

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL D
TESE DEFENDIDA POR Carlos André Dias
Bezerra E APROVADA PEL
COMISSÃO JULGADORA EM 21/02/2002
Douglas E. Zampieri
ORIENTADOR

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

Desenvolvimento de um Robô Bípede Para Locomoção em Ambiente Desestruturado

Autor: Carlos André Dias Bezerra

Orientador: Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri

05-2002

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

Desenvolvimento de Um Robô Bípede Para Locomoção em Ambiente Desestruturado

Autor: Carlos André Dias Bezerra

Orientador: Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri

Curso: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

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

Campinas, 2002

S.P. - Brasil

UNIDADE	30
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	B469d
V	
VALOR	48938
PREÇO	16.837,02
DATA	10/05/02
Nº CPD	

CM00167276-0

118 ID 239958

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

B469d

Bezerra, Carlos André Dias

Desenvolvimento de um robô bípede para locomoção
em ambiente desestruturado / Carlos André Dias Bezerra.
--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Douglas Eduardo Zampieri

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Análise de trajetória. 2. Planejamento. 3. Robótica.
4. Teoria dos autômatos. I. Zampieri, Douglas Eduardo.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

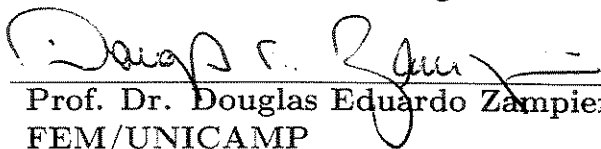
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

TESE DE DOUTORADO

Desenvolvimento de um Robô Bípede Para
Locomoção em Ambiente Desestruturado

Autor: Carlos André Dias Bezerra

Orientador: Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri



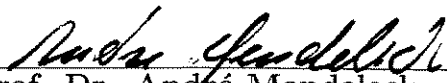
Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri, Presidente
FEM/UNICAMP



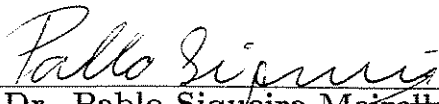
Prof. Dr. Alberto Adade Filho
ITA/CTA



Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho
DEMEC/UFU



Prof. Dr. André Mendeleck
IPEP



Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles
FEM/DMC

Campinas, 21 de Fevereiro de 2002.

002200050

Dedicatória

Para Sílvia: a minha amiga, esposa e amada mulher.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por tudo.

À minha esposa Sílvia pela companhia, inspiração e amor.

À minha família e da minha esposa pelo apoio.

Ao Prof. Douglas pela sua atenção, orientação e amizade, indispensáveis para a realização deste trabalho.

À CAPES, pela bolsa de estudos.

À FAPESP, pelos recursos gastos nesta pesquisa.

Ao Prof. André Mendeleck pela idéia e seus conhecimentos em eletrônica. Aos imprescindíveis bolsistas Daniel Carmona de Campos e Danilo Landucci Benzatti pela contribuição. Ao Prof. João Bosco Gonçalves, aos mestres José Fábio Abreu de Andrade e Antônio Fernando Abreu de Andrade e bolsistas do LSAM, pela amizade e longas conversas sobre o trabalho.

Ao Prof. Ricardo Machado de Barros e demais professores e colegas do LIB - Laboratório para Instrumentação em Biomecânica (FEF), pelos valiosos conhecimentos em Biomecânica.

Aos engenheiros Carlos Alfredo Batista de Campos e André Luiz Pissolatti do Centro de Tecnologia da UNICAMP por suas soluções criativas e pela fabricação dos robôs.

Aos meus amigos e suas respectivas, que para não cometer injustiças resolvi não citá-los aqui, mas que sempre estarão presentes nas entrelinhas deste trabalho.

Aos professores, funcionários do DMC e a todos que contribuíram para este trabalho, meus agradecimentos.

*“ Na verdade, os pensamentos dos mortais são tímidos
e nossas reflexões incertas: porque o corpo corruptível
torna pesada a alma, e essa tenda de argila oprime a
mente que pensa . . . ”*

Livro da Sabedoria

Resumo

Bezerra, Carlos André Dias, *Desenvolvimento de um Robô Bípede Para Locomoção em Ambiente Desestruturado*. Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 181 p. Tese (Doutorado).

Neste trabalho desenvolveu-se a concepção, modelagem, simulação, construção e implementação de um robô bípede, capaz de interagir com o ambiente através de sensores e desviar de obstáculos em seu ambiente de trabalho a princípio de localização desconhecida. A determinação da equação de movimento foi realizada através do método de Newton - Euler - Jourdain, que apresenta a vantagem da obtenção da equação de movimento sem a necessidade do conhecimento das forças internas entre as uniões dos segmentos que compõem o robô. Entre os experimentos realizados para validação da modelagem, incluem-se marcha em linha reta, realização de curvas e desvio de obstáculo de maneira autônoma, com o uso de sensores. Os materiais, métodos e resultados experimentais são apresentados na forma de fotos e figuras. Os resultados alcançados neste trabalho permitem o desenvolvimento de robôs capazes de se locomoverem e desviarem de obstáculos através de diferentes estratégias.

Palavras chaves: Modelagem, Robô Bípede, Sensores, Desvio de Obstáculo, Planejamento de Trajetória

Abstract

Bezerra, Carlos André Dias. *Development of a Biped Robot For Locomotion in a Unknown Environment*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. Tese (Doutorado).

In this work the conception, modeling, simulation, construction, and implementation of a biped robot has been developed. The robot was able to interact with the workspace through sensor and avoid obstacle in his workspace which was initially unknown. The determination of the motion equation was carried out using Newton-Euler-Jourdain, which presents advantages in the determination of motion equation without the necessity of knowing internal forces between the joints which are made the robot. Walk on a straight line, perform curves, and avoid obstacle in autonomous way, with the use of sensors are among the experiments carried out to validate the modeling. The materials, methods, and experimental results are presented by pictures and figures. As result of this work it can be develope biped robots able to move and avoiding obstacles through different strategies.

Key words:

Modelling, Biped Robot, Sensor based navigation, Deviation of Obstacle, Planning of Path.

Sumário

1	Introdução	1
2	Conceitos de Robótica e Biomecânica	4
2.1	Introdução	4
2.2	Histórico dos robôs	4
2.3	Estruturas mecânicas usadas em robótica	8
2.3.1	Manipuladores paralelos	10
2.3.2	Estruturas híbridas	11
2.4	Termos usados em biomecânica	12
3	Revisão da Literatura Sobre os Robôs Bípedes	21
3.1	Introdução	21
3.2	Robôs bípedes	21
3.3	Planejamento de movimento de robôs bípedes baseado em sensores	32
4	Modelagem Cinemática do RB-1	38
4.1	Introdução	38
4.2	Modelo cinemático	39
4.2.1	Matrizes de transformação de coordenadas	40
4.2.2	Posição das juntas	41
4.2.3	Velocidade angular absoluta das bases móveis	44
4.2.4	Velocidade e aceleração angular absoluta dos segmentos do RB-1 . . .	45
4.2.5	Velocidade linear absoluta das juntas	45
4.2.6	Aceleração linear absoluta das juntas	49

5	Modelagem Dinâmica do RB-1	55
5.1	Introdução	55
5.2	Método de Newton - Euler - Jourdain	56
6	Simulação computacional do RB-1	67
6.1	Introdução	67
6.2	Simulação cinemática	67
6.3	Simulação dinâmica	79
6.3.1	Método Newton - Euler - Jourdain	79
7	Robôs bípedes RB-1 e RB-2	87
7.1	Introdução	87
7.2	RB-1	87
7.2.1	Determinação do centro de gravidade do RB-1	90
7.3	RB-2	93
7.3.1	Modelo matemático	94
7.3.2	Estratégia de giro	94
7.3.3	Determinação do centro de gravidade do RB-2	96
7.3.4	Giro à direita e giro à esquerda	98
7.4	Simulação	99
8	Experimentos	102
8.1	Introdução	102
8.2	Materiais	103
8.2.1	Placa de controle dos servomotores	103
8.2.2	Sensores de infravermelho	107
8.2.3	Placa dos sensores	108
8.2.4	Softwares de interface	109
8.3	Planejamento automático de trajetórias do RB-2	111
8.3.1	Estratégia de desvio de obstáculos	112
8.4	Métodos	116

8.4.1	Marcha a frente do RB-2 sem os sensores	116
8.4.2	Giro à esquerda e à direita do RB-2 sem os sensores	118
8.4.3	Marcha a frente, giro à direita e à esquerda do RB-2 com sensores . . .	119
8.4.4	Realização da tarefa de desvio de obstáculo com RB-2 e sensores . . .	122
9	Conclusão	124
9.1	Trabalhos futuros	125
A	Método de Lagrange	139
A.1	Introdução	139
A.1.1	Princípio do trabalho virtual	139
A.1.2	Restrições Cinemáticas	141
A.1.3	Deslocamentos Generalizados	141
A.1.4	Princípio de Hamilton para sistemas conservativos	143
A.1.5	Estrutura da energia cinética e classificação das forças inerciais	145
A.1.6	Conservação de energia em sistemas com restrições escleronômicas . .	146
A.1.7	Classificação das forças generalizadas	147
A.1.8	Equação de Lagrange para o caso geral	151
A.2	Equação de Lagrange para RB-1	151
A.2.1	Centro de Gravidade	153
A.2.2	Energia Cinética	154
A.2.3	Energia Potencial	156
B	Listagens dos programas	161
B.1	Programa robo1.m	161
B.2	Programa robo1nej.m	170
B.3	Programa robo1lag.m	179
B.4	Programa rb2g*.m	183
B.5	Programa angle1.m	186
C	Desenho RB-1	187

Lista de Figuras

2.1	Estrutura Cartesiana Totalmente Paralela	10
2.2	Estrutura híbrida	11
2.3	Análise dos movimentos por Borelli (1608-79)	13
2.4	Planos cardeais	15
2.5	Nomenclatura adotada	16
2.6	Fases do ciclo da marcha	18
2.7	Indivíduo instrumentado realizando a marcha	19
4.1	(a) Representação do Robô Bípede; (b) Bases Móveis (Mita <i>et al.</i> , 1984) . .	39
4.2	Movimento de rotação em torno do eixo +Z da Base B1 para B2	40
5.1	Diagrama de Corpo Livre do RB-1	58
6.1	Determinação da posição do ponto C (joelho)	69
6.2	Diagrama do programa Robo1.m	70
6.3	Marcha do RB-1 : a)Regime transitório b)Regime permanente	71
6.4	Deslocamento das juntas no sistema inercial: trajetória senoidal	72
6.5	Deslocamento das juntas no sistema inercial: trajetória elíptica	72
6.6	Ângulos q_i x tempo (pés trajetória senoidal)	73
6.7	Ângulos q_i x tempo (pés com trajetória elíptica)	74
6.8	Velocidade das juntas x tempo (pés com trajetória senoidal)	75
6.9	Aceleração das juntas x tempo (pés com trajetória senoidal)	76
6.10	Velocidade das juntas x tempo (pés com trajetória elíptica)	77
6.11	Aceleração das juntas x tempo (pés com trajetória elíptica)	78
6.12	Diagrama do programa Robo1nej.m	80

6.13	Trajetoórias senoidal e elíptica do RB-1 a ser simulado dinamicamente	82
6.14	Torques nas juntas x tempo (trajeto�ria senoidal)	83
6.15	Torques nas juntas x tempo (trajeto�ria elíptica)	84
7.1	P� e Perna do RB-1	88
7.2	Coxa e Pelve do RB-1	89
7.3	Software de interface do RB-1	90
7.4	(a) Robô bípede RB-1 (b) Sistema de coordenadas do CG	91
7.5	Representação da trajeto�ria do CG do RB-1	94
7.6	(a) Robô bípede 2 (b) Representação RB-2	95
7.7	Representação do sistema de coordenadas do CG do RB-2	97
7.8	Representação da trajeto�ria do CG do RB-2	98
7.9	Vista superior (a) giro � direita; (b) giro � esquerda	100
7.10	ângulos do RB-2 para um giro � esquerda de 90�	101
8.1	Placa de controle	103
8.2	Servomotor Futaba S3801	104
8.3	Pulsos do servomotor S3801	105
8.4	ângulos do RB-2 sem correção	106
8.5	Sensor de infravermelho <i>X – Ortek�</i>	107
8.6	Localização dos sensores no RB-2	108
8.7	Placa de controle dos sensores no RB-2	109
8.8	Tela principal do software de interface rb2.exe	110
8.9	Tela principal do software de interface estrategia2.exe	111
8.10	Situação dos sensores do RB-2 : a) [100]; b) [010]; c) [001]	113
8.11	Fluxograma do algoritmo da estratégia de desvio de obstáculo	114
8.12	Representação do ambiente com obstáculo	114
8.13	Posições inicial e final da marcha no chão	117
8.14	Posições inicial e final da marcha na manta	118
8.15	Posições inicial e final do giro no chão	118
8.16	Posições inicial e final do giro na manta	119

8.17 Experimento no piso	120
8.18 Experimento no piso com adesivo	121
8.19 Experimento na manta de borracha EVA	122
A.1 Pêndulo duplo	142
A.2 Pêndulo duplo	147
A.3 Representação do Robô Bípede	152
A.4 Diferença entre os valores do torque	160

Lista de Tabelas

5.1	Atuadores	59
7.1	Parâmetros do RB-1	92
7.2	Centros de gravidade absolutos dos segmentos do RB-1	93
7.3	Parâmetros do RB-2	96
7.4	Centros de gravidade absolutos dos segmentos do RB-2	97
8.1	Servomotor S3801	104
8.2	Parâmetros d_p (mm) e d_r (graus)	117
8.3	Parâmetro ângulo girado em graus	119

Capítulo 1

Introdução

Os métodos de locomoção no solo incluem rodas, trilhos e pernas (Lum et al., 1999). A locomoção sobre pernas apresenta a característica da descontinuidade de contato com o solo, permitindo desviar de obstáculos, locomover em superfícies inclinadas e subir escadas. O ser humano pode andar em superfícies planas como também em solo irregular, como escadas ou rampas.

Para estudar os robôs que podem se locomover de modo semelhante ao ser humano, muitos pesquisadores realizaram estudos a respeito da locomoção humana (Hasegawa et al., 2000). Eles concordam que os robôs bípedes podem facilmente adaptar-se aos vários tipos de terrenos. Em teoria, os robôs bípedes podem ter a habilidade de movimento em ambientes desestruturados onde os humanos vivem e ainda, devido a sua característica antropomórfica, eles também podem fazer várias tarefas tais como supervisão, manutenção e assistência em todos os ambientes que o ser humano pode mover-se com as suas pernas (Sardain et al., 1998). Além disso, os robôs com pernas tem uma mobilidade muito eficiente, eles têm potencial para uso em ambiente industrial, como por exemplo, para transporte de passageiros e cargas em terrenos irregulares, resgate em desastres, operação em zonas perigosas, entre outros. Outro potencial dos robôs bípedes seria a substituição de uma parte do trabalho humano tais como afazeres domésticos ou ajudar idosos, porque o padrão bípede acessa qualquer ambiente onde o ser humano pode ir (Fujimoto, 1998; Lum et al., 1999). Portanto, o padrão bípede é o melhor para o ambiente do ser humano, sendo a locomoção do robô bípede uma das principais tecnologias necessárias para a construção de um andróide (Fujimoto, 1998).

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para

a concepção, modelagem, simulação e construção de um robô bípede capaz de interagir com o ambiente através de sensores e desviar dos obstáculos, bem como a implementação de uma estratégia de desvio de obstáculos. Neste contexto, foram desenvolvidos dois robôs: o RB-1 e o RB-2 . O trabalho foi dividido em nove capítulos além deste.

No segundo capítulo são apresentados alguns conceitos inerentes às estruturas mecânicas usadas em robótica, com a respectiva nomenclatura. A nomenclatura usada para as partes físicas do RB-1 e RB-2 é a mesma usada na ciência Biomecânica, devido à semelhança da estrutura e do movimento humano.

O terceiro capítulo tem como objetivo descrever o estado da arte dos principais robôs, desde os primeiros estudos concentrados na análise teórica da locomoção e projeto conceitual de máquinas de andar com duas pernas até os robôs mais recentes.

No quarto capítulo são descritos os métodos e princípios utilizados para a determinação dos centros de gravidade do RB-1 e do RB-2 . Eles são utilizados na determinação da projeção do centro de gravidade do robô no solo, necessário para manter o equilíbrio estático, e na matriz de inércia, necessária ao modelo dinâmico.

No quinto capítulo é descrito como o RB-1 foi projetado a partir da revisão bibliográfica realizada. Ele é capaz de realizar a marcha no plano sagital no modo estaticamente estável utilizando servomotores . Ele foi projetado para ter desenho de forma inédito. Também é determinado o modelo cinemático do RB-1 . No modelo cinemático são determinadas a posição, velocidade e aceleração angulares de cada junta de rotação do robô, como também a posição, velocidade e aceleração lineares dos pontos que representam o centro geométrico de cada junta e dos pontos que representam os centros de gravidade de cada segmento. A determinação destas grandezas é feita utilizando-se as matrizes de transformação homogênea, para a transformação de coordenadas entre diferentes sistemas de referência móveis e fixo.

A determinação da equação de movimento do RB-1 é apresentada no sexto capítulo, onde é introduzido o método de Newton - Euler - Jourdain , que consiste no princípio da potência virtual, para a modelagem dinâmica do RB-1 . Os ângulos entre cada segmento são adotados como coordenadas generalizadas. Assim como o método de Lagrange , esse método apresenta a vantagem da obtenção da equação de movimento sem a necessidade do conhecimento das forças internas entre as uniões dos segmentos que compõem o robô.

No capítulo sete, é realizada a simulação computacional do RB-1 utilizando-se as equações da modelagem cinemática e dinâmica. Os valores numéricos obtidos na simulação cinemática (posição, velocidade e aceleração angulares) são usados como os dados de entrada para a simulação dinâmica, que foi realizada utilizando o método de Newton - Euler - Jourdain . São apresentados gráficos com os resultados das simulações.

O capítulo oito é dedicado ao RB-2 . Para possibilitar que o RB-1 desvie de obstáculo realizando curvas, foram adicionados mais dois graus de liberdade, transformando-o em RB-2. A modelagem cinemática e dinâmica são as mesmas usadas no RB-1 , com a inclusão dos novos graus de liberdade. São realizadas as simulações para os novos tipos de movimento do RB-2 : curvas à esquerda e à direita. A estratégia de giro à direita e à esquerda são apresentadas.

No capítulo nove são apresentados os materiais, o planejamento automático de trajetória e os métodos utilizados na obtenção dos resultados experimentais. Através dos experimentos realizados com o RB-1 foi possível implementar e testar o software e hardware para o controle dos servomotores , necessários para a realização da marcha no plano sagital. Já os experimentos realizados com o RB-2 foram a marcha, a curva à esquerda e a curva à direita no plano sagital. O objetivo foi validar a modelagem realizada com o RB-2 e o planejamento automático de trajetórias com o uso de sensores.

No décimo capítulo são apresentados a conclusão e os trabalhos futuros que poderão ser realizados. Após a bibliografia encontram-se os anexos, onde estão as listagens dos programas desenvolvidos em Matlab® e o desenho do RB-1 .

Capítulo 2

Conceitos de Robótica e Biomecânica

2.1 Introdução

Neste capítulo serão abordadas algumas definições necessárias para o entendimento do texto. As definições serão apresentadas na medida que o texto se desenvolve. Alguns conceitos inerentes às estruturas mecânicas usadas em robótica são apresentados, com a respectiva nomenclatura. A nomenclatura usada para as partes físicas do RB-1 e RB-2 será a mesma usada na ciência Biomecânica, devido à semelhança da estrutura e do movimento humano, evitando-se assim, a criação de novos termos.

2.2 Histórico dos robôs

Apesar de se ter notícia da existência de autômatos desde as primeiras civilizações e que a palavra robô tenha aparecido no início do século XX, somente na década de setenta é que surgiram os primeiros robôs bípedes. De uma forma geral, a palavra robô é comumente associada a uma máquina com aparência e ações semelhantes as do ser humano, porém bem mais inteligente e perfeita. Atualmente isso só ocorre na ficção científica. Conforme tem sido observado nos últimos anos, os robôs consistem em dispositivos mecânicos desenvolvidos para auxiliar o homem em atividades industriais, militares e didáticas. É interessante salientar em um breve histórico, alguns fatos a respeito dos primeiros dispositivos automáticos ou autômatos.

Desde a antigüidade a humanidade tem-se fascinado por mecanismos capazes de reproduzir o comportamento humano e/ou animal, realizando as mesmas tarefas e movimentos

com a mesma perfeição. Como exemplo pode-se citar : no Egito foi descoberto por arqueólogos, um cachorro mecânico de brinquedo com a mandíbula controlada através de alavanca, datando de aproximadamente 2000 AC. Homero, no 18º livro da *Ilíada*, descreve as assistentes do deus dos ferreiros, Hephaestus, como “virgens de ouro, vivendo como mulheres, com inteligência, voz, com a energia de uma serva, com habilidades de imortais e montadas em tripés com rodas que lhes permitiam movimentar, . . . uma maravilha para os olhos”. Por volta de 500AC os bizantinos ergueram em Gaza um enorme relógio movido a água, no qual a figura de Hércules golpeava um sino de maneira automática (Sandler, 1991). Uma primeira aproximação de andróide é atribuída a Albertus Magnus (1200-1280) que criou um homem de ferro. No século XV foi criada a denominada “verdadeiramente fonte portátil de energia mecânica- a mola de aço (Sandler, 1991). Esta fonte de energia estimulou a criação de inúmeros autômatos mecânicos sofisticados. Em 1770, Henri Jacquet-Droz, seu irmão Pierre, seu neto Henri-Louis e Jean-Frederic Leshot construíram um grupo de bonecos, semelhantes aos homens, controlados por cames e movidos por molas, que podiam tocar instrumentos musicais, escrever e até desenhar. Alguns desses autômatos podem ser vistos em museus, como por exemplo o autômato em forma de um tigre na posição de ataque, que se encontra no museu Vitória e Carlos, em Londres. Um outro autômato conhecido é o “Pato e o flautista”, de Jacques de Vaucanson (1709-1782), que é capaz de tocar uma dúzia de canções. Na Espanha, havia um autômato de madeira na forma de um boneco, que percorria o trajeto de ida e volta até o palácio arcebispo de Toledo fazendo reverências. Foi construído pelo relojoeiro de Carlos I, Juanelo Turriano (Wolovich, 1985).

Todos estes exemplos mostram a intenção do homem em produzir um autômato, à sua semelhança ou de máquinas, capaz de realizar tarefas e movimentos com perfeição e repetibilidade, de acordo com os costumes da época, porém limitados pela tecnologia disponível.

No século XX, com o contínuo avanço no campo tecnológico, a idéia de produzir um autômato com forma e comportamento humano, ainda persistiu. Mas foi no campo literário da ficção científica que este autômato surgiu e, juntamente com ele, a palavra robô. Ela foi derivada da palavra tcheca “robota” ou “robata”, sinônimo de trabalho escravo, que surgiu pela primeira vez em 1917, na obra de ficção científica *Opilek* e três anos depois na satírica peça teatral *R.U.R. - Rossum's Universal Robot*, ambas do escritor tcheco Karel

Capek. A peça narrava a estória de um excêntrico cientista chamado Rossum e seu filho, que fabricavam humanos artificiais semelhantes a máquinas, denominados de robôs, para realizarem trabalhos escravos. O foco da peça é uma revolta dos robôs, destruindo os humanos e seu inevitável desaparecimento, devido a incapacidade de se reproduzirem. O trabalho de Capek é notável até hoje devido a introdução da palavra robô, para representar mecanismos com movimentos e habilidades, como seres humanos. Nos países de língua slava, slavos ou tchecos, a palavra *robot* significa trabalhador, embora nos dias atuais signifique tanto humano como mecânico (Snyder, 1985). A partir da obra de Capek surgiram outras histórias de cunho literário, onde os robôs tornavam-se personagens “más e destruidoras”. Estas histórias com robôs inteligentes e perversos refletiam o descontentamento com o rumo da tecnologia, principalmente com os mecanismos utilizados durante e após a I guerra mundial e também com o possível desemprego provocado pela utilização de máquinas modernas, que dispensavam a contratação de mão de obra.

Aos poucos a imagem dos robôs começaria a mudar. Os autores de ficção científica começaram a ver os autômatos com bons olhos e em favor do melhoramento das condições de vida da sociedade. A partir de 1940, Isaac Asimov e John Campbell publicaram várias histórias e artigos de ficção científica, descrevendo os robôs como máquinas bem comportadas e inteligentes que seguem fielmente as instruções e comandos humanos. Suas obras contribuíram para a difusão do robô como uma máquina semelhante ao homem e com grandes virtudes. Como exemplo, pode-se citar: *I, Robot* (Asimov, 1950), que retrata a terra após o ano 2000, onde os robôs fazem parte da vida cotidiana, possuindo forma antropomórfica e dotados de voz e sentimentos. Convém notar que os trabalhos de Asimov e Campbell são contemporâneos ao surgimento do computador. Asimov e Campbell aplicaram pela primeira vez o termo “robótica” para denotar o estudo de robôs. Definiram também as três leis éticas da robótica, que jamais são negligenciadas por um robô em seus livros. Estas três leis são :

1ª Lei : Um robô não fará mal a um ser humano, nem por omissão, permitirá que o ser humano seja ferido.

2ª Lei : Um robô obedecerá as ordens dadas pelos humanos, exceto se tais ordens conflitarem com a primeira lei.

3ª Lei : Um robô protegerá sua própria existência, até o instante em que tal ação conflite

com as duas primeiras leis.

No campo científico, o surgimento dos robôs foi precedido por evoluções e inovações nas técnicas de fabricação de dispositivos e de resolução dos modelos matemáticos. Os primeiros robôs foram construídos com forma semelhante ao braço humano, possuindo a forma serial na união de seus segmentos. Eram teleoperados e/ou utilizavam técnicas semelhantes às máquinas de comando numérico. Os robôs teleoperados foram desenvolvidos durante a segunda guerra mundial, com a finalidade de manipular materiais radioativos. As máquinas de CNC (*Computer Numerical Control*) foram desenvolvidas para atender a demanda de peças com alta precisão, exigidas, principalmente, pela indústria aeronáutica. Somente em 1954 que George Devol projetaria o primeiro robô programável e a partir de 1960, a teoria de mecanismos espaciais começou a despertar um maior interesse acadêmico, principalmente com a introdução dos robôs industriais.

Recentemente, com os avanços extraordinários em eletrônica e computadores, muitas dificuldades encontradas em robótica foram solucionadas ou minimizadas, tanto na fabricação de dispositivos elétricos e/ou mecânicos, como no desenvolvimento de ferramentas matemáticas e computacionais. De fato, os mecanismos espaciais deixaram de ser restritos aos interesses acadêmicos e passaram a despontar como alternativas modernas para aumentar a segurança, a produtividade e a qualidade dos meios de produção, atendendo a uma demanda crescente do mercado. Apesar do grande nível tecnológico alcançado, algumas dificuldades relacionadas ao controle de robôs, ainda permanecem passíveis de soluções.

Portanto, desde o surgimento da palavra robô até os dias atuais, muita coisa mudou. Na ficção científica, os robôs passaram de autômatos maus para seres bons e com sentimentos, como no filme da série “Guerra nas Estrelas”, com os robôs R2D2 e C3PO ou até em apresentação de conjuntos musicais, onde são vistos tocando instrumentos, no caso de uma apresentação do grupo alemão *Kraftwerk* e, no caso dos robôs antropomórficos da Honda e da Sony para entretenimento. Já no mundo real, a evolução dos robôs industriais modernos só se tornou realidade com o surgimento do computador e com o avanço tecnológico na fabricação de seus componentes.

Hoje em dia, os robôs possuem tato, visão, audição e voz, mas esses seus “sentidos” ainda estão longe de se assemelharem aos sentidos humanos, tornando-os uma máquina ainda

rudimentar, quando comparada sob este ponto de vista.

Atualmente os robôs são constituídos de uma estrutura mecânica e de uma unidade de controle. A estrutura mecânica serve como sustentação para a realização da tarefa específica do robô e o controle constitui-se em um computador que controla os acionadores das juntas, configurando a estrutura do robô e definindo a posição e orientação do órgão terminal (garra, pistola de pintura, ferramenta, corte a laser, ou o pé). As estruturas seriais apresentam maior número de estudo de casos, sendo as mais utilizadas. Por outro lado, devido às limitações das estruturas seriais, estudos têm sido direcionados para a utilização de estruturas que supram tais deficiências. Neste contexto as estruturas paralelas despontam como alternativas promissoras em substituição às seriais.

