necessidade de um sistema de controle muito complexo para que a velocidade de navegação do robô seja pelo menos razoável e, mesmo assim, essa velocidade ainda é muito baixa. Além disso, também apresentam limitações

quanto a seu equilíbrio estático, que será discutido mais à frente. Logicamente, toda essa limitação que os bípedes apresentam tem motivado o desenvolvimento de várias pesquisas nessa área. Figliolini e Ceccarelli (2001) desenvolveram na Universidade de Cassino um sistema bípede, o EP-WAR2, que consegue subir escadas, mesmo que a uma velocidade relativamente baixa, Fig. 2.8.

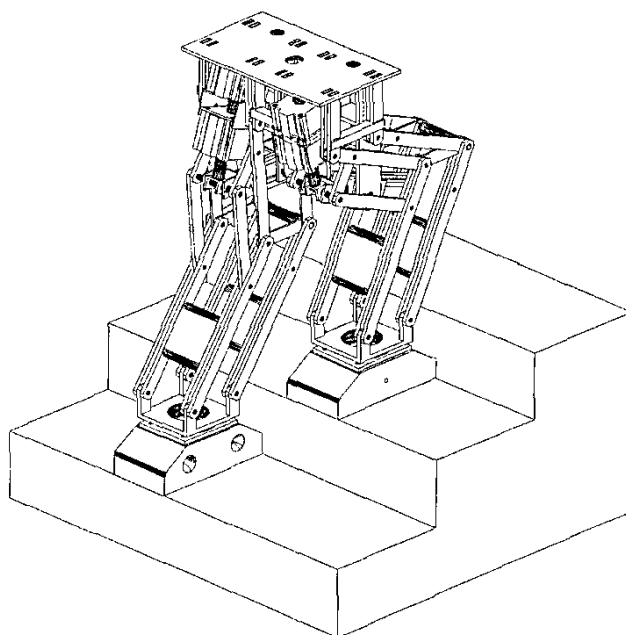


Figura 2.8: Representação esquemática do EP-WAR2 (FIGLIOLINI; CECCARELLI, 2001).

2.3 – Robôs com pernas

Segundo RAIBERT (1986), o estudo científico da locomoção fazendo o uso de pernas iniciou-se apenas no final do século XIX, com um estudo a respeito da forma de como acontece o trotar do cavalo, a pedido de um governador da Califórnia. Após o estudo do movimento do cavalo, estudou-se também a movimentação de uma série de outros mamíferos, inclusive do ser humano. No entanto, os robôs com pernas só começariam a surgir depois da primeira metade do século seguinte, por volta da metade da década de 60.

Os robôs com pernas são robôs que possuem controle relativamente complexo, mas que apresentam uma mobilidade muito maior que os robôs providos de rodas ou de esteiras, podendo alcançar ambientes que robôs com rodas não podem, o que acaba lhes dando um potencial de utilidade muito grande, justificando os esforços extras requeridos para controlar seu movimento pois, geralmente, para locomover-se utilizando pernas há a necessidade de um sistema bastante complexo de locomoção. Essa complexidade faz com que mesmo os mais

ágeis robôs dotados de pernas, sejam facilmente superados por seus animais e/ou insetos inspiradores em terrenos irregulares (BÜHRLE; CORDES, 1996 e DELCOMYN; NELSON, 2000). Essa facilidade com que os animais e/ou insetos superam os robôs mais desenvolvidos tecnologicamente, dá motivos de sobra para que os engenheiros e os demais pesquisadores da área da robótica móvel trabalhem mais e desenvolvam cada vez mais interesse no estudo dos movimentos desses seres, bem como nos mecanismos de controle de seus sistemas biológicos sempre para tornar possível melhorar a performance dos robôs com pernas (DELCOMYN; NELSON, 2000 e RAIBERT, 1986). Essa motivação fez com que se estudasse os movimentos de inúmeros tipos de seres vivos, desde sua forma de caminhar até a forma de correr, com o intuito de construir robôs com o máximo de agilidade possível, mesmo em terrenos muito irregulares.

Através das pesquisas desenvolvidas, sendo a maioria baseada na observação de insetos tais como baratas, grilos e louva-deuses, foi possível chegar à conclusão de que o ciclo de movimento das pernas desses insetos observados, durante o ato de caminhar, se dá em função de reflexos, de forma que o perfil do passo muda quando também muda o tipo do movimento. Isto significa que o perfil do passo é um quando o inseto caminha, e outro quando ele está correndo. Isso demonstra que o ciclo de movimento independe das pernas. Essa conclusão é muito importante porque, geralmente é em função de características particulares de insetos e outros animais que grande parte dos robôs móveis são construídos, já que muitos pesquisadores procuram se referenciar em características biológicas previamente conhecidas (SONG et al., 1984, FERREL, 1995, VENKATARAMAN, 1997). Desta forma, o perfil de passo que geralmente é utilizado para o robô caminhar é diferente para cada tipo de movimento (caminhar, galopar, trotar e correr).

Em função disso, foram desenvolvidas algumas tentativas de solução para a locomoção sobre pernas em terrenos acidentados, sendo que uma dessas tentativas de solução, muito comum para esses tipos de terrenos, é permitir que cada perna seja posicionada remotamente, ou seja, à medida que o robô caminha, um operador vai controlando seus passos em função dos obstáculos presentes na trajetória. Uma outra alternativa é fazer uso de um pré-planejamento extensivo, baseado no conhecimento prévio do terreno onde o robô se deslocará. Mesmo assim, a utilização dessas soluções ainda faz com que a grande maioria dos robôs com pernas caminhem lentamente, principalmente em terrenos irregulares, tornando-os praticamente não-autônomos. Além disso, eles não conseguem se adaptar, de forma rápida, às

mudanças bruscas no ambiente, exatamente o contrário dos animais e insetos nos quais foram inspirados (ESPENSCHIED et al., 1996).

Apesar da maior destreza apresentada pelos robôs móveis com pernas frente aos demais, as velocidades que eles conseguem desenvolver ainda são muito baixas. A principal causa para essa baixa velocidade de deslocamento consiste no tipo de estrutura utilizada na confecção de suas pernas. Na sua grande maioria, elas são constituídas por estruturas seriais contendo de três a cinco graus de liberdade (SONG et al., 1984, KROTKOV; SIMMONS; WHITTAKER, 1992, PFEIFFER; ELTZE; WEIDEMANN, 1995, BÜHRLE; CORDES, 1996, ESPENSCHIED et al., 1996, MENNITTO; BUEHLER, 1996, NELSON et al., 1997, GRIECO et al., 1998, DELCOMYN; NELSON, 2000, ZIELINSKA; HENG, 2002). No entanto, há robôs móveis que apresentam pernas com um menor número de graus de liberdade por perna, às vezes associando graus de liberdade ativos com passivos, como é o caso do hexápode RHex apresentado por Moore (2002), Fig. 2.9. O modelo de perna utilizado no RHex possui apenas um grau de liberdade ativo e outro passivo. Esse é um robô que não salta obstáculos, pelo contrário, ele vai caminhando e muitas vezes trombando no obstáculo para que, a partir daí, o robô escale o obstáculo até a sua transposição. É um robô que se adapta tanto a ambientes secos como também ao meio aquático, bastando para isso que se utilize o modelo mais adequado de pernas em função do ambiente no qual ele está inserido.



Figura 2.9: Robô Hexápode RHex (MOORE, 2002)

Segundo Zielinska e Heng (2002), para que um robô móvel tenha uma maior capacidade de se adaptar às variações do terreno no qual ele se locomove, cada perna deve ter ao menos três graus de liberdade. No entanto, isso não é um consenso no meio científico, já

que há robôs que, com um número menor de graus de liberdade por perna, conseguem se locomover com razoável destreza em ambientes bastante acidentados (RAIBERT, 1986, MAHAJAN; FIGUEROA, 1997, MOORE, 2002). O problema que a estrutura pode apresentar por possuir um maior número de graus de liberdade é a dificuldade para se fazer seu controle em tempo real, sobretudo em situações de transposição de obstáculos, onde se exige uma maior mobilidade das pernas do robô. Segundo esses autores, a maior quantidade de graus de liberdade torna-se um problema ainda mais crítico quando há a necessidade de o robô ser totalmente autônomo pois, nesses casos, os componentes dos controladores devem ser miniaturizados.

A maior dificuldade que se tem para o controle da estrutura surge devido ao número de pernas que a grande maioria dos robôs móveis possuem pois, em geral, esses robôs são quadrúpedes ou hexápodes.

Para que um robô provido de pernas esteja equilibrado estaticamente, durante a movimentação em um plano horizontal, o seu centro de massa deve estar situado dentro do polígono formado pela união dos pontos de apoio do robô no chão. Assim, para que essa situação aconteça, o robô deve manter ao menos três pés em contato com o chão. Conseqüentemente, um robô móvel equilibrado estaticamente deve ter ao menos quatro pernas, para que três delas permaneçam no chão durante o seu caminhar. Isso demonstra que quanto maior o número de pernas do robô, dependendo do perfil de seu passo, o mesmo apresenta boas características de estabilidade estática e dinâmica (BÜHRLE; CORDES, 1996). Outra conclusão importante que pode ser tirada disso é que robôs com menos de quatro pernas não podem ser normalmente equilibrados estaticamente, mas deve, durante sua locomoção, ser equilibrado dinamicamente.

Estudando o equilíbrio dinâmico, Raibert (1986) e sua equipe desenvolveram um robô monópode que, saltitando, consegue desenvolver velocidades da ordem de 4,8 milhas por hora, Fig. 2.10. A perna desse monópode, estudada por Raibert, mais tarde veio a servir com base para a construção de um sistema bípede, que também saltitava. Esse novo sistema chegou a desenvolver velocidades de aproximadamente 9,5 milhas por hora.

Existe uma nítida preferência pela modelagem de robôs móveis com pernas simétricos sendo que, dentre esses, os robôs hexápodes estão entre os robôs com pernas mais estudados atualmente. Isto se deve principalmente à sua maior mobilidade frente aos robôs de quatro pernas, bem como pela maior simplicidade durante o caminhar, pois é possível deixar três pés sempre em contato com o chão enquanto os outros três executam o movimento de avanço ou

recuo do robô, garantindo que o robô esteja sempre equilibrado (ANGELES, 2003). Na Fig. 2.11 é apresentado o robô hexápode LAURON II, desenvolvido em 1995 na Universidade de Karlsruhe – Alemanha. Esse robô é caracterizado, segundo sua forma, como sendo um robô do tipo inseto.

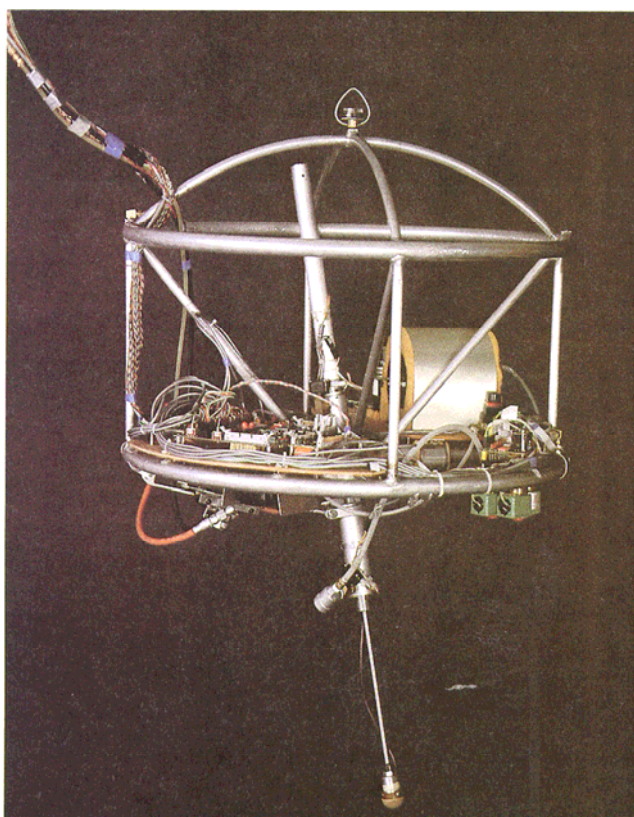


Figura 2.10: Robô monópode (RAIBERT, 1986).

Em função da necessidade de um grande número de pernas para os robôs móveis, e de modo a facilitar seu controle, estudos têm sido desenvolvidos utilizando-se cadeias cinemáticas fechadas com reduzido número de graus de liberdade, para a confecção de pernas robóticas. Por exemplo, pode-se citar as pernas desenvolvidas a partir de mecanismos planos, como os pantógrafos, que podem se mover com apenas um grau de liberdade. Um exemplo de utilização de pernas pantográficas é apresentado por Song et al (1984).

Diversas configurações cinemáticas de pernas robóticas são encontradas na literatura, tais como em Song et al. (1984), Pfeiffer; Eltze; Weidemann (1995), Mennitto e Buehler (1996), Nelson et al. (1997), Delcomyn e Nelson (2000), entre outros. No entanto, nem sempre os autores justificam a utilização de determinada cadeia cinemática. Todavia, o perfil do passo é quase sempre semi-elíptico ou algo similar, seja ele plano ou espacial, composto

por um trecho linear, que representa o contato do pé com o chão, e um trecho curvo, que representa o translado do pé ao longo do espaço. Formalmente, Mahajan e Figueroa (1997) definem passo como sendo o movimento de elevação da perna no final de seu ciclo efetivo de movimento, e seu reposicionamento para iniciar outro ciclo.

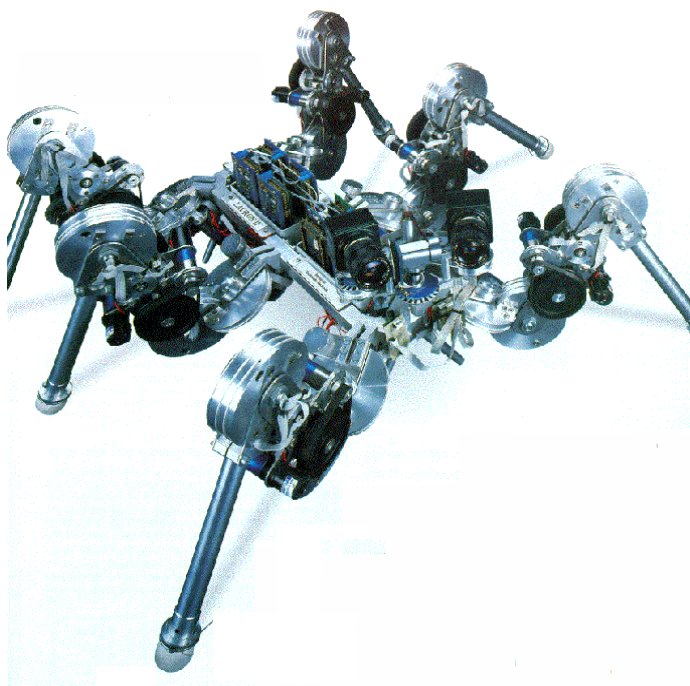


Figura 2.11: LAURON II.

Em função da evolução tecnológica, os robôs com pernas têm se tornado cada vez mais parecidos com os animais e/ou insetos nos quais foram inspirados, de forma que membros complexos, até mesmo com graus de liberdade redundantes em suas configurações, começam a fazer parte da configuração dessas estruturas, como é o caso de muitos seres vivos. Desta forma, desde que começaram a surgir os robôs dotados de pernas, percebeu-se que a arquitetura das pernas é um dos parâmetros mais importantes para a construção de um robô móvel. Isso é devido ao fato de ser necessário adotar uma estrutura/configuração de pernas para a qual seja possível se obter um passo com um perfil aproximadamente semi-elíptico, seja através de uma trajetória plana, seja através de uma trajetória espacial. No entanto, é ideal que as pernas dos robôs possuam uma estrutura de geometria tão simples o quanto for possível e ainda, segundo Song et al. (1984), quando o corpo do robô move-se em uma linha reta horizontal, somente um atuador deveria estar ativo, de forma a conseguir uma boa eficiência energética da estrutura construída. Há várias variáveis no projeto e estudo de um

robô com pernas, sendo que as arquiteturas de pernas robóticas e a forma de se fazer o controle da estrutura, são algumas das questões mais estudadas na atualidade. Trabalhos interessantes também foram desenvolvidos estudando o escorregamento do pé do robô à medida que ele caminha, como o apresentado por Xu e Song (1996).

Os robôs projetados na forma de mamíferos, Fig. 2.12(a), estiveram entre os primeiros robôs com pernas desenvolvidos (RAIBERT, 1986). Essa configuração de pernas permite mais facilmente a utilização de mecanismos planos, que podem ser relativamente mais simples para se controlar, bem como para se conseguir uma trajetória aceitável para o pé do robô. Isso certamente é um fator importante, e provavelmente é uma das razões para esse tipo de robô estar entre os mais comuns na atualidade.

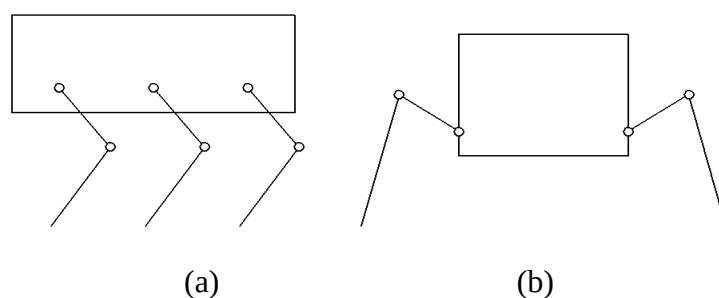


Figura 2.12: Configuração das pernas de um robô nas formas de (a) mamífero e (b) inseto

Um mecanismo plano muito utilizado para a confecção de pernas robóticas, em contrapartida às pernas formadas por cadeias abertas, é o pantógrafo, com o qual pode-se traçar uma linha reta com uma configuração adequada das barras do mecanismo. O projeto de uma perna de um hexápode que utiliza pernas pantográficas, de grandes dimensões, foi apresentado por Song et al. (1984), tendo sido aperfeiçoado no ano seguinte, sofrendo uma ligeira evolução (SONG; WALDRON; KINZEL, 1985). A perna proposta teve suas dimensões e geometria definidas com auxílio computacional, fazendo tentativas e modificações, até que se encontrasse uma trajetória com um trecho linear satisfatório. Procedendo desta maneira, os autores relatam terem encontrado várias configurações que atendiam às necessidades do projeto. No entanto, não deixam claro o porque da configuração final adotada. A perna construída tem três graus de liberdade, sendo que um grau de liberdade é de rotação e os outros dois são de translação. Um deles está na ligação da perna com o corpo do robô, enquanto o outro está localizado na extremidade do pé do robô, para permitir a possibilidade de um ajuste vertical durante o caminhar. Uma figura esquemática dessa perna, baseada na figura apresentada por Song et al. (1984), é apresentada na Fig. 2.13. O hexápode

construído é denominado ASV (Adaptive Suspension Vehicle), e está apresentado na Fig. 2.14. Como pode ser visto na figura, trata-se de um robô de grandes dimensões.

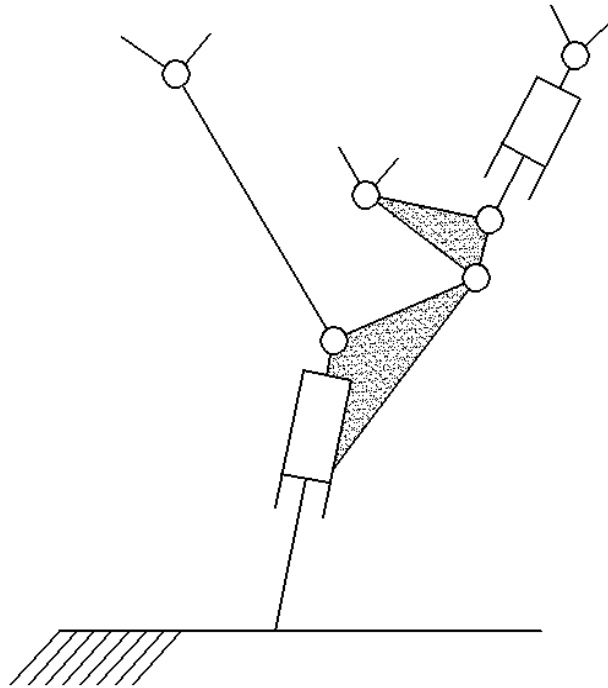


Figura 2.13: Esquema representativo de uma perna do ASV (SONG et al. 1984).



Figura 2.14: ASV – Adaptive Suspension Vehicle (www.ece.osu.edu/~klein/robotics/walker.jpg).

Em se tratando de robôs de grandes dimensões, também há o hexápode desenvolvido para missões espaciais, denominado AMBLER (KROTKOV; SIMMONS; WHITTAKER, 1992). Trata-se de um robô teleoperado, que carrega equipamentos científicos bem como ferramentas para agarrar e escavar. Suas pernas possuem três graus de liberdade cada uma, que são consistidos em uma articulação de rotação e uma articulação prismática, que se movem no plano horizontal, e uma outra articulação prismática, para o movimento do pé na direção vertical, perpendicular ao plano de rotação da perna. É um robô que pesa aproximadamente 2500 Kg e se move com um consumo moderado de energia a velocidades de até um metro por minuto. Um desenho esquemático do robô é apresentado na Fig. 2.15.

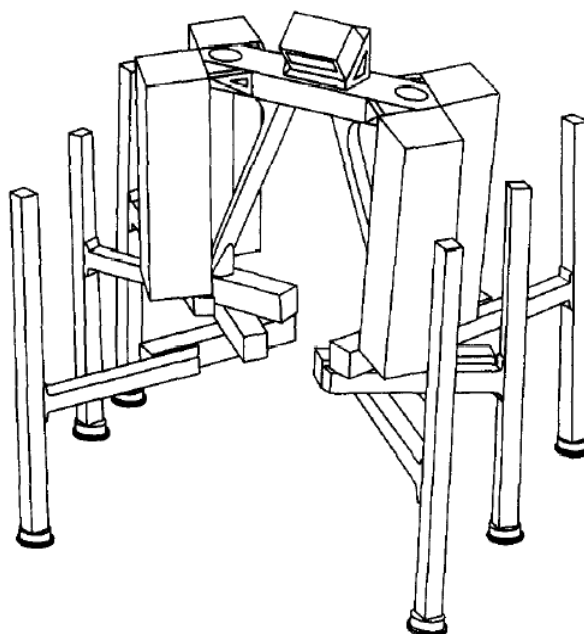


Figura 2.15: Robô AMBLER (KROTKOV; SIMMONS; WHITTAKER, 1992)

No entanto, a situação mais comum é encontrar robôs móveis cujas pernas são movidas apenas por atuadores rotativos, principalmente devido à maior facilidade de montagem e simplicidade apresentada por esse tipo de atuador, bem como por geralmente serem mais compactos. Pfeiffer; Eltze; Weidemann (1995) desenvolveram um robô hexápode, do tipo inseto, cujas pernas são constituídas por três segmentos conectados por articulações de rotação. Esse robô foi construído nitidamente com inspiração na natureza, baseado na morfologia do *Carausius morosus*, ou como é popularmente conhecido, o louva-deus. Suas pernas foram construídas sobre dois principais critérios que são: menor energia para elevar e descer a perna e menores forças de interação com o chão.

No robô apresentado, intitulado TUM (Technical University in Munich), como em seu inseto inspirador, os três segmentos das pernas estão situados em um plano e são conectados por três articulações de rotação, resultando em um total de três graus de liberdade por perna do robô. Essas pernas são montadas no corpo de robô de forma inclinada, sendo posicionadas por dois ângulos de rotação: um ângulo Ψ com a vertical e um ângulo φ com a direção longitudinal do corpo do robô. Na Fig. 2.16 é apresentado esquematicamente o posicionamento de cada uma das pernas do robô em relação ao corpo do mesmo.

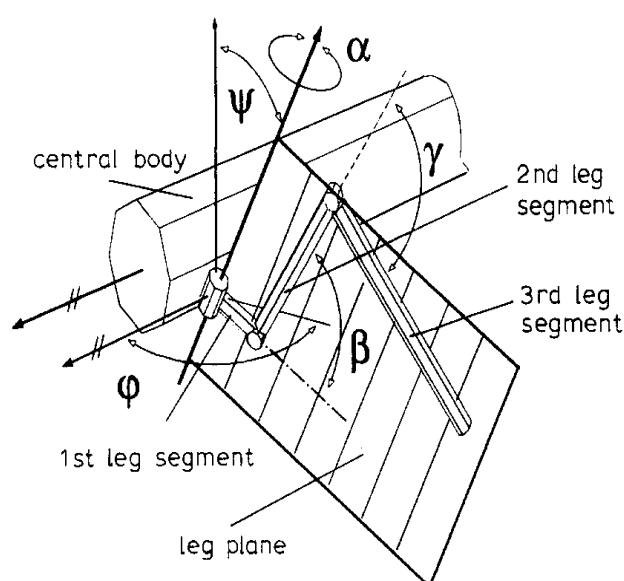


Figura 2.16: Montagem de uma perna do TUM (PFEIFFER; ELTZE; WEIDEMANN, 1995).

Segundo os autores, é essa orientação espacial do eixo de rotação da perna juntamente com a geometria não retangular da mesma, que permite que tanto os insetos como seu modelo se movam de forma suave, com um passo harmônico. A inclinação desse eixo de rotação, para o inseto, é diferente em cada tipo de ambiente no qual ele se move. Assim, o corpo do robô TUM também apresenta mais seis graus de liberdade de forma que se pode controlar o ângulo de posicionamento das pernas. Isso faz com que toda a estrutura tenha 24 graus de liberdade que precisam ser controlados à medida que o robô caminha.

A estrutura da perna do robô é apresentada na Fig. 2.17 e, com essa configuração, a perna tem massa de aproximadamente 2,9 Kg, tendo uma capacidade de carga de aproximadamente 18 Kg, ou seja, seis vezes o seu peso próprio. Na Fig. 2.18 é apresentada uma visão geral do robô TUM.

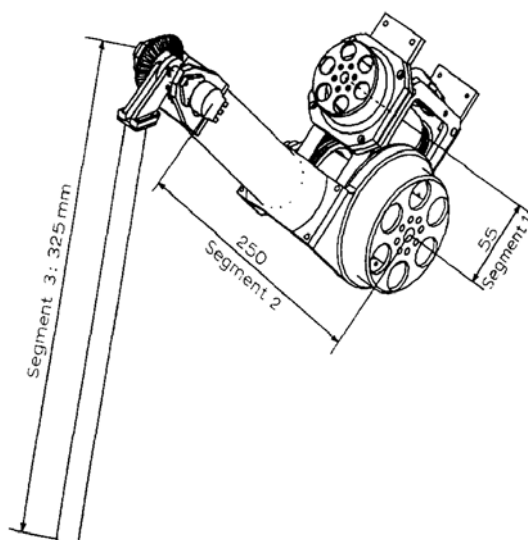


Figura 2.17: Estrutura da perna do TUM (PFEIFFER; ELTZE; WEIDEMANN, 1995).

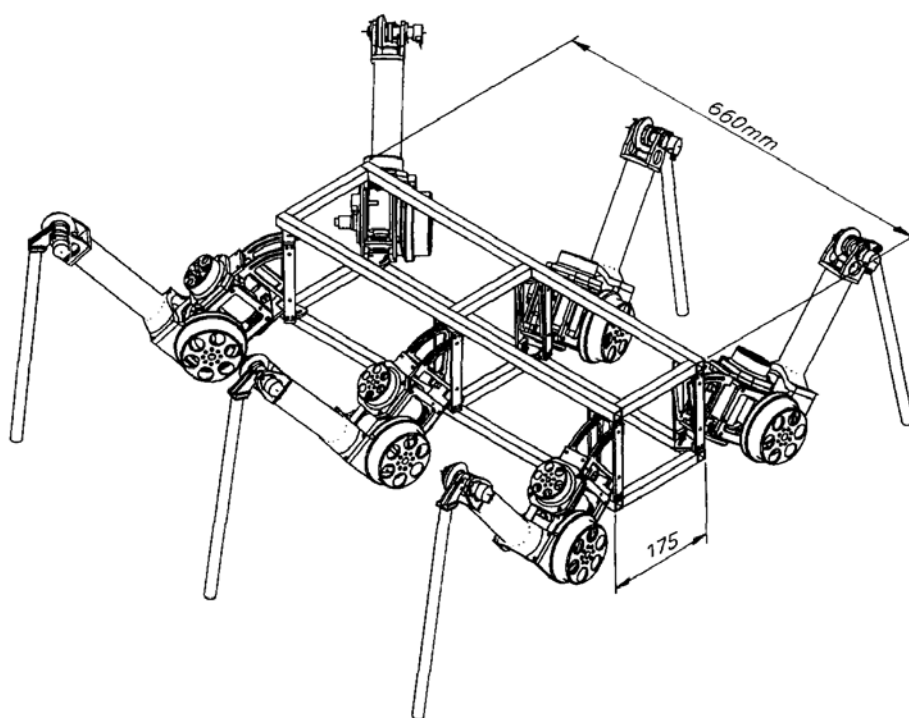


Figura 2.18: Visualização esquemática do robô TUM – Technical University in Munich (PFEIFFER; ELTZE; WEIDEMANN, 1995).