2.3 Estruturas mecânicas usadas em robótica

Os mecanismos espaciais também podem ser divididos em três classes em função de sua estrutura mecânica: seriais, fechados e híbridos, de acordo com a disposição dos segmentos que o compõem. Se esses segmentos forem ligados entre si de forma seqüencial, formando uma cadeia cinemática aberta, o mecanismo é denominado de estrutura serial ou aberta. Se os segmentos forem interligados na forma de elos, tem-se a estrutura fechada. A estrutura híbrida consiste na utilização das estruturas serial e fechada em uma única estrutura robótica.

Os mecanismos espaciais, devido a complexidade do seu movimento, são analisados analiticamente através de vetores e transformações matriciais. A análise de mecanismos consiste em determinar as expressões matemáticas que descrevem sua situação em função dos seus parâmetros, considerando as restrições de suas juntas. Entende-se por situação o conjunto posição e orientação de um determinado segmento do mecanismo.

Existem vários métodos de análise de mecanismos espaciais, desenvolvidos ao longo dos anos por diversos pesquisadores (Bennett, 1903; Chace, 1963; Khalil and Kleinfinger, 1986; Denavit and Hartenberg, 1964) cuja descrição pormenorizada foge aos objetivos deste trabalho. Antes de apresentar o método utilizado neste trabalho, algumas definições se fazem importantes.

A posição de um ponto no espaço é definida por três parâmetros independentes, podendo

ser representadas através de coordenadas cartesianas, cilíndricas ou esféricas. A situação de um corpo livre no espaço tridimensional, por seis parâmetros independentes, três para definir a posição de um dos seus pontos e três para definir sua orientação. Estes parâmetros são denominados de graus de liberdade (gdl), que no caso de um ponto no espaço cartesiano, podem ser as três coordenadas cartesianas e no caso de um corpo livre no espaço, podem ser as três rotações e as três translações ao longo dos eixos cartesianos.

Ao se construir um mecanismo através da união de segmentos, restringe-se seu movimento ao formar os pares cinemáticos, reduzindo o número de graus de liberdade. Nos mecanismos planos geralmente utilizam-se somente dois tipos de pares cinemáticos, ou juntas : juntas prismáticas, denominadas por P, com 1 gdl e juntas de rotação, denominadas por R, também com 1 gdl. Já os mecanismos espaciais apresentam, além das juntas R e P, juntas do tipo parafuso ou helicoidais com 1 gdl, juntas cilíndricas com 2 gdl e juntas esféricas, denominadas por S, com 3 gdl. Estas juntas restringem o movimento de um mecanismo de 1 gdl a 5 gdl. Em outras palavras, o número de graus de liberdade de um mecanismo depende do tipo de junta que o compõe .

Utiliza-se a palavra manipulador para designar os robôs que tem a função de manipular objetos. A disposição serial dos segmentos e juntas, se assemelha ao conjunto ombro, antebraço, cotovelo, braço, punho e mão humana. Daí, muitas vezes os robôs manipuladores seriais serem denominados de braço mecânico. A estrutura robótica serial pode ser dividida em três partes : a base, o punho e o elemento ou órgão terminal. A base tem como função posicionar o órgão terminal no espaço de trabalho; o punho, definir sua orientação e o órgão terminal, o dispositivo que permitirá ao robô, a execução da tarefa a ser realizada, podendo ser uma ferramenta, uma tocha para soldagem, pistola de pintura, garra, entre outros.

Os robôs com estrutura serial são constituídos de juntas de rotação e/ou translação, com 1 gdl cada. Sendo assim, a mobilidade dessas estruturas é sempre igual ao número de juntas. Os robôs industriais, com estrutura serial, são construídos com até seis graus de liberdade, sendo capazes de posicionar e orientar um objeto no espaço. Porém, quando necessário, pode-se adicionar graus de liberdade extras ao robô. Neste caso, estes graus de liberdade são necessários para que o robô desvie de obstáculos, para a execução de sua tarefa.

2.3.1 Manipuladores paralelos

Define-se como estruturas paralelas aquelas onde seus segmentos e juntas estão dispostos em duas ou mais cadeias cinemáticas, conectando a base do manipulador ao órgão terminal. Na figura 2.1 tem-se representada a Estrutura Cartesiana Totalmente Paralela (Bezerra, 1996; Carvalho and Dahan, 1995).

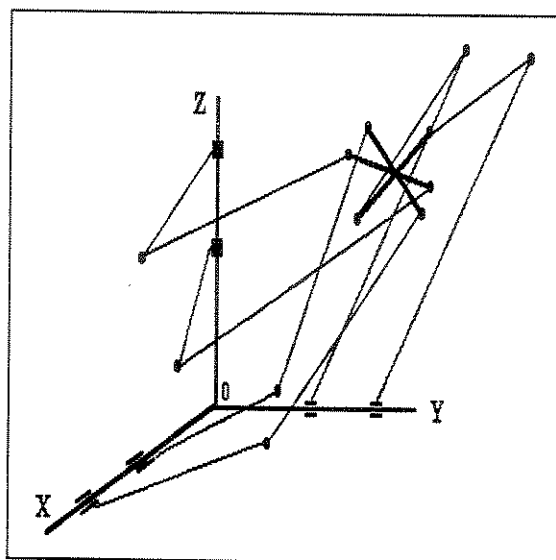


Figura 2.1: Estrutura Cartesiana Totalmente Paralela

Para alguns pesquisadores, foi devido ao avanço tecnológico e às limitações das estruturas seriais dos robôs manipuladores tradicionais, que surgiu a necessidade de se pesquisar uma estrutura que superasse essas limitações (Merlet and Gosselin, 1991).

O termo “manipulador paralelo” foi introduzido pelo professor Marvin Minsky do MIT, em seu trabalho “Manipulator Design Vignettes” (Minsky, 1972). Ele afirma, em seu trabalho, que o conceito de manipulador paralelo é melhor ilustrado pela maneira que o corpo de um animal é suportado por suas pernas, onde as várias restrições, que são as conexões de um membro com outro, simultaneamente determinam a configuração da estrutura do animal.

O manipulador totalmente paralelo é definido como uma estrutura paralela, onde a base e o órgão terminal são conectados por segmentos, ou conjunto de segmentos, articulados com um acionador para cada segmento (Carvalho and Dahan, 1995).

2.3.2 Estruturas híbridas

Esta terceira classe de estrutura tem sido estudada por pesquisadores, que conduzem trabalhos a respeito de combinações de mecanismos seriais e paralelos. Entre eles pode-se citar: (Fichter and McDowell, 1980; Hunt, 1983; Mohammed and Duffy, 1985; Khalil and Kleinfinger, 1986; Waldron et al., 1989; Chakarov and Parushev, 1994). Embora não haja uma definição rigorosa para os sistemas híbridos, pode-se classificá-los como estruturas que possuem uma de suas partes na forma serial e outra na forma paralela. Kumar (Kumar, 1990) define como sistemas híbridos, as estruturas que não são totalmente seriais ou totalmente paralelas. Na figura 2.2 apresenta-se um exemplo de estruturas híbridas.

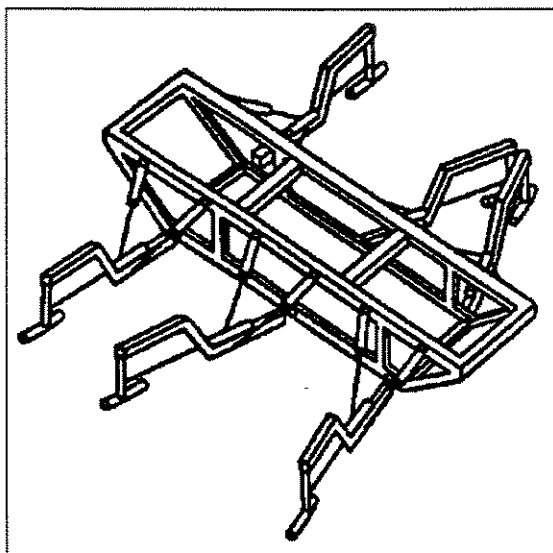


Figura 2.2: Estrutura híbrida

Outra importante classe de estruturas híbridas são os robôs com pernas. Estes robôs são classificados em função do número de perna que possuem. Atualmente são conhecidos robôs com uma perna (monópode ou unípede), duas (bípede), três (trípode), quatro (quadrúpede), cinco, seis (hexápode), sete, oito e nove pernas. Alguns destes robôs possuem ainda um manipulador serial acoplado em sua estrutura, como no caso dos robôs antropomórficos ou “humanóides”. No próximo capítulo serão detalhados os robôs bípedes (rbs), que é o enfoque principal deste trabalho. Um repositório a respeito dos mais importantes robôs com pernas pode ser visto em (Karsten, 2001) e (World, 2001).

2.4 Termos usados em biomecânica

Devido à semelhança entre a estrutura antropomórfica e a estrutura mecânica dos rbs, é realizada uma pequena introdução à Biomecânica com o objetivo principal de apresentar a nomenclatura utilizada, uma vez que será adotada para o estudo do robô bípede (rb). Esta seção não tem a pretensão de abranger todos os tópicos da Biomecânica e sim apenas descrever as características necessárias para uma compreensão da analogia entre os termos técnicos da área biomédica e os termos de robótica usados neste trabalho.

A Biomecânica é a aplicação dos princípios da mecânica ao corpo humano (Smith et al., 1997). A Cinesiologia é o estudo do movimento com a finalidade de compreender as forças que atuam no corpo humano, visando propor procedimentos para tratamento de lesões. A cinemetria é o conjunto de procedimentos biomecânicos para a obtenção das grandezas cinemáticas necessárias para descrever a posição e o movimento de seres vivos. Em Biomecânica, muitas técnicas modernas de estudo do movimento priorizam a obtenção de dados quantitativos, permitindo o cálculo das velocidades, acelerações e forças. Porém, isto na Mecânica é a análise cinemática e dinâmica dos corpos em movimento, onde a análise cinemática aborda o movimento considerando a posição de todos os componentes de um sistema em relação ao tempo e a análise dinâmica permite o cálculo das forças necessárias para produzir um determinado movimento.

O estudo da locomoção humana já demonstrava interesse desde os primórdios da civilização, conforme as primeiras pinturas nas cavernas. Um dos primeiros estudos do movimento humano é atribuído a Aristóteles (384-322 AC) (Aristotles, 2001). O seu trabalho é notável por classificar as espécies animais (vivíparas e ovíparas) a partir de seus movimentos. Por exemplo é questionado por que os seres humanos e os pássaros apresentam padrão bípede de marcha, embora as pernas dos humanos possuam articulação posterior (joelho) e as pernas dos pássaros articulação anterior.

Alguns autores afirmam que Aristóteles antecipou em aproximadamente dois mil anos a terceira Lei de Newton (Barros, 1993)

“...o animal que se move faz sua mudança de posição pressionando contra o que está embaixo dele..”

Porém, somente com o surgimento da ciência da física foi possível a sua análise mecânica. Os pioneiros foram Leonardo da Vinci (1452-1519), Galileu Galilei (1564-1642), Giovanni Borelli (1608-79) e, já no século *XIX* os irmãos Weber (1836)(Smith et al., 1997). Galileu, astrônomo e físico italiano, estudou animais como estruturas mecânicas durante anos, notando que animais grandes tinham ossos relativamente mais grossos. Borelli em seu livro *On the Movement of Animals* foi o primeiro a calcular as forças nos músculos quando submetidos a forças externas (Hurrell, 1994). Na figura 2.3 pode-se ver algumas figuras analisadas por ele.

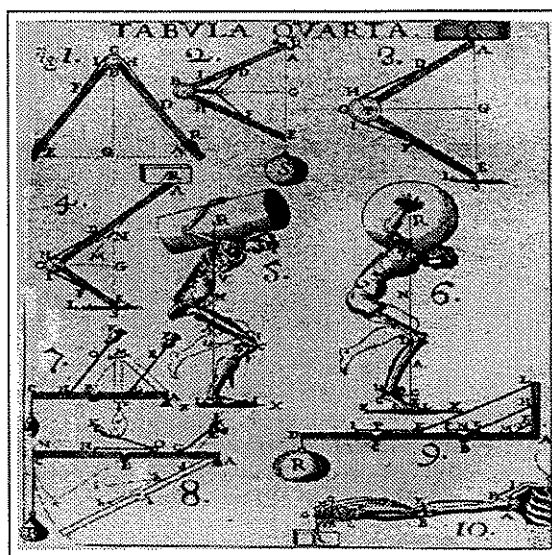


Figura 2.3: Análise dos movimentos por Borelli (1608-79)

Com o interesse pela capacidade de movimento humano e de animais para o trabalho, corridas e atividades militares, houve um notável avanço na cinemática e cinética da locomoção na segunda metade do século *XIX*.

Em 1880 Muybridge (Muybridge, 1957) publicou diversas seqüências de fotos de seres humanos andando, subindo escadas, correndo, rastejando, além de marchas de mais de 30 animais. As fotos foram obtidas usando um conjunto de até 36 câmeras sincronizadas, com intervalo entre as fotos de 1/24 segundos.

Marey (1830-1904), fisiologista francês, utilizou técnicas inovadoras para estudar a locomoção fotograficamente, com métodos que levaram ao surgimento do cinema. O método consistia em uma série de exposições fotográficas de imagens de um indivíduo andando. Várias fotografias foram tiradas do indivíduo andando ao sol vestido com uma roupa preta

que possuía marcadores e faixas brilhantes (que representavam as articulações e ossos), e ao fundo uma tela negra, de tal modo que ao superpor as fotografias, os pontos e linhas apareciam na placa fotográfica descrevendo o movimento. A frequência foi de aproximadamente 20 fotos por segundo (Cavanah, 1990).

Em 1900 Otto Fischer (Fischer, 1907), um matemático alemão, e o anatomista Wilhelm Braune calcularam as trajetórias, velocidades, acelerações, forças e torques nas articulações e segmentos do corpo humano em 31 fases do ciclo da marcha, estabelecendo a base científica da análise da marcha humana. Neste estudo, são propostos cálculos que comprovam que a perna ao oscilar não exerce uma ação pendular e sim exige forças musculares para o movimento (Braune and Fischer, 1987).

Porém, foi somente no final dos anos sessenta do século passado que os primeiros sistemas de medição capazes de detectar quantitativamente as trajetórias dos pontos no espaço passaram a ser desenvolvidos (Pedotti, 1990). Eles consistiam de marcadores ativos do tipo LED (*Light Emitting Diodes*), que eram colocados em pontos relevantes do corpo do indivíduo conectados por fios para medir as grandezas envolvidas no movimento. Os sistemas mais importantes foram o *SELSHOT* e o *WATSMART*. Em meados dos anos setenta foi que os primeiros sistemas de medição baseados em camera de TV surgiram[†]. Estes sistemas de medição utilizavam marcadores passivos, com base no seu brilho próprio, de tal modo que os marcadores deviam ser mais brilhante dos que os outros objetos da cena. Os principais sistemas foram *VI-CON*, *MOTION ANALISYS*, *PEAK PERFORMANCE*, entre outros. Nos anos oitenta com o surgimento da visão computacional e das técnicas de reconhecimento de padrões, tornou-se possível o surgimento de sistemas com alta tecnologia e amigáveis, entre eles o *ELITE*, que permite a análise tridimensional do movimento a 100Hz. Atualmente os sistemas de medição são baseados na arquitetura paralela de computação. Eles são capazes de realizar a análise cinemática, dinâmica, *tracking* e reconstrução de marcadores invisíveis, correção da distorção de imagens e reconstituição tridimensional usando técnicas esteriométricas. Uma completa caracterização ou comparação entre os diversos sistemas de análise de movimentos usados em Biomecânica pode ser visto em (Allard et al., 1995; Boenick and Näder, 1990; Berme and Cappozzo, 1990).

[†]Videogrametria = Uso do vídeo na cinemetria

O Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB) da Faculdade de Educação Física da UNICAMP desenvolveu um sistema de análise de marcha, denominado de DVIDEO, capaz de capturar o movimento de sensores passivos e realizar a análise de posição e cinemática dos membros do corpo humano instrumentados (Barros et al., 1999).

Na análise do movimento humano é usado o sistema de coordenadas retangulares tridimensional. O espaço tridimensional é dividido em três planos imaginários, com a finalidade de definir os movimentos das articulações e segmentos e localizar pontos de interesse no espaço cartesiano. Os três planos, denominados de planos cardeais, são perpendiculares entre si e se interceptam no centro de gravidade do corpo (No ser humano este ponto se situa ligeiramente anterior à segunda vértebra sacra). São eles : plano frontal, plano sagital e plano horizontal, conforme a figura 2.4.

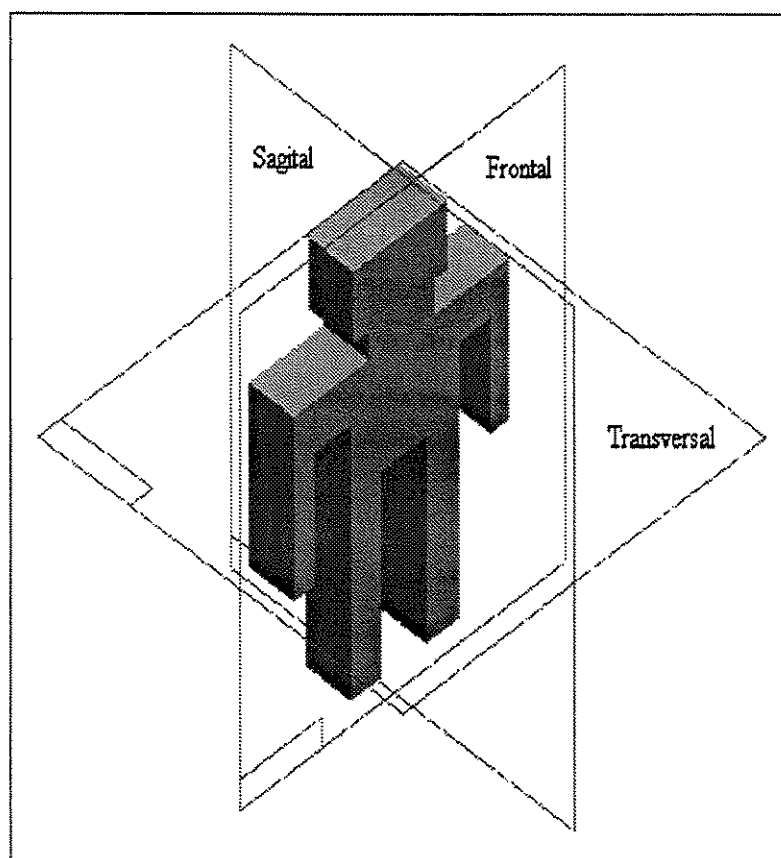


Figura 2.4: Planos cardeais

O plano frontal, ou plano coronal, é vertical e paralelo ao osso frontal e divide o corpo em parte da frente e costas. Neste plano ocorrem os movimentos de abdução (quando um

segmento se afasta da linha mediana vertical) e adução. O plano sagital também é vertical e divide o corpo em lado esquerdo e direito. Neste plano ocorrem os movimentos de flexão (quando um segmento se aproxima do outro) e extensão. O plano horizontal ou plano transversal divide o corpo em parte superior e inferior. Neste plano ocorrem a pronação e a supinação do antebraço (que são as rotações para dentro e para fora, respectivamente).

A nomenclatura a ser utilizada para os segmentos e juntas do rb é a mesma utilizada para o tronco, membros inferiores e articulações do ser humano. De acordo com a figura 2.5, que representa a posição anatômica de um corpo, pode-se observar a respectiva nomenclatura do rb.

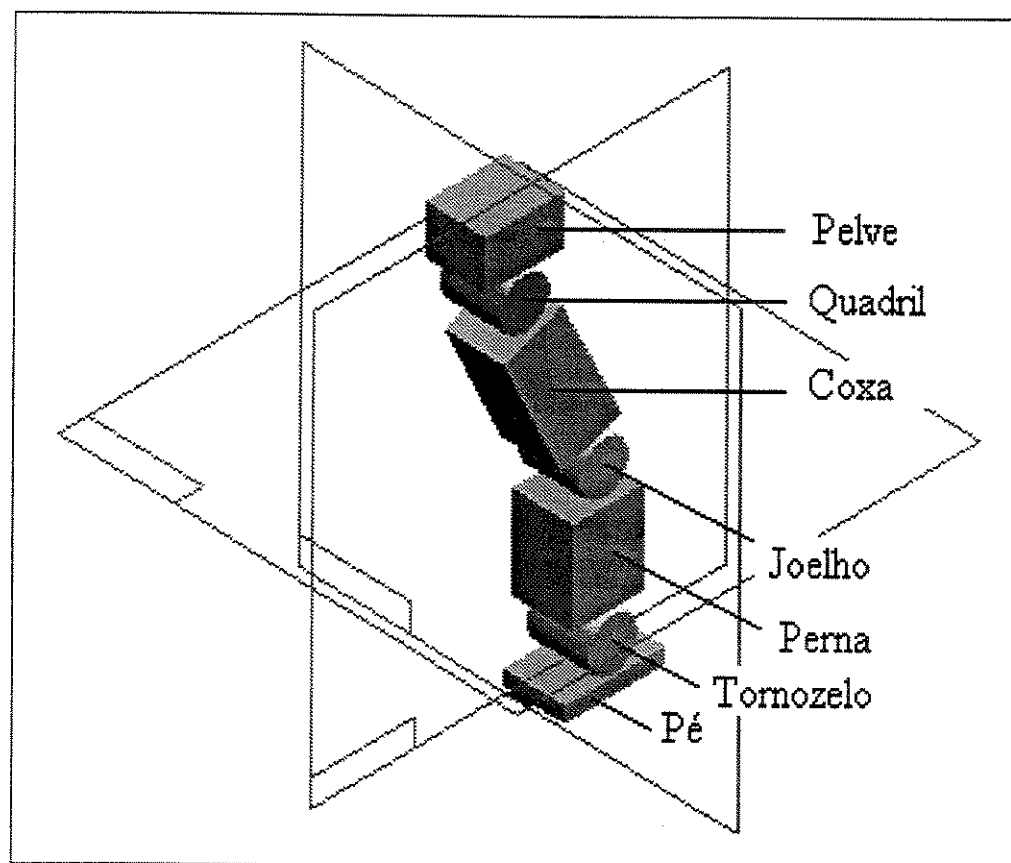


Figura 2.5: Nomenclatura adotada

O ângulo de junta, também denominado de ângulo inter-segmental, é o ângulo entre dois segmentos adjacentes, usualmente medido em graus. Deve-se observar que os ângulos das juntas são relativos aos ângulos de segmentos, não variando com a orientação do corpo. O ângulo de segmento é uma medida absoluta, tomado de acordo com a regra da mão direita,

e variam com a orientação do corpo.

Define-se postura (Smith et al., 1997) como sendo uma posição ou atitude do corpo. É a disposição relativa entre as partes do corpo para uma determinada atividade. A postura é equivalente ao conjunto posição e orientação (configuração) de um determinado segmento do rb durante um instante de tempo.

Define-se deambulação como um tipo de locomoção (Smith et al., 1997). Nos seres humanos o padrão adotado é o padrão bípede, que é adquirido ainda na fase da lactância. Com o treinamento, o indivíduo desenvolve o sistema sensitivomotor para gerar automaticamente uma repetição de comandos de controle motor de maneira particular, permitindo-o andar sem esforço consciente. Neste trabalho, será adotado o termo *marcha* para representar a deambulação do rb. A maneira como o rb realiza a marcha será denominada *modo de andar*. Ao conjunto marcha para frente, marcha a ré, curva à direita e à esquerda será denominado de *locomoção*.

A marcha pode ser definida como a maneira ou o estilo de andar inerente a cada indivíduo. Para a descrição do padrão de marcha de um indivíduo é necessário especificar a velocidade de locomoção em metros por segundo e o número de passos por segundo ou cadência. O ciclo de marcha é a sucessão das fases da marcha. Durante um ciclo de marcha ocorrem as seguintes fases : fase de balanço (quando o pé está no ar) e fase de apoio duplo (pés estão no solo). Durante a corrida ocorre a substituição da fase de apoio duplo pela fase no ar, onde os pés estão no ar simultaneamente. A duração do ciclo da marcha inicia-se no momento em que o calcanhar toca o solo e termina no momento em que o mesmo calcanhar toca o solo novamente, realizando uma *passada*. No regime permanente, uma passada corresponde a dois passos. Nos seres humanos normais a fase de apoio dura aproximadamente 60% e a fase de balanço 40% de um ciclo da marcha em velocidades normais de marcha. Estas fases do ciclo da marcha podem ser divididas em subfases, conforme pode ser fartamente encontrado na literatura. Na figura 2.6 estão representadas as fases do ciclo da marcha a serem adotados neste trabalho.

Durante uma corrida e/ou uma marcha, o corpo tem como propósito deslocar-se somente na horizontal. Considerando que qualquer outro deslocamento vertical ou lateral, gasta uma quantidade preciosa de energia, seria ideal que a trajetória do centro de gravidade se

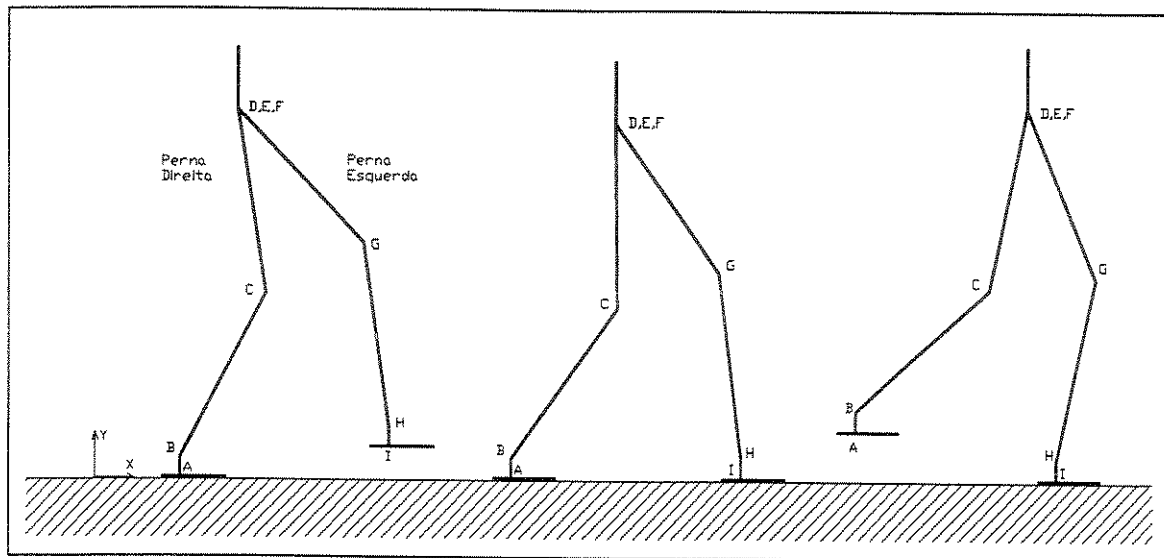


Figura 2.6: Fases do ciclo da marcha

aproximasse de uma linha reta. Tal trajetória ideal somente seria possível caso o ser humano deslocasse sobre rodas, sem nenhum movimento vertical ou lateral. O sistema locomotor utiliza mecanismos biomecânicos para reduzir a amplitude do movimento vertical e lateral do centro de gravidade (CG). Tais mecanismos são denominados de mecanismos determinantes do modo de andar e apresentam duas características principais: reduzir a altura máxima e a amplitude da trajetória do CG. No ser humano os mecanismos determinantes são a rotação pélvica, a inclinação pélvica, a flexão do joelho na fase de apoio simples, a rotação transversal das pernas, entre outros. Estes movimentos podem ser observados através da análise computacional de dados biomecânicos da marcha de um indivíduo normal, onde a projeção no plano frontal da trajetória de um ponto na pelvis é semelhante ao número oito. Na figura 2.7 tem-se uma foto (*Frame*) de um indivíduo instrumentado com marcadores passivos no tornozelo, joelho e quadril, realizando a marcha.