Outro robô inseto já há muito conhecido é o LAURON. Bührle e Cordes (1995) desenvolveram esse robô e sua segunda versão, o LAURON II, já apresentado na Fig. 2.11. Similarmente ao TUM, o LAURON também apresenta um total de 24 graus de liberdade. Cada perna também é formada pela união de três segmentos por articulações rotativas e estas pernas também estão ligadas ao corpo do robô por atuadores rotativos. Cada perna possui três

graus de liberdade. Em virtude da necessidade de baixo peso, o LAURON é quase todo feito em alumínio.

Os autores relatam que na modelagem da estrutura o chão não foi considerado como uma restrição cinemática, que é uma vantagem, pois desta forma o número de graus de liberdade da estrutura permanece sempre constante. Outra vantagem dessa consideração é que, desta forma, pode-se estudar o escorregamento dos pés do robô. Como já mencionado, Xu e Song (1996) fizeram um estudo desse gênero para outro hexápode, o ASV. Outra vantagem disso, segundo os autores, é que não é possível simular um chão perfeitamente rígido, principalmente em função de problemas numéricos, o que acarretaria na obtenção apenas de soluções aproximadas. Isso acaba por fazer com que as simulações computacionais apresentem resultados mais próximos de uma eventual situação real.

Espenschied et al. (1996) desenvolveram um robô, também hexápode, baseado na *Locusta migratoria*, uma das muitas espécies de gafanhoto. Os autores relatam que a mecânica do robô é de fundamental importância para a implementação de algum mecanismo biológico de controle, de forma que essa consideração acaba ditando muitas decisões para o projeto do robô. O robô tem um centro de massa muito baixo, o que lhe garante mais estabilidade. No entanto, em função de seu centro de massa ser baixo, há a desvantagem de que o robô não consegue transpor obstáculos muito grandes. Cada perna tem quatro graus de liberdade, sendo três deles ativos, de rotação, e um grau de liberdade passivo, que é constituído por uma mola linear. Esse grau de liberdade passivo tem a função de auxiliar o robô a manter sua postura em terrenos irregulares, já que, nesse tipo de solo, é mais vantajoso se o robô puder se adaptar. Cada perna também possui sensores angulares nos atuadores rotativos, bem como um sensor de força no sistema de molas do grau de liberdade passivo. Em função dos graus de liberdade das pernas da *Locusta migratoria* não serem acoplados, os graus de liberdade das pernas do robô também não são. Segundo os autores, essa característica do gafanhoto foi decisiva na decisão de não se utilizar pernas com aproximações de pantógrafos ou qualquer outro sistema que acople os graus de liberdade para simplificação do controle.

De forma a facilitar ainda mais a conformação do robô a superfícies irregulares, além do sistema de molas presente nas pernas, fez-se o controle das mesmas de forma tal a permitir que elas exibissem um comportamento típico de um músculo. Esse tipo de controle foi feito em função de duas principais vantagens apresentadas pelo sistema, que são: a possibilidade de se controlar a rigidez da articulação, prevenindo danos à mesma quando há a presença de

carregamentos pesados e também melhorar a distribuição do carregamento vertical entre as pernas do robô. Esse tipo de controle traz ainda outras vantagens que não serão mencionadas nesse texto e estão detalhadas no artigo dos autores (ESPENSCHIED et al., 1996).

Uma perna robótica também foi desenvolvida por Mennitto e Buehler (1996). Esta perna, intitulada CARL (Compliant Articulates Robot Leg) por seus idealizadores, foi desenvolvida com o intuito principal de ser utilizada na construção de um robô quadrúpede. Ela foi desenvolvida considerando-se a movimentação dinâmica do robô, permitindo que o mesmo caminhe ou até mesmo o trote, possibilitando uma combinação de diferentes tipos de passos. Segundo os autores, essa perna permite desenvolver velocidades de até 3 metros por segundo. Cada perna possui três membros e quatro graus de liberdade de rotação, Fig. 2.19.

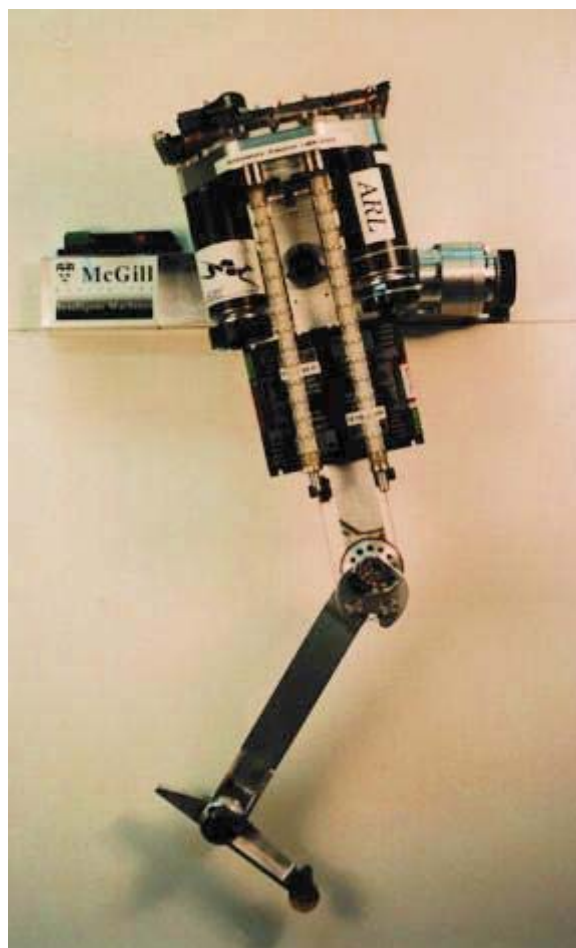


Figura 2.19: CARL (www.cim.mcgill.ca/research/94-95AnualReport/node92.htm).

Neste trabalho, os autores relatam algumas vantagens de se utilizar apenas articulações rotativas que, segundo eles, são mais vantajosas frente às prismáticas, principalmente devido a características como baixo atrito, maior simplicidade e ainda maior mobilidade. Os atuadores

são elétricos e a fonte de energia é composta por baterias. O problema da potência necessária foi resolvido utilizando um sistema de conversão de potência do motor para altos torques nas articulações, denominado de LADD. Cada perna tem aproximadamente 12 Kg, mas pode ser diminuída para até aproximadamente 9 Kg (cada motor tem massa entre 0,5 e 1,3Kg).

Nelson et al. (1997) relatam que em Case Western Reserve University também foram desenvolvidos dois hexápodes, o R-I e o R-II. O primeiro deles, o R-I, foi desenvolvido para testar um controlador de locomoção. Cada perna do R-I possui dois graus de liberdade e o robô consegue caminhar, com passos de inseto, de forma contínua em uma superfície plana. O R-II foi mecanicamente projetado tendo como base o louva-Deus. Esse robô apresenta seis pernas com três graus de liberdade rotativos em cada uma delas, acionados por motores elétricos de corrente contínua. Esse robô tem a capacidade de caminhar de forma contínua, girar, mergulhar sem se mover, andar para frente, para trás e de lado e ainda consegue caminhar em superfícies acidentadas ou descontínuas. Utiliza um controlador distribuído baseado em insetos.

Uma nova evolução da robótica móvel em Case Western também é apresentada por esses autores. Essa evolução consiste na simulação de outro hexápode, o R-III, baseado em uma barata, a *Blaberus discoidalis*. Esse robô foi projetado e construído para testar princípios de controle observados na barata. A *Blaberus discoidalis* foi escolhida porque tem grande capacidade de correr e subir em objetos como também porque sua biomecânica já é bem conhecida através de trabalhos científicos publicados. Outra motivação é que, como se sabe, a performance de um robô pode ser significativamente melhorada quando são levados em conta alguns princípios da biologia quando se está fazendo o projeto mecânico (FERREL, 1995, ESPENSCHIED et al., 1996).

Contrariamente à “regra geral”, involuntariamente instituída entre os trabalhos sobre robótica móvel, de se utilizar robôs com pernas iguais, principalmente por uma questão de maior simplicidade de projeto, o novo protótipo apresentado por Nelson et al. (1997), o R-III, é simétrico apenas em relação a um plano longitudinal ao corpo robô, pois o mesmo possui três tipos diferentes de pernas, que são iguais aos pares. Quanto ao número de graus de liberdade das pernas, estes estão distribuídos da seguinte forma: cinco graus de liberdade nas pernas dianteiras, quatro graus de liberdade nas pernas centrais e três graus de liberdade nas pernas traseiras.

Isso faz com que o robô, considerando apenas suas pernas, possua 24 graus de liberdade, todos ativos. Segundo os autores, isso é feito porque essa disposição dos graus de

liberdade permite a imitação das diferentes funções de cada perna. As articulações são acionadas por cilindros pneumáticos e, nessas articulações, também existem potenciômetros devidamente instalados. Os segmentos individuais das pernas lembram um esqueleto animal: minimizados no meio, mas reforçados nos extremos, de forma a suportar os carregamentos aplicados e a ação de concentração de tensões. Um estudo a respeito da postura do R-III foi apresentado por Nelson e Quinn (1998), onde relatam as funções de cada par de pernas, que são: dar propulsão, levantar e girar o corpo e funções sensoriais.

Mesmo com esse elevado número de graus de liberdade que a estrutura apresenta, os autores afirmam que há situações nas quais é possível fazer o controle de uma perna, com até cinco graus de liberdade, em tempo real. Uma fotografia do R-III é apresentada na Fig. 2.20. Esse robô tem capacidade de levantar aproximadamente 13 Kg.

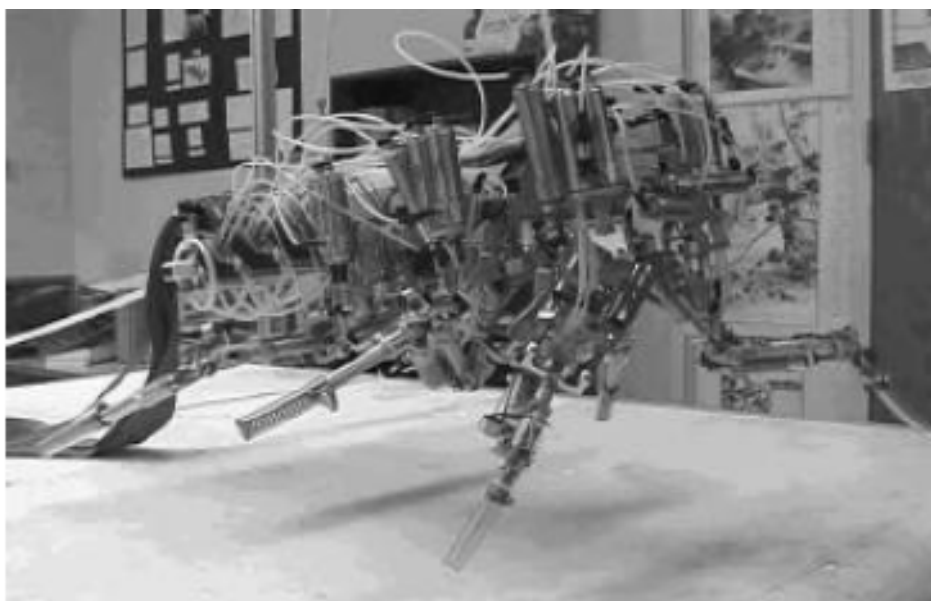


Figura 2.20: R-III (NELSON et al., 1997).

Mahajan e Figueroa (1997) desenvolveram um robô quadrúpede, o Flimar. Esse robô possui dimensões relativamente pequenas, possuindo aproximadamente 40cm de comprimento, 20cm de altura e 20cm de profundidade. Ele se move deixando sempre três pés em contato com o solo, de forma a garantir que o centro de massa do robô sempre esteja dentro do polígono formado, geometricamente, pela união dos três pés em contato com o solo, o que garante os equilíbrios estático e dinâmico. As pernas do Flimar possuem três graus de liberdade rotativos cada uma, sendo dois deles no plano vertical e o outro no plano horizontal, de forma que cada perna aja como um manipulador de duas barras no plano vertical. Isso

resulta em um total de doze graus de liberdade para todo robô, sendo que cada grau de liberdade é acionado por um servo-motor.

A função da rotação no plano horizontal, que une a terceira barra da perna ao corpo do robô, é fazer com que essa barra funcione como um quadril, permitindo com que o robô faça curvas. Assim, quando o robô caminha em linha reta, esse grau de liberdade não é utilizado, de forma que o robô pode se mover com apenas oito graus de liberdade, ou seja, utilizando apenas dois graus de liberdade por perna.

Uma outra categoria de robôs com pernas são os que podem caminhar na posição vertical. Procurando desenvolver um robô para essa função em particular, que se enquadra em uma categoria de robôs ainda não muito estudada, Grieco et al. (1998) apresentaram um hexápode que, carregando uma alta quantidade de peso, consegue subir em paredes ferromagnéticas. Esse tipo de robô pode ser largamente empregado em atividades relacionadas à inspeção e manutenção de equipamentos industriais.

O robô apresentado consegue carregar mais de 100Kg e transpor alguns obstáculos mais simples. É um robô que possui um comportamento semi-autônomo. Seu corpo é de alumínio e as dimensões do corpo são aproximadamente: 1100 (comprimento) x 90 (altura) x 600 (profundidade) [mm]. Note que a altura do robô é mais de doze vezes menor que o comprimento e mais de seis vezes menor que a profundidade. Isso é feito para que se minimize o esforço atuante nos pés do robô, que é tanto menor quanto menor for a distância do corpo do robô à parede (pois reduz o momento provocado pelo peso da estrutura). O aumento desse esforço tende a aumentar a força necessária para fixação do robô na parede, que é feita por imãs.

Esse hexápode não utiliza nem pernas pantográficas nem pernas do tipo inseto, mas pernas do tipo SCARA, Fig. 2.21, que possui dois graus de liberdade de rotação e um de translação. Segundo os autores, apesar de uma perna SCARA não ter um volume de trabalho tão bom quanto uma perna do tipo inseto, a estrutura SCARA apresenta vantagens como maior manipulabilidade, com forças e velocidades de operação altamente independentes e, para o caso de subir por paredes, a perna SCARA apresenta mais compatibilidade com essa tarefa, sendo também mais estável.

Além dos três graus de liberdade ativos de cada uma das pernas, o pé do robô apresenta um grau de liberdade passivo, sendo acoplado à perna por uma associação entre uma articulação esférica e molas, de forma a permitir que o pé do robô se adapte naturalmente à superfícies com inclinações de até 30°. Esse tipo de mecanismo de auto-ajuste é muito comum

tanto para compensar possíveis inclinações da superfície na qual o robô caminha, bem como para poder compensar alguma imperfeição do passo adotado para o robô. Na Fig. 2.22 é apresentada uma fotografia do robô construído.

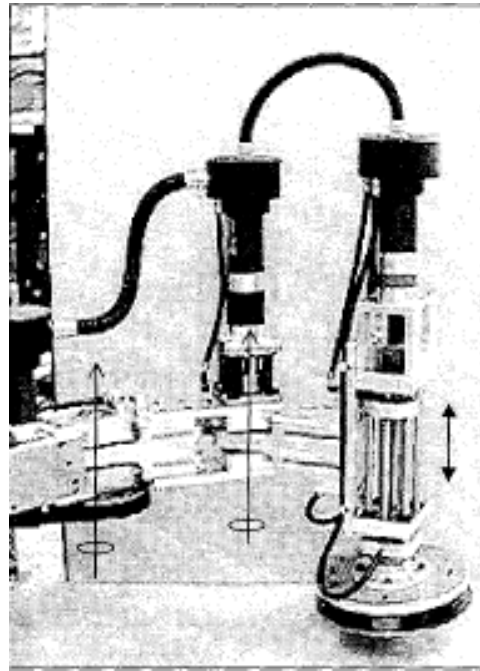


Figura 2.21: Perna com arquitetura do tipo SCARA (GRIECO et al., 1998).

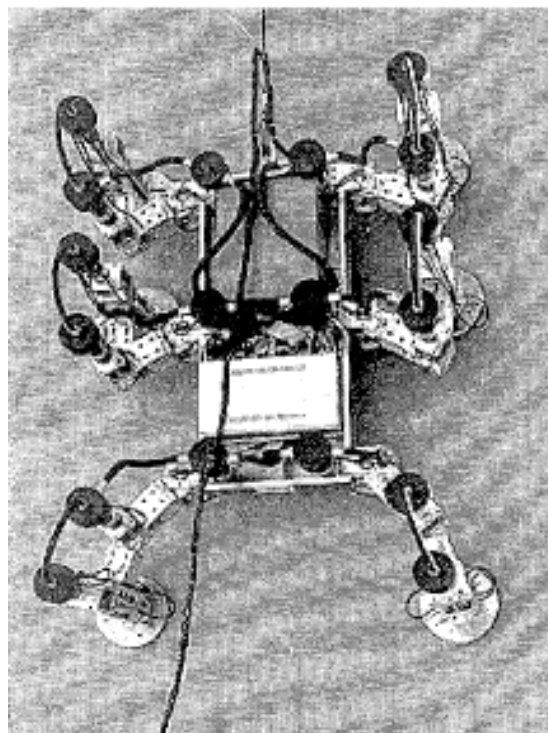


Figura 2.22: Hexápode com pernas do tipo SCARA (GRIECO et al., 1998).

Delcomyn e Nelson (2000), como em Nelson et al. (1997), também desenvolveram um robô hexápode movido a ar comprimido. Esse robô também foi construído tendo como base uma barata. No entanto, a barata que serviu como base para essa nova estrutura é diferente da utilizada na confecção do R-III, apresentado em Nelson et al. (1997). Trata-se da *Periplaneta americana* ao invés da *Blaberus discoidalis*. Com base na estrutura física desses insetos, Delcomyn e Nelson (2000) construíram um robô que possui três tamanhos de perna diferentes, no entanto, iguais aos pares. Cada perna é constituída por três segmentos (coxa, fêmur e tíbia) e possui três graus de liberdade cada uma delas. Segundo os autores, o ciclo de movimento de cada perna dura de dois a quatro segundos.

Os atuadores pneumáticos do robô utilizam um mecanismo de válvula única para imitar características musculares, de forma que, segundo os autores, é possível conseguir melhores resultados de força e aceleração quando comparados com muitos sistemas motorizados. Na Fig. 2.23 é apresentado um esquema do robô construído.

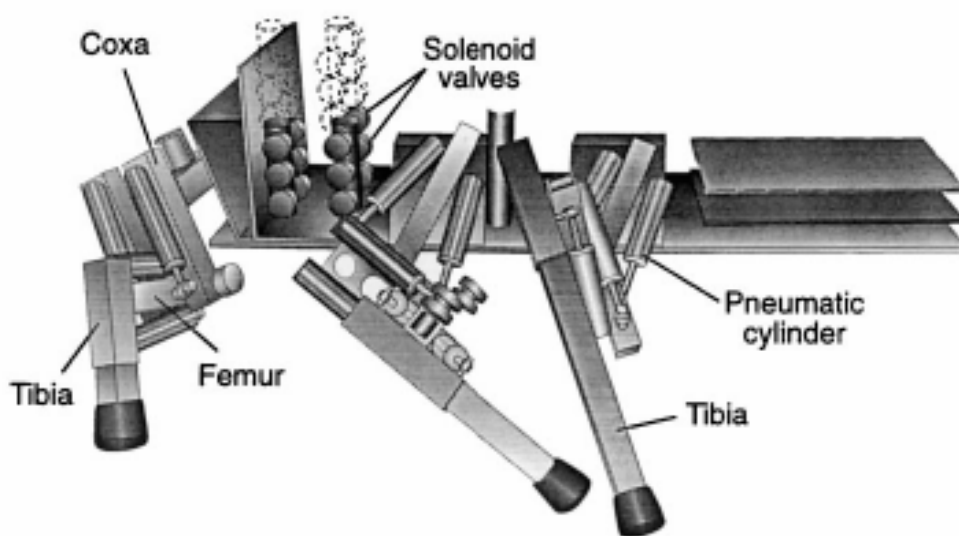


Figura 2.23: Hexápode pneumático (DELCOMYN; NELSON, 2000).

Zielinska e Heng (2002) também desenvolveram um hexápode cujas pernas possuem três graus de liberdade cada uma. Essas pernas são bastante flexíveis, permitindo que o robô tenha as pernas configuradas tanto como um robô inseto quanto como um robô mamífero, bastando para isso, segundo os autores, apenas um ajuste na estrutura. Outra opção possível para esse robô é a possibilidade de configuração do mesmo como sendo um hexápode omnidirecional. Os autores ressaltam a importância da necessidade de haver uma solução

geral para o projeto de pernas de robôs móveis, mas como ainda não há nenhuma solução desse tipo, afirmam que parte da dificuldade em se encontrar uma solução para esse problema relaciona-se aos acionadores (que geralmente são grandes e pesados) e à dificuldade de controle (devido ao número de graus de liberdade), confirmando o que já foi constatado por vários outros pesquisadores dessa área.

As pernas são montadas de tal forma que permitem melhorias significativas quanto ao volume de trabalho e quanto ao modelo cinemático. A perna se comporta de forma simétrica, o que permite a inversão do robô (característica essencial quando se opera em extremidades, como na proximidade de obstáculos). Outra vantagem do robô proposto é que o mesmo pode realizar tarefas, como pick-and-place, por exemplo, utilizando para isso suas duas patas dianteiras. Na Fig. 2.24 está representado o robô hexápode em sua configuração de inseto.

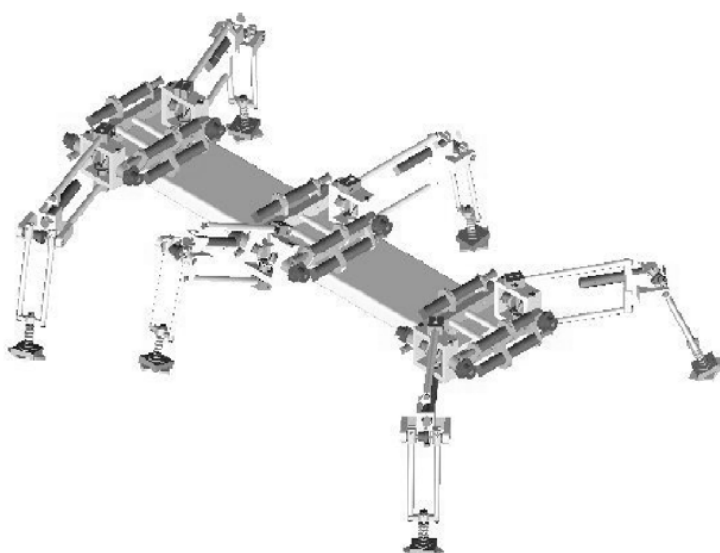


Figura 2.24: Hexápode inseto/mamífero (ZIELINSKA; HENG, 2002).

2.4 – Conclusão

Os robôs móveis modernos que se locomovem sobre pernas, apesar geralmente fazerem uso de tecnologia de ponta, ainda são muito ineficientes, movendo-se a velocidades relativamente baixas e superando obstáculos com dificuldade. Dentre essas estruturas, há algumas que se locomovem em velocidades mais altas, no entanto geralmente são controlados apenas de forma parcial.

A maior parte desses robôs utiliza pernas baseadas em estruturas seriais. Esse tipo de perna, por apresentar um alto número de graus de liberdade, é o fator que mais compromete o

desempenho da estrutura, principalmente quando são utilizadas em robôs quadrúpedes ou hexápodes.

Buscando uma solução para esse problema, alguns avanços tecnológicos têm sido apresentados. Esses avanços têm se concentrado no controle desses robôs e no desenvolvimento de pernas com base em diferentes arquiteturas, sobretudo mecanismos de cadeia fechada que, geralmente, permitem o uso de um sistema de controle mais simples.

CAPÍTULO III

MECANISMOS

3.1 – Introdução

O homem é um ser que, desde o início de sua existência, vem sempre procurando facilitar suas tarefas cotidianas, seja na vida doméstica seja em seu trabalho. Em virtude disso, no decorrer da história a tecnologia veio se desenvolvendo, ora de forma mais acelerada ora de forma mais lenta, mas sempre procurando atender às necessidades do homem.

Pode-se dizer que o que mais motivou o ser humano a se desenvolver tecnologicamente, foram suas necessidades e/ou desejos mais intrínsecos à sua natureza, como sua ambição em se expandir e conquistar, bem como sua segurança, sua carência de força para mover grandes pesos e sua subsistência. Exemplos clássicos deste desenvolvimento são os moinhos de trigo e outros cereais movidos pelas forças da natureza ou mesmo por animais. Há também exemplos de dispositivos mais engenhosos como uma espécie de odômetro (HARTENBERG; DENAVITT, 1964), desenvolvido e utilizado pelos romanos para medir suas estradas e para medir a distância navegada por seus navios, Fig. 3.1. Os egípcios também utilizavam mecanismos primitivos para a construção de seus monumentos, muitos deles famosos ainda hoje, como as pirâmides (NORTON, 1992).

Dentre as razões para o progresso do ser humano, pode-se afirmar que desde os tempos mais antigos de nossa história, foram as guerras que trouxeram, e ainda trazem, um desenvolvimento tecnológico mais significativo. A indústria armamentista sempre se destacou dentre as demais por sempre ter financiado pesquisas para o desenvolvimento de novos armamentos, promovendo também o desenvolvimento de outras áreas. Para citar um exemplo

de pesquisa feita sob o financiamento dessa indústria, pode-se relatar as pesquisas voltadas para o desenvolvimento de máquinas que arremessavam projéteis de vários tipos. Na literatura técnica da época, essas máquinas eram denominadas de “*throwing engines*”. Exemplos dessas máquinas são as catapultas (HARTENBERG; DENAVITT, 1964, NORTON, 1992).

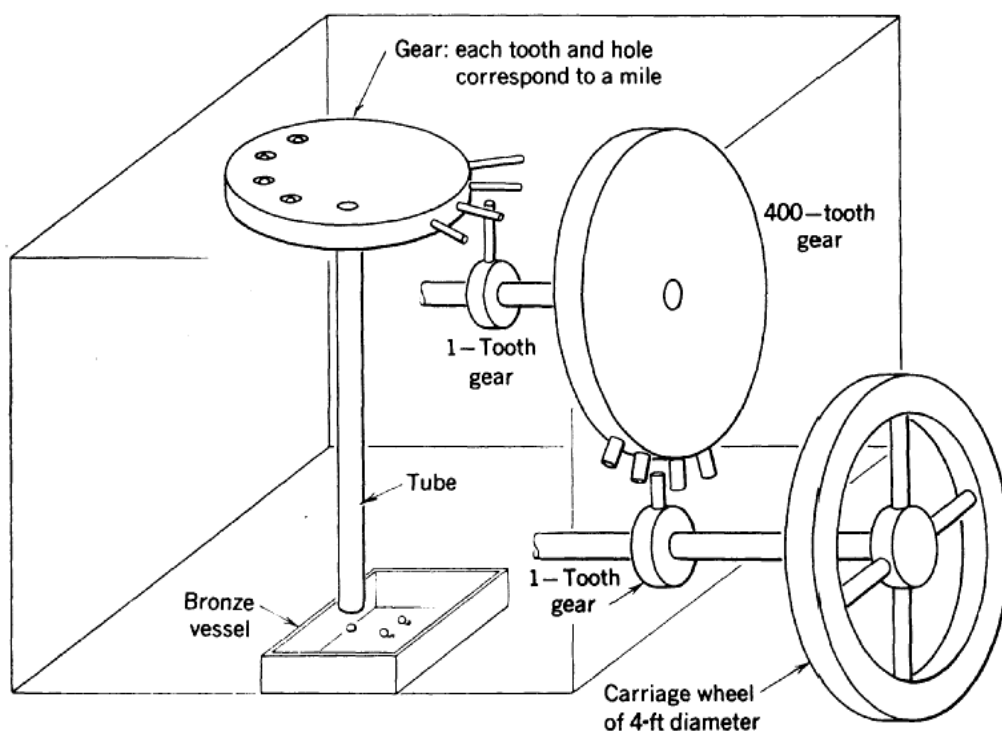


Figura 3.1 – Desenho esquemático de um odômetro romano (HARTENBERG; DENAVITT, 1964).