Os métodos matemáticos para determinação do modo de andar são sempre baseados nos modelos de segmentos, no qual o corpo humano é aproximado por um sistema de múltiplos corpos rígidos acoplados. As equações do movimento, obtidas do modelo de segmentos, são usadas para determinar o movimento a partir das forças e momento das forças conhecidas (dinâmica direta) ou vice versa (dinâmica inversa). O método da dinâmica inversa envolve diferenciação numérica e o método da dinâmica direta envolve integração numérica. O método

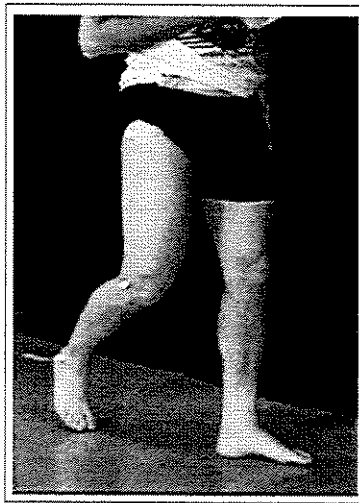


Figura 2.7: Indivíduo instrumentado realizando a marcha

da dinâmica inversa pode ser aplicado na tecnologia da reabilitação para determinar-se os padrões de marcha e ainda ser utilizado para simular o movimento de componentes protéticos. Numerosos modelos têm sido propostos para analisar o movimento humano, principalmente para determinar grandezas que não podem ser medidas diretamente (Koopman, 1990), tais como as forças entre os diversos segmentos do corpo humano. Porém, devido ao fato de que nem todas as rotações e translações podem ser medidas, e também devido aos erros de medida, as simplificações e considerações do modelo de segmentos, o movimento simulado será uma aproximação do movimento real. Além disso, adota-se como restrições cinemáticas que o pé de apoio não gira quando em contato com o solo, que durante a fase de duplo apoio ambos os pés estão no solo e não ocorre deslizamento entre o pé e o solo.

Portanto, o robô a ser modelado e simulado neste trabalho é formado pela união de sete corpos rígidos unidos através de juntas de rotação com 1 gdl cada, conforme será detalhado a seguir, formando uma estrutura do tipo híbrida. Para a escolha do movimento a ser descrito pelos pés, foi feita a divisão do ciclo da marcha e imposta a trajetória para os pés e a pelve em cada um deles. A escolha da trajetória foi baseada no movimento tridimensional capturado através do sistema DVIDEOW[®]. Em seguida, o movimento tridimensional é submetido às restrições cinemáticas para obter-se o modelo bidimensional de segmentos, pois o robô não apresenta os mecanismos de compensação do movimento do CG. A partir do

modelo de segmentos do robô será determinada a postura da estrutura mecânica para que ela percorra uma determinada trajetória (síntese), determinada a equação de movimento e aplicado o método da dinâmica inversa para obter os torques necessários para a especificação dos atuadores a serem utilizados no robô.

Capítulo 3

Revisão da Literatura Sobre os Robôs Bípedes

3.1 Introdução

Este capítulo tem como principal objetivo descrever o estado da arte dos principais robôs, desde os primeiros estudos concentrados na análise teórica da locomoção e projeto conceitual de máquinas de andar com duas pernas até os rbs mais recentes. Os principais rbs e respectivos pesquisadores estão listados a seguir.

3.2 Robôs bípedes

Há muito tempo diversos pesquisadores têm tentado imitar a locomoção de animais e/ou a locomoção humana, através de mecanismos biológicos, como por exemplo o cavalo mecânico de L. Rygg, 1893 (Caux and Zapata, 1999).

No início, os estudos sobre os rbs tinham ênfase apenas na locomoção e nunca na aplicação real destes robôs no ambiente industrial. Considerando que o rb tem duas pernas e é semelhante ao ser humano, e que muitos dos ambientes industriais foram originalmente criados para operadores humanos, então por que não pensar na substituição dos operadores por rbs, em determinadas operações perigosas e/ou que exijam grande mobilidade, sem qualquer modificação na planta da fábrica? Talvez isto tenha sido um dos pontos que tornaram os rbs muito atrativos para uso na futura manufatura automatizada. Porém, para que isto seja verdade, o rb deverá ser totalmente útil em suas habilidades, isto é, deve possuir uma

plataforma móvel sobre 2 pernas de tal modo que o permita realizar tarefas como andar, desviar de obstáculos e subir escadas. Além disso a plataforma deve ser capaz de conduzir alguma carga ou receber uma braço mecânico para realizar determinadas tarefas de manipulação de objetos. Dois dos maiores desafios do estudo dos rbs são: como sustentar firmemente a plataforma e como prover uma marcha eficiente e estável.

Dentre os primeiros estudos concentrados na análise teórica da locomoção bípede e no projeto conceitual de máquinas de andar, tem-se que em 1964 o prof. A.L.Kemurdjian em São Petersburgo, Russia, criou um mecanismo bípede capaz de transformar o movimento de rotação em translação, baseado no mecanismo de “Chebyshev”. Em 1968, foi proposto um modelo denominado de “Máquina de andar ideal” (Frank, 1968). O modelo consistia em um corpo sustentado por duas pernas sem massa. Cada pé fazia parte da respectiva perna. Posteriormente (Frank, 1970), um método adequado para especificar a configuração e a lei de controle foi apresentado, baseado no conceito de energia mínima de locomoção, que foi usado na análise dinâmica e síntese desta máquina. Esta “máquina de andar” foi usada não somente como um modelo teórico de locomoção bípede, mas também serviu como referência para construção de rbs” (Zheng and Sias, 1988). Em 1973, Vukobratovic apresentou os primeiros estudos sobre o controle e a locomoção bípede (Vukobratovic and Stepanenko, 1973; Vukobratovic, 1973). Foi ele quem criou o termo Ponto de Momento Zero - ZMP (*Zero Moment Point*), que é definido como o ponto no solo onde a somatória de todos os momentos é zero.

Diante disso, nos últimos anos, muitos pesquisadores têm estudado robôs capazes de realizar uma locomoção estável. Eles dividem a locomoção em dois modos: estática e dinâmica. A marcha estaticamente estável é a locomoção caracterizada pelo fato que a projeção do centro de gravidade no solo está sempre dentro da área de suporte do pé, ou pelo polígono formado por eles. Por outro lado, a marcha dinamicamente estável é a locomoção caracterizada pelo fato de que a projeção do CG nem sempre está dentro da área de suporte do pé ou do polígono de suporte. Uma importante característica da marcha dinamicamente estável, é que ela usa o ZMP para determinar onde o pé em balanço deve ser posicionado no solo. A seguir os principais rbs e os respectivos pesquisadores estão listados em ordem cronológica de surgimento.

Um dos primeiros rbs foi construído em 1969 pelo professor Ichiro Kato e seus colaboradores, do Departamento de Engenharia Mecânica da escola de Ciência e Engenharia da Universidade de Waseda, Tóquio. Possuía forma antropomórfica e foi denominado de WAP-1 “Waseda pneumatically Activated Pedipulator-1”. Era constituído de uma estrutura mecânica e atuado através de músculos artificiais de borracha. O WAP-1 era capaz de se locomover utilizando um controle do tipo “*playback*” de seus músculos artificiais. Em 1970, Kato e seus colaboradores desenvolveram o WAP-2, que também utilizava músculos artificiais e usava sensores de pressão no solo para controlar automaticamente a sua postura no plano sagital. Em 1971, Kato e seus colaboradores desenvolveram o WAP-3, capaz de mover o seu centro de gravidade no plano frontal de tal forma que além de andar em superfícies planas, o WAP-3 era capaz de descer e subir escadas e planos inclinados. Era controlado por um controlador baseado em memória e seus atuadores eram do tipo “PWM” (*Pulse Width Modulator*). O WAP-3 foi o primeiro rb no mundo que realizou a marcha tridimensional automática.

Ainda em 1971, Kato e seus colaboradores, apresentaram o WL-5 (Waseda Leg-5) com 11 gdl. Possuía um minicomputador para controle do movimento do CG no plano frontal. Devido ao minicomputador era capaz de realizar a marcha automática e mudar de direção quando estava se locomovendo.

Em 1973, Kato e seus colaboradores usando os membros superiores do WAM-4 (WAseda Manipulator-4) e os membros inferiores do WL-5 criaram o WABOT-1 (WAseda roBOT-1). Ele era semelhante ao ser humano (robô antropomórfico ou “humanóide”) (Kato et al., 1974). O WABOT I era estaticamente estável em todas as fases do ciclo da marcha, mantendo o seu CG dentro da área de suporte dos pés. Foi o primeiro rb de tamanho proporcional ao ser humano do mundo. Possuía um sistema de controle dos membros, um sistema de visão e um sistema de conversação, permitindo-o comunicar com uma pessoa em japonês e medir distâncias e direções de objetos usando sensores externos, ouvidos, olhos e boca artificiais. Além de andar, ele era capaz de pegar e transportar objetos com as mãos, que possuíam sensores de tato. Foi estimado que o WABOT-1 tinha a faculdade mental de uma criança de 1 ano e meio.

Nos anos seguintes, Kato e seus colaboradores desenvolveram um tipo de locomoção

para rbs denominado de locomoção “quasi-dinâmica”. A principal característica era que a transição da fase de apoio de um pé para o outro ocorria muito rápida sem ocorrer a fase de duplo apoio (Kato et al., 1983; Zheng and Sias, 1988). Em 1981, Kato e seus colaboradores desenvolveram o WL-9DR (Waseda Leg-9 Dynamic Refined), que consistia de um modelo tridimensional dos membros inferiores humanos. Era capaz de realizar passos arbitrários e andar no modo quasi-dinâmico usando um micro controlador de 16-bits no minicomputador. Porém, a lei de controle negligenciava a velocidade e aceleração do robô, de tal modo que ele realizava um passo em 9s (Mita et al., 1984).

Miyazaki e Arimoto (Miyazaki and Arimoto, 1980) realizaram estudos teóricos de um rb que possibilitou notar que em alguns casos, o número de graus de liberdade tornava-se maior do que o número de atuadores durante a locomoção dinâmica. Para estabilizar o robô quando isto acontecia, eles propuseram o método de controle denominado de “técnica da perturbação singular” e aplicaram em um rb de 7 gdl. A técnica da perturbação singular era baseada no princípio de que a locomoção bípede pode ser dividida em 2 modos: rápido e lento. Eles trabalharam com modelos de ordem reduzida, nos quais ao se fornecer uma função de sinal de referência para cada controlador e usando esta função repetidamente para cada passo, era obtida uma locomoção estável (Shih, 1999). Em 1981, eles construíram o rb IDATEN (Miyazaki and Arimoto, 1981).

No período de 1982-83, Kato e seus colaboradores apresentaram o WL-10R (Waseda Leg - 10 Refined), uma versão atualizada do WL-10. O WL-10R possuía servo-atuadores, componentes estruturais em fibra de carbono, juntas na pelve que o possibilitava andar de lado, girar, andar para frente e para trás.

Mita e seus colaboradores simularam e construíram o rb CW-1 (Chiba-Walker-1) com 7 segmentos, 6 motores CC e com 5 gdl. Propuseram um novo método de controle usando a teoria de controle moderno (controle LQR e a teoria do regulador ótimo) o qual estabilizava a fase de apoio simples. A altura do CW-1 era de 75,5 cm, com massa de 15,3 Kg e era capaz de realizar um passo de 30cm em 1s no modo dinamicamente estável (Mita et al., 1984).

O rb BIPER foi desenvolvido na Universidade de Tokyo por Kimura, Mitsuishi, Shimoyama e Miura (Miura and Shimoyama, 1984). Foram desenvolvidas cinco versões, todas elas eram estaticamente instáveis e podiam andar no modo dinamicamente estável com um con-

trole adequado. As versões BIPER-1 e BIPER-2 somente andavam de lado. Para construir o BIPER-3 e estudar o comportamento no plano sagital e no plano frontal, ele foi modelado com 3 segmentos (pelve e duas pernas), atuados por 4 motores de corrente contínua situados na pelve, sendo dois para mover as pernas no plano frontal e dois para movê-las para frente. O BIPER-3 não possuía torque motor no tornozelo, nem joelho e apresentava um contato pontual entre a perna e o solo. Sua massa era 2,116 Kg e altura de 30,8 cm. Uma característica deste rb era a necessidade de uma sucessão de passos para manter o robô em pé. Miura e Shimoyama usaram o “*feedforward compensation*” para seguir trajetórias específicas, utilizando a realimentação para corrigir os distúrbios. Usaram a dinâmica do pêndulo invertido e linearizaram as equações de movimento para controlar o BIPER-3 de 3 gdl e o BIPER-4 de 7 gdl.

O robô músico chamado de WABOT-2 (WAseda roBOT - 2) foi desenvolvido em 1984. Ele era capaz de comunicar-se com uma pessoa, ler uma partitura com seus olhos e tocar uma partitura de dificuldade média em um órgão eletrônico. Também era capaz de acompanhar no teclado uma pessoa ao ouvi-la cantar. Ele é considerado o primeiro robô desenvolvido como um robô pessoal para entretenimento.

Kato e Mori (Kato and Mori, 1984) construíram um rb com 4 gdl denominado de BIPMAN (BIPedal walking MACHiNe). O rb era constituído por duas pernas telescópicas e sem massa, dois pés e uma pelve. As pernas não possuíam joelhos, mas podiam ser estendidas ou contraídas. Porém, a ênfase era no estudo de um método de controle para a locomoção dinâmica que assegurasse uma estabilidade assintótica para a trajetória, a partir do ajuste dos parâmetros massa, comprimento e momento de inércia dos segmentos. Para descrever o movimento eles usaram as equações de *van der Pol*. O BIPMAN tinha massa de 36,5 Kg e para um comprimento de perna de 1m, realizava um passo de 0,5m.

Em 1985, Jessica Hodgins e Marc Raibert desenvolveram uma máquina de duas pernas com 4 gdl capaz de pular entre 44 cm até 67 cm. O robô era acionado por atuadores hidráulicos, sendo capaz de correr com uma postura inclinada para frente mantendo um balanço dinâmico semelhante ao rb de Miura e Shimoyama com velocidade de 4m/s (Raibert, 1986; Hodgins, 1988; Hodgins and Raibert, 1990). Raibert usando simetria, estendeu o seu trabalho com o robô unípede ou monópode denominado de “CMU hopper”, para analisar

robôs de uma, duas e quatro pernas, e derivar uma característica global do sistema para a corrida bípede (Kajita et al., 1992). Ele usou um modelo de uma estrutura de múltiplos segmentos para realizar o planejamento de posicionamento do pé, e desenvolveu um sistema de controle desacoplado para a atitude do corpo, altura do corpo e posicionamento do pé (Miller-III, 1994). A lei de controle foi obtida considerando as características dinâmicas de uma perna com mola. Usando esta lei de controle, o rb podia variar a sua velocidade em tempo real (Kajita et al., 1992). Hodgins (Hodgins, 1988) também estudou a locomoção dinâmica em terreno irregular usando uma versão modificada do método de controle de Raibert para determinadas variações do passo do rb (Shih and Chiou, 1998). Raibert desenvolveu o seu trabalho no MIT Leg Lab, que atualmente tem pesquisadores atuando em duas linhas de pesquisa: projeto de atuadores elásticos e algoritmo de controle para a locomoção virtual (Pratt, 2000).

Em 1985, Kato e seus colaboradores desenvolveram o WL-10RD (Waseda Leg - 10 Refined Dynamic) (Takanishi et al., 1985), que era capaz de andar no modo dinâmico, subir e descer escadas e superfícies suavemente inclinadas, modificando o seu padrão de marcha. Para superfícies planas o WL-10RD gastava 1,3s para dar um passo de 40cm. Também em 1985, Kato e seus colaboradores apresentaram o WHL-11 (Waseda Hitach Leg-11) desenvolvido em parceria com a Hitach Ltda. Era baseado no WL-10R e capaz de realizar locomoção estática. Ainda em 1985, Kato e seus colaboradores desenvolveram outro rb capaz de tocar música, o WASUBOT (WAseda SUMitomo roBOT), em parceria com a Sumitomo Electric Industry Ltd. Composto pelo WABOT-2 e pelos membros superiores do WAM-8 (Waseda Arm Manipulator - 8), o WASUBOT podia acionar um teclado musical após ler a partitura. Ele se apresentou em um concerto musical juntamente com a “*NHK Symphony Orchestra*” tocando a “*Aria on the G-string*” de *J.S. Bach* na cerimônia de abertura da Exposição Internacional de Ciência e Tecnologia realizada de 16 de Março a 16 de Setembro de 1985 (World, 2001).

Dando continuidade à série de rbs da Universidade de Waseda foi construído em 1986 o WL-12 (Waseda Leg-12) a partir do WL-10 e com um tronco. O robô tinha massa de 107Kg (tronco 30Kg), altura de 180cm, possuía 6 gdl para as pernas e 3 gdl para o tronco e era capaz de andar no modo dinâmico com um passo de 30cm em 1,3s. Em 1988 surgiu o

WL-12R (Waseda Leg-12 Refined), com 8 gdl para as pernas e 2 gdl para o tronco, 107 Kg e 1,80m, equipado com sensores de força nos pés e juntas e atuado hidraulicamente. O passo do WL-12R era de 30 cm e com duração de 0,8s. Ele usava motores do tipo “direct drive” e era capaz de realizar diferentes modos de andar dinâmico sobre a ação de uma força externa de até 10 Kgf. (Takanishi et al., 1988; Takanishi, 1990; Tzafestas et al., 1996).

Em 1987, Furusho e Masubuchi (Furusho and Masubuchi, 1986) desenvolveram modelos numéricos e experimentais para síntese de um rb com 5 segmentos, 4 gdl, 29,81 Kg, altura de 1,1m e com velocidade de 0,8m/s. A técnica era baseada na linearização da equação de movimento em torno do equilíbrio vertical e aplicado um controle do tipo proporcional derivativo realimentado em cada junta, para seguir um padrão descrito de perfis de deslocamento (Hurmuzlu, 1993). Eles apresentaram um modelo reduzido de 2ª ordem usando o controle PD em cada junta e mostraram que dois pólos do modelo reduzido correspondem aos pólos de um pêndulo invertido (Shih and Gruver, 1992).

Furusho e Masubuchi a partir do modelo plano de 5 segmentos e 4 motores construíram o rb Kenkyaku-1, que mais tarde com adição de mais 2 segmentos tornou-se o rb Kenkyaku-2 (Yamada et al., 1985), com massa de 40Kg e altura de 1,10m (Tzafestas et al., 1996). Eles propuseram um modelo de ordem reduzida para o rb que aproxima o modelo de alta ordem não linear muito bem, pela aplicação da realimentação local em cada junta do rb (Furusho and Masubuchi, 1987).

Sano e Furusho (Sano and Furusho, 1988) construíram o rb BLR-G1 e em seguida o BLR-G2 (Furusho and Sano, 1990), com 9 segmentos e com 8 gdl. Era composto de um quadril e duas pernas, com joelhos e tornozelos. Os joelhos apresentam 1 gdl cada e os tornozelos 2 gdl cada. A massa era de 25 Kg, com 0,97m de altura e andava com uma velocidade de 0.18 m/s. (Tzafestas et al., 1996; Sardain et al., 1998; Miller-III, 1994). Eles usaram um modelo de controle independente baseado em sensores para o movimento do rb BLR-G2 nos planos frontal e sagital. O movimento no plano frontal era determinado por um regulador com dois estados de equilíbrio. No plano sagital eles usaram uma função para gerar um padrão de velocidade suave para o rb ao controlar o torque no tornozelo. O trabalho era baseado no controle realimentado da força na sola do pé e do torque do tornozelo (Miller-III, 1994; Shih, 1999). Em 1989, Sano e Furusho desenvolveram o robô quadrúpede Colt3 (Sano and

Furusho, 1989).

McGeer projetou um rb puramente dinâmico com 1 gdl, sem quadril e possuindo 2 pernas finas articuladas uma na outra, com massa de 3.5 Kg, 0,5m de altura e capaz de desenvolver uma velocidade de 0,46 m/s em uma superfície inclinada para baixo de 2.5 graus. Ele estudou a locomoção passiva estável nesta superfície inclinada. Seu robô era capaz de gerar um padrão de marcha passivo sem o uso de qualquer tipo de atuador e de controle ativo, era acionado somente pela gravidade (McGeer, 1990). Porém, para iniciar e parar o movimento é necessário uma força externa (Shih and Chiou, 1998). Muitos outros pesquisadores publicaram trabalhos sobre locomoção passiva (der Linde, 1998; Kuo, 1999; Garcia, 1999).

Zheng e seus colaboradores (Zheng and Sias, 1988; Zheng and Shen, 1990) estudaram a locomoção dinâmica usando os rbs SD-1 (sem tornozelos) e SD-2 (com tornozelos), com 9 segmentos e 8 gdl. Eles desenvolveram um modelo explícito para a dinâmica do robô multissegmentos, e projetaram um controlador realimentado que otimizava a trajetória do CG usando o critério de margem de estabilidade. O método de análise da dinâmica do rb consistia na divisão do modelo do sistema em subsistemas mais simples. O rb SD-2 possuía 4 juntas que permitiam movimento no plano frontal e outras 4, que permitiam movimento no plano sagital e era capaz de passar de uma superfície plana para uma inclinada, porém sempre no modo estático de locomoção (McCown-McClintick and Moskowitz, 1998). O SD-2 usava sensores de força sob os pés que permitiam o reconhecimento da transição entre uma superfície plana e inclinada de até 10 graus. À medida que subia na superfície, o SD-2 inclinava o corpo para frente ou para trás para manter o equilíbrio (Shih, 1999).

Takanishi e seus colaboradores (Takanishi et al., 1990) desenvolveram o WL-12RIII (Waseda Leg-12 Refined III) com 9 gdl. Era capaz de subir degraus com velocidade de 1 passo em 2.6s e em superfícies inclinadas andava com um passo a cada 1.6s. Além disso também possuía um tronco que se movimentava no plano frontal como um pêndulo invertido. Sua massa era de 100 Kg e tinha altura de 170 cm (Sardain et al., 1998).

Kajita e sua equipe (Kajita et al., 1992) desenvolveram equações diferenciais lineares simples para um rb ideal com pernas sem massa, assumindo uma classe de trajetórias onde o tronco estava restrito ao movimento horizontal, de tal modo que o CG movia-se horizontalmente. Eles usaram o termo “órbita de conservação de energia potencial” para descrever

esta classe de trajetória. Tal modelo foi usado para controlar o rb MELTRAN de 4 gdl com pernas sem massa e joelhos que andava no modo dinâmico. Sua massa era de 2,5 Kg com 0,4m de altura e velocidade de 0,3 m/s (Sardain et al., 1998; Miller-III, 1994). Nos anos seguintes, Kajita e Tani (Kajita and Tani, 1991) desenvolveram um algoritmo para locomoção em terreno acidentado. Este algoritmo foi baseado no movimento linear do CG do rb MELTRAN movendo-se no plano bidimensional com posições pré definidas para os pés (McCown-McClintick and Moskowitz, 1998). Eles utilizaram um modelo linear do pêndulo invertido para controlar um rb em um terreno acidentado (Shih and Chiou, 1998).

Gruver e seus colaboradores (Shih et al., 1993) desenvolveram um rb de 12 gdl capaz de andar no modo dinâmico, composto de uma pelve e duas pernas. O rb possuía 5 segmentos e 4 gdl no plano frontal e 7 segmentos e 6 gdl no plano sagital. Apresentava a característica de mudar de direção, devido aos 2 gdl do eixo vertical de seus quadris. Com massa de 57 Kg e altura de 92cm. Ao andar em linha reta apresentava uma velocidade de 0,71 m/s. (Sardain et al., 1998)

Miller modificou o SD-2 com a adição de joelhos. O rb resultante possuía 5 juntas de rotação por perna, num total de 10 gdl. Ele realizou estratégias de controle baseado em controladores do tipo PID e redes neurais do tipo CMAC (Cerebellar Model Arithmetic Computer), sem usar um modelo detalhado da cinemática e dinâmica do rb. Ele desenvolveu uma estratégia de controle on-line de baixo nível que permitiu ao robô andar no modo dinâmico. O rb tinha massa de 6,8Kg com 104cm de altura. Além disso, usava 8 sensores de força de filme de polímero para a determinação do centro de força (Miller-III, 1994).

Grishin e seus colaboradores construíram um rb puramente dinâmico com 2 gdl. Composto de quadril e duas pernas telescópicas sem tornozelos acionadas por 2 motores CC. Sua massa era de 7.5Kg, altura 0,75m, velocidade de 0,3 m/s e com os atuadores situados no quadril e em cada coxa (Grishin et al., 1994). Um algoritmo adaptativo foi usado para o controle do rb (Shih, 1999).

Yamaguchi e seus colaboradores (Yamaguchi et al., 1995) desenvolveram um rb que andava no modo dinâmico e era capaz de se adaptar a superfícies inclinadas. Usava um material absorvedor de impacto para obter informação sobre o terreno (Shih and Chiou, 1998).

Kajita e Tani apresentaram um estudo experimental sobre o rb MELTRAN II com 6 gdl,

onde cada perna foi modelada como um mecanismo paralelo e acionada por 2 motores CC de 11W, montados na pelve. Era capaz de locomover-se e transpor uma caixa de 3,5 cm de altura com uma velocidade de 20 cm/s. Eles usaram o modelo do pêndulo simples invertido para analisar o MELTRAN II, considerando que o CG se deslocava somente em linha reta. (Kajita and Tani, 1996).

Em 1997, Zheng e seus colaboradores usaram um algoritmo neural de aprendizagem não supervisionado para permitir ao rb SD-2 subir superfícies inclinadas. O sistema de controle dos 8 motores das juntas era do tipo PI, juntamente com um controlador neural que armazenava diferentes padrões de marcha em uma unidade adaptativa. A unidade adaptativa era responsável pela variação das trajetórias das juntas, permitindo ao rb andar em superfícies desconhecidas. (Salatian et al., 1997).

A *Honda Motor Company* em Tóquio no Japão iniciou em 1986 o desenvolvimento de mecanismos andróides (Gomi et al., 1992). Nos sete anos seguintes foram desenvolvidos sete robôs denominados de E0 (1986), E1-E3 (1987 - 1991) e E4-E6 (1991-1993). A Honda apresentou em dezembro de 1996 um robô antropomórfico com duas pernas, tronco, dois braços e cabeça denominado de P2 (Hirai et al., 1998; Hirai, 1997). Seus membros inferiores possuíam 12 gdl: 3 gdl por quadril, 1 gdl por joelho e 2 gdl por tornozelo. O rb possuía 5 segmentos no plano frontal que lhe conferiam 4 gdl e 7 segmentos no plano sagital, dando 6 gdl. A altura do robô era de 182cm e a massa de 210Kg. Seu acionamento era realizado por motores CC, redutores de velocidade e transmissão por correias do tipo "Harmonic driver". Era capaz de locomover a 0,83 m/s em superfícies planas, subir e descer escadas e andar em uma superfície inclinada de até 10%. Além disso podia andar de lado, girar e andar para trás (Sardain et al., 1998).

A Sony Co. (Sony, 2001) lançou em 2000 (Tóquio no Japão) um pequeno robô bípede denominado SDR-3X, com 50 cm de altura, 24 gdl e que é capaz de andar dinamicamente, mudar de direção, levantar-se, equilibrar-se em uma só perna, chutar uma bola e dançar. O SDR-3X pode andar a uma velocidade de 15 m/min com passos de 6 cm. Além disso, quando em superfícies inclinadas, sensores de postura na área do peito e sensores de toque na extremidade dos pés são usados para controlar sua postura. Os movimentos do robô podem ser controlados via voz, pois ele tem uma função de reconhecimento de voz e pode

reconhecer cerca de 20 palavras pré-gravadas. Outra característica do robô é que ele pode distinguir cores através de uma câmara CCD (*Charge coupled device*) localizada na cabeça, permitindo-o reconhecer uma bola colorida, encontrar uma rede do gol, se movimentar para o lado da bola, chutar a bola e reconhecer se a bola entrou ou não no gol. O SDR-3X pode ser operado por controle remoto utilizando um cartão LAN sem fio no slot de cartões do PC. Um software de simulação foi desenvolvido para simular os movimentos do SDR-3X em um computador pessoal.

Shih e Chiou estudaram o controle do movimento do rb BR-1 (Biped Robot-1), capaz de andar no modo estáticamente estável em um terreno inclinado. O BR-1 possuía 7 gdl, com duas pernas telescópicas e uma massa móvel na pelve para manter a projeção do CG dentro da área de suporte dos pés. Com massa de 42Kg, altura de 80cm, seu pé media 20 cm x 15 cm e usava 7 motores CC de 80W cada, com controle do tipo PD. O BR-1 era capaz de subir e descer superfícies com degraus e inclinadas de 10 a 18 graus com velocidade de 8 cm/s e para superfícies planas 12 cm/s (Shih and Chiou, 1998; Shih, 1999).

Hasegawa e seus colaboradores propuseram um algoritmo evolucionário hierárquico para gerar a locomoção, considerando a otimização de energia. O algoritmo era capaz de gerar um movimento natural considerando o ZMP (*Zero Moment Point*)[†]. Eles realizaram uma simulação numérica e aplicaram a um rb de 24Kg, altura de 1,205m e com 13 juntas (13 gdl). Os 13 motores CC eram controlados usando o controle PD para seguir uma determinada trajetória de referencia. O rb andava com um passo de 30 cm em 5s (Hasegawa et al., 2000).