Como a maior parte da ciência, nota-se que o desenvolvimento tecnológico do homem, no que diz respeito aos mecanismos, também se deu de forma bem gradativa, começando com a utilização de mecanismos bem simples, como a alavanca, até os mecanismos mais elaborados utilizados atualmente. No início, os mecanismos, bem como as máquinas, eram produzidos, na maioria das vezes, de forma puramente experimental, por observações, visando, quase sempre, satisfazer alguma necessidade vigente. Logicamente, equipamentos construídos desta forma nem sempre eram bem sucedidos (HARTENBERG; DENAVITT, 1964).

O significado dos termos mecanismo e máquina são muito similares, sendo que, entre os pesquisadores, é praticamente um consenso que um mecanismo é um dispositivo que se movimenta lentamente e no qual as forças envolvidas são muito pequenas, enquanto que em

uma máquina, que geralmente se constitui da associação de vários mecanismos, as velocidades de operação e potências transmitidas são significativamente maiores (HARTENBERG; DENAVITT, 1964, HUNT, 1978, NORTON, 1992). Por outro lado, há quem defina mecanismo como sendo dispositivos que transmitem movimento e/ou força de uma entrada para uma saída, como é o caso de Erdman e Sandor (1990).

À medida que os estudos sobre os mecanismos foram evoluindo, eles foram recebendo contribuições dos mais diversos engenheiros e pesquisadores da área, dentre os quais pode-se citar o engenheiro Leonardo da Vinci (cujas obras só se tornaram públicas no século XVIII), o matemático Leonard Euler (que, segundo Lagrange, foi quem publicou “o primeiro grande trabalho no qual a análise é aplicada à ciência do movimento”), o engenheiro James Watt (que preocupou-se com o movimento, projetando e construindo um mecanismo que descrevesse uma trajetória linear, apresentado na Fig. 3.2), entre outros. Também foram surgindo livros de desenhos de mecanismos e até mesmo algum algebrismo para a geração de curvas, de forma a complementar o que já era denominado por muitos de “arte de criar mecanismos”.

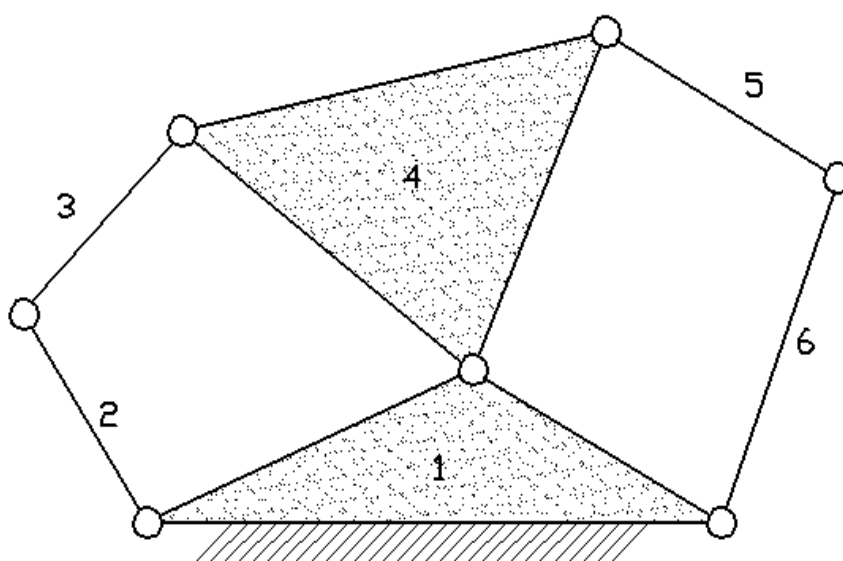


Figura 3.2: Mecanismo de Watt.

Segundo Leonard Euler, o estudo do movimento de um corpo rígido deveria ser convenientemente separado em duas partes, uma geométrica e outra mecânica, sendo que na primeira parte a transferência do corpo de uma posição para outra deveria ser estudada sem considerar as causas do movimento. Isso mostrou que era necessário, ou até mesmo de certa forma inevitável, o surgimento de uma nova ciência que estudasse bem esses mecanismos.

Assim, veio a surgir o que o físico e professor André Marie Ampère denominou de *cinématique*, ou cinemática, que vem da palavra grega *κίνημα*, que quer dizer movimento. Ampère definiu a cinemática como sendo “o estudo do movimento de mecanismos e dos métodos de criá-los” (HARTENBERG; DENAVITT, 1964, HUNT, 1978, NORTON, 1992, ERDMAN; SANDOR, 1990). Alguns dos primeiros mecanismos estudados por essa nova ciência, foram os mecanismos que faziam a transformação de um movimento circular contínuo em um movimento linear alternado.

À medida que se intensificavam os estudos da cinemática, ou mesmo a dinâmica de mecanismos, notou-se que quase sempre se fazia necessária a utilização de desenhos, de maneira a facilitar a visualização do mecanismo e de seus movimentos característicos. No entanto, em mecanismos mais complexos, essa representação gráfica pode ser muito trabalhosa, demandando muito tempo. Desta forma, de maneira a simplificar a representação gráfica, tanto dos mecanismos mais complexos como também dos mais simples, foi criada uma forma de representação simbólica das barras e das articulações através de suas linhas de ação. Essa representação simbólica foi primeiramente desenvolvida e proposta por Franz Reuleaux, e vem sendo aperfeiçoada a cada dia (HARTENBERG; DENAVITT, 1964).

Atualmente, a cinemática dos mecanismos é dividida em duas grandes áreas que estão intimamente inter-relacionadas. A primeira e mais simples delas é a *análise*, que trata do estudo dos mecanismos em si, ou seja, dado um mecanismo, o movimento característico de seus componentes e as demais propriedades cinemáticas serão determinadas por sua análise. Os parâmetros da análise contêm todas as dimensões principais do mecanismo, as conexões entre suas barras e ainda a especificação da entrada de movimento ou método de atuação. Os objetivos principais de uma análise cinemática são: a determinação dos deslocamentos, das velocidades, acelerações, possíveis choques, jerk, e até mesmo das acelerações de ordem superior que eventualmente possam existir no mecanismo. Por uma análise cinemática também é possível descrever, por meio de equações, o caminho percorrido por um ponto definido em uma das barras do mecanismo durante a evolução de seu movimento. Em suma, com uma análise cinemática pode-se determinar a performance do movimento de um determinado mecanismo (ERDMAN; SANDOR, 1990).

A segunda grande área da cinemática dos mecanismos é a *síntese*. Na síntese, o problema é resolvido de forma inversa, ou seja, sendo conhecido o movimento, procura-se o mecanismo que realiza este tipo de movimento. Trata-se, basicamente, do estudo para se criar um mecanismo para uma dada aplicação. Um engenheiro do século XIX, Robert Willis, autor

de *Princípios dos Mecanismos*, trabalho que, segundo Hartenberg e Denavit (1964), veio a contribuir de forma muito substancial para a síntese de mecanismos, tinha a idéia de que deveria haver uma aproximação sistemática para o projeto de mecanismos para um dado propósito.

A síntese pode ser vista de duas maneiras:

a – O estudo dos métodos de criar um determinado movimento em termos do tipo de mecanismo

b – O estudo dos métodos de criar mecanismos partindo-se de movimentos dados

No primeiro caso, *caso (a)*, para uma dada performance, deve-se determinar qual o melhor tipo de mecanismo para a aplicação. Por exemplo, deve-se determinar, para uma dada aplicação, se é mais viável utilizar um mecanismo plano ao invés de um mecanismo espacial. Esse tipo de síntese é denominado de *síntese de tipo*. Uma vez determinado o tipo de mecanismo a ser utilizado, passa-se a perguntar quantas barras terá esse mecanismo, ou seja, se será utilizado um mecanismo de quatro, cinco, ou mais barras, e assim sucessivamente. Esse tipo de síntese também é denominado de *síntese de número*.

Já no segundo caso, *caso (b)*, também denominado de *síntese dimensional*, o principal fator a se determinar são as dimensões do mecanismo a se utilizar (como os comprimentos das barras, diâmetros de engrenagens, etc), bem como a posição inicial do mecanismo para a partida, geralmente dada por uma posição angular da barra motora (ERDMAN; SANDOR, 1990).

3.2 – Componentes de um mecanismo

Um mecanismo é composto basicamente por suas barras, consideradas corpos rígidos, e por suas articulações, ou pares cinemáticos. Geralmente, também há uma fonte motora que é a responsável pela movimentação do mecanismo. O estudo de forças, torques, energia e inércia, são objeto de estudo da dinâmica. Desta forma, ao se fazer a modelagem cinemática de um mecanismo, o efeito destas variáveis não são levados em conta.

Por definição, um corpo rígido é um corpo que não pode se alongar, torcer, ou sofrer qualquer outro tipo de deformação, ou seja, tomando como referência um sistema inercial, a distância entre dois pontos quaisquer pertinentes a uma barra rígida do mecanismo permanece inalterada durante todo seu movimento (BEER, JOHNSTON JR, 1994). No entanto, um corpo nessas condições ideais não existe fisicamente, pois sempre há alguma deformação, plástica ou elástica, em virtude dos esforços presentes, por menores que eles sejam. Assim, para que

se obtenha um resultado experimental mais próximo do que se espera, ao se fazer uma análise cinemática, geralmente utilizam-se corpos reais que são dinamicamente superdimensionados, ou seja, utilizam-se barras nas quais as deformações por elas sofridas podem ser desprezadas quando em comparação com a magnitude do movimento por elas realizado em um ciclo de movimento. Já existem trabalhos científicos onde são estudados mecanismos formados com barras flexíveis, como pode ser visto em (WANG; MILLS, 2006).

Os corpos rígidos podem ser classificados quanto ao número de nós que apresentam, e segundo esse critério, as barras podem ser divididas em binárias, ternárias, e assim sucessivamente (NORTON, 1992). A Fig. 3.3 apresenta, em uma representação esquemática de um mecanismo plano de quatro barras que possui três barras binárias (barras um, dois e quatro) e uma barra ternária (barra três).

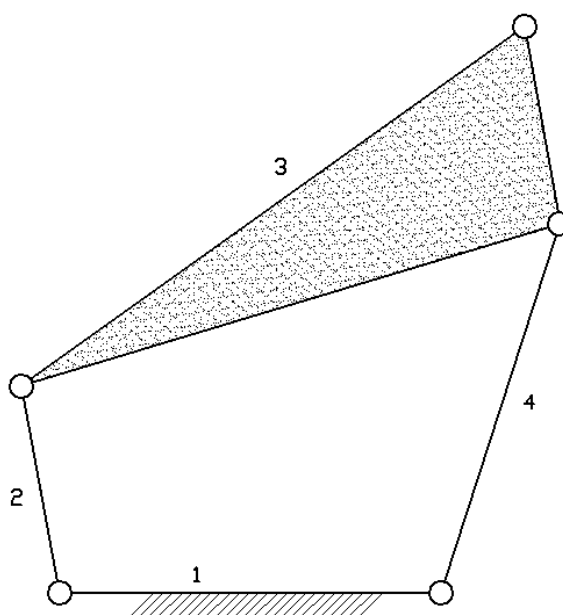


Figura 3.3: Mecanismo plano de quatro barras com uma barra ternária.

O segundo componente de um mecanismo são suas articulações, também denominadas de juntas ou ainda pares cinemáticos. É o elemento de união entre as barras. A forma mais elementar de uma união entre dois corpos é o seu contato em um ponto comum aos dois, de forma que esse ponto de contato seja mantido continuamente durante o movimento relativo entre os corpos. No entanto, apesar de haver aplicações onde o ideal é que esse contato entre os corpos se dê por apenas um ponto, freqüentemente prefere-se que o contato se dê por

vários pontos, distribuindo o carregamento entre eles. O tipo de movimento relativo entre os corpos unidos é característico do tipo de articulação utilizada na união entre os mesmos.

As articulações podem ser classificadas conforme o *número de graus de liberdade* que possuem; em função do *tipo de fechamento físico*; segundo o *número de corpos unidos*, ou ainda conforme o tipo de *contato entre os corpos que compõe a articulação* (NORTON, 1992).

Quanto ao número de graus de liberdade: um corpo livre no espaço possui seis graus de liberdade (três deles relativos à posição do corpo no espaço e os outros três relativos à sua orientação). No entanto, pode-se articular esse corpo de forma a restringir parte desses graus de liberdade, chegando a um limite de até cinco restrições de movimento, ou seja, utilizando-se articulações que permitem apenas um tipo de movimento. De maneira análoga pode-se utilizar articulações que restringem menos tipos de movimento, podendo possuir dois, três ou mais graus de liberdade. Entretanto deve-se atentar ao fato de que quanto maior o número de graus de liberdade das articulações, maior será a mobilidade do corpo no espaço, e conseqüentemente, o número de parâmetros a se controlar também será maior.

Quanto ao tipo de fechamento físico: a articulação pode ser com fechamento do tipo ligação por força, quando o que mantém os corpos unidos é a presença de uma força no sentido de aproximá-los, ou ligação por forma, como no caso de uma articulação esférica. Um exemplo de fechamento por força é apresentado na Fig. 3.4.

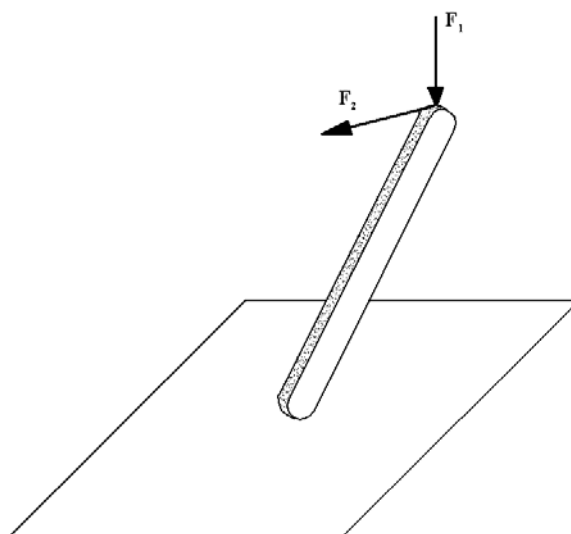


Figura 3.4: Fechamento por força.

Quanto ao número de corpos unidos: as articulações podem fazer a união de apenas dois corpos rígidos, que é o caso mais comum, mas também podem fazer a união de mais corpos, Fig. 3.5. Uma propriedade que vem dessa forma de classificação é a ordem de junta, que é determinada pela Eq. (3.1), onde O_{junta} representa a ordem da junta, e n representa o número de barras unidas pela articulação.

$$O_{junta} = n - 1 \quad (3.1)$$

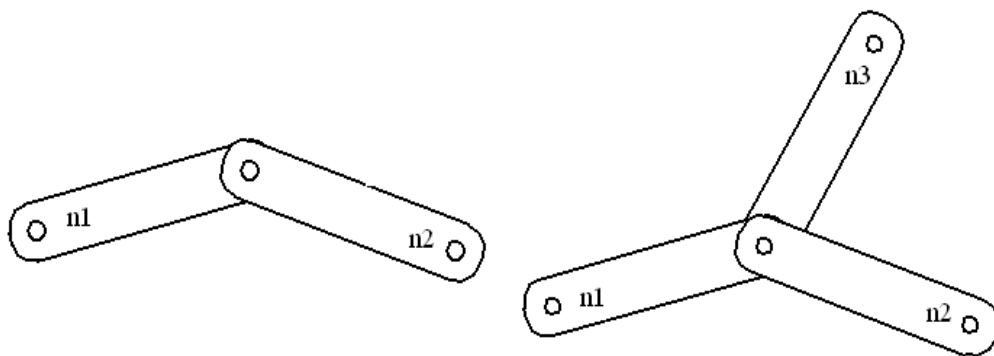


Figura 3.5: Articulações de primeira e segunda ordem.

Quanto ao tipo de contato entre os corpos que compõem a articulação: é o tipo de classificação mais importante. As articulações, ou pares cinemáticos, podem ser divididas em dois grandes grupos: os pares inferiores (*lower pairs*) e os pares superiores (*higher pairs*). Segundo Hartenberg e Denavit (1964), essa divisão foi inicialmente proposta por Franz Reuleaux em sua obra *Theoretische kinematik*, de 1875. Nos pares superiores o contato entre os corpos rígidos se dá por apenas um ponto ou ao longo de uma curva (engrenagens, contato das esferas de um rolamento com a pista, came e seguidor, entre outros). Na verdade, como os corpos reais sempre se deformam, o contato dos pares superiores se dá por uma região de contato. No entanto, as dimensões dessa região de contato são muito reduzidas. Nos pares inferiores, o contato entre os corpos rígidos se dá em uma região da superfície de dimensões bastante significativas em relação às dimensões das articulações (articulações esféricas, articulações rotativas, parafuso sem fim, entre outros). O fato dessa região de contato ser maior nos pares inferiores é uma vantagem pois, em função disso, esse tipo de articulação pode suportar carregamentos maiores que os pares superiores, já que as pressões existentes nessas articulações são, em geral, menores. Outra vantagem dos pares inferiores, diz respeito

à sua fabricação, que é mais simples, já que, com exceção da articulação do tipo parafuso, todas as demais articulações derivam de círculos ou de linhas retas, que são formas que se consegue fabricar com muita precisão. Em função dessas vantagens, nota-se que os pares inferiores são mais importantes que os pares superiores, como também são os mais comuns de forma que, sempre que possível, é preferível substituir um par superior por um par inferior. A seguir são citados os seis tipos de movimento permitidos por esse tipo de articulação:

1 – articulação de rotação (R): é uma articulação que permite apenas uma rotação em torno de seu próprio eixo, possuindo um grau de liberdade. É o tipo mais comum de articulação. Fig. 3.6a.

2 – articulação prismática (P): é o tipo de articulação que permite apenas um movimento de translação, possuindo apenas um grau de liberdade, Fig. 3.6b. Exemplo: guias lineares.

3 – articulação do tipo parafuso (H): apesar de, nesse tipo de articulação, haver dois tipos de movimento relativo (rotação e translação), ainda assim é uma articulação com apenas um grau de liberdade. Isto ocorre pois o movimento de translação está associado ao movimento de rotação, Fig. 3.6c.

4 – articulação cilíndrica (C): são articulações com dois graus de liberdade, pois permitem dois tipos de movimento, gerando duas variáveis independentes necessárias para a descrição completa do movimento: uma relativa à rotação e a outra à translação ao longo do eixo de rotação. É formada pela montagem de um eixo cilíndrico em um mancal também cilíndrico, sendo que esse mancal não restringe o movimento axial do eixo, Fig. 3.6d.

5 – articulação esférica (S): é a articulação formada pelo acoplamento de uma esfera em uma calota esférica, sendo que ambas possuem raios geométricos com valores muito próximos. Esse tipo de articulação possui três graus de liberdade, todos de rotação, sendo que um deles refere-se à rotação em torno de seu próprio eixo, Fig. 3.6e.

6 – articulação planar (E): é um tipo de articulação com três graus de liberdade. Hunt (1990) classifica esse tipo de articulação como sendo um caso especial de uma articulação esférica, considerando que os dois planos em contato são porções de superfícies esféricas de

raio infinito. Hartenberg e Denavitt (1964) dizem que as variáveis desse tipo de articulação são duas translações e uma rotação (perfazendo os três graus de liberdade da articulação). Por outro lado, Hunt (1990) diz que o movimento planar não deve ser considerado como sempre sendo composto de duas translações e uma rotação e faz a observação que, de acordo com o tipo de coordenadas que se utiliza, pode-se ter duas rotações e apenas uma translação, no caso de coordenadas polares, Fig. 3.6f.

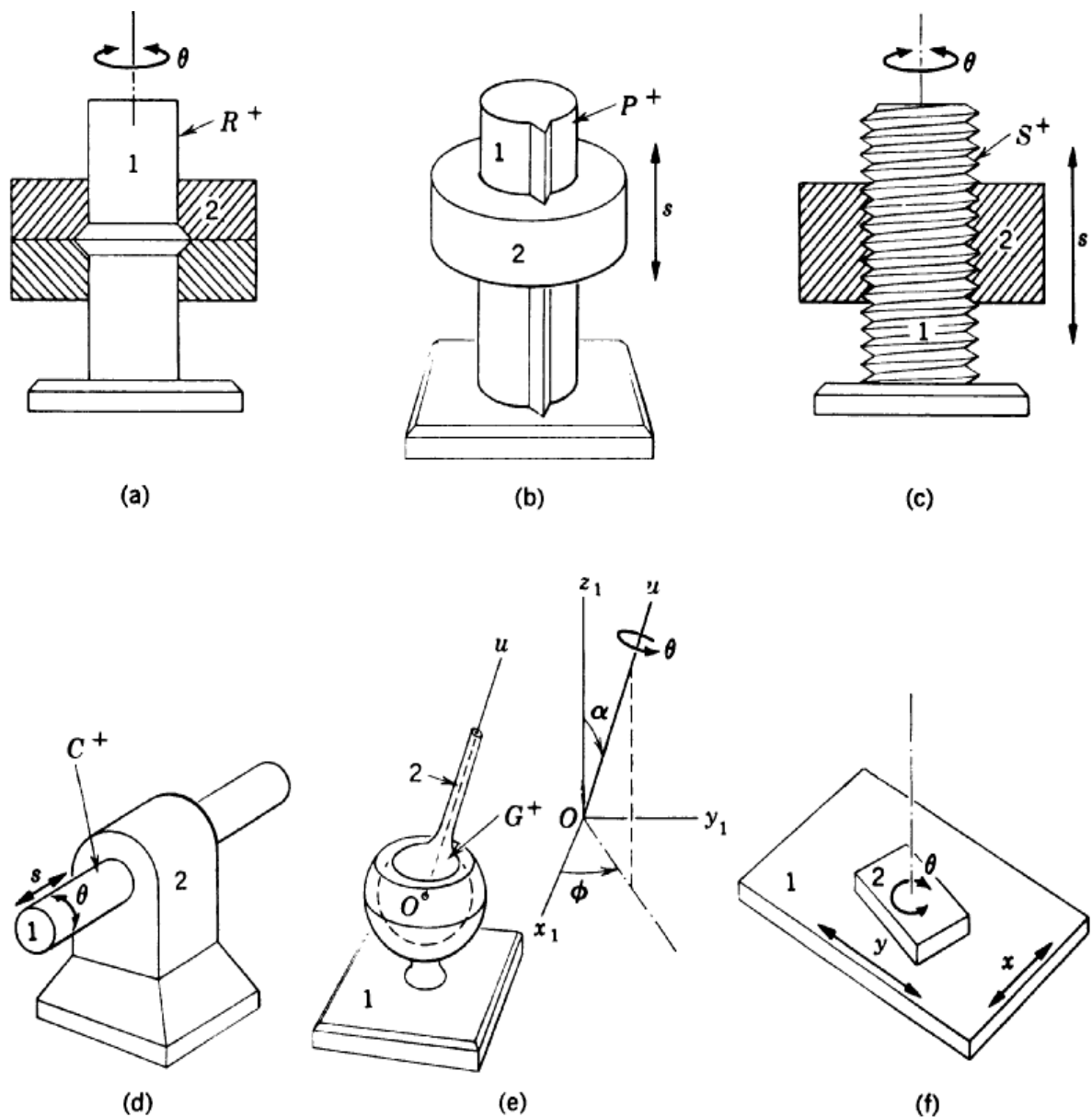


Figura 3.6: Tipos de articulações (pares inferiores): (a) de rotação, (b) prismática, (c) do tipo parafuso, (d) cilíndrica, (e) esférica e (f) planar (HARTENBERG; DENAVIT, 1964).

3.3 – Tipos de mecanismo

Há inúmeras formas de se classificar os mecanismos. A classificação tem por objetivo agrupá-los em função de características comuns, de forma que o modelo de classificação adotado seja capaz de auxiliar o projetista a escolher determinada forma de mecanismo, tendo em vista a aplicação desejada. Segundo Hartenberg e Denavit (1964), dois importantes grupos de classificação dos mecanismos são os denominados *funcionais* e os *estruturais*. Os funcionais levam em conta apenas a tarefa proposta, ou seja, o tipo de movimento gerado pelo mecanismo. Por outro lado, a classificação estrutural considera o movimento relativo de cada barra do mecanismo. Outras formas de classificação têm sido utilizadas tais como a classificação quanto ao seu número de barras (de quatro barras, de cinco barras, etc.), quanto ao espaço de trabalho (planos ou espaciais), ou ainda quanto à transformação de movimento que promovem.

Um mecanismo pode transformar o movimento de entrada de duas maneiras distintas. Considerando-se que a entrada de movimento é uniforme, a saída de movimento pode ser:

a – uniforme: quando o movimento de entrada é igual ao movimento de saída, como é o caso de quando se faz uso de engrenagens circulares, da transmissão por elementos flexíveis (correias e correntes) ou ainda de mecanismos do tipo paralelogramo.

b – não-uniforme: quando o movimento de entrada é diferente do movimento de saída, como no caso da transmissão de movimento por cames, engrenagens não circulares, entre outros.

Quanto ao número de barras, pode-se ter mecanismos com as mais diversas configurações, sejam eles planos ou espaciais. A título de ilustração, na Fig. 3.7 está apresentado um mecanismo plano de seis barras, denominado de mecanismo de Stephenson, onde a barra um é a barra fixa. Outro mecanismo de seis barras também muito conhecido é o mecanismo de Watt, apresentado anteriormente na Fig. 3.2. Nos dois casos, os mecanismos possuem apenas articulações de rotação. Um exemplo de um mecanismo espacial é o mecanismo do tipo RRSC, onde a sequência de articulações é: duas articulações de rotação, seguidas por uma articulação esférica e uma articulação cilíndrica. Ao menos em teoria, de acordo com as necessidades do projetista, ou até mesmo de acordo com suas preferências, sempre respeitando certos limites, pode-se construir um mecanismo para atendê-las.

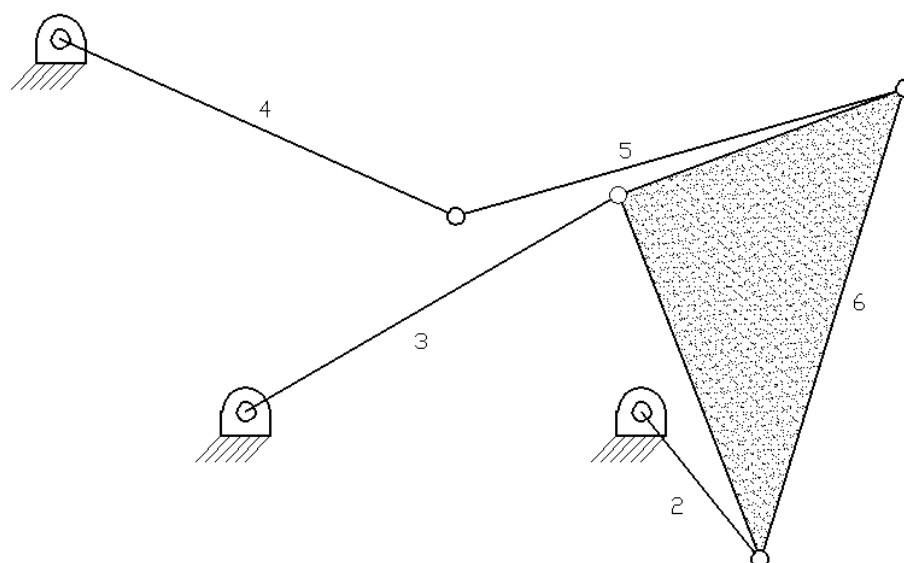


Figura 3.7: Mecanismo de Stephenson.