No Brasil pesquisadores têm publicado trabalhos a respeito de robôs bípedes experimentais e teóricos. Pinto e Bevilacqua (1991) desenvolveram um robô bípede na Universidade Federal do Rio de Janeiro, construído em alumínio e acionado por 4 motores de passo. Possuía pernas de 280mm de altura com uma coxa de 140mm de comprimento, sua altura era de 420mm, massa de 7.5Kg aproximadamente, com um torque nos motores, sem as reduções, de 0,7Nm. O robô foi modelado com 5 graus de liberdade e era capaz de realizar passos no plano sagital. Possuía controle em malha aberta e era capaz de seguir um padrão de marcha enviado aos motores.

[†]Termo criado por Vukobratovic (Vukobratovic, 1973) para designar o ponto no solo onde a somatória dos momentos é zero.

Dutra (Dutra, 1997) tem publicado uma série de trabalhos sobre modelagem e simulação de estruturas mecânicas com pernas. Atualmente tem trabalhado na formulação de sistema de coordenação e sincronização de movimentos usando osciladores não lineares.

Schammas (Schammas et al., 1999) modelou e simulou um robô unípede usando dois tipos de algoritmo de controle. Foi realizada uma comparação entre eles tendo como índice de performance a energia gasta. Seu modelo foi baseado no "CMU hopper" desenvolvido por Raibert.

O Laboratório de Sistemas Ativos e Mecatrônica - LSAM, da UNICAMP (FEM/DMC) modelou, simulou (Campos et al., 2000), projetou, construiu um robô bípede, denominado de RB-1 no período de 2000 a 2001. O rb é capaz de realizar a marcha no modo estaticamente estável no plano sagital utilizando uma malha aberta de controle. Possui sete segmentos, 45 cm de altura e acionado por servomotores de 14Kgf.cm de torque cada. O RB-1 possui 6 gdl.

O objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de robôs com capacidade de locomoção semelhante ao ser humano e que possuam também uma estratégia de desvio de obstáculo baseada em sensores.

3.3 Planejamento de movimento de robôs bípedes baseado em sensores

Considerando-se que os rbs possuem a capacidade de locomoção semelhante a dos seres humanos, espera-se que rb deva ter a habilidade de se locomover em ambiente com obstáculos (ambiente desestruturado), desviar dos obstáculos, manter a marcha estável e continuar a sua locomoção normal. Para isto é necessário o uso de sensores interagindo com o ambiente. A estratégia de planejamento de movimento baseada em sensores (*Sensor-based motion planning strategy*), usada para detectar objetos no ambiente de trabalho, é implementada através do uso de sensores de toque, infravermelho, ultrasom, visão, temperatura, controle manual (*Joystick*), entre outros.

Experimentos em animais revelam que movimentos rítmicos tal como a locomoção são gerados pelos geradores de padrão central (CPGs) (Taga, 1998; Drew, 1994; Patla et al., 1991; Grillner, 1985). Os CPGs estão presentes no nível baixo do sistema nervoso central

tal como a medula vertebral. Nestes estudos teóricos foi mostrado que os CPG são sistemas adaptativos complexos, onde os movimentos emergem da interação dinâmica entre o sistema neural, o corpo e o ambiente de uma maneira auto organizada. Tal propriedade indica uma certa adaptabilidade às variações imprevisíveis do ambiente. A estratégia humana para transpor um obstáculo usando a informação visual é composta pelo planejamento antecipado do movimento, no intuito de evitar o obstáculo. Durante a marcha, a estratégia humana de desvio de obstáculos deve mudar o padrão de marcha rapidamente para se livrar dos obstáculos com segurança e de estados transientes ao ter se livrado do obstáculo, mantendo a estabilidade de locomoção. Os principais padrões de marcha que são variados são a frequência e o comprimento dos passos. No trabalho de Taga (Taga, 1998), foram explorados mecanismos que resolvam estes problemas para produzir um ajuste antecipado da locomoção humana para realizar o desvio, onde a frequência do passo e o comprimento são alterados. A modulação de parâmetros específicos e a modificação de padrões básicos da marcha ocorrem no desvio de obstáculos, a partir da informação externa recebida. A estratégia para regular o comprimento do passo assume que somente o último passo antes do desvio do obstáculo é diminuído ou aumentado de acordo com a localização do obstáculo. A combinação mais usada para a variação do passo é a variação do comprimento e da frequência a uma dada velocidade.

Diversos pesquisadores (Taga, 1998; Taga, 1995; Mcfadyen et al., 1994; Taga et al., 1991; Jordan, 1990; Kawato et al., 1987) têm proposto algoritmos computacionais para a modelagem e determinação dos parâmetros da marcha em animais. As trajetórias das juntas são geradas a partir de padrões da marcha humana obtidos experimentalmente e os torques necessários para o movimento são calculados. Porém, a relação entre o mecanismo de tomada de decisão e o mecanismo de geração de padrões de marcha ainda é objeto de estudo. Neste trabalho será proposto no capítulo 8 uma relação entre estes mecanismos e implementado no robô a ser estudado.

Gorce e Hafi (Gorce and Hafi, 2000; Hafi and Gorce, 2000) estudaram os mecanismos de tomada de decisão de seres humanos para a tarefa de transpor obstáculos. A coleta de dados cinemáticos dos indivíduos foi realizada através dos sistema *VICON*. Em seguida foi realizado um modelo biomecânico do corpo humano. O modelo foi chamado de BIPMAN (Biomechanical and Pneumatic Man) sendo composto por 11 segmentos e 12 juntas pneumáticas (4

por perna e 2 por braço). Eles propuseram uma técnica para determinar os parâmetros da marcha, baseado na distância entre o modelo e o obstáculo, necessários para a estratégia de desvio do obstáculo.

Hill e seus colegas (Hill et al., 1999) realizaram experimentos com indivíduos amputados abaixo do joelho e analisaram a estratégia para desvio dos obstáculos, com base nos dados cinemáticos colhidos dos indivíduos amputados ao passarem sobre os obstáculos de diferentes alturas na direção da marcha. Através da dinâmica inversa foi calculada a potência e o trabalho realizado durante as fases da marcha para a perna normal e para a perna com prótese. Foi observado que à medida que a altura dos obstáculos aumentava, a flexão do joelho da perna protética aumentava através da variação do trabalho realizado pela pelve, e não pelo joelho, indicando que o esforço maior é realizado na região da pelve.

De acordo com a literatura pesquisada, a maioria dos trabalhos sobre robôs bípedes está relacionada com a estratégia de controle dos mesmos, visando manter os robôs em equilíbrio ao se locomoverem. Alguns autores têm apresentados trabalhos sobre a marcha em planos inclinados, subindo escadas e marcha em terrenos irregulares, conforme descrito anteriormente. Porém, poucos pesquisadores têm proposto para robôs bípedes trabalhos relacionados à locomoção em um ambiente desestruturado, como também estratégias de desvio de obstáculos. O procedimento de desvio de obstáculos pode ser classificado (Yagi and Lumelsky, 2000), em função das dimensões do objeto, em três tipos: passar sobre o obstáculo, passar pisando sobre o obstáculo e contornar o obstáculo. O principal problema durante o desvio de obstáculos (*Obstacle avoidance*) é a manutenção da estabilidade da locomoção, pois o pé deve se locomover preservando a estabilidade e evitar o obstáculo.

Vukobratovic (Vukobratovic, 1973) apresentou um dos primeiros trabalhos teóricos, tendo considerações sobre os distúrbios e obstáculos relacionados ao padrão bípede de locomoção. Ele analisou a variação dos seguintes padrões de marcha: velocidade média da marcha, largura do passo, fases e tempo de um ciclo da marcha, quando o seu modelo era submetido a um distúrbio provocado por uma força longitudinal, originada da colisão com o obstáculo. Também foram analisados os efeitos que obstáculos do tipo degraus e buracos provocam na locomoção.

Shin e seus colaboradores (Shin et al., 1989) usaram duas câmeras de vídeo digitais no rb

WL-12RII-V (Waseda Leg-12 Refined II with Vision) para estudarem a estratégia de desvio de um obstáculo, onde o rb passava sobre ele, evitando assim contorná-lo. O WL-12RII-V possui 3 gdl por perna, um tronco com 2 gdl com massa em balanço de 30kg, massa total de 102Kg. Feito em CFRP (*carbon fiber reinforced plastic*) e duralumínio e acionado por sistema eletro-hidro-pneumático, com 160 cm de altura. O sistema de visão era capaz de informar com precisão a posição e a forma do obstáculo. Para evitar os problemas causados na imagem pela vibração do rb, que prejudica as medidas, imagem da câmera era congelada em intervalos de tempo durante a marcha. Além disso, para resolver o problema de localização absoluta do rb, que era dificultado pela vibração, foi usada uma tabela de distâncias, a qual relacionava a posição do rb com a velocidade dada. O rb usa 3 tipos de padrões de marcha, que os alternava para localizar e passar sobre o obstáculo.

Um dos principais trabalhos experimentais sobre desvio de obstáculos foi proposto por Kajita e Tani (Kajita and Tani, 1996). O rb MELTRAN II com 6 gdl foi controlado para locomover-se e transpor uma caixa de 3,5 cm de altura com uma velocidade de 20 cm/s. Para identificar o obstáculo foi usado sensor de ultrasom. Ao ser identificado, o robô variava o comprimento do passo para transpô-lo.

Pratt e Pratt (Pratt and Pratt, 1998) propuseram uma estratégia de controle intuitiva para a análise de rb. A estratégia foi aplicada ao rb “Spring Flamingo”, com 7 segmentos, capaz de andar lento e rápido, passar sobre obstáculos, porém sem sensores para localizá-los.

Shih (Shih, 1999) estudou o BR-1 e implementou uma estratégia para o robô subir e descer escadas. Porém, o robô não possuía sensores capazes de identificar os degraus, de modo que o robô sabia a priori a existência e o número de degraus.

Um modelo para sensores de proximidade simulando sensores laser, ultrasom e sensores de reflexão foi proposto por (France et al., 1999). Eles aplicaram esse modelo de sensores em um rb virtual andando em um ambiente desconhecido. Na simulação, os sensores extraíram informações a respeito da distância do robô aos obstáculos, construindo um perfil do ambiente necessário para o planejamento da trajetória. Além disso, no trabalho são apresentados modelos matemáticos dos sensores usados na simulação.

Yagi e Lumelsky (Yagi and Lumelsky, 2000) propuseram uma estratégia de desvio de obstáculos, para um rb virtual com 7 corpos rígidos e 12 gdl (6 na pelve, 1 no joelho e

2 no tornozelo), considerando somente a região marginal de um obstáculo padrão do tipo paralelepípedo. A estratégia consiste em manter o ponto de momento zero (ZMP) estável e associado a um determinado número de padrões de marcha, necessário para lidar com tipos padronizados de obstáculos. Eles assumiram que o robô possuía sensor de visão capaz de captar a vizinhança do obstáculo, determinar as suas dimensões (altura, largura e profundidade) e determinar a distância até ele. O controle do robô seleciona, entre os padrões de marcha estável armazenados em seu controle, a estratégia de desvio em função da informação obtida pelo sensor: o robô passará por cima se o obstáculo tiver altura inferior a máxima amplitude de elevação do pé, o robô contornará o obstáculo caso contrário. Além disso o rb virtual é capaz de ajustar o passo em função da distância até o obstáculo, assim mantendo uma posição segura do obstáculo. A estratégia apresentou resultados satisfatórios.

Foi proposta uma estratégia (Figliolini et al., 2000) para o rb EP-WAR2 (ElectroPneumatic Walking Robot) baseada em sensores lógicos para evitar diferentes obstáculos. O desvio de obstáculos é possível a partir da interação com o ambiente. O rb usa três sensores (dois foto elétricos e um de ultrasom) para mudar o padrão de marcha, podendo alternar entre passada, passo com a perna esquerda, passo com a perna direita, giro à esquerda, giro à direita. Porém, os testes ainda estão em andamento para validar a estratégia.

Um algoritmo foi proposto por Kuffner e seus colaboradores (Kuffner et al., 2001) que possibilitava planejar automaticamente a trajetória. O algoritmo gera uma trajetória dinamicamente estável para o desvio dos obstáculos. Para a determinação da trajetória é necessário fornecer a configuração geométrica tridimensional do ambiente e uma postura estaticamente estável para o robô. Em seguida é determinada a configuração espacial do robô (postura) para realizar o desvio dos obstáculos de modo a satisfazer as restrições dinâmicas de balanço. O algoritmo foi implementado e testado no rb antropomórfico H6 (*Humanoid robot 6*) de 137cm de altura, 51kg e 33 gdl.

Para o robô a ser estudado neste trabalho, a estratégia de desvio proposta está descrita no capítulo 8. Ela é baseada na mudança automática de seis padrões de locomoção ao encontrar um obstáculo, de tal modo que o rb não precisa conhecer o ambiente de trabalho. Ao se locomover pelo ambiente, ele é capaz de executar uma determinada tarefa, mesmo que encontre um obstáculo em seu caminho. A estratégia será simulada e implementada através

do uso de dois tipos de sensores. Além disso, o robô será capaz de identificar e desviar do obstáculo sem a necessidade do conhecimento de sua posição absoluta e da posição do obstáculo.

Capítulo 4

Modelagem Cinemática do RB-1

4.1 Introdução

O RB-1 foi projetado a partir da revisão bibliográfica realizada. Sua concepção foi a de um mecanismo articulado em série com seis juntas de rotação de um grau de liberdade cada, capaz de realizar a marcha no plano sagital no modo estaticamente estável. Outro fator importante na especificação de suas dimensões foi a utilização de servomotores usados em modelismo. Inicialmente o RB-1 foi projetado para ter um desenho inédito e as suas dimensões foram determinadas em função do uso de servomotores de corrente contínua.

Neste capítulo será apresentado o modelo cinemático do RB-1. A partir das coordenadas cartesianas absolutas dos pontos que compõem a trajetória dos pés e da pelve, serão obtidas as coordenadas generalizadas, ou seja, os valores dos ângulos entre cada segmento que compõe o robô, as velocidades e acelerações.

No modelo cinemático serão determinadas a posição, velocidade e aceleração angulares de cada junta de rotação do robô, e também a posição, velocidade e aceleração lineares dos pontos que representam o centro geométrico de cada junta e dos pontos que representam os centros de gravidade de cada segmento. A determinação destas grandezas será feita utilizando-se as matrizes de transformação homogênea, através da transformação de coordenadas entre diferentes sistemas de referencia móveis e fixo.

No próximo capítulo será apresentado o modelo dinâmico do robô obtido a partir das equações do modelo cinemático.

4.2 Modelo cinemático

O RB-1, robô bípede versão 1, é modelado como um sistema mecânico formado por 7 corpos rígidos, que representam os membros inferiores do corpo humano, unidos entre si através de juntas de rotação com 1 gdl cada. Os ângulos q_i ($i = 1 \dots 6$) entre os sete corpos rígidos do robô são denominados de coordenadas generalizadas. Os 7 corpos rígidos ou segmentos são os dois pés, as duas pernas (popular canela), as duas coxas e a pelve. A pelve apresenta 2 juntas de rotação, sendo uma no quadril direito, unindo a coxa direita, e a outra no quadril esquerdo unindo a coxa esquerda. Na figura 4.1 tem-se a representação do RB-1. Por ser uma estrutura do tipo híbrida, é modelado como uma cadeia cinemática aberta, com o pé esquerdo em balanço. Com isto evitam-se as configurações singulares que cancelam algumas coordenadas generalizadas.

Quando os braços não balançam muito, pode-se assumir que o CTM (Cabeça, Tronco e Membros) pode ser modelado como um segmento somente, no caso a pelve (Onyshko and Winter, 1980). Logo, representar a locomoção do corpo humano por 7 segmentos é aceitável.

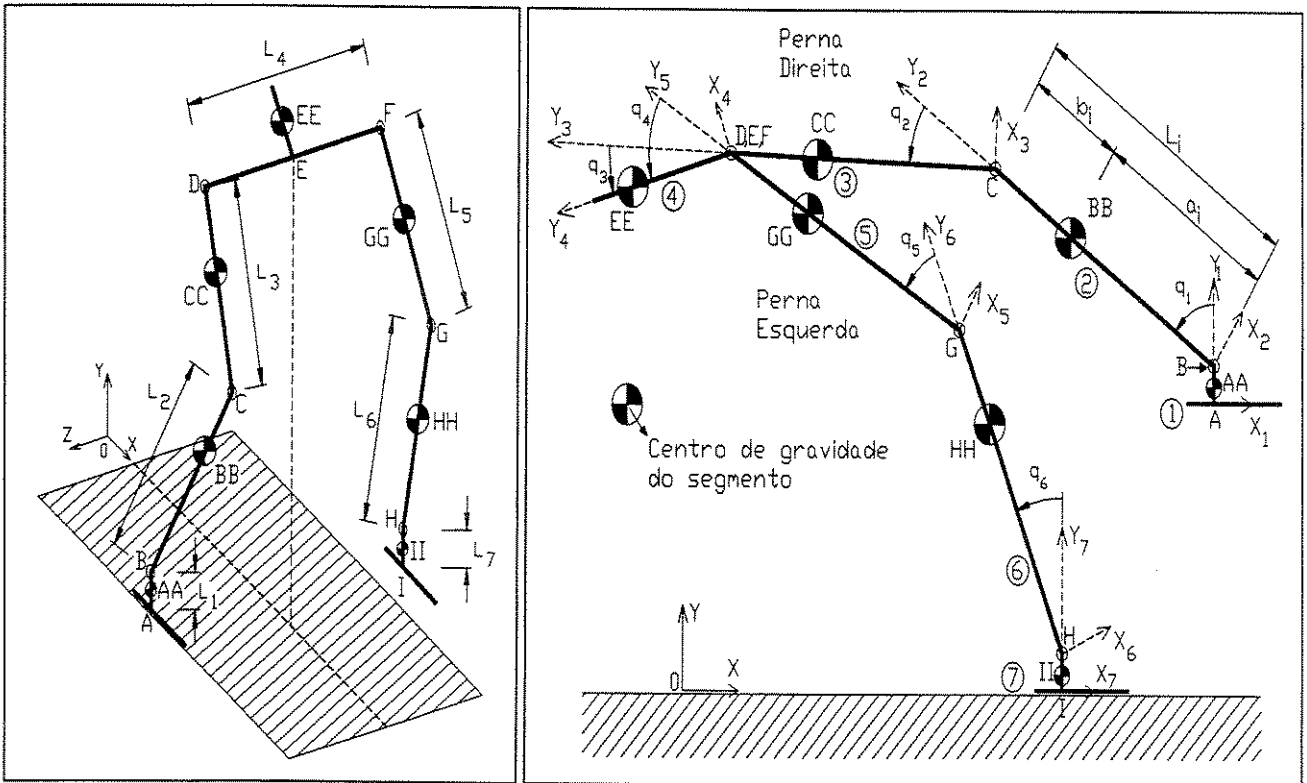


Figura 4.1: (a) Representação do Robô Bípede; (b) Bases Móveis (Mita *et al.*, 1984)

O RB-1 é modelado do mesmo modo que os robôs seriais, aplicando-se sucessivas transformações de coordenadas em suas sucessivas bases. Considera-se que a base do referencial inercial está localizada no pé de apoio e que as demais bases estão localizadas nas demais juntas de rotação. Estas bases são denominadas de bases móveis. Quando o pé em balanço atinge o solo, instantaneamente a base inercial é transladada para o mesmo, e assim por diante.

4.2.1 Matrizes de transformação de coordenadas

Uma vez estabelecida a localização das bases fixa e móveis, torna-se necessário estabelecer as relações entre elas, ou seja, como representar um mesmo vetor em cada uma das bases. Considerando-se a transformação de um vetor s qualquer da base B_1 para base B_2 (rotação positiva de q_1 em torno de Z_1) :

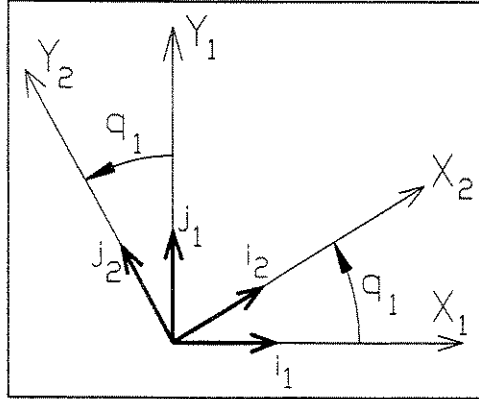


Figura 4.2: Movimento de rotação em torno do eixo +Z da Base B1 para B2

$$\begin{aligned} i_2 &= \cos q_1 i_1 + \sin q_1 j_1 + 0 k_1 \\ j_2 &= -\sin q_1 i_1 + \cos q_1 j_1 + 0 k_1 \\ k_2 &= 0 i_1 + 0 j_1 + 1 k_1 \end{aligned} \Rightarrow$$

$$\begin{Bmatrix} i_2 \\ j_2 \\ k_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ -\sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_1 \\ j_1 \\ k_1 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_{B2}S = [R_1] {}_{B1}S$$

$$\begin{aligned} {}_{B1}S &= [R_1]^{-1} {}_{B2}S \\ {}_{B1}S &= [R_1]^T {}_{B2}S \end{aligned}$$

Portanto, a transformação de um vetor ${}_{B1}S$ representado na base B_1 , para uma base B_2

é realizada multiplicando-se o vetor pela matriz de transformação de coordenadas $[R_1]$. De maneira análoga, para transformar um vetor da base B2 para B1, basta multiplicá-lo pela inversa de $[R_1]$. Uma propriedade da matriz de transformação de coordenadas é que $[R_i]$ é ortonormal, assim, $[R_i]^{-1} = [R_i]^T$.

Observando-se a figura 4.1(b), nota-se que todas as rotações são em torno do eixo Z positivo, pois todos os eixos Z são paralelos. Portanto, pode-se obter todas as matrizes de transformação de coordenadas segundo:

$$[R_2] = \begin{bmatrix} \cos q_2 & \sin q_2 & 0 \\ -\sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}_{B3}\mathbf{s} = [R_2] {}_{B2}\mathbf{s} ; {}_{B2}\mathbf{s} = [R_2]^T {}_{B3}\mathbf{s}$$

$$[R_3] = \begin{bmatrix} \cos q_3 & \sin q_3 & 0 \\ -\sin q_3 & \cos q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}_{B4}\mathbf{s} = [R_3] {}_{B3}\mathbf{s} ; {}_{B3}\mathbf{s} = [R_3]^T {}_{B4}\mathbf{s}$$

$$[R_4] = \begin{bmatrix} \cos q_4 & \sin q_4 & 0 \\ -\sin q_4 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}_{B4}\mathbf{s} = [R_4] {}_{B5}\mathbf{s} ; {}_{B5}\mathbf{s} = [R_4]^T {}_{B4}\mathbf{s}$$

$$[R_5] = \begin{bmatrix} \cos q_5 & \sin q_5 & 0 \\ -\sin q_5 & \cos q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}_{B5}\mathbf{s} = [R_5] {}_{B6}\mathbf{s} ; {}_{B6}\mathbf{s} = [R_5]^T {}_{B5}\mathbf{s}$$

$$[R_6] = \begin{bmatrix} \cos q_6 & \sin q_6 & 0 \\ -\sin q_6 & \cos q_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}_{B6}\mathbf{s} = [R_6] {}_{B7}\mathbf{s} ; {}_{B7}\mathbf{s} = [R_6]^T {}_{B6}\mathbf{s}$$

4.2.2 Posição das juntas

Para a obtenção das posições dos centros de gravidade de cada corpo e das posições dos centros geométricos das juntas em relação ao sistema inercial, tem-se que: *Vetor* $\mathbf{r}_{AAA}$ (vetor do ponto A, origem da base B1, até o ponto AA, centro de gravidade do corpo 1)

$${}_{B1}\mathbf{r}_{AAA} = \begin{Bmatrix} 0 \\ a_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{AAA} = \begin{Bmatrix} 0 \\ a_1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \text{ pois } {}_{B1}\mathbf{s} = [I] {}_I\mathbf{s} \Rightarrow {}_I\mathbf{s} = [I] {}_{B1}\mathbf{s}$$

$$\text{Vetor } \mathbf{r}_{AB} \\ {}_{B1}\mathbf{r}_{AB} = \begin{Bmatrix} 0 \\ l_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{AB} = \begin{Bmatrix} 0 \\ l_1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \text{ pois } {}_{B1}\mathbf{s} = [I] {}_I\mathbf{s} \Rightarrow {}_I\mathbf{s} = [I] {}_{B1}\mathbf{s}$$

Vetor $\mathbf{r}_{BBB}$ (vetor do ponto B, origem da base B2, até o ponto BB, centro de gravidade do corpo 2)

$$\begin{aligned} {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ a_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{BBB} = [R_1]^T {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} \Rightarrow \\ {}_I\mathbf{r}_{BBB} &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ a_2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -a_2 \sin q_1 \\ a_2 \cos q_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vetor } \mathbf{r}_{BC} \\ {}_{B2}\mathbf{r}_{BC} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ l_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{BC} = [R_1]^T {}_{B2}\mathbf{r}_{BC} \Rightarrow \\ {}_I\mathbf{r}_{BC} &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ l_2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -l_2 \sin q_1 \\ l_2 \cos q_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vetor } \mathbf{r}_{CCC} \\ {}_{B3}\mathbf{r}_{CCC} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ a_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{CCC} = [R_1]^T [R_2]^T {}_{B3}\mathbf{r}_{CCC} \Rightarrow \\ {}_I\mathbf{r}_{CCC} &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ a_3 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -a_3 \sin(q_1 + q_2) \\ a_3 \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vetor } \mathbf{r}_{CD} \\ {}_{B3}\mathbf{r}_{CD} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ l_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{CD} = [R_1]^T [R_2]^T {}_{B3}\mathbf{r}_{CD} \Rightarrow \\ {}_I\mathbf{r}_{CD} &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ l_3 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -l_3 \sin(q_1 + q_2) \\ l_3 \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vetor } \mathbf{r}_{DEE} \\ {}_{B4}\mathbf{r}_{DEE} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ a_4 \\ -l_4/2 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{DEE} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T {}_{B4}\mathbf{r}_{DEE} = \begin{Bmatrix} -a_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ +a_4 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ -l_4/2 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vetor } \mathbf{r}_{DF} \\ {}_{B4}\mathbf{r}_{DF} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_4 \end{Bmatrix} \Rightarrow {}_I\mathbf{r}_{DF} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T {}_{B4}\mathbf{r}_{DF} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_4 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Vetor $\mathbf{r}_{FGG}$

$$B5\mathbf{r}_{FGG} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -b_5 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$I\mathbf{r}_{FGG} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T [R_4] \quad B5\mathbf{r}_{FGG} = \begin{Bmatrix} b_5 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) \\ -b_5 \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Vetor $\mathbf{r}_{FG}$

$$B5\mathbf{r}_{FG} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_5 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow I\mathbf{r}_{FG} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T [R_4] \quad B5\mathbf{r}_{FG} = \begin{Bmatrix} l_5 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) \\ -l_5 \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Vetor $\mathbf{r}_{GHH}$

$$B6\mathbf{r}_{GHH} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -b_6 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$I\mathbf{r}_{GHH} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T [R_4] [R_5] \quad B6\mathbf{r}_{GHH} = \begin{Bmatrix} b_6 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) \\ -b_6 \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Vetor $\mathbf{r}_{GH}$

$$B6\mathbf{r}_{GH} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_6 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$I\mathbf{r}_{GH} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T [R_4] [R_5] \quad B6\mathbf{r}_{GH} = \begin{Bmatrix} l_6 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) \\ -l_6 \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Vetor $\mathbf{r}_{HII}$

$$B7\mathbf{r}_{HII} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -b_7 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$I\mathbf{r}_{HII} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T [R_4] [R_5] [R_6] \quad B7\mathbf{r}_{HII} = \begin{Bmatrix} b_7 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ -b_7 \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Vetor $\mathbf{r}_{HI}$

$$B7\mathbf{r}_{HI} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_7 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$I\mathbf{r}_{HI} = [R_1]^T [R_2]^T [R_3]^T [R_4] [R_5] [R_6] \quad B7\mathbf{r}_{HI} = \begin{Bmatrix} l_7 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ -l_7 \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Para obter-se os vetores de posição para a configuração perna esquerda em balanço, somam-se os vetores coerentemente e obtém-se a posição de cada ponto em relação à base

inercial. Seguindo o mesmo procedimento acima, pode-se obter os vetores posição para a configuração perna direita em balanço. No entanto isto será omitido, já que o RB-1 é simétrico.

4.2.3 Velocidade angular absoluta das bases móveis

Continuando com a configuração perna esquerda em balanço, para obter-se a velocidade linear absoluta de cada junta, torna-se necessário conhecer a velocidade angular absoluta das bases móveis Ω_i , logo:

$B_1\Omega_1 = 0$, pois não existe rotação de B1 em relação ao sistema inercial.

$$B_2\Omega_2 = B_2\dot{q}_1 ; B_1\dot{q}_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$B_2\Omega_2 = [R_1] B_1\dot{q}_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ -\sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{Bmatrix}$$

$$B_3\Omega_3 = B_3\dot{q}_1 + B_3\dot{q}_2 ; B_2\dot{q}_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow B_3\Omega_3 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \end{Bmatrix}$$

$$B_4\Omega_4 = B_4\dot{q}_1 + B_4\dot{q}_2 + B_4\dot{q}_3 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \end{Bmatrix}$$

$$B_5\Omega_5 = B_5\dot{q}_1 + B_5\dot{q}_2 + B_5\dot{q}_3 - B_5\dot{q}_4 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 \end{Bmatrix}$$

$$B_6\Omega_6 = B_6\dot{q}_1 + B_6\dot{q}_2 + B_6\dot{q}_3 - B_6\dot{q}_4 - B_6\dot{q}_5 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 \end{Bmatrix}$$

$$B_7\Omega_7 = B_7\dot{q}_1 + B_7\dot{q}_2 + B_7\dot{q}_3 - B_7\dot{q}_4 - B_7\dot{q}_5 - B_7\dot{q}_6 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 - \dot{q}_6 \end{Bmatrix}$$

4.2.4 Velocidade e aceleração angular absoluta dos segmentos do RB-1

Como todas as bases são solidárias aos corpos, então a velocidade angular absoluta da base Ω_i ($i=1, \dots, 7$) é igual à velocidade angular absoluta de cada respectivo corpo ω_i ($i=1, \dots, 7$), ou seja, $\Omega_i = \omega_i$, $i=1, \dots, 7$.

As acelerações angulares absolutas dos segmentos do RB-1 são determinadas pela derivação temporal das velocidades angulares. Como as velocidades angulares são representadas nas bases móveis B_i , então não basta somente derivar no tempo, que fornece somente a variação da amplitude do vetor ω_i . É necessário acrescentar a variação em termos de direção, que é dada pelo produto vetorial $\Omega_i \times \omega_i$. No caso deste robô esse produto vetorial sempre será igual a zero, pois as bases são paralelas. Assim:

$${}_{B1}\dot{\omega}_1 = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}^T = 0$$

$${}_{B2}\dot{\omega}_2 = \frac{d}{dt}({}_{B2}\omega_2) + \underbrace{{}_{B2}\Omega_2 \times {}_{B2}\omega_2}_{=0} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 \end{Bmatrix} \quad {}_{B5}\dot{\omega}_5 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 \end{Bmatrix}$$

$${}_{B3}\dot{\omega}_3 = \frac{d}{dt}({}_{B3}\omega_3) + \underbrace{{}_{B3}\Omega_3 \times {}_{B3}\omega_3}_{=0} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 \end{Bmatrix} \quad {}_{B6}\dot{\omega}_6 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5 \end{Bmatrix}$$

$${}_{B4}\dot{\omega}_4 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 \end{Bmatrix} \quad {}_{B7}\dot{\omega}_7 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5 - \ddot{q}_6 \end{Bmatrix}$$

4.2.5 Velocidade linear absoluta das juntas

Pode-se, então calcular a velocidade linear absoluta de cada centro geométrico de cada junta.

Ponto A, AA (centro de gravidade do corpo 1) e B (junta do tornozelo direito)

$${}_{I}\mathbf{v}_A = 0; \quad {}_{I}\mathbf{v}_{AA} = 0; \quad {}_{I}\mathbf{v}_B = 0$$

Ponto BB (centro de gravidade do corpo 2)

$${}_{B2}\mathbf{v}_{BB} = \underbrace{{}_{B2}\mathbf{v}_B}_{=0} + {}_{B2}\boldsymbol{\omega}_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B2}\mathbf{r}_{BC})}_{=0} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 \\ 0 & a_2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} -a_2\dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto C (junta do joelho direito)

$${}_{B2}\mathbf{v}_C = \underbrace{{}_{B2}\mathbf{v}_B}_{=0} + {}_{B2}\boldsymbol{\omega}_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B2}\mathbf{r}_{BC})}_{=0} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 \\ 0 & l_2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto CC (centro de gravidade do corpo 3)

$${}_{B3}\mathbf{v}_{CC} = {}_{B3}\mathbf{v}_C + {}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CCC} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B3}\mathbf{r}_{CCC})}_{=0}$$

$${}_{B3}\mathbf{v}_C = [R_2] {}_{B2}\mathbf{v}_C = \begin{bmatrix} \cos q_2 & \sin q_2 & 0 \\ -\sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos q_2 \\ l_2\dot{q}_1 \sin q_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CCC} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \\ 0 & a_3 & 0 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} -a_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\Rightarrow {}_{B3}\mathbf{v}_{CC} = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos q_2 - a_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ l_2\dot{q}_1 \sin q_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto D (junta do quadril direito)

$$\text{Analogamente ao } Ponto \text{ CC, tem-se: } {}_{B3}\mathbf{v}_D = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos q_2 - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ l_2\dot{q}_1 \sin q_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto EE (centro de gravidade do corpo 4)

$${}_{B4}\mathbf{v}_{EE} = {}_{B4}\mathbf{v}_D + {}_{B4}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B4}\mathbf{r}_{DEE} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B4}\mathbf{r}_{DEE})}_{=0}$$

$${}_{B4}\mathbf{v}_D = [R_3] {}_{B3}\mathbf{v}_D = \begin{bmatrix} \cos q_3 & \sin q_3 & 0 \\ -\sin q_3 & \cos q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos q_2 - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ l_2\dot{q}_1 \sin q_2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_3 \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_3 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_{B4}\omega_4 \times {}_{B4}\mathbf{r}_{DEE} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \\ 0 & a_4 & -l_4/2 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} -a_4(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\Rightarrow {}_{B4}\mathbf{v}_{EE} = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_3 - a_4(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_3 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto E (centro da quadril) e F (junta do quadril esquerdo)

${}_I\mathbf{v}_D = {}_I\mathbf{v}_E = {}_I\mathbf{v}_F$, pois a pelve sempre se mantém paralela ao eixo Z

Ponto GG (centro de gravidade do corpo 5)

$${}_{B5}\mathbf{v}_{GG} = {}_{B5}\mathbf{v}_F + {}_{B5}\omega_5 \times {}_{B5}\mathbf{r}_{FGG} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B5}\mathbf{r}_{FGG})}_{=0}$$

$${}_{B5}\mathbf{v}_F = [R_4]^T [R_3] {}_{B3}\mathbf{v}_F$$

$$\Rightarrow {}_{B5}\mathbf{v}_{GG} = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_3 - q_4) + b_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_3 - q_4) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto G (junta do joelho esquerdo)

$${}_{B5}\mathbf{v}_G = {}_{B5}\mathbf{v}_F + {}_{B5}\omega_5 \times {}_{B5}\mathbf{r}_{FG} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B5}\mathbf{r}_{FG})}_{=0}$$

$$\Rightarrow {}_{B5}\mathbf{v}_G = \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_3 - q_4) + l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_3 - q_4) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto HH (centro de gravidade do corpo 6)

$${}_{B6}\mathbf{v}_{HH} = {}_{B6}\mathbf{v}_G + {}_{B6}\omega_6 \times {}_{B6}\mathbf{r}_{GHH} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B6}\mathbf{r}_{GHH})}_{=0}$$

$${}_{B6}\mathbf{v}_G = [R_5]^T {}_{B5}\mathbf{v}_G$$

$$\Rightarrow {}_{B6}\mathbf{V}_{HH} = \left\{ \begin{array}{c} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5) \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5) \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \cos q_5 + l_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5) \\ +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \sin q_5 \\ 0 \end{array} \right\}$$

Ponto H (junta do tornozelo esquerdo)

$${}_{B6}\mathbf{V}_H = {}_{B6}\mathbf{V}_G + {}_{B6}\omega_6 \times {}_{B6}\mathbf{r}_{GH} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B6}\mathbf{r}_{GH})}_{=0}$$

$${}_{B6}\mathbf{V}_G = [R_5]^T {}_{B5}\mathbf{V}_G$$

$$\Rightarrow {}_{B6}\mathbf{V}_H = \left\{ \begin{array}{c} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5) \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5) \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \cos q_5 + l_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5) \\ +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \sin q_5 \\ 0 \end{array} \right\}$$

Ponto II (centro de gravidade do corpo 7)

$${}_{B7}\mathbf{V}_{II} = {}_{B7}\mathbf{V}_H + {}_{B7}\omega_7 \times {}_{B7}\mathbf{r}_{HII} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B7}\mathbf{r}_{HII})}_{=0}$$

$${}_{B6}\mathbf{V}_H = [R_6]^T {}_{B6}\mathbf{V}_H$$

$$\Rightarrow {}_{B6}\mathbf{V}_{II} = \left\{ \begin{array}{c} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \cos(q_5 + q_6) + l_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5) \cos q_6 \\ +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \sin(q_5 + q_6) + l_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5) \sin q_6 \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} b_7(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 - \dot{q}_6) \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}$$

Ponto I

$${}_{B7}\mathbf{V}_I = {}_{B7}\mathbf{V}_H + {}_{B7}\omega_7 \times {}_{B7}\mathbf{r}_{HI} + \underbrace{\frac{d}{dt}({}_{B7}\mathbf{r}_{HI})}_{=0}$$

$$\begin{aligned}
{}_{B7}\mathbf{v}_I &= \begin{Bmatrix} -l_2\dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ l_2\dot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ 0 \end{Bmatrix} \\
\Rightarrow &+ \begin{Bmatrix} +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \cos(q_5 + q_6) + l_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5) \cos q_6 \\ +l_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4) \sin(q_5 + q_6) + l_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5) \sin q_6 \\ 0 \end{Bmatrix} \\
&+ \begin{Bmatrix} l_7(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 - \dot{q}_6) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

Devido a simetria do RB-1 , a obtenção das equações para a perna direita em balanço é de maneira análoga.

4.2.6 Aceleração linear absoluta das juntas

A aceleração linear absoluta das juntas e centro de gravidade é agora apresentada.

Ponto A, AA (centro de gravidade do corpo 1) e *Ponto B* (tornozelo direito)

$${}_I\mathbf{a}_A = \mathbf{0} ; {}_I\mathbf{a}_{AA} = \mathbf{0}; {}_I\mathbf{a}_B = \mathbf{0}$$

Ponto BB (centro de gravidade do corpo 2)

$$\begin{aligned}
{}_{B2}\mathbf{a}_{BB} &= \underbrace{{}_{B2}\mathbf{a}_B}_{=0} + {}_{B2}\omega_2 \times {}_{B2}\omega_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} + {}_{B2}\dot{\omega}_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} + \underbrace{2 {}_{B2}\omega_2 \times \frac{d}{dt}({}_{B2}\mathbf{r}_{BBB})}_{=0} \\
&+ \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B2}\mathbf{r}_{BBB})}_{=0}
\end{aligned}$$

$${}_{B2}\omega_2 \times {}_{B2}\omega_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} = {}_{B2}\omega_2 \times \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 \\ 0 & a_2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 \\ -a_2\dot{q}_1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -a_2\dot{q}_1^2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_{B2}\dot{\omega}_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BB} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \ddot{q}_1 \\ 0 & a_2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} -a_2\ddot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\Rightarrow {}_{B2}\mathbf{a}_{BB} = \begin{Bmatrix} -a_2\ddot{q}_1 \\ -a_2\dot{q}_1^2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto C (junta do joelho direito)

$${}_{B2}\mathbf{a}_{BB} = \underbrace{{}_{B2}\mathbf{a}_B}_{=0} + {}_{B2}\boldsymbol{\omega}_2 \times {}_{B2}\boldsymbol{\omega}_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} + {}_{B2}\dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times {}_{B2}\mathbf{r}_{BBB} + 2 \underbrace{{}_{B2}\boldsymbol{\omega}_2 \times \frac{d}{dt}({}_{B2}\mathbf{r}_{BBB})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B2}\mathbf{r}_{BBB})}_{=0}$$

$$\Rightarrow {}_{B2}\mathbf{a}_C = \begin{Bmatrix} -l_2\ddot{q}_1 \\ -l_2\dot{q}_1^2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto CC (centro de gravidade do corpo 3)

$${}_{B3}\mathbf{a}_{CC} = {}_{B3}\mathbf{a}_C + {}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CCC} + {}_{B3}\dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CCC} + 2 \underbrace{{}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times \frac{d}{dt}({}_{B3}\mathbf{r}_{CCC})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B3}\mathbf{r}_{CCC})}_{=0}$$

$${}_{B3}\mathbf{a}_C = [R_2] {}_{B2}\mathbf{a}_C = \begin{bmatrix} \cos q_2 & \sin q_2 & 0 \\ -\sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -l_2\ddot{q}_1 \\ -l_2\dot{q}_1^2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_2[-\ddot{q}_1 \cos q_2 - \dot{q}_1^2 \sin q_2] \\ l_2[\ddot{q}_1 \sin q_2 - \dot{q}_1^2 \cos q_2] \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CD} = {}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \\ 0 & a_3 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \\ -a_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -a_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_{B3}\dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CD} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 \\ 0 & a_3 & 0 \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} -a_3(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\Rightarrow {}_{B3}\mathbf{a}_{CC} = \begin{Bmatrix} l_2[-\ddot{q}_1 \cos q_2 - \dot{q}_1^2 \sin q_2] - a_3(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \\ l_2[\ddot{q}_1 \sin q_2 - \dot{q}_1^2 \cos q_2] - a_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto D (junta do quadril no lado direito)

$${}_{B3}\mathbf{a}_D = {}_{B3}\mathbf{a}_C + {}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CD} + {}_{B3}\dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \times {}_{B3}\mathbf{r}_{CD} + 2 \underbrace{{}_{B3}\boldsymbol{\omega}_3 \times \frac{d}{dt}({}_{B3}\mathbf{r}_{CD})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B3}\mathbf{r}_{CD})}_{=0}$$

$$\Rightarrow {}_{B3}\mathbf{a}_D = \begin{Bmatrix} l_2[-\ddot{q}_1 \cos q_2 - \dot{q}_1^2 \sin q_2] - l_3(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \\ l_2[\ddot{q}_1 \sin q_2 - \dot{q}_1^2 \cos q_2] - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ponto EE (centro de gravidade do corpo 4)

$$B_4 \mathbf{a}_{EE} = B_3 \mathbf{a}_D + B_4 \omega_4 \times B_4 \omega_4 \times B_4 \mathbf{r}_{DEE} + B_4 \dot{\omega}_4 \times B_4 \mathbf{r}_{DEE} \\ + 2 \underbrace{B_4 \omega_4 \times \frac{d}{dt}(B_4 \mathbf{r}_{DEE})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}(B_3 \mathbf{r}_{DEE})}_{=0}$$

$$B_4 \mathbf{a}_D = [R_3] B_3 \mathbf{a}_D = \begin{bmatrix} \cos q_3 & \sin q_3 & 0 \\ -\sin q_3 & \cos q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} l_2[-\ddot{q}_1 \cos q_2 - \dot{q}_1^2 \sin q_2] - l_3(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \\ l_2[\ddot{q}_1 \sin q_2 - \dot{q}_1^2 \cos q_2] - l_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\ 0 \end{array} \right\} = \\ \left\{ \begin{array}{l} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3)] + l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos q_3 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin q_3] \\ l_2[\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3)] + l_3[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin q_3 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos q_3] \\ 0 \end{array} \right\}$$

$$B_4 \omega_4 \times B_4 \omega_4 \times B_4 \mathbf{r}_{DEE} = B_4 \omega_4 \times \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \\ 0 & a_4 & -l_4/2 \end{vmatrix} = \\ \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \\ -a_4(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) & 0 & 0 \end{vmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ -a_4(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 \\ 0 \end{array} \right\}$$

$$B_4 \dot{\omega}_4 \times B_4 \mathbf{r}_{DEE} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 \\ 0 & a_4 & -l_4/2 \end{vmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} -a_4(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}$$

$$B_4 \mathbf{a}_{EE} = \left\{ \begin{array}{l} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3)] + l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos q_3 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin q_3] \\ l_2[\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3)] + l_3[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin q_3 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos q_3] \\ 0 \end{array} \right\} \\ + \left\{ \begin{array}{l} -a_4(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \\ -a_4(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 \\ 0 \end{array} \right\}$$

Ponto E (centro da pelve) e *Ponto F* (junta do quadril esquerdo)

$$I \mathbf{a}_E = I \mathbf{a}_D = I \mathbf{a}_F$$

Ponto GG (centro de gravidade do corpo 5)

$$B_5 \mathbf{a}_{GG} = B_5 \mathbf{a}_F + B_5 \omega_5 \times B_5 \omega_5 \times B_5 \mathbf{r}_{FGG} + B_5 \dot{\omega}_5 \times B_5 \mathbf{r}_{FGG} + 2 \underbrace{B_5 \omega_5 \times \frac{d}{dt}(B_5 \mathbf{r}_{FGG})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}(B_5 \mathbf{r}_{FGG})}_{=0}$$

$$B_5 \mathbf{a}_F = [R_4]^T [R_3] B_3 \mathbf{a}_F$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow {}_{B5}\mathbf{a}_{GG} = & \left\{ \begin{array}{c} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3 - q_4)] \\ l_2[+\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3 - q_4)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
+ & \left\{ \begin{array}{c} l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_3 - q_4) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_3 - q_4)] \\ l_3[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_3 - q_4) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_3 - q_4)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
+ & \left\{ \begin{array}{c} b_5[\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4] \\ b_5[(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2] \\ 0 \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

Ponto G (junta do joelho esquerdo)

$${}_{B5}\mathbf{a}_G = {}_{B5}\mathbf{a}_F + {}_{B5}\omega_5 \times {}_{B5}\omega_5 \times {}_{B5}\mathbf{r}_{FG} + {}_{B5}\dot{\omega}_5 \times {}_{B5}\mathbf{r}_{FG} + \underbrace{2 {}_{B5}\omega_5 \times \frac{d}{dt}({}_{B5}\mathbf{r}_{FG})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B5}\mathbf{r}_{FG})}_{=0}$$

$${}_{B5}\mathbf{a}_F = [R_4]^T {}_{B4}\mathbf{a}_F$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow {}_{B5}\mathbf{a}_G = & \left\{ \begin{array}{c} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3 - q_4)] \\ l_2[+\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3 - q_4)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
+ & \left\{ \begin{array}{c} l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_3 - q_4) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_3 - q_4)] \\ l_3[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_3 - q_4) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_3 - q_4)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
+ & \left\{ \begin{array}{c} l_5[\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4] \\ l_5[(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2] \\ 0 \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

Ponto HH (centro de gravidade do corpo 6)

$${}_{B6}\mathbf{a}_{HH} = {}_{B6}\mathbf{a}_G + {}_{B6}\omega_6 \times {}_{B6}\omega_6 \times {}_{B6}\mathbf{r}_{GH} + {}_{B6}\dot{\omega}_6 \times {}_{B6}\mathbf{r}_{GH} + \underbrace{2 {}_{B6}\omega_6 \times \frac{d}{dt}({}_{B6}\mathbf{r}_{GH})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B6}\mathbf{r}_{GH})}_{=0}$$

$${}_{B6}\mathbf{a}_G = [R_5]^T {}_{B5}\mathbf{a}_G$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow {}_{B6}\mathbf{a}_{HH} = & \left\{ \begin{array}{c} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5)] \\ l_2[+\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
+ & \left\{ \begin{array}{c} l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_3 - q_4 - q_5)] \\ l_3[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_3 - q_4 - q_5)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
+ & \left\{ \begin{array}{c} l_5[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \cos q_5 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \sin q_5] \\ l_5[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \sin q_5 + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \cos q_5] \\ 0 \end{array} \right\} \\
+ & \left\{ \begin{array}{c} b_6[\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5] \\ b_6[(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5)^2] \\ 0 \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

Ponto H (junta do tornozelo esquerdo)

$$\begin{aligned}
{}_{B6}\mathbf{a}_H &= {}_{B6}\mathbf{a}_G + {}_{B6}\boldsymbol{\omega}_6 \times {}_{B6}\boldsymbol{\omega}_6 \times {}_{B6}\mathbf{r}_{GH} + {}_{B6}\dot{\boldsymbol{\omega}}_6 \times {}_{B6}\mathbf{r}_{GH} + \underbrace{2 {}_{B6}\boldsymbol{\omega}_6 \times \frac{d}{dt}({}_{B6}\mathbf{r}_{GH})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B6}\mathbf{r}_{GH})}_{=0} \\
\Rightarrow {}_{B6}\mathbf{a}_H &= \left\{ \begin{array}{l} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5)] \\ l_2[+\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_3 - q_4 - q_5)] \\ l_3[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_3 - q_4 - q_5)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_5[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \cos q_5 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \sin q_5] \\ l_5[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \sin q_5 + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \cos q_5] \\ 0 \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_6[\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5] \\ l_6[(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5)^2] \\ 0 \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

Ponto II (centro de gravidade do corpo 7)

$$\begin{aligned}
{}_{B7}\mathbf{a}_{II} &= {}_{B7}\mathbf{a}_H + {}_{B7}\boldsymbol{\omega}_7 \times {}_{B7}\boldsymbol{\omega}_7 \times {}_{B7}\mathbf{r}_{HII} + {}_{B7}\dot{\boldsymbol{\omega}}_7 \times {}_{B7}\mathbf{r}_{HII} + \underbrace{2 {}_{B7}\boldsymbol{\omega}_7 \times \frac{d}{dt}({}_{B7}\mathbf{r}_{HII})}_{=0} \\
&+ \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B7}\mathbf{r}_{HII})}_{=0} \\
\Rightarrow {}_{B7}\mathbf{a}_{II} &= \left\{ \begin{array}{l} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \\ l_2[+\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \\ l_3[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_5[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \cos(q_5 + q_6) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \sin(q_5 + q_6)] \\ l_5[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \sin(q_5 + q_6) + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \cos(q_5 + q_6)] \\ 0 \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_6[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5) \cos q_6 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5)^2 \sin q_6] \\ l_6[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5) \sin q_6 + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5)^2 \cos q_6] \\ 0 \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} b_7[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5 - \ddot{q}_6)] \\ b_7[(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 - \dot{q}_6)^2] \\ 0 \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

Ponto I

$$\begin{aligned}
{}_{B7}\mathbf{a}_I &= {}_{B7}\mathbf{a}_H + {}_{B7}\boldsymbol{\omega}_7 \times {}_{B7}\boldsymbol{\omega}_7 \times {}_{B7}\mathbf{r}_{HII} + {}_{B7}\dot{\boldsymbol{\omega}}_7 \times {}_{B7}\mathbf{r}_{HII} + \underbrace{2 {}_{B7}\boldsymbol{\omega}_7 \times \frac{d}{dt}({}_{B7}\mathbf{r}_{HII})}_{=0} + \underbrace{\frac{d^2}{dt^2}({}_{B7}\mathbf{r}_{HII})}_{=0} \\
\Rightarrow {}_{B7}\mathbf{a}_I &= \left\{ \begin{array}{l} l_2[-\ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \\ l_2[+\ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_3[-(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \\ l_3[+(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6)] \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_5[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \cos(q_5 + q_6) - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \sin(q_5 + q_6)] \\ l_5[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4) \sin(q_5 + q_6) + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4)^2 \cos(q_5 + q_6)] \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_6[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5) \cos q_6 - (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5)^2 \sin q_6] \\ l_6[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5) \sin q_6 + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5)^2 \cos q_6] \end{array} \right\} \\
&+ \left\{ \begin{array}{l} l_7[(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5 - \ddot{q}_6)] \\ l_7[(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 - \dot{q}_6)^2] \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

Para se obter as acelerações no referencial inercial, basta multiplicar coerentemente pelas matrizes de transformação de coordenadas. Assim, obtém-se a aceleração do ponto I para a perna esquerda em balanço e para o caso simétrico, a aceleração do ponto AA.

Capítulo 5

Modelagem Dinâmica do RB-1

5.1 Introdução

Para a determinação da equação de movimento de sistemas mecânicos tem-se o método de Lagrange, os princípios de Hamilton, d'Alembert, Newton-Euler-Jourdain, entre outros. De acordo com a literatura revisada, os métodos mais utilizados para a modelagem dinâmica de rbs são o método de Lagrange e o princípio de d'Alembert. Aqui será introduzido o método de Newton - Euler - Jourdain para a modelagem dinâmica do RB-1 .

As equações de movimento podem ser desenvolvidas através de diferentes técnicas. Incluindo-se o uso de vários sistemas de coordenadas com a aplicação da mecânica Newtoniana e da Lagrangeana. O uso de coordenadas cartesianas para descrever a posição dos vários segmentos do corpo humano mostra que há mais equações de restrição do que equações de movimento. Experimentos realizados com várias coordenadas demonstrou que as coordenadas mais adequadas, aquelas que apresentaram o menor número de restrições associadas com elas, são os ângulos entre os segmentos (Onyshko and Winter, 1980). Logo serão adotados como coordenadas generalizadas os ângulos entre cada segmento.

O método de Lagrange (A) consiste na determinação da equação de movimento a partir do Lagrangeano, que é definido como a diferença entre a energia cinética e a energia potencial do sistema. O método de Newton-Euler-Jourdain consiste no princípio da potência virtual (Santos, 2001). Ambos apresentam a vantagem da obtenção da equação de movimento sem a necessidade do conhecimento das forças internas entre as uniões dos segmentos que compõem o robô. Existem trabalhos comparando a eficiência computacional entre eles (Corke, 1999;

Wampler, 1985), onde o método Newton - Euler - Jourdain é mais eficiente do que o de Lagrange. Por esta razão, o RB-1 será modelado pelo método NEJ. Além disso, para a simulação computacional não é necessário o conhecimento das forças internas nos segmentos do robô. Uma desvantagem do método Newton - Euler - Jourdain é que a seleção das coordenadas generalizadas não é evidente.

5.2 Método de Newton - Euler - Jourdain

Ao se modelar dinamicamente um corpo rígido usando o método de Newton (variação no tempo do momento linear) - Euler (variação no tempo do momento angular), obtém-se um conjunto de equações diferenciais de movimento e as reações dinâmicas, respectivamente, na forma:

$$\sum_{j=1}^s \mathbf{F}_j = m\mathbf{a} \quad (5.1)$$

$$\sum_{j=1}^s \mathbf{M} = \mathbf{I} \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) + m\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{a} \quad (5.2)$$

Onde s é o número total de forças externas $\mathbf{F}$, m a massa do corpo, $\mathbf{a}$ a aceleração linear do CG do corpo, $\mathbf{M}$ momento provocado pelas “ s ” forças (externas e de reação), $\mathbf{I}$ é o tensor de inércia, $\boldsymbol{\omega}$ velocidade angular do corpo, $\boldsymbol{\Omega}$ é a velocidade angular do sistema de referência na base móvel e $\boldsymbol{\rho}$ é o vetor distância em torno do qual é calculado a quantidade de momento angular até o CG do corpo.

As forças e momentos aplicados em um corpo podem ser passivos (não realizam trabalho) e ativos (realizam trabalho). As forças e momentos de reação são exemplos de forças e momentos passivos. Logo, reescrevendo-se as equações 5.1 e 5.2:

$$\sum \mathbf{R} + \sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (5.3)$$

$$\sum \mathbf{M}_r + \sum \mathbf{M} = \mathbf{I} \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) + m\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{a} \quad (5.4)$$

calculando-se as forças e momentos de reação:

$$\sum \mathbf{R} = -\sum \mathbf{F} + m\mathbf{a} \quad (5.5)$$

$$\sum \mathbf{M}_r = -\sum \mathbf{M} + \mathbf{I} \frac{d}{dt}(\omega) + \Omega \times (\mathbf{I}\omega) + m\rho \times \mathbf{a} \quad (5.6)$$

Introduzindo-se os vetores de deslocamento virtual Δ_s e Δ_ξ para pequenas amplitudes nas direções que permitem o movimento, ou seja, considerando-se as equações de vínculo, e ainda, considerando-se que as forças e momento de reação não produzem trabalho, tem-se que:

$$\Delta_s^t \cdot \sum \mathbf{R} = \Delta_s^t \cdot (-\sum \mathbf{F} + m\mathbf{a}) = 0 \quad (5.7)$$

$$\Delta_\xi^t \cdot \sum \mathbf{M}_r = \Delta_\xi^t \cdot (-\sum \mathbf{M} + \mathbf{I} \frac{d}{dt}(\omega) + \Omega \times (\mathbf{I}\omega) + m\rho \times \mathbf{a}) = 0 \quad (5.8)$$

somando-se o trabalho virtual realizado pelas forças e momentos de reação

$$\Delta_s^t \cdot (-\sum \mathbf{F} + m\mathbf{a}) + \Delta_\xi^t \cdot (-\sum \mathbf{M} + \mathbf{I} \frac{d}{dt}(\omega) + \Omega \times (\mathbf{I}\omega) + m\rho \times \mathbf{a}) = 0 \quad (5.9)$$

Realizando o mesmo procedimento acima, mas usando vetores de velocidade virtual $\Delta\dot{s}$ e $\Delta\dot{\xi}$, obtém-se o princípio da potência virtual ou Princípio de Jourdain:

$$\Delta\dot{s}^t \cdot (-\sum \mathbf{F} + m\mathbf{a}) + \Delta\dot{\xi}^t \cdot (-\sum \mathbf{M} + \mathbf{I} \frac{d}{dt}(\omega) + \Omega \times (\mathbf{I}\omega) + m\rho \times \mathbf{a}) = 0 \quad (5.10)$$

Conforme pode-se observar na equação 5.10 não aparecem forças e momentos de reação.