3.4 – Número de graus de liberdade de um mecanismo

O número de graus de liberdade de uma cadeia cinemática pode ser definido como sendo um número inteiro que corresponde ao número mínimo de coordenadas independentes (coordenadas generalizadas) necessárias para especificar, geometricamente, a configuração da cadeia cinemática (ANGELES, 1978). É uma variável muito importante, principalmente quando se deseja relacionar as variáveis de entrada no mecanismo com as variáveis de saída. Uma situação possível é que, dependendo da configuração da estrutura, não exista uma correspondência direta entre apenas uma variável de entrada e a variável de saída como, por exemplo, no caso do mecanismo apresentado na Fig. 3.8. Nesse caso não é suficiente que o mecanismo tenha apenas uma variável de entrada, ou seja, apenas um grau de liberdade. Isso ocorre devido ao número elevado de barras binárias que há separando a entrada da saída de movimento.

O número máximo de graus de liberdade que um par cinemático pode possuir depende do tipo de articulação utilizada no mecanismo. Um par superior pode ter no máximo cinco graus de liberdade, sendo dois de translação e três de rotação. Isso ocorre para um par superior que tem apenas um ponto de contato entre os corpos rígidos. Já os pares inferiores, nos quais o contato se dá em porções significativas da área da superfície de contato, podem ter três graus de liberdade ou menos. Assim, fica evidente a necessidade de se conhecer os diferentes tipos de articulações presentes na estrutura, quando se deseja descrever o

movimento de um dado corpo do mecanismo, em relação a um referencial fixo, mesmo que o corpo em estudo não seja adjacente à barra fixa.

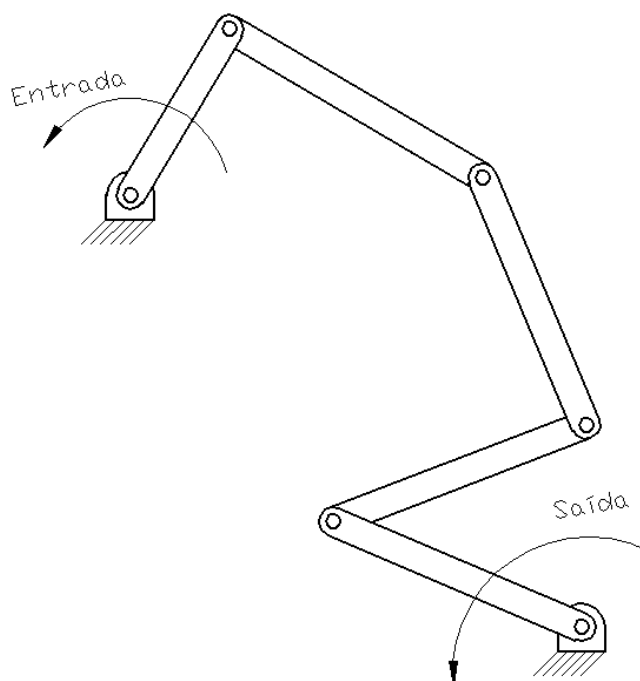


Figura 3.8: Mecanismo sem restrição.

Um conceito importante na análise dos mecanismos consiste na mobilidade. Esse conceito pode ser definido como sendo o número de variáveis de entrada que podem ser controladas, a fim de se levar o sistema mecânico a uma posição particular. Há quem denomine mobilidade como sendo o número de graus de liberdade de um mecanismo. A princípio, a mobilidade de qualquer sistema mecânico pode ser prevista.

Sabe-se que para se posicionar um corpo rígido livre no espaço, há a necessidade de se conhecer seis coordenadas independentes do mesmo, sendo que a natureza dessas coordenadas depende do referencial adotado. Comumente adotam-se três translações e três rotações. Desta forma, para n corpos livres no espaço, tem-se uma quantidade de graus de liberdade igual a $6n$. Se os n elementos forem acoplados, de forma que o início de uma barra seja preso no final de outra, o número total de graus de liberdade da estrutura é reduzido em função do tipo de articulação utilizada. Essa redução do número de graus de liberdade acontece porque o deslocamento de cada elemento deixa de ser independente. Fixando o primeiro elemento, de forma a definir a barra fixa, sempre presente em um mecanismo, acontece uma redução do número total de graus de liberdade da cadeia cinemática. Nesse

caso, há uma redução de seis graus de liberdade, já que a barra não está mais livre no espaço. Assim, pode-se calcular a mobilidade do mecanismo através da seguinte equação (HUNT, 1990):

$$M = 6(n-1) - \sum_{i=1}^g u_i \quad (3.2)$$

Onde n representa o número de corpos rígidos do mecanismo, u representa o número de movimentos restritos por cada articulação que une os corpos, e g representa o número total de articulações do mecanismo.

O número de restrições impostas pelas articulações, u , somado ao número de graus de liberdade da articulação, f , é igual ao máximo número de variáveis independentes que o corpo rígido pode ter, ou seja:

$$u + f = 6 \quad (3.3)$$

Desta forma, inserindo-se a Eq. (3.3) na Eq. (3.2), tem-se:

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (3.4)$$

Eliminando-se o somatório da Eq. (3.4), e considerando a presença de articulações com um, dois, ou ainda três graus de liberdade, a Eq. (3.4) pode ser reescrita na forma:

$$M = 6(n - 1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3 \quad (3.5)$$

Onde J_1 , J_2 e J_3 representam o número de articulações do mecanismo que possuem um, dois e três graus de liberdade, respectivamente. Para o caso de mecanismos planos, o multiplicador seis das Eq. (3.4) e (3.5) torna-se três, pois um corpo livre em um plano tem apenas três graus de liberdade de forma que, para o caso plano, a Eq. (3.4) torna-se:

$$M = 3(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (3.6)$$

No caso de mecanismos planos de quatro barras, como cada articulação permite apenas um grau de liberdade, a Eq. (3.6) pode ser escrita como:

$$M = 3(n - 1) - 2g \quad (3.7)$$

A Eq. (3.7), como apresentada acima, é uma variante da denominada equação de Grübler para mecanismos com articulações de rotação. Essa equação é idêntica à equação proposta por Silvestre, e foi uma das equações mais utilizadas para se estudar a mobilidade de mecanismos. No entanto, como sempre houve uma grande quantidade de mecanismos para os quais essa equação não era satisfeita, sempre foram surgindo evoluções de equações anteriores, sendo que uma das mais significativas foi dada por Hochman. Uma das evoluções da equação de Grübler foi desenvolvida por Kutzbach, que consiste em uma particularização da equação de Hochman (GOGU, 2005). Essa contribuição acabou dando origem à equação de Grübler-Kutzbach, apresentada na Eq. (3.4). A equação de Grübler-Kutzbach é uma equação geral, e representa o *critério geral da mobilidade* (HUNT, 1978). Uma revisão detalhada do número de graus de liberdade em mecanismos articulados é apresentada por Gogu (2005).

É importante observar que, quando se calcula a mobilidade de um mecanismo, o valor resultante deve ser um número inteiro qualquer, podendo assumir desde o valor nulo, a valores positivos e até mesmo valores negativos. Ora, quando a equação de mobilidade retorna um valor positivo, esse valor representa, como já foi mencionado, o número de variáveis de entrada que devem ser controladas para que se tenha um mecanismo que também possa ser controlado. Se a equação resulta em zero, quer dizer que há a possibilidade de que a estrutura em análise não seja um mecanismo, mas sim uma estrutura estaticamente definida, ou seja, sem movimento relativo entre suas barras. Por outro lado, quando se obtiver um valor negativo para a mobilidade, implica que novamente se trata de uma estrutura e não um mecanismo. Só que, nesse caso, a estrutura é hiperestática. Essa análise deve ser feita com muito cuidado pois há mecanismos nos quais essas equações não podem ser aplicadas, como será mostrado mais adiante.

3.5 – Mecanismos de quatro barras do tipo 4R

Os mecanismos de quatro barras têm sido muito estudados, como também são usados nas mais diversas aplicações, como em limpadores de pára-brisas, na plaina limadora para

usinagem (na forma de um mecanismo de retorno rápido), nos motores de combustão interna, na suspensão do automóvel, em retroescavadeiras, no trem de pouso de aviões, entre inúmeras outras aplicações. São temas de diversos trabalhos científicos, sendo usados até mesmo como base para a modelagem de pernas robóticas, como apresentado em Song et al (1984), que descreve a utilização de um mecanismo pantográfico para a aplicação em um robô móvel.

Os mecanismos de quatro barras podem ser projetados nas mais diferentes formas e tamanhos. São relativamente simples, baratos e fáceis de se manter. Podem trabalhar tanto a altas como a baixas velocidades bem como podem transmitir pouca ou muita potência e ainda podem operar em todos os tipos de ambiente. Isso demonstra que são mecanismos muito versáteis apesar de serem relativamente simples (MABIE, 1980, GROSJEAN, 1991).

Um mecanismo de quatro barras do tipo 4R consiste basicamente em quatro barras, geralmente consideradas rígidas, ligadas por articulações de rotação, sendo que em uma dessas articulações é instalada uma fonte motora para o acionamento do mecanismo. Uma das quatro barras do mecanismo é fixa em relação às demais.

O mecanismo de quatro barras pode ser facilmente invertido liberando-se a peça fixa e fixando-se uma peça que era inicialmente móvel. Esse procedimento logicamente resulta em quatro possíveis configurações para o mecanismo de quatro barras. Estudando as inversões do mecanismo plano, Grashof (1983) desenvolveu uma metodologia que permite que se conheça previamente como se comportará o mecanismo, considerando-se apenas as dimensões das barras do mesmo. Um exemplo dessas quatro possíveis configurações para um mecanismo plano de quatro barras, em função de suas inversões, é apresentado na Fig. 3.9.

Denotando o comprimento da menor barra por a , e o comprimento da maior barra por b , e o das outras duas por c e d respectivamente, segundo o critério de Grashof, tem-se que: se a soma dos comprimentos da maior e da menor barra for menor ou igual do que a soma dos comprimentos das outras duas, ou seja, se $a + b \leq c + d$ o mecanismo formará:

***a** – dois mecanismos do tipo manivela balancim, diferentes, quando a menor peça for a manivela e qualquer das peças adjacentes for a peça fixa, Fig. 3.9a e Fig. 3.9c.*

***b** – um mecanismo manivela dupla quando a menor peça for a fixa, Fig. 3.9b.*

***c** – um mecanismo balancim duplo quando a peça oposta à menor for a peça fixa, Fig. 3.9d.*

Os mecanismos de quatro barras conectados por articulações de rotação podem ser classificados em três grandes grupos: os mecanismos planos de quatro barras, os mecanismos

esféricos de quatro barras, e por último os mecanismos espaciais de quatro barras, cada um com suas particularidades que serão tratadas a seguir.

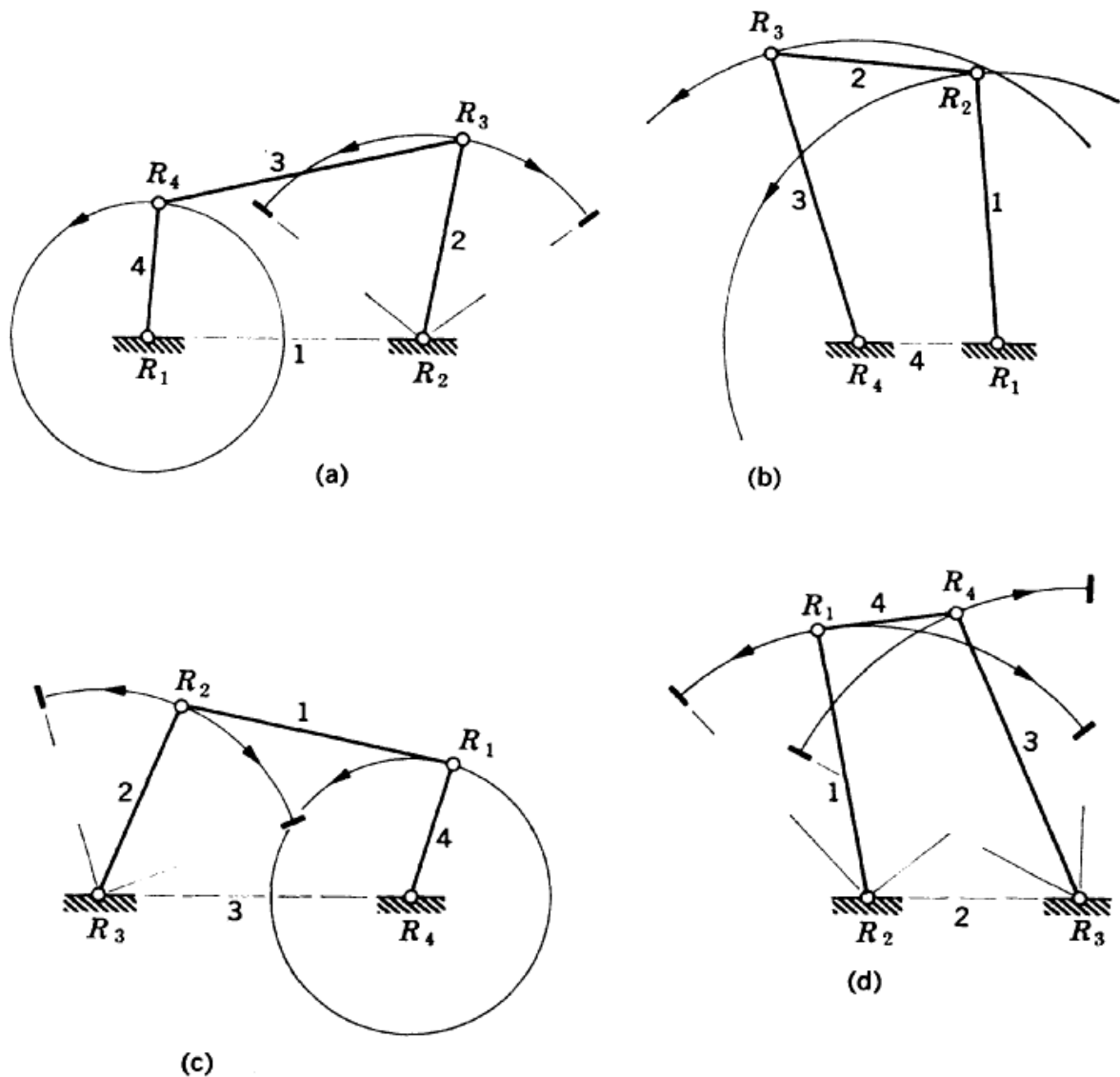


Figura 3.9: Inversões do mecanismo plano de quatro barras. Menor barra: 4; Maior barra: 3. (a) manivela balancim, (b) manivela dupla, (c) manivela balancim e (d) balancim duplo.