Para aplicar a equação 5.10 em sistemas de corpos rígidos é necessário determinar os vetores de velocidades virtuais $\Delta\dot{s}$ e $\Delta\dot{\xi}$, de tal forma que eles sejam perpendiculares às forças e momentos de reação. Logo, estes vetores devem respeitar as equações de vínculo e somente variar nas direções em que o corpo pode mover-se, ou seja, nas direções que se tem graus de liberdade. Portanto, sabendo-se que estes vetores somente variam nas direções dos graus de liberdade dos corpos, estes podem ser obtidos através das derivadas parciais em relação aos graus de liberdade do sistema. Para os casos de sistemas com mais de um gdl, os vetores $\Delta\dot{s}$ e $\Delta\dot{\xi}$ são matrizes, sendo denominados de Jacobiano de translação $\mathbf{J}_v$ e de rotação $\mathbf{J}_w$. Mais adiante será mostrado como determinar os Jacobianos para o RB-1 .

Para a obtenção das equações de movimento do RB-1 faz-se necessário apresentar o Diagrama de Corpo Livre (DCL), como pode ser visto na figura 5.1.

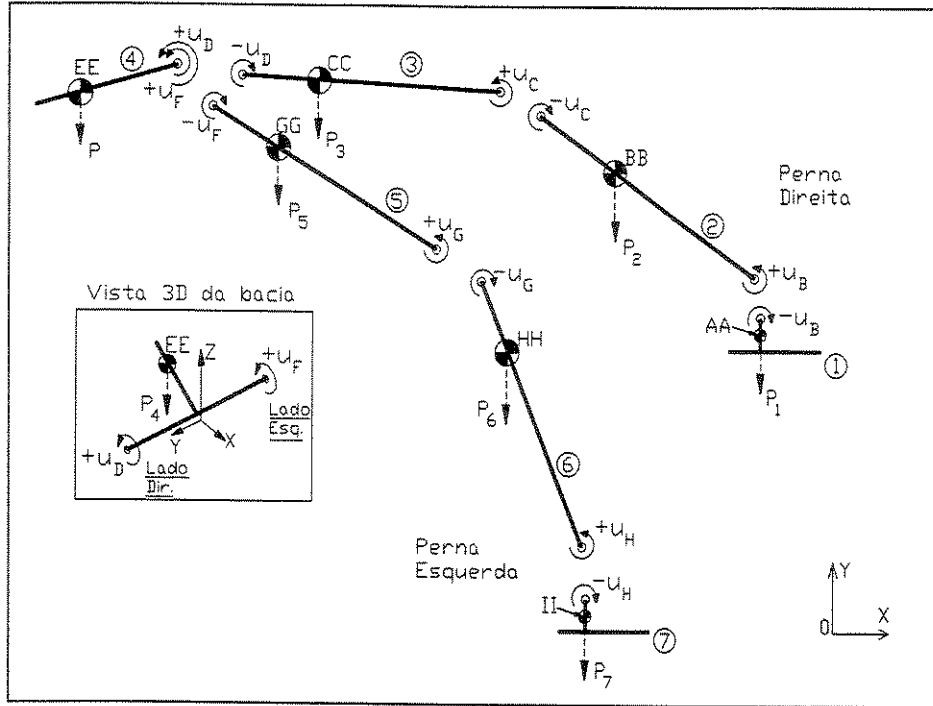


Figura 5.1: Diagrama de Corpo Livre do RB-1

Considerando-se que a obtenção das reações internas não são de interesse neste trabalho, o desenvolvimento da modelagem dinâmica do RB-1 consiste na determinação das equações de movimento. Desta maneira, as reações internas (reações em cada junta e reações no pé de apoio) foram omitidas no DCL. Porém, de acordo com a figura 5.1, indicam-se as forças e momentos externos atuantes no sistema: os torques u_B , u_C , u_D , u_F , u_G , u_H e as forças gravitacionais de cada corpo P_i ($i=1, \dots, 7$). Considera-se que a força de gravidade age no centro de gravidade de cada corpo i . Devido a simetria do RB-1, o CG do pé, perna e coxa direita são idênticos aos CG da perna esquerda.

Na tabela 5.1 estão indicados onde os vários atuadores estão solidários e em quais corpos os mesmos atuam. Ao atuar em um outro corpo, uma reação de mesmo módulo e de sentido oposto atua no corpo ao qual o atuador é solidário.

Durante a fase de apoio simples, o sistema mecânico é holonômico, pois o número de graus de liberdade ($q_1, \dots, q_6$) é igual ao número de graus de liberdade de velocidade ($\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_6$). Até o pé em balanço tocar o solo, o sistema possui somente restrições geométricas. A equação vetorial que descreve este método pode ser escrita como (Santos, 2001):

Tabela 5.1: Atuadores

Atuador	Solidário ao Corpo	Atua no sentido de Z Positivo no Corpo
B	2 (perna direita)	1 (pé direito)
C	2 (perna direita)	3 (coxa direita)
D	3 (coxa direita)	4 (pelve)
F	5 (coxa esquerda)	4 (pelve)
G	6 (perna esquerda)	5 (coxa esquerda)
H	6 (perna esquerda)	7 (pé esquerdo)

$$\sum_{i=1}^p \left[\mathbf{J}_{v_i}^T \left(\sum_{Bn} \mathbf{F}_E - m_i {}_{Bn}\mathbf{a}_i \right) + \mathbf{J}_{\omega_i}^T \left(\sum_{Bm} \mathbf{M}_{E_O} - \mathbf{I}_{O_i} \frac{d}{dt} ({}_{Bm}\boldsymbol{\omega}_i) - {}_{Bm}\boldsymbol{\Omega}_i \times (\mathbf{I}_{O_i} {}_{Bm}\boldsymbol{\omega}_i) - m_i {}_{Bm}\mathbf{r}_{O_i}^{CG} \times {}_{Bm}\mathbf{a}_i \right) \right] = 0 \quad (5.11)$$

onde

$\sum_{i=1}^p$ é a somatória de todos os corpos p

$\mathbf{J}_{v_i}^T$ é o Jacobiano de velocidade linear (Jacobiano de translação) do corpo i

$\sum_{Bn} \mathbf{F}_E$ somatória das forças externas representadas na Base Bn agindo no corpo i

m_i é a massa do corpo i

${}_{Bn}\mathbf{a}_i$ é a aceleração do corpo i , escrito em relação à base móvel Bm

$\mathbf{J}_{\omega_i}^T$ é o Jacobiano de velocidade angular (Jacobiano de rotação) do corpo i

$\sum_{Bm} \mathbf{M}_{E_O}$ somatória dos momentos externos representados na base Bm em relação ao ponto O do corpo i

$\mathbf{I}_{O_i}$ é o momento de inércia de massa do corpo i em relação ao ponto O

$\frac{d}{dt} ({}_{Bm}\boldsymbol{\omega}_i)$ derivada temporal do vetor de velocidade angular do corpo i na própria base Bm

${}_{Bm}\boldsymbol{\Omega}_i$ é o vetor de velocidade angular da base Bm representada na própria base Bm

${}_{Bm}\omega_i$ é o vetor de velocidade angular do corpo i representado na base Bm

${}_{Bm}\mathbf{r}_{O_i}^{CG}$ é o vetor de deslocamento do ponto O , onde ocorre a somatória de momentos, até o ponto CG , ou seja, o centro de gravidade do corpo i

Conforme descrito anteriormente, as forças e momentos internos (reações internas) do RB-1 não aparecem na equação acima, pois a multiplicação do Jacobiano de velocidade linear do corpo i pelas forças internas atuantes neste corpo e a multiplicação do Jacobiano de velocidade angular do corpo i com os momentos internos deste corpo são identicamente nulos. Assim os Jacobianos são definidos para um vetor genérico $\mathbf{s} = \{s_x \ s_y \ s_z\}^T$ em relação ao vetor de coordenadas mínimas de velocidade (no sentido dos graus de liberdade):

$\dot{\mathbf{q}} = \{ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dots \ \dot{q}_n \}^T$, n = número de graus de liberdade do sistema.

O Jacobiano do vetor $\mathbf{s}$ em relação ao vetor de coordenadas mínimas de velocidade é:

$$\mathbf{J}_s = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_x}{\partial \dot{q}_1} & \frac{\partial s_x}{\partial \dot{q}_2} & \dots & \frac{\partial s_x}{\partial \dot{q}_n} \\ \frac{\partial s_y}{\partial \dot{q}_1} & \frac{\partial s_y}{\partial \dot{q}_2} & \dots & \frac{\partial s_y}{\partial \dot{q}_n} \\ \frac{\partial s_z}{\partial \dot{q}_1} & \frac{\partial s_z}{\partial \dot{q}_2} & \dots & \frac{\partial s_z}{\partial \dot{q}_n} \end{bmatrix}$$

Agora, determina-se cada item da equação 5.11:

- Velocidades e Acelerações Lineares dos Centros de Gravidade dos corpos

As velocidades e acelerações dos centros de gravidade de cada corpo já foram apresentados no capítulo de Modelagem Cinemática.

- Velocidade Angular Absoluta das Base Móveis

$$\begin{aligned} {}_{B1}\Omega_1 &= \mathbf{0}; \quad {}_{B2}\Omega_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{Bmatrix}; \quad {}_{B3}\Omega_3 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \end{Bmatrix}; \quad {}_{B4}\Omega_4 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \end{Bmatrix}; \\ {}_{B5}\Omega_5 &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 \end{Bmatrix}; \quad {}_{B6}\Omega_6 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 \end{Bmatrix}; \\ {}_{B7}\Omega_7 &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 - \dot{q}_4 - \dot{q}_5 - \dot{q}_6 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

- Velocidade Angular Absoluta dos corpos

Como já foi mostrado anteriormente:

$${}_{B_i}\omega_i = {}_{B_i}\Omega_i \quad (i=1, \dots, 7)$$

- Derivada da Velocidade Angular Absoluta dos corpos nas respectivas Bases Móveis

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}({}_{B_1}\Omega_1) &= 0; & \frac{d}{dt}({}_{B_2}\Omega_2) &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 \end{Bmatrix}; \\ \frac{d}{dt}({}_{B_3}\Omega_3) &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 \end{Bmatrix}; & \frac{d}{dt}({}_{B_4}\Omega_4) &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 \end{Bmatrix}; \\ \frac{d}{dt}({}_{B_5}\Omega_5) &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 \end{Bmatrix}; & \frac{d}{dt}({}_{B_6}\Omega_6) &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5 \end{Bmatrix}; \\ \frac{d}{dt}({}_{B_7}\Omega_7) &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - \ddot{q}_4 - \ddot{q}_5 - \ddot{q}_6 \end{Bmatrix}; \end{aligned}$$

- Vetor de Coordenadas Mínimas de Velocidade

$$\dot{\mathbf{q}} = \{ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3 \ \dot{q}_4 \ \dot{q}_5 \ \dot{q}_6 \}^T$$

- Jacobianos de Velocidade Linear

$$\mathbf{J}_{v_{AA}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}}({}_{B_1}\mathbf{v}_{AA}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{v_{BB}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}}({}_{B_2}\mathbf{v}_{BB}) = \begin{bmatrix} -a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{v_{CC}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}}({}_{B_3}\mathbf{v}_{CC}) = \begin{bmatrix} -l_2 \cos q_2 - a_3 & -a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_2 \sin q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{v_{EE}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}}({}_{B_4}\mathbf{v}_{EE}) = \begin{bmatrix} -l_2 \cos(q_2 + q_3) - l_3 \cos q_3 - a_4 & -l_3 \cos q_3 - a_4 & -a_4 & 0 & 0 & 0 \\ l_2 \sin(q_2 + q_3) + l_3 \sin q_3 & l_3 \sin q_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{v_{GG}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B5 \mathbf{v}_{GG}) = \begin{bmatrix} -l_2 \cos(q_2 + q_3 - q_4) - l_3 \cos(q_3 - q_4) + b_5 & -l_3 \cos(q_3 - q_4) + b_5 & b_5 & -b_5 & 0 & 0 \\ l_2 \sin(q_2 + q_3 - q_4) + l_3 \sin(q_3 - q_4) & l_3 \sin(q_3 - q_4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{v_{HH}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B6 \mathbf{v}_{HH}) = \begin{bmatrix} -l_2 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - l_3 \cos(q_3 - q_4 - q_5) + l_5 \cos q_5 + b_6 & & & & & \\ l_2 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5) + l_3 \sin(q_3 - q_4 - q_5) + l_5 \sin q_5 & & & & & \\ 0 & & & & & \\ -l_3 \cos(q_3 - q_4 - q_5) + l_5 \cos q_5 + b_6 & l_5 \cos q_5 + b_6 & -l_5 \cos q_5 - b_6 & -b_6 & 0 & \\ l_3 \sin(q_3 - q_4 - q_5) + l_5 \sin q_5 & l_5 \sin q_5 & -l_5 \sin q_5 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{v_{II}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B7 \mathbf{v}_{II}) = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -l_3 \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + l_5 \cos(q_5 + q_6) + l_6 \cos q_6 + b_7 & l_5 \cos(q_5 + q_6) + l_6 \cos q_6 + b_7 \\ l_3 \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + l_5 \sin(q_5 + q_6) + l_6 \sin q_6 & l_5 \sin(q_5 + q_6) + l_6 \sin q_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -l_5 \cos(q_5 + q_6) - l_6 \cos q_6 - b_7 & -l_6 \cos q_6 - b_7 & -b_7 \\ -l_5 \sin(q_5 + q_6) - l_6 \sin q_6 & -l_6 \sin q_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Onde

$$N_1 = -l_2 \cos(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - l_3 \cos(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + l_5 \cos(q_5 + q_6) + l_6 \cos q_6 + b_7$$

$$N_2 = l_2 \sin(q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + l_3 \sin(q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + l_5 \sin(q_5 + q_6) + l_6 \sin q_6$$

- Jacobianos de Velocidade Angular

$$\mathbf{J}_{\omega_1} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B1 \omega_1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{\omega_2} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B2 \omega_2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{\omega_3} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B_3 \omega_3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{\omega_4} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B_4 \omega_4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{\omega_5} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B_5 \omega_5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{\omega_6} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B_6 \omega_6) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{\omega_7} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} (B_7 \omega_7) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

- Termos restantes da equação de Newton-Euler-Jourdain

Corpo 1

$$\sum_{B1} \mathbf{F}_E = [I]_I \mathbf{P}_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -m_1 g \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\sum_{B1} \mathbf{M}_{E_{AA}} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -u_B \end{Bmatrix}; \mathbf{I}_{AA_1} = \begin{bmatrix} I_{xx1} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy1} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz1} \end{bmatrix}$$

onde

I_{xx1} é o momento de inércia principal do corpo 1 na direção do eixo X da base B1

I_{yy1} é o momento de inércia principal do corpo 1 na direção do eixo Y da base B1

I_{zz1} é o momento de inércia principal do corpo 1 na direção do eixo Z da base B1

Corpo 2

$$\sum_{B2} \mathbf{F}_E = [R_1]_I \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ -\sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ -m_2 g \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m_2 g \sin q_1 \\ -m_2 g \cos q_1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\sum_{B2} \mathbf{M}_{EBB} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ +u_B - u_C2 \end{Bmatrix}; \mathbf{I}_{BB2} = \begin{bmatrix} Ixx2 & 0 & 0 \\ 0 & Iyy2 & 0 \\ 0 & 0 & Izz2 \end{bmatrix}$$

Corpo 3

$$\sum_{B3} \mathbf{F}_E = [R_2][R_1] {}_I\mathbf{P}_3 = \begin{Bmatrix} -m_3g \sin(q_1 + q_2) \\ -m_3g \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\sum_{B3} \mathbf{M}_{ECC} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ +u_C - u_D \end{Bmatrix}; \mathbf{I}_{CC3} = \begin{bmatrix} Ixx3 & 0 & 0 \\ 0 & Iyy3 & 0 \\ 0 & 0 & Izz3 \end{bmatrix}$$

Corpo 4

$$\sum_{B4} \mathbf{F}_E = [R_3][R_2][R_1] {}_I\mathbf{P}_4 = [R_3][R_2][R_1] \begin{Bmatrix} 0 \\ -m_4g \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m_4g \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ -m_4g \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\sum_{B4} \mathbf{M}_{EEE} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ +u_D + u_F \end{Bmatrix}; \mathbf{I}_{EE4} = \begin{bmatrix} Ixx4 & 0 & 0 \\ 0 & Iyy4 & 0 \\ 0 & 0 & Izz4 \end{bmatrix}$$

Corpo 5

$$\sum_{B5} \mathbf{F}_E = [R_4]^T[R_3][R_2][R_1] {}_I\mathbf{P}_5 = [R_4]^T[R_3][R_2][R_1] \begin{Bmatrix} 0 \\ -m_5g \\ 0 \end{Bmatrix} =$$

$$= \begin{Bmatrix} -m_5g \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) \\ -m_5g \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\sum_{B5} \mathbf{M}_{EGG} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -u_F + u_G \end{Bmatrix}; \mathbf{I}_{GG5} = \begin{bmatrix} Ixx5 & 0 & 0 \\ 0 & Iyy5 & 0 \\ 0 & 0 & Izz5 \end{bmatrix}$$

Corpo 6

$$\sum_{B6} \mathbf{F}_E = [R_5]^T[R_4]^T[R_3][R_2][R_1] {}_I\mathbf{P}_6 = [R_5]^T[R_4]^T[R_3][R_2][R_1] \begin{Bmatrix} 0 \\ -m_6g \\ 0 \end{Bmatrix} =$$

$$= \begin{Bmatrix} -m_6g \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) \\ -m_6g \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\sum_{B6} \mathbf{M}_{EHH} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -u_G + u_H \end{Bmatrix}; \mathbf{I}_{HH6} = \begin{bmatrix} Ixx6 & 0 & 0 \\ 0 & Iyy6 & 0 \\ 0 & 0 & Izz6 \end{bmatrix}$$

Corpo 7

$$\begin{aligned} \sum_{B7} \mathbf{F}_E &= [R_6]^T [R_5]^T [R_4]^T [R_3] [R_2] [R_1] {}_I \mathbf{P}_7 = [R_6]^T [R_5]^T [R_4]^T [R_3] [R_2] [R_1] \begin{Bmatrix} 0 \\ -m_7 g \\ 0 \end{Bmatrix} = \\ &\begin{Bmatrix} -m_7 g \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ -m_7 g \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \sum_{B7} \mathbf{M}_{E_{II}} &\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -u_H \end{Bmatrix}; \mathbf{I}_{II7} = \begin{bmatrix} I_{xx7} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy7} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz7} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

- Obtenção das Equações de Movimento para o RB-1

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^p \left[\mathbf{J}_{v_i}^T \left(\sum_{Bn} \mathbf{F}_E - m_i {}_{Bn} \mathbf{a}_i \right) + \right. \\ \left. \mathbf{J}_{\omega_i}^T \left(\sum {}_{Bm} \mathbf{M}_{E_O} - \mathbf{I}_{O_i} \frac{d}{dt} ({}_{Bm} \omega_i) - \underbrace{{}_{Bm} \boldsymbol{\Omega}_i \times (\mathbf{I}_{O_i} {}_{Bm} \omega_i)}_{=0} - \underbrace{m_i {}_{Bm} \mathbf{r}_{O_i}^{CG} \times {}_{Bm} \mathbf{a}_i}_{=0} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (5.12)$$

${}_{Bm} \boldsymbol{\Omega}_i \times (\mathbf{I}_{O_i} {}_{Bm} \omega_i)$ é igual a zero, pois $\omega_i = \boldsymbol{\Omega}_i$ para cada corpo i . $m_i {}_{Bm} \mathbf{r}_{O_i}^{CG} \times {}_{Bm} \mathbf{a}_i = 0$, pois $\mathbf{r}_{O_i}^{CG} = 0$, já que a somatória de momentos do corpo i é feita em relação ao centro de gravidade de cada corpo, ou seja, Ponto O $\equiv$ Ponto CG _{i} .

O resultado final da equação acima é um vetor com 6 elementos, sendo que cada elemento representa uma equação de movimento. Estas 6 equações de movimento descrevem o sistema mecânico do RB-1. As 6 equações podem ser escritas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \\ \ddot{q}_5 \\ \ddot{q}_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} bb_1 \\ bb_2 \\ bb_3 \\ bb_4 \\ bb_5 \\ bb_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_B \\ u_C \\ u_D \\ u_F \\ u_G \\ u_H \end{Bmatrix} \quad (5.13)$$

Ou simplificadamente:

$$[A] \{\ddot{\mathbf{q}}\} = \{\mathbf{b}\mathbf{b}\} + \{\mathbf{u}\} \quad (5.14)$$

As equações acima são função dos parâmetros geométricos (l_i, a_i e b_i), dos parâmetros de massa (m_i e I_{zz_i}) e das variáveis q_i , $\dot{q}_i$ e $\ddot{q}_i$, sendo $i=1, \dots, 7$ e os torques de acionamento (u_B , u_C , u_D , u_F , u_G e u_H).

A equação acima pode ser escrita de duas formas, a primeira isolando-se o vetor $\ddot{\mathbf{q}}$:

$$\{\ddot{\mathbf{q}}\} = [A]^{-1}(\{\mathbf{b}\mathbf{b}\} + \{\mathbf{u}\}) \quad (5.15)$$

e a segunda forma, isolando-se o vetor de torques externos:

$$\{\mathbf{u}\} = [A] \{\ddot{\mathbf{q}}\} - \{\mathbf{b}\mathbf{b}\} \quad (5.16)$$

Capítulo 6

Simulação computacional do RB-1

6.1 Introdução

Para a realização da simulação computacional do RB-1 utilizou-se as equações da modelagem cinemática e dinâmica. Nestas simulações o pé em balanço percorre dois tipos de trajetórias: senoidal ou elíptica e a pelve percorre uma trajetória senoidal. Além disso, a pelve permanece sem girar em relação ao sistema inercial, assim como o pé em balanço. Os valores numéricos obtidos na simulação cinemática (posição, velocidade e aceleração angulares) serão os dados de entrada para a simulação dinâmica, que foi realizada utilizando o método de Newton - Euler - Jourdain (NEJ).

6.2 Simulação cinemática

Para a determinação da melhor trajetória a ser seguida pelas pernas em função do acionamento das juntas, diversos pesquisadores têm proposto diferentes metodologias. Vukobratovic e seus colegas (Vukobratovic et al., 1990) adotaram dados biomecânicos do modelo humano, ou seja, foram obtidos dados através de medições do modo de andar de seres humanos. Bay e Hemami (Bay and Hemami, 1997) utilizaram o Gerador Central de Padrões (*CPG*) para gerar movimentos rítmicos das pernas. Katoh e Mori (Katoh and Mori, 1984) usaram um par de osciladores de van der Pol para gerar padrões de passos para o robô bípede BIPMAN. McClintick e Moskowitz (McCown-McClintick and Moskowitz, 1998) utilizaram uma função quadrática para definir a posição inicial e final da perna em balanço. Cheng e Lin

(Cheng and Lin, 1997) propuseram um algoritmo genético para a determinação da trajetória ótima.

Após a aquisição de dados biomecânicos através do software DVIDEOW[®], foi possível propor uma trajetória para o robô semelhante a trajetória realizada pelo indivíduo no laboratório. Para o RB-1 foi adotada como trajetória dos pés em cada passo meia senóide ou meia elipse. Especificando-se o ponto de início, a amplitude (altura do chão) e a distância em X de cada passo, a trajetória do pé se torna totalmente conhecida, tanto para a função senoidal, quanto para função elíptica. Considerou-se também que tanto a pelve quanto os pés possuem velocidades lineares constantes na direção X e que a fase bi-apoiada é instantânea. O robô inicia o movimento com um passo da perna esquerda (regime transitório), que corresponde a postura pés juntos e pernas eretas até a fase de apoio duplo com a perna esquerda a frente. A pelve descreve uma parábola até atingir uma altura mínima do solo. Em seguida o robô realiza uma passada com a perna direita, iniciando o regime permanente.

A simulação cinemática utiliza as equações da modelagem cinemática. Para a determinação da trajetória dos segmentos do RB-1 foram adotadas as seguintes restrições : o pé em balanço somente percorrerá uma trajetória senoidal ou elíptica; tanto o pé em balanço como a pelve permanecem paralelos ao solo; e o movimento do robô ocorre somente no plano sagital. Assim, a posição do joelho (x_C, y_C) pode ser determinada a partir da figura 6.1.

b , c , dd e g são ângulos, L_1 e L_2 são os comprimentos da perna e da coxa, respectivamente. Os pontos B, C e D são os centros geométricos do tornozelo, joelho e quadril direito, respectivamente. X, Y e Z são os lados de um triângulo retângulo. Para o RB-1 e RB-2 $L_1 = L_2 = l$. Logo, $b = dd$, o ângulo c pode ser determinado por:

$$Z^2 = l^2 + l^2 - 2l^2 \cos(c)$$

$$c = \arccos\left(\frac{2l^2 - Z^2}{2l^2}\right)$$

$$dd = b = \left(\frac{180 - c}{2}\right)$$

$$g = \arccos\left(\frac{X}{Z}\right)$$

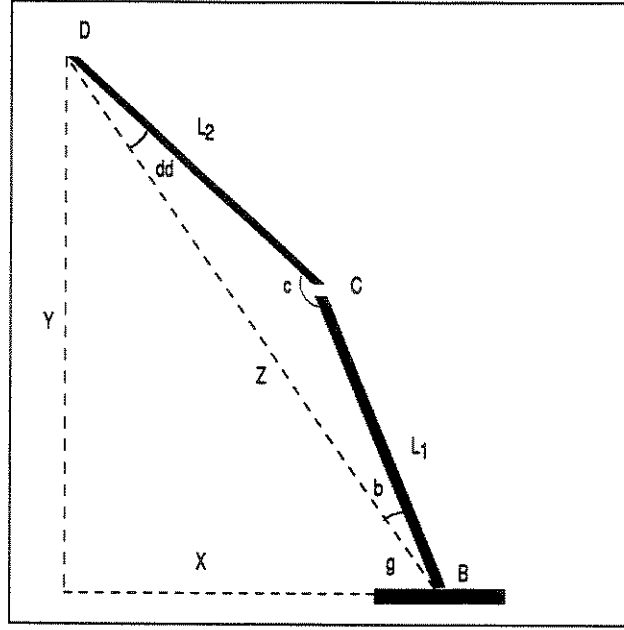


Figura 6.1: Determinação da posição do ponto C (joelho)

Numericamente os programas `angle1.m` e `angle2.m` (anexo) determinam os valores dos ângulos entre a perna e a coxa usando as relações matemáticas acima.

Portanto, com os valores dos pontos $B(x_B, y_B)$, $C(x_C, y_C)$ e $D(x_D, y_D)$, a trajetória da perna direita é totalmente conhecida e de maneira análoga, os valores dos pontos F, G e H. Por conseqüência, o sistema torna-se totalmente conhecido em cada instante de tempo e a trajetória dos segmentos do RB-1 é estabelecida.

Ao se estabelecer a posição do sistema mecânico em cada intervalo de tempo Δt conhecido, obtém-se o deslocamento, a velocidade e a aceleração de cada junta (ou outro ponto qualquer dos segmentos) e a variação de q_i , $\dot{q}_i$ e $\ddot{q}_i$ ao longo do tempo.

A simulação cinemática é realizada através dos programas `robo1.m`, `angle1.m` e `angle2.m`, em código Matlab[®] (Campos et al., 2000). Na figura 6.2 pode-se ver um diagrama que representa o programa principal da simulação cinemática: `Robo1.m`. A partir dos parâmetros da marcha (amplitude do passo, comprimento do passo, altura do passo, número de passos e tipo de trajetória do pé) determina-se o vetor dos ângulos para cada atuador do RB-1.

Os parâmetros da marcha são np - o número de passadas, n é o número de divisões do passo, A é a amplitude que o pé em balanço sobe em relação ao solo, d é a amplitude horizontal do passo, Ye é a altura da pelve no regime permanente e t é a duração do passo.

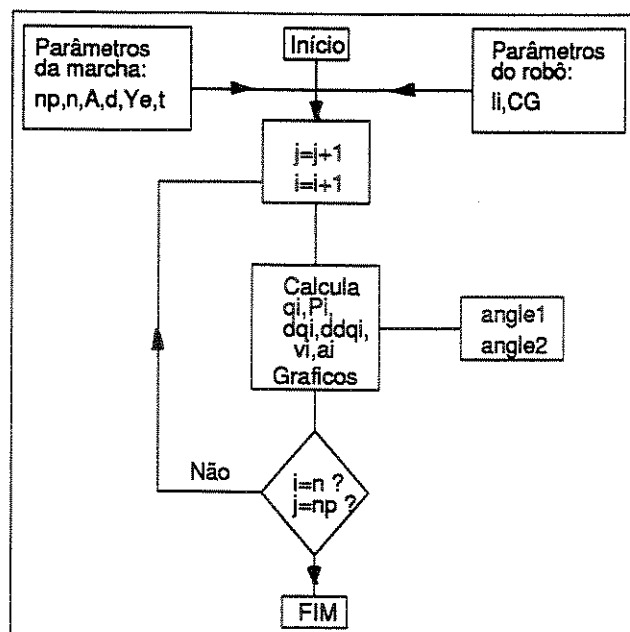


Figura 6.2: Diagrama do programa Robo1.m

Os parâmetros do robô são l_i - as dimensões dos segmentos do robô e CG - os centros de gravidade de cada segmento. No diagrama P_i são as coordenadas cartesianas dos pontos dos segmentos do robô, q_i são as coordenadas generalizadas, dq_i as velocidades angulares das coordenadas generalizadas ($\dot{q}_i$), ddq_i as acelerações angulares das coordenadas generalizadas ($\ddot{q}_i$), v é a velocidade linear dos pontos dos segmentos e a a aceleração linear destes pontos. Na figura 6.3 pode ser visto um passo com a perna esquerda (a) e, o mesmo passo com a perna esquerda, mais uma passada com a perna direita (b).

Ao executar o Robo1.m obtém-se como resposta os arquivos: Trb1.dat, Qrb1.dat, dQrb1.dat e ddQrb1.dat, sendo que o primeiro é formado por uma coluna com n elementos contendo o vetor tempo (exemplo: 0,00; 0,01; 0,02) e os outros arquivos são formados por 6 colunas de n elementos cada, representando os deslocamentos angulares ($q_1, \dots, q_6$), as velocidades angulares ($\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_6$) e as acelerações angulares ($\ddot{q}_1, \dots, \ddot{q}_6$), respectivamente, em cada instante de tempo correspondente aos elementos do arquivo Trb1.dat.

Na simulação cinemática utilizou-se os seguintes parâmetros físicos e de simulação:

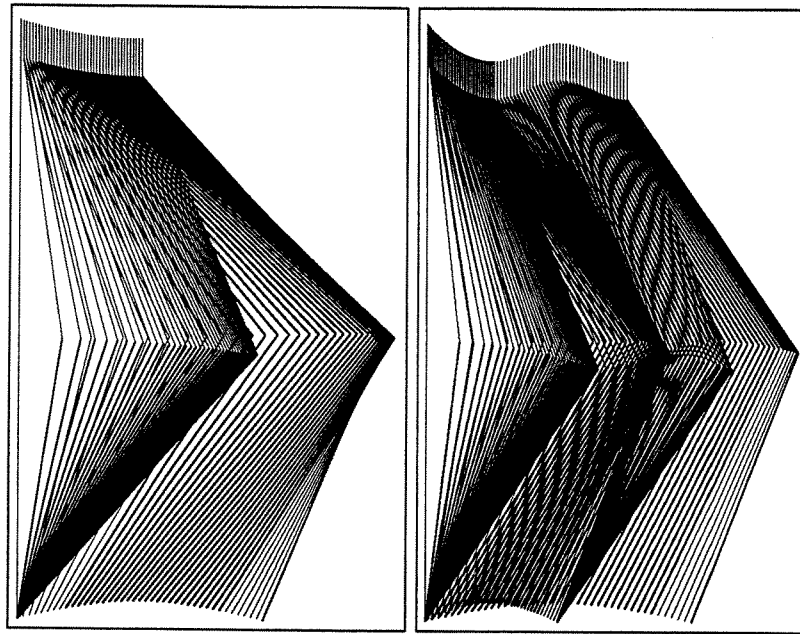


Figura 6.3: Marcha do RB-1 : a)Regime transitório b)Regime permanente

Pernas	$l_2 = l_3 = l_5 = l_6 = 181,82 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Pés	$l_1 = l_7 = 49,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Pelve	altura mínima da pelve em relação ao solo = $0,395 \text{ m}$ amplitude de oscilação da pelve (pico a pico) = $0,009 \text{ m}$
Passos	amplitude dos passos (altura máxima do solo) = $0,025 \text{ m}$ distância de um passo na direção X (regime permanente) = 0.05 m distância de um passo na direção X (regime transitório) = 0.025 m período de um passo = 8 s
Incrementos	20 por passo ($\Delta t = 8 \text{ s}/20 = 0,4 \text{ s}$)

As figuras 6.4 e 6.3 representam as trajetórias das juntas para os dois tipos de trajetória dos pés, senoidal e elíptica, respectivamente. Nota-se, nas figuras 6.6 e 6.7, que a curva de mesmos ângulos, nas trajetórias senoidal e elíptica, variam ligeiramente umas das outras. A maior diferença entre os dois tipos de trajetória dos pés está associado as curvas de velocidade dos pés (figuras 6.8 e 6.10) e, conseqüentemente, as curvas de aceleração. Para mesma amplitude vertical, distância e tempo do passo, a curva de velocidade do pé para a trajetória elíptica apresenta valores mais acentuados de velocidade na direção Y quando o pé está para tocar o chão. Isto provoca um impacto muito grande do pé contra o solo, sendo, portanto, um efeito indesejado. Assim, sob este aspecto, a trajetória senoidal se mostrou mais adequada para aplicação prática. (Bezerra, 1996)

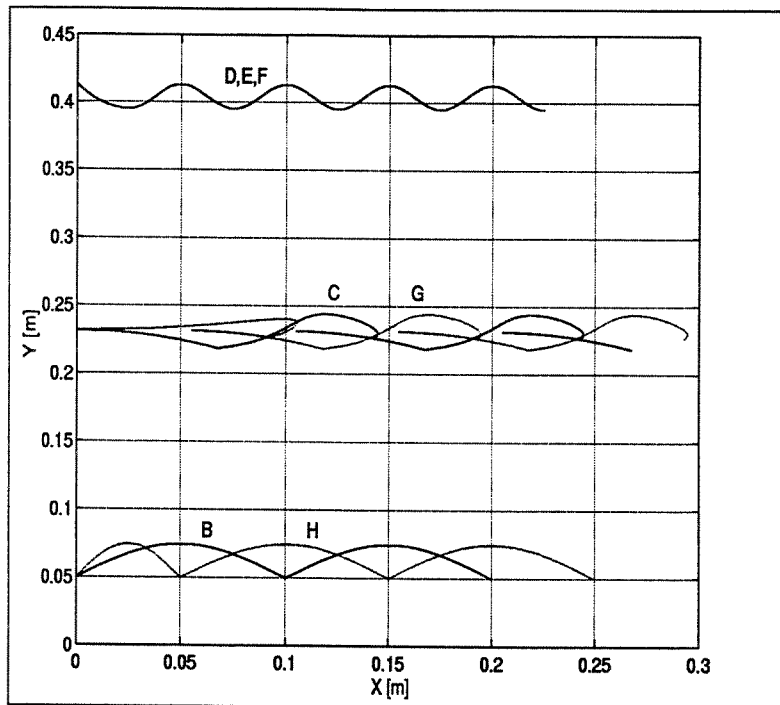


Figura 6.4: Deslocamento das juntas no sistema inercial: trajetória senoidal

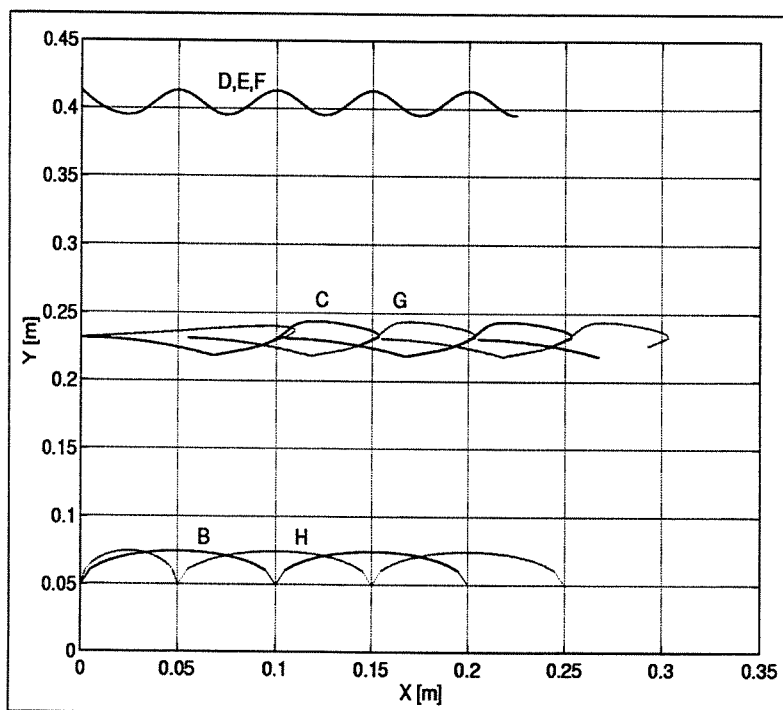


Figura 6.5: Deslocamento das juntas no sistema inercial: trajetória elíptica

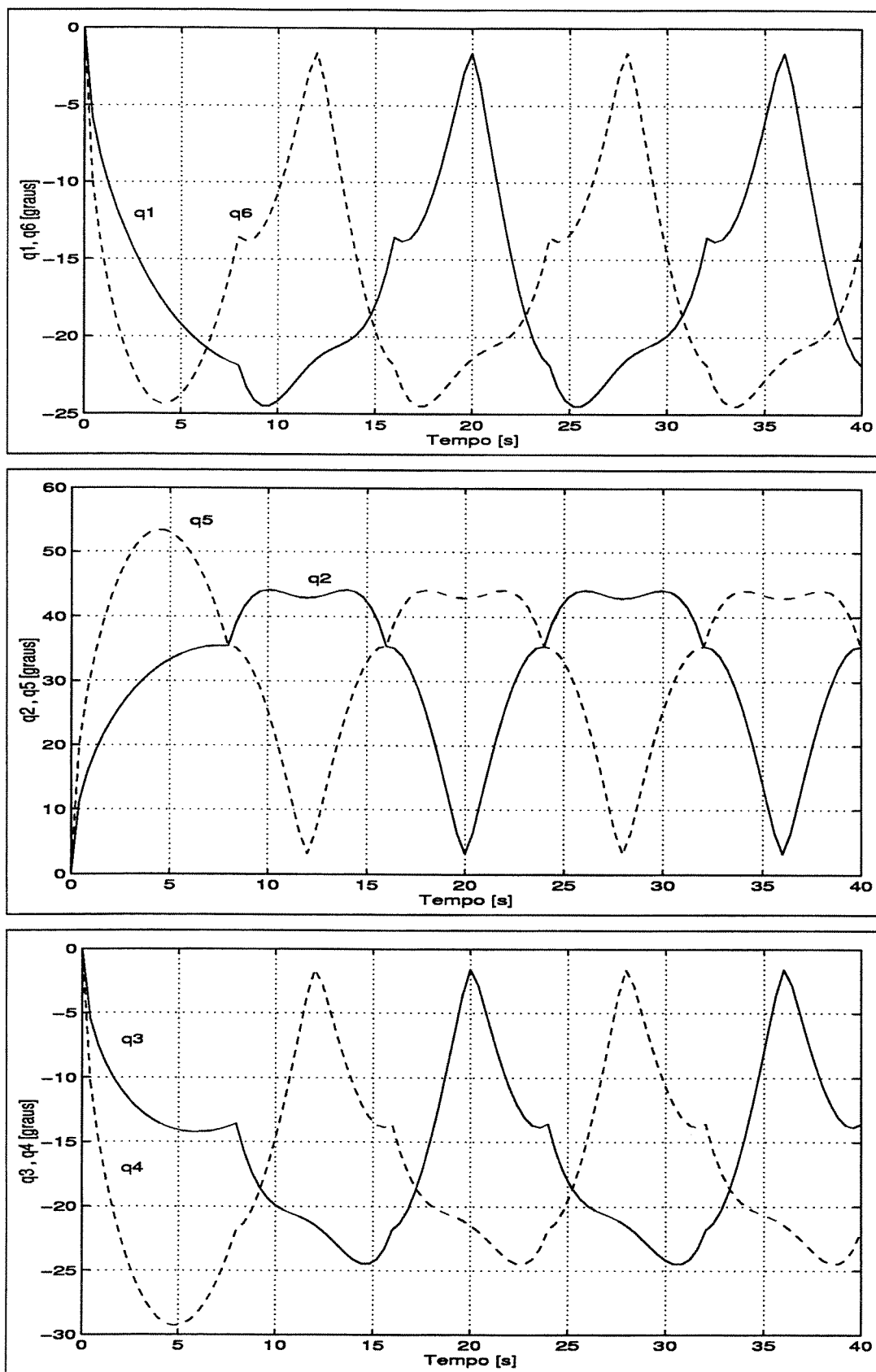


Figura 6.6: Ângulos q_i x tempo (pés trajetória senoidal)

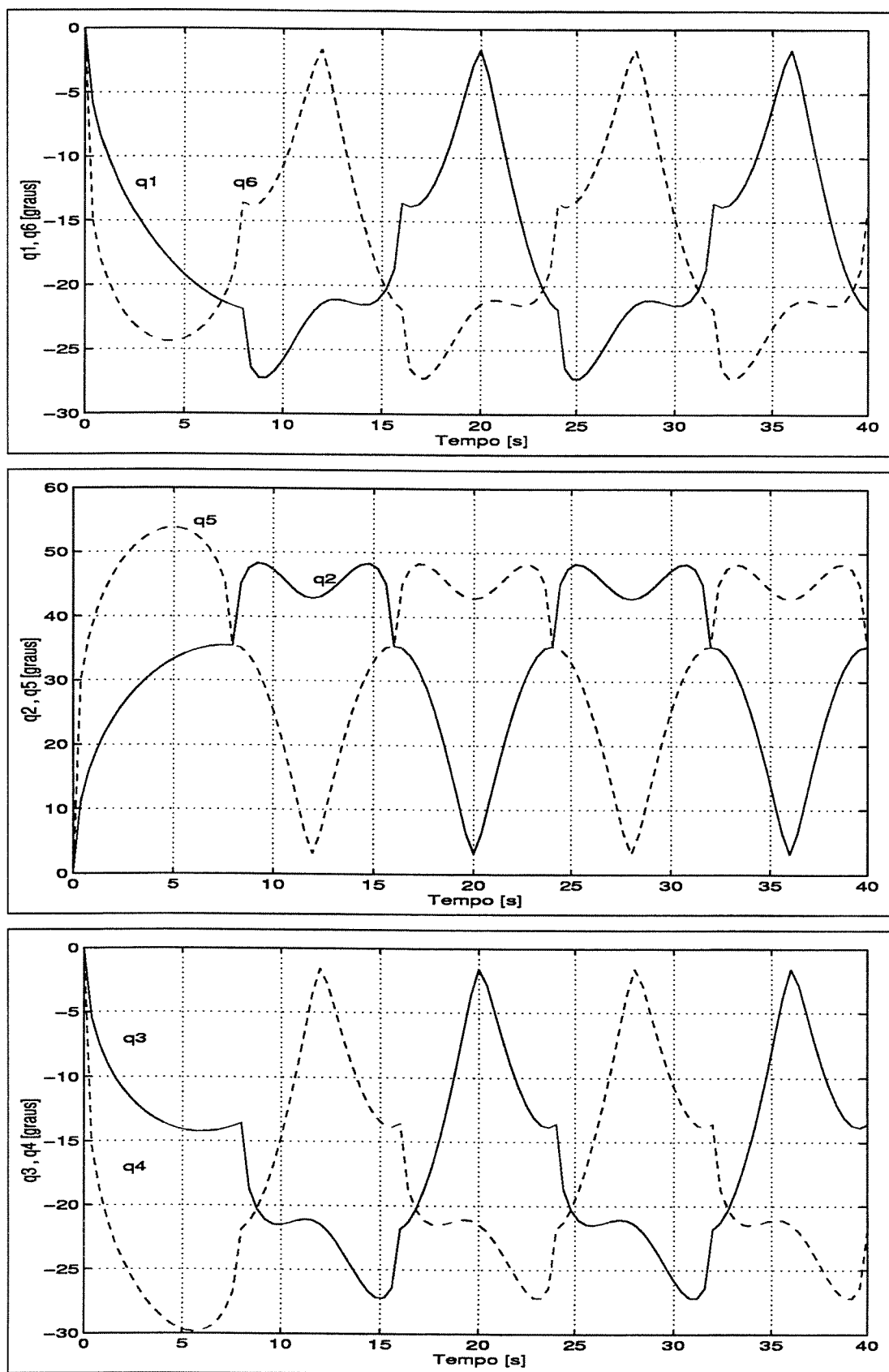


Figura 6.7: Ângulos q_i x tempo (pés com trajetória elíptica)

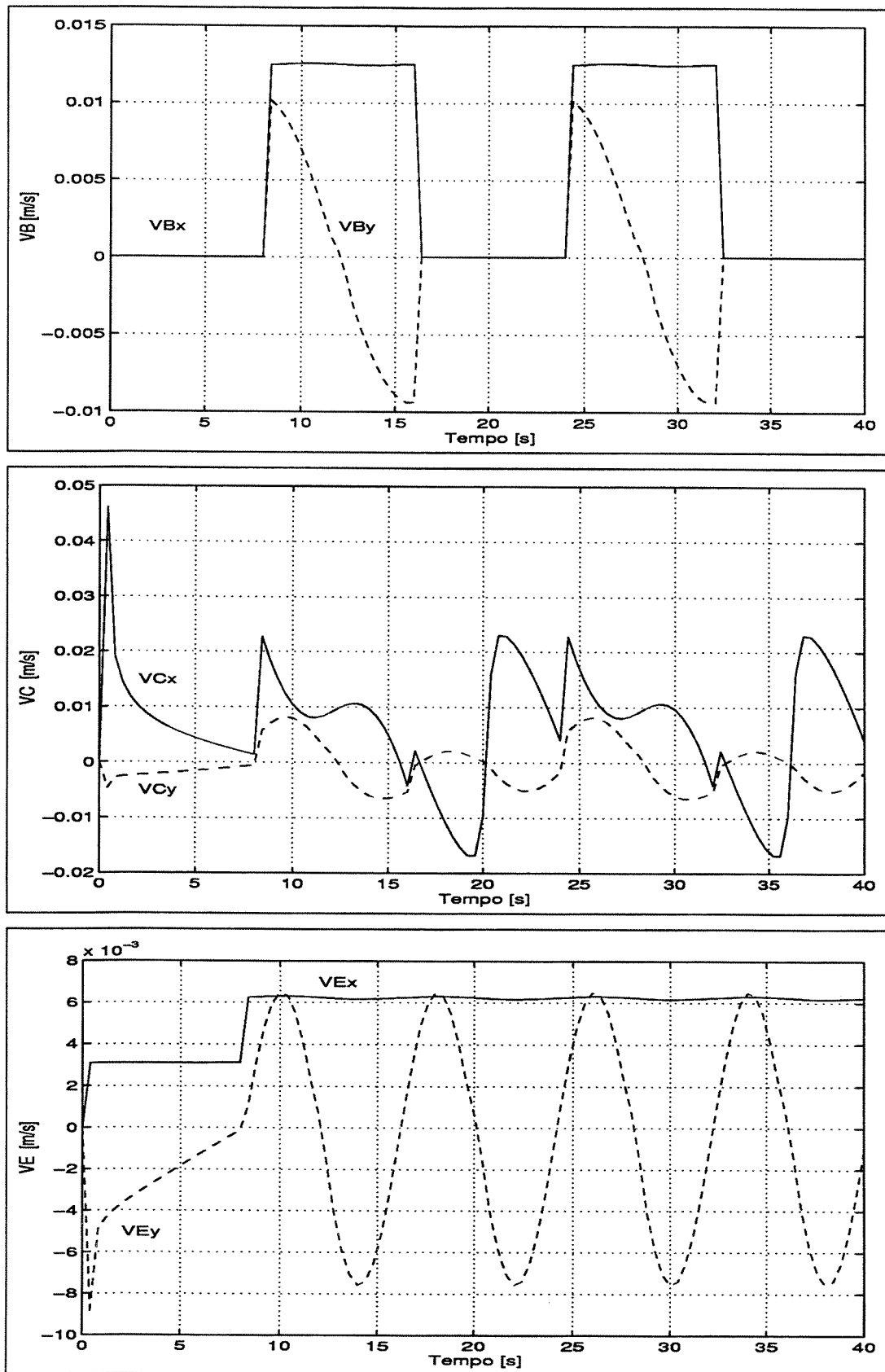


Figura 6.8: Velocidade das juntas x tempo (pés com trajetória senoidal)

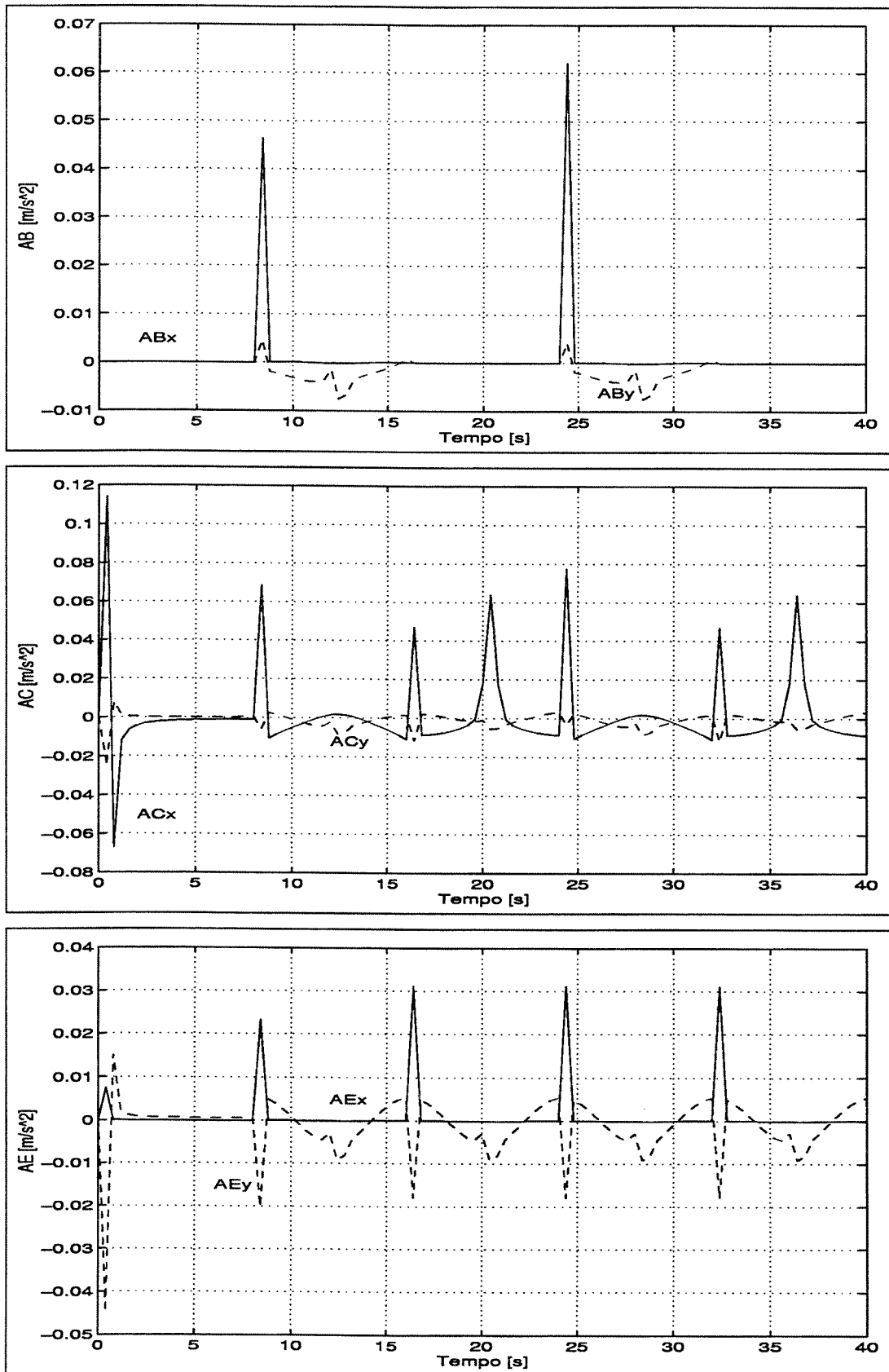


Figura 6.9: Aceleração das juntas x tempo (pés com trajetória senoidal)

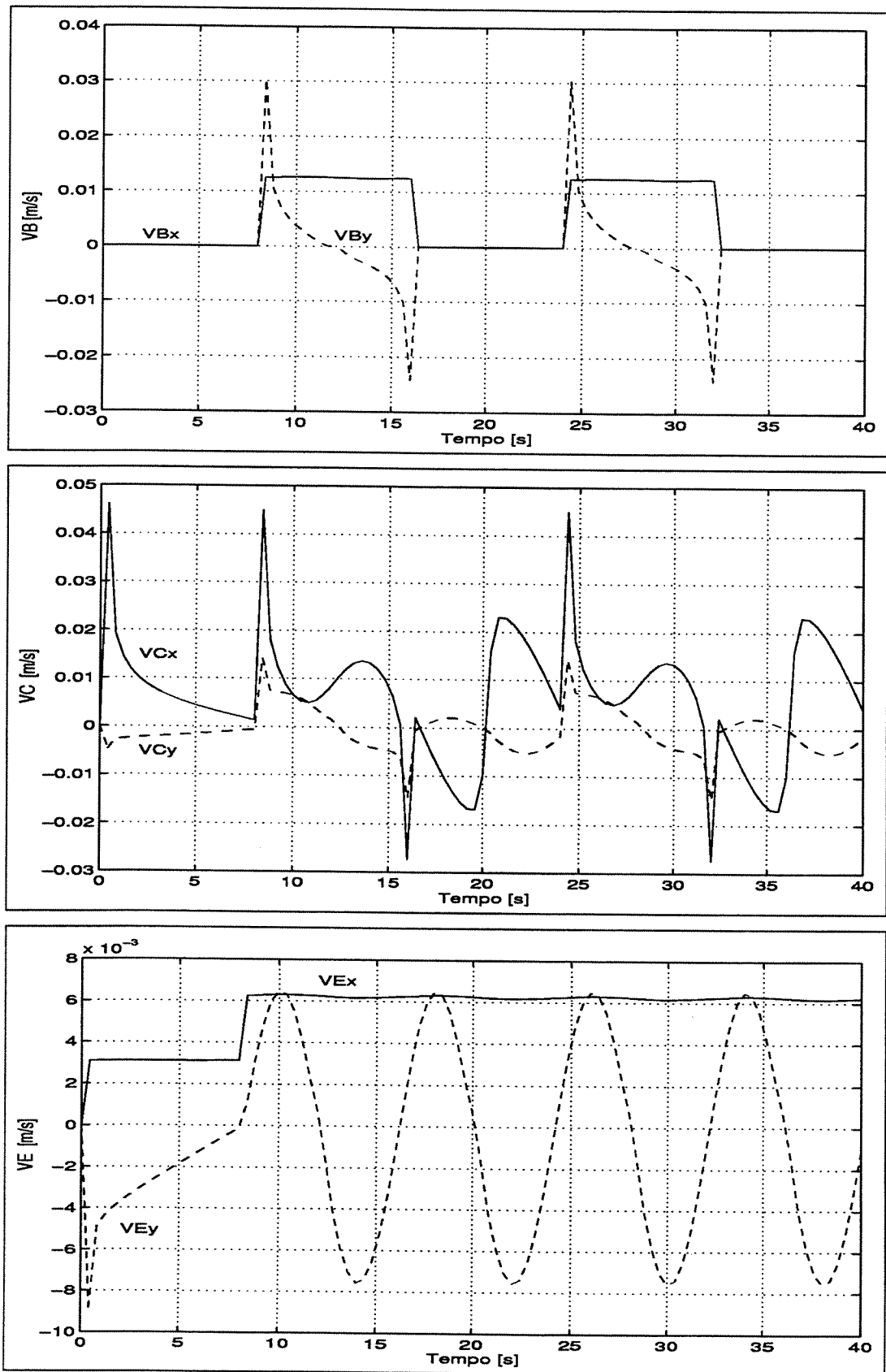


Figura 6.10: Velocidade das juntas x tempo (pés com trajetória elíptica)