3.5.1 – Mecanismo plano de quatro barras

A principal particularidade de um mecanismo plano de quatro barras é que os eixos de rotação das articulações permanecem sempre paralelos durante toda movimentação do mecanismo. Por essa razão também são denominados de mecanismos de quatro barras cilíndricos. Os mecanismos planos são os mais estudados, sendo que diversos trabalhos foram, e ainda são, publicados fazendo referência ao uso desse tipo de mecanismo nas mais

diversas aplicações. A Fig. 3.10 ilustra o desenho esquemático de um mecanismo plano de quatro barras, denominado de mecanismo de Whitworth. Este mecanismo também é classificado como sendo um mecanismo de retorno rápido. Essa denominação dá-se em função dos ângulos da manivela relativos ao avanço e ao retorno do cursor. É um mecanismo que está presente na plaina limadora.

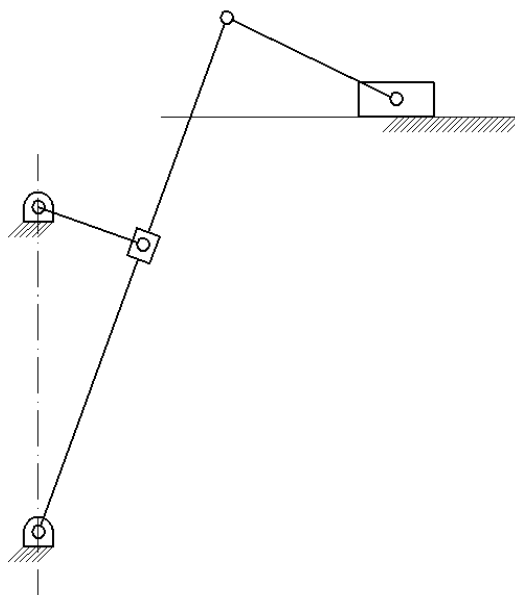


Figura 3.10: Mecanismo de Whitworth.

3.5.2 – Mecanismo esférico de quatro barras

No mecanismo esférico de quatro barras, os quatro eixos das articulações são concorrentes em um só ponto, de forma que o movimento do mecanismo tem como sua principal característica de movimento esférico a invariabilidade do triângulo formado pela união entre dois vértices e o ponto de concorrência dos eixos de rotação, ou o centro da esfera, durante todo o movimento. Um exemplo prático desse tipo de mecanismo é a articulação de Hooke. Há diversos trabalhos que enfocam esse tipo de mecanismo como, por exemplo, os apresentados por Al-Widyan e Angeles (2003), por Lu e Hwang (1996), e ainda por Alizade e Kilit (2005). A Fig. 3.11 ilustra esse mecanismo.

3.5.3 – Mecanismo espacial de quatro barras

No mecanismo espacial de quatro barras os eixos de rotação nem são todos paralelos, nem são todos concorrentes em um só ponto. Nesse caso, há a necessidade de que relações geométricas sejam satisfeitas para que o mecanismo possa se mover com um grau de liberdade. Essa categoria de mecanismo de quatro barras com articulações de rotação é

recente, datando do início do século XX (BENNETT, 1903). Esse tipo de mecanismo tem sido tema de alguns trabalhos no meio científico, como os apresentados por Baker (1979) e também por Perez e McCarthy (2000). Na Fig. 3.12, apresentada por Ho (1977), é ilustrado um mecanismo espacial de quatro barras. Esse mecanismo também é denominado mecanismo de Bennett, em função de seu descobridor, e será tratado separadamente no próximo item.

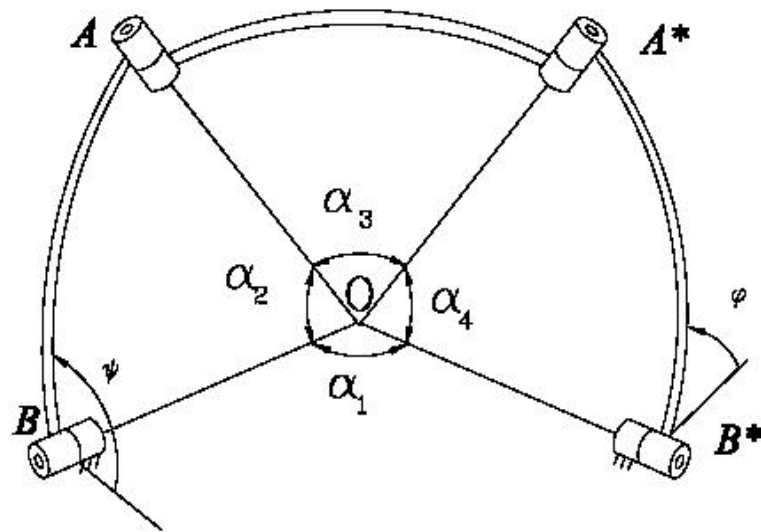


Figura 3.11: Mecanismo esférico de quatro barras (AL-WIDYAN; ANGELES, 2003).

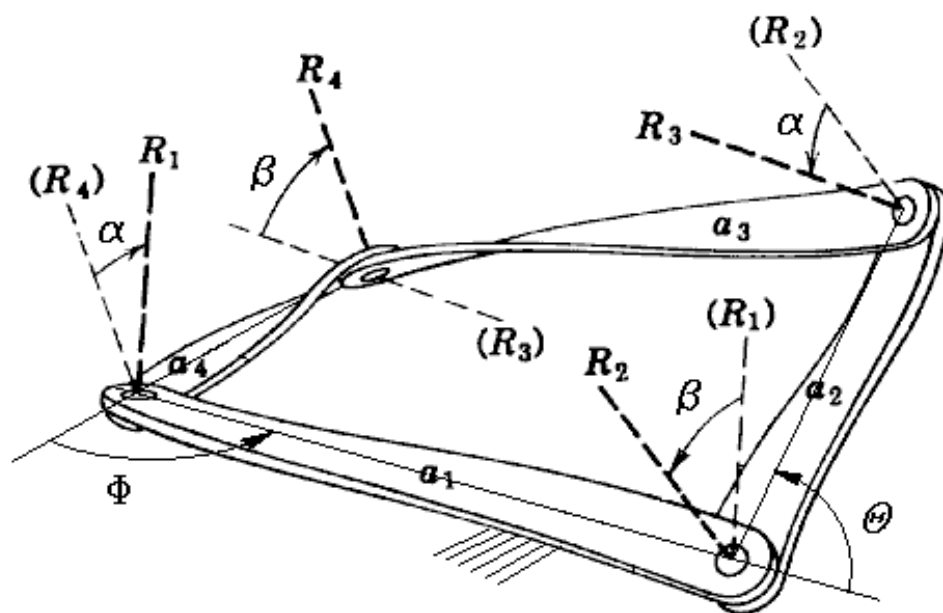


Figura 3.12: Mecanismo espacial de quatro barras – Mecanismo de Bennett (HO, 1977).

3.6 – Mecanismo de Bennett

Até 1903, quando G. T. Bennett, um matemático britânico, apresentou formalmente sua descoberta (BENNETT, 1903), existiam apenas dois tipos de mecanismos de quatro barras, que eram os mecanismos planos, ou cilíndricos e os mecanismos esféricos. Essa nova descoberta culminou no surgimento de uma nova categoria de mecanismos do tipo 4R, que são os mecanismos espaciais de quatro barras do tipo 4R, nos quais, como mencionado anteriormente, os eixos das articulações não são nem concorrentes em um só ponto, nem paralelos. Nesse caso, a existência do mecanismo está condicionada apenas a relações geométricas de sua estrutura física.

A montagem de um mecanismo de quatro barras do tipo 4R, feita de uma maneira diferente das duas formas anteriormente conhecidas, não produzia nenhum mecanismo, mas sim uma estrutura completamente rígida. No entanto, Bennett (1903) descobriu que há uma configuração diferente das demais, na qual um mecanismo plano 4R é torcido, de forma que, seguidos alguns requisitos básicos, a estrutura passa a se mover com apenas um grau de liberdade. Segundo Bennett (1903), há duas características geométricas essenciais para a existência desse mecanismo, que se baseiam no ângulo de torção entre os eixos de rotação e no tamanho da menor distância, ou da perpendicular comum, entre os eixos de rotação. Para que esse mecanismo exista essas duas variáveis devem obedecer às seguintes condições:

a – duas barras alternadas devem possuir o mesmo comprimento a e o mesmo ângulo de torção α entre suas articulações;

b – as outras duas barras alternadas também devem possuir o mesmo comprimento b e o mesmo ângulo de torção β entre suas articulações;

c – os comprimentos e torções são tais que satisfaçam a relação:

$$\frac{\sin(\alpha)}{a} = \frac{\sin(\beta)}{b} \quad (3.7)$$

Bennett descobriu que se fossem satisfeitas simultaneamente essas três condições, a estrutura proposta se moveria com um grau de liberdade. Na Fig. 3.12 foi apresentado o mecanismo de Bennett com seus parâmetros. Nessa figura também podem ser observados os ângulos de torção entre as articulações do mecanismo, os comprimentos das barras do mesmo e seus ângulos de entrada e saída, θ e ϕ . À medida que os ângulos entre as articulações vão

diminuindo, tendendo a zero, o mecanismo de Bennett tende a se tornar um mecanismo do tipo 4R plano. Nesse caso, tende a tornar-se um paralelogramo, já que as barras são iguais duas a duas. Esse é um caso limite do mecanismo de Bennett. Um outro caso limite acontece à medida que o maior ângulo de torção tende a se igualar a 180° , enquanto o menor ângulo tende a zero, formando um outro tipo de mecanismo plano, que consiste em uma forma de um paralelogramo cruzado, também denominado de antiparalelogramo.

É importante mencionar que, mesmo o mecanismo sendo composto por quatro barras iguais duas a duas, como no caso de um paralelogramo 4R, os ângulos de entrada θ e saída ϕ não são iguais. No entanto, quanto menores forem os ângulos de torção entre as articulações, mais próximos serão os ângulos θ e ϕ , já que, no caso limite (α e β iguais a zero), o mecanismo é equivalente a um paralelogramo. A relação entre os ângulos de entrada e saída também foi definida inicialmente por Bennett (1903) e, mais tarde, também foi deduzida por Baker (1979), que também estudou extensivamente as equações de fechamento do mecanismo. Essa equação de fechamento, apresentada por Baker é dada por:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} \quad (3.8)$$

Ainda segundo Baker (1979), o mecanismo de Bennett pode ser descrito por três equações independentes e, a partir destas três equações é que se obtém a Eq. (3.8).

Há quem classifique o Mecanismo de Bennett como sendo uma estrutura paralela, e há também quem o classifique como sendo um mecanismo de cadeia fechada. Mas conforme definição do IFToMM (The International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science), que define um manipulador paralelo como sendo um “manipulador que controla o movimento de seu órgão terminal por pelo menos duas cadeias cinemáticas do órgão terminal até a base”, o mecanismo de Bennett enquadra-se como uma cadeia cinemática fechada.

No que diz respeito à mobilidade, quando se utiliza a equação de Grübler-Kutzbach, Eqs. (3.3) e (3.4), para mecanismos do tipo 4R em três dimensões, sejam eles esféricos ou espaciais, obtém-se um valor negativo para a mobilidade. Por exemplo, da Eq. (3.3) tem-se:

$$M = 6(4 - 4 - 1) + \sum_{i=1}^4 f_i = -6 + (1 + 1 + 1 + 1) = -2$$

Esse resultado implica que o mecanismo assim montado não tem mobilidade alguma, pois é caracterizado como sendo uma estrutura hiperestática. Logicamente isso não é verdade, pois há muito é sabido que é perfeitamente possível se construir um mecanismo esférico e/ou espacial do tipo 4R que se move com apenas um grau de liberdade. Nesse caso, para que se encontre o verdadeiro valor da mobilidade desses mecanismos do tipo 4R, deve-se utilizar o critério geral da mobilidade para o caso de mecanismos planos, onde o número seis da equação (número mínimo de coordenadas necessárias para se posicionar um corpo no espaço) é alterado para três (número mínimo de coordenadas independentes necessárias para se posicionar um corpo no plano), ou seja:

$$M = 3(4 - 4 - 1) + \sum_{i=1}^4 f_i = -3 + (1 + 1 + 1 + 1) = 1$$

Este resultado demonstra que o estudo da mobilidade de mecanismos, sejam eles planos ou espaciais, é um assunto que ainda requer mais estudos para que possa apresentar resultados com uma confiabilidade razoável.

Apesar de o mecanismo de Bennett ser um mecanismo descoberto há mais de um século, ainda não existem muitos trabalhos científicos a seu respeito. No entanto, há trabalhos que estudam algumas de suas características particulares. Baker (2001) relata que o ser humano tem um ligamento no joelho que se comporta de maneira muito similar a um mecanismo de Bennett. Esse ligamento, apesar de não ser constituído inteiramente de elementos rígidos, possui um movimento muito similar ao do mecanismo de Bennett, e isso logicamente acaba por garantir um enorme potencial para o melhoramento das próteses utilizadas no joelho. Ho (1977) estudou a condição de existência do mecanismo de Bennett, Eq. (3.7), provando a veracidade da mesma, fazendo uso de uma análise tensorial. Perez e McCarthy (2000) apresentam uma síntese dimensional desse mecanismo que, segundo eles, consiste em um procedimento para se projetar o mecanismo de Bennett utilizando as equações de Veldkamp. Esses autores relatam que as duas soluções das equações de síntese de uma cadeia cinemática RR formam um mecanismo de Bennett. Segundo Perez e McCarthy (2000), Veldkamp resolveu essas equações para três posições simultâneas e mostrou que as duas

soluções formam um mecanismo de Bennett. Relatam ainda que Suh (1969) também resolveu essas equações de forma numérica e usando a geometria de ‘screw’, mostrando que nas duas situações a solução forma um mecanismo de Bennett. Em contrapartida, Tsai e Roth (1973) resolveram algebricamente as equações e também comprovaram que sempre há duas soluções que formam um mecanismo de Bennett (PEREZ; MCCARTHY, 2000).

Entretanto, apesar dos esforços feitos procurando compreender esse mecanismo, sua aplicação prática ainda é muito limitada. Uma das poucas citações consiste no manipulador construído tendo como base o mecanismo de Bennett, proposto por Wang (1989).