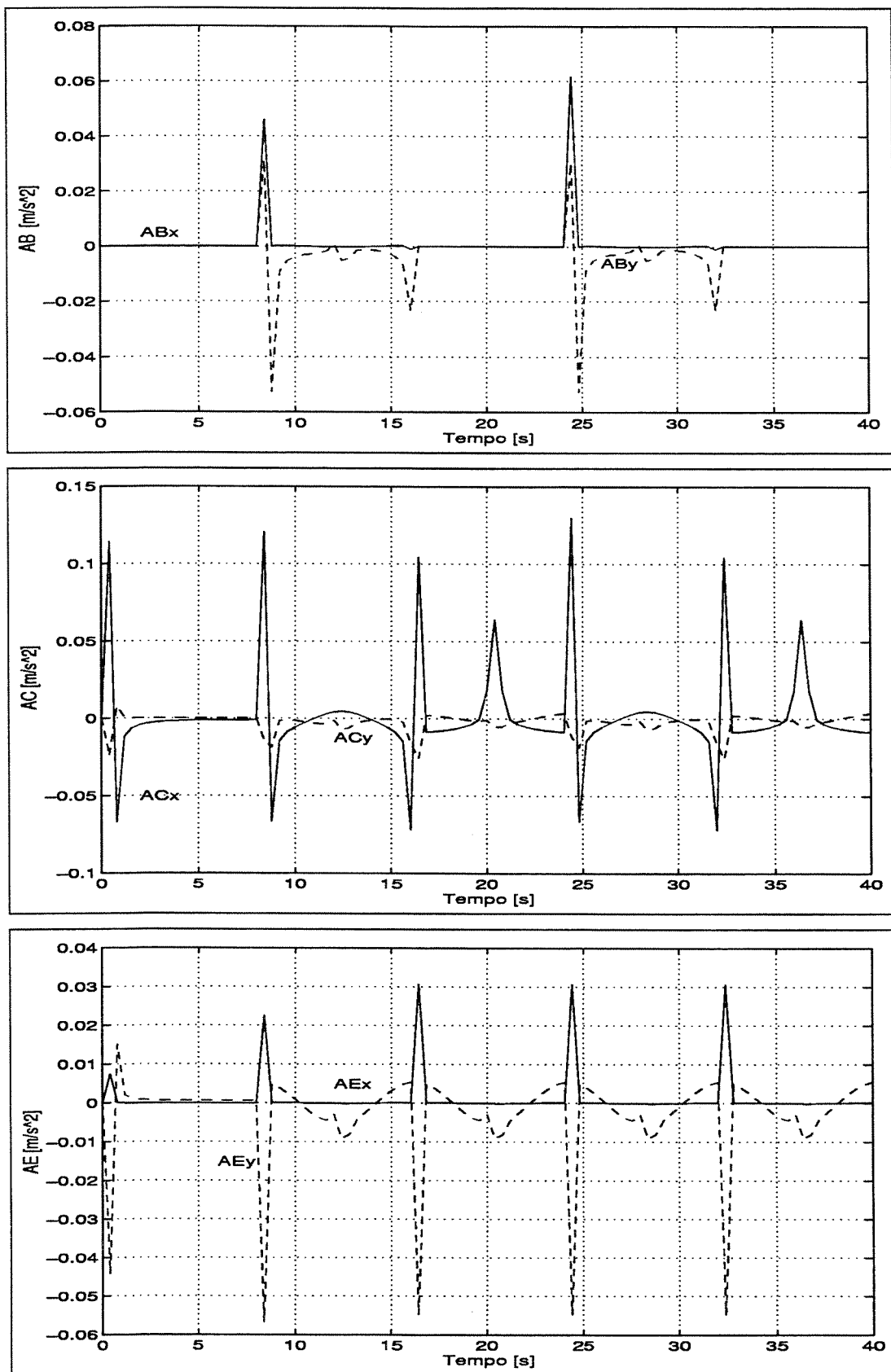


Figura 6.11: Aceleração das juntas x tempo (pés com trajetória elíptica)

6.3 Simulação dinâmica

Os dados gerados na simulação cinemática são dados de entrada para a simulação dinâmica inversa. O arquivo `Robo1nej.m` simula o método Newton - Euler - Jourdain . Nos anexos é apresentado o arquivo `Robo1lag.m`, que simula o método de Lagrange .

6.3.1 Método Newton - Euler - Jourdain

As equações de movimento obtidas no método NEJ podem ser escritas na forma (Campos et al., 2000):

$$\{\mathbf{u}\} = [\mathbf{A}] \{\ddot{\mathbf{q}}\} - \{\mathbf{bb}\} \quad (6.1)$$

que os utiliza para calcular a variação dos torques (u_B, u_C, u_D, u_F, u_G e u_H) ao longo do tempo. Deve-se observar que os comprimentos l_i , tempo de iteração Δt , tempo de passo t da simulação dinâmica devem ser coerentes com os da simulação cinemática.

Em uma segunda opção, o programa `Robo1nej.m` simula a dinâmica direta, permitindo fazer a simulação com as equações de movimento na forma:

$$\{\ddot{\mathbf{q}}\} = [\mathbf{A}]^{-1}(\{\mathbf{bb}\} + \{\mathbf{u}\}) \quad (6.2)$$

Neste caso, os torques deixam de ser os dados de saída e passam a ser os dados de entrada, ou seja, à partir dos torques obtém-se $\ddot{\mathbf{q}}$ ao longo do tempo. Através do vetor $\ddot{\mathbf{q}}$, calculado na primeira iteração, utiliza-se uma aproximação de Taylor de primeira ordem, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{q}_i(t + \Delta t) &= \dot{q}_i(t) + \ddot{q}_i(t)\Delta t \\ q_i(t + \Delta t) &= q_i(t) + \dot{q}_i(t)\Delta t \end{aligned}$$

para obtenção dos vetores q_i e $\dot{q}_i$ em cada instante de tempo. Assim, estes valores de $q_i(t + \Delta t)$ e $\dot{q}_i(t + \Delta t)$ são dados de entrada para a iteração do instante $t + \Delta t$ na equação 6.2.

Na figura 6.12 pode-se ver um diagrama que representa o programa principal da simulação dinâmica: `Robo1nej.m`. No início do programa é solicitado se a simulação a ser realizada será

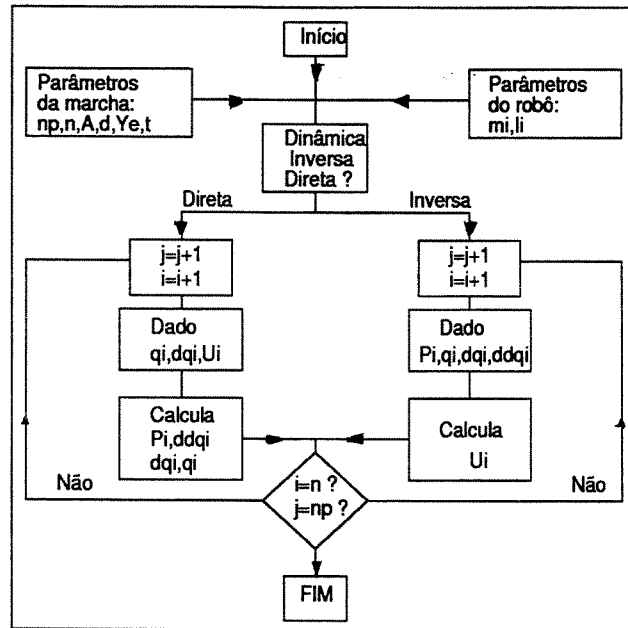


Figura 6.12: Diagrama do programa Robo1nej.m

a modelagem dinâmica inversa ou a direta. Para ambos os métodos (Newton - Euler - Jourdain e Lagrange) o algoritmo é o mesmo, mudando apenas as equações matemáticas do movimento.

Para calcular a variação dos torques (u_B , u_C , u_D , u_F , u_G e u_H) ao longo do tempo, foram usados os mesmos parâmetros físicos do modelo cinemático (características da marcha, dimensões, massa, tempo de iteração, tempo de passo, Δt), além da inércia e aceleração da gravidade. Também é usado a aproximação de Taylor de primeira ordem.

Nas simulações do RB-1 utilizou-se os seguintes parâmetros físicos e de simulação:

Pernas	$l_2 = l_3 = l_5 = l_6 = 0,18182 \text{ m}$
Pés	$l_1 = l_7 = 0,0495 \text{ m}$
Pelve	altura mínima da pelve em relação ao solo = $0,39 \text{ m}$ amplitude de oscilação da pelve (pico a pico) = $0,009 \text{ m}$
Passos	amplitude dos passos (altura máxima do solo) = $0,025 \text{ m}$ distância de um passo na direção X (regime permanente) = $0,05 \text{ m}$ distância de um passo na direção X (regime transitório) = $0,025 \text{ m}$ período de um passo = 8 s
Massas	$m_2 = m_6 = 0,32545 \text{ kg}$ $m_3 = m_5 = 0,26611 \text{ kg}$ $m_1 = m_7 = 0,31692 \text{ kg}$ $m_4 = 0,49562 \text{ kg}$
Momentos de Inércia	$I_{zz_2} = I_{zz_6} = 8,343826 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ $I_{zz_3} = I_{zz_5} = 1,127465 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ $I_{zz_1} = I_{zz_7} = 1,649 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ $I_{zz_4} = 5,886819 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Centros de gravidade	$a_2 = a_6 = 0,0909 \text{ m}$ $a_3 = a_5 = 0,1049 \text{ m}$ $a_1 = a_7 = 0,0153 \text{ m}$ $a_4 = 0,0314 \text{ m}$
Incrementos	20 por passo ($\Delta t = 8 \text{ s}/20 = 0,4 \text{ s}$)

Para o cálculo dos momentos de inércia de massa dos perfis, utilizou-se o programa Mominer.m desenvolvido em Matlab[®]. As simulações apresentadas consistem em um passo inicial em regime transitório com a perna esquerda em balanço, três passos no regime permanente e um passo com a perna esquerda, para juntar as pernas.

Para esta simulação dinâmica são gerados vetores correspondentes a um passo no regime transitório, três passadas no regime permanente e um passo correspondentes ao movimento de juntar os pés, representados na figura 6.13. Os dados de saída do programa Robo1.m da simulação cinemática são a variação dos ângulos q_i ao longo do tempo, assim como suas respectivas velocidade $\dot{q}_i$, as acelerações $\ddot{q}_i$ ao longo do tempo, as coordenadas dos pontos A, B, C, D, G, H, e I, além do vetor tempo T_i . Estes arquivos são dados de entrada para o programa de simulação dinâmica (Robo1nej.m), como já foi anteriormente explicado.

Assim os torques ao longo do tempo para o pé com trajetória senoidal e elíptica podem ser vistos nas figuras 6.14 e 6.15, respectivamente.

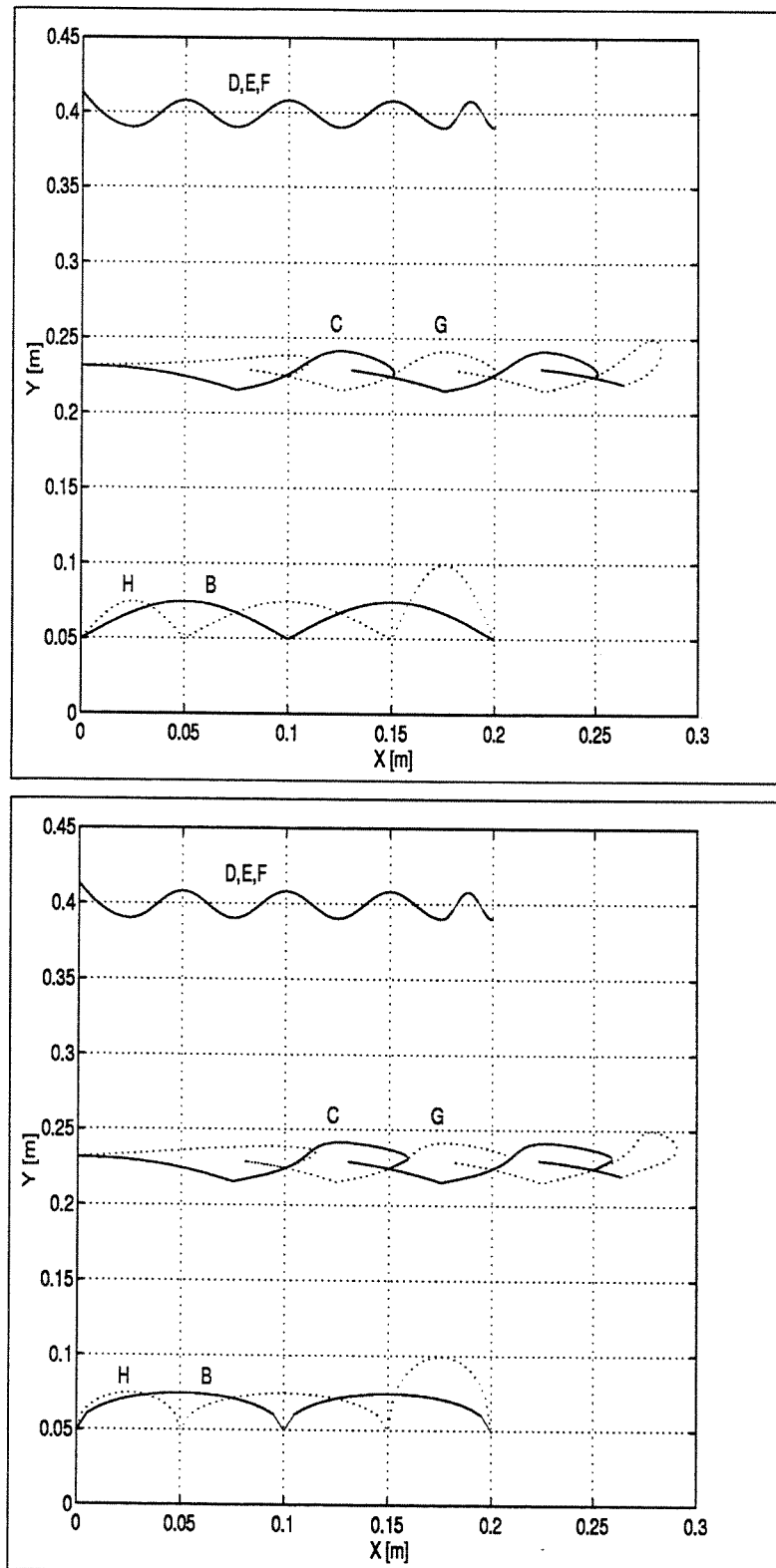


Figura 6.13: Trajetórias senoidal e elíptica do RB-1 a ser simulado dinamicamente

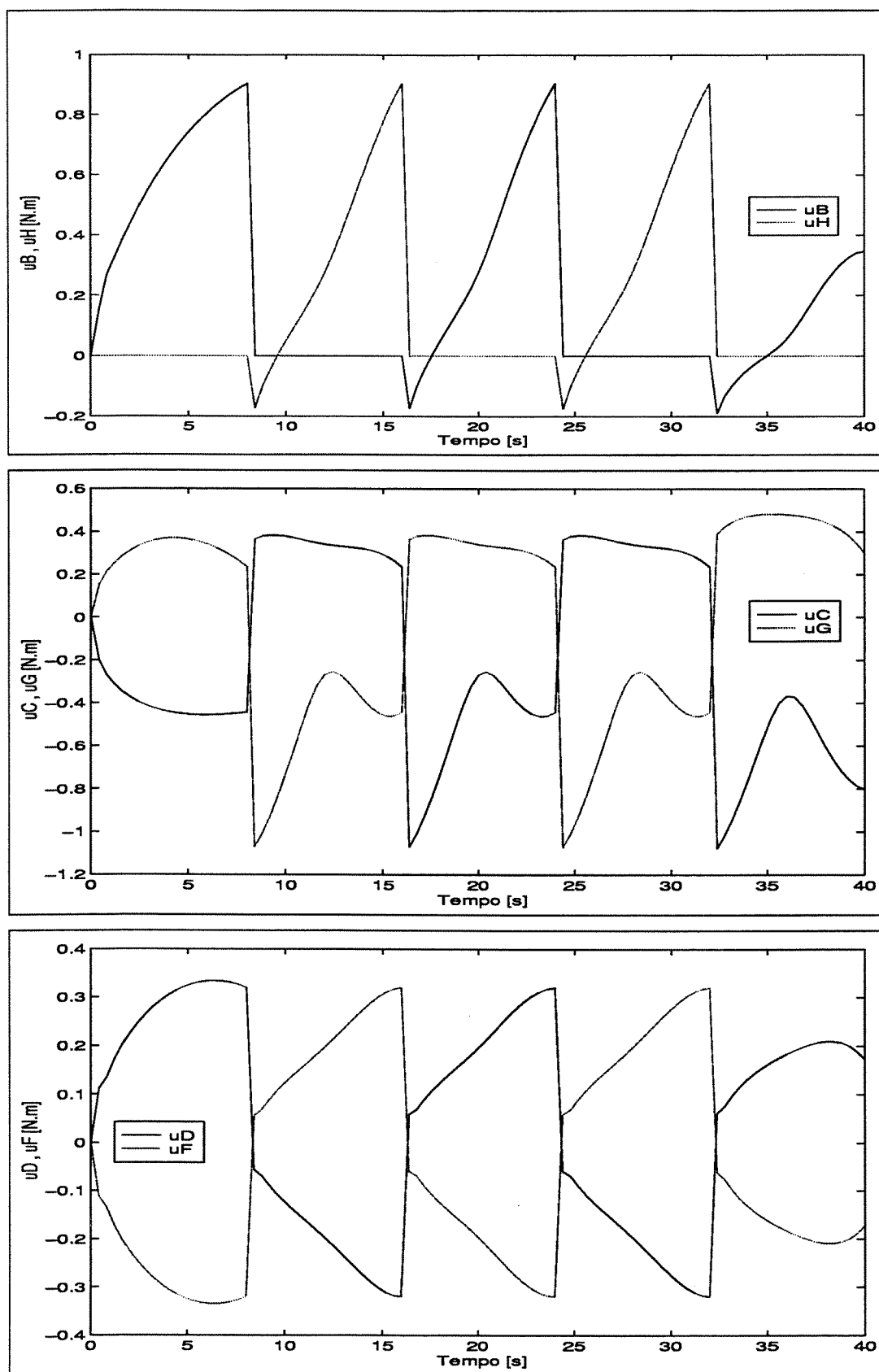


Figura 6.14: Torques nas juntas x tempo (trajetória senoidal)

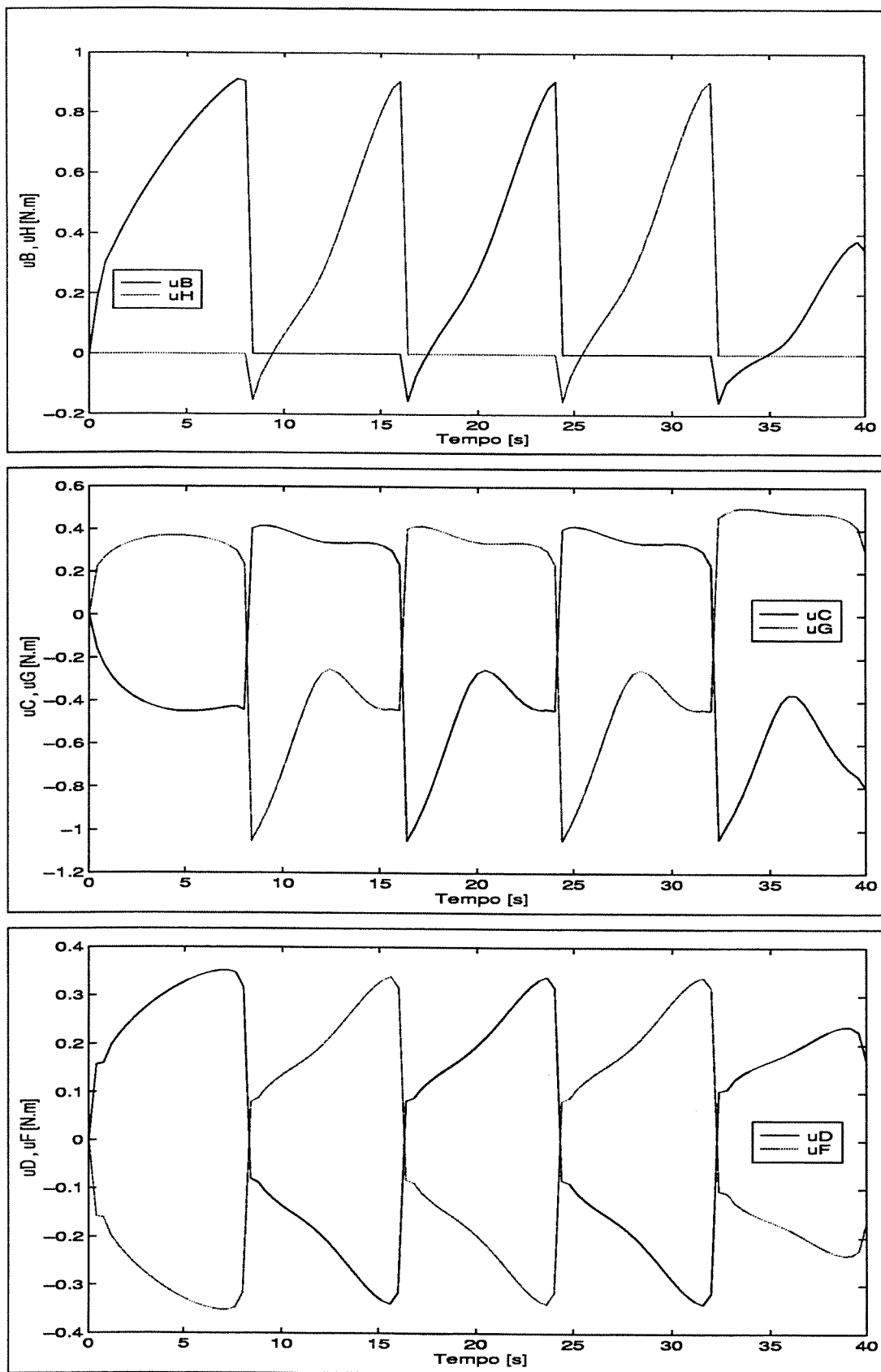


Figura 6.15: Torques nas juntas x tempo (trajetória elíptica)

Observando-se estas figuras, os torques u_B e u_H indicam que ao iniciar o passo, o torque no tornozelo deve impulsionar o RB-1 para frente, mas, posteriormente, o mesmo torque tende a forçar o robô para trás, ou seja, é uma forma de frear o movimento para que o impacto com o solo não seja forte. Pode-se verificar este comportamento, por exemplo, no instante de $8 \leq t \leq 16s$, em que a perna direita está em balanço, realizando o passo e a perna esquerda está apoiada no solo. Verifica-se que o torque no tornozelo direito (u_B) é positivo para $17,5 \leq t \leq 24s$ (figura 6.14(a) e 6.15(a)) e a derivada da curva do ângulo do tornozelo q_1 é negativa, ou seja, q_1 é cada vez mais negativo. Como o ângulo q_1 é igual ao ângulo absoluto θ_1 , então o trabalho deste atuador $W_B = \int u_B dq_1$ é negativo neste período de tempo. Assim o atuador B dissipa energia (de certa forma freando) do RB-1 neste período de tempo.

Nota-se na figuras 6.14(c) e 6.15(c), que os valores dos torques u_D e u_F são complementares, ou seja, $u_D(t) + u_F(t) = 0$, para todo instante t . Isto já era de se esperar, já que na simulação cinemática a pelve permanece sem girar em relação ao sistema inercial: a somatória dos torques sobre a pelve em relação ao eixo Z deve ser igual a zero. Esta escolha tem razões práticas: no protótipo, os sensores e outros equipamentos estão fixos na pelve. Por esta razão ela deve permanecer a mais estacionária possível em relação ao sistema inercial. Assim, na simulação cinemática, ela não gira em relação ao sistema inercial.

Verifica-se ainda, na figura 6.14 que os torques de acionamento podem ser analisados aos pares: $u_B \Leftrightarrow u_H$ (torques nos tornozelos), $u_C \Leftrightarrow u_G$ (torques nos joelhos) e $u_D \Leftrightarrow u_F$ (torques na pelve). As curvas dos pares são idênticas, defasadas do tempo de um passo, neste caso 1s. Esta característica decorre da simetria adotada na escolha das bases móveis do modelo e sentido adotado dos torques positivos.

Em módulo, os máximos valores dos torques são para os pares $u_B \Leftrightarrow u_H$ e $u_C \Leftrightarrow u_G$ menores que $1,08 N \cdot m$. Assim, verifica-se que os atuadores devem ser capazes de fornecer este valor de torque.

Pequenas diferenças existem entre os resultados da trajetória senoidal ou elíptica dos pés, apenas algumas alterações entre mesmas curvas. Mesmo os valores em módulo são bem semelhantes.

Os picos de torque se devem aos dados de entrada do programa de simulação cinemática também possuem picos nestes instantes. São exatamente os instantes em que os pés tocam

o chão, provocando descontinuidades, já que o equacionamento muda ao trocar o pé de apoio e esta mudança é instantânea na simulação cinemática.

Capítulo 7

Robôs bípedes RB-1 e RB-2

7.1 Introdução

Para testar a modelagem realizada foram construídos dois robôs. O primeiro denominado de RB-1 , é capaz de realizar a marcha no plano sagital. Para possibilitar que o RB-1 desvie de obstáculo realizando curvas, foram adicionados mais dois atuadores idênticos aos demais, transformando-o em RB-2 . A modelagem cinemática e dinâmica para o RB-2 são as mesmas usadas no RB-1 . Porém uma modificação foi feita na simulação, visando determinar os vetores de posição angular referentes aos novos tipos de movimento do RB-2 : curvas à esquerda e à direita.

7.2 RB-1

O RB-1 , construído no Centro de Tecnologia da UNICAMP (CT,2000) em Novembro de 2000, era capaz de realizar a marcha estaticamente estável a partir dos ângulos de referência gerados pelo robo1.m, conforme já explicado anteriormente. O robô é capaz de realizar passos de 0 – 9 cm, andar para frente, andar para trás e sua velocidade de marcha é de 1 cm/s.

O RB-1 foi construído em alumínio. As suas seis juntas de rotação eram atuadas por servomotores do tipo Futaba S3801[®]. As dimensões, os segmentos e a massa de cada segmentos do RB-1 são as mesmas usadas na simulação apresentada no capítulo 6. A seguir são apresentados os segmentos do RB-1 .

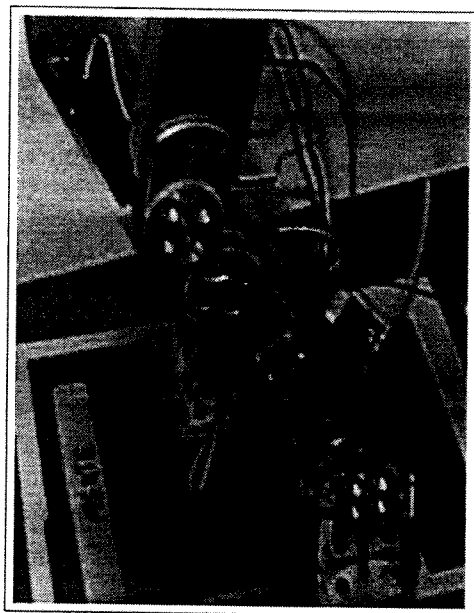
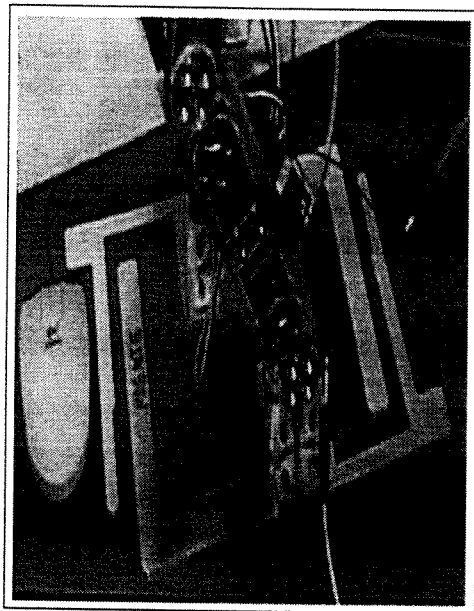


Figura 7.1: Pé e Perna do RB-1

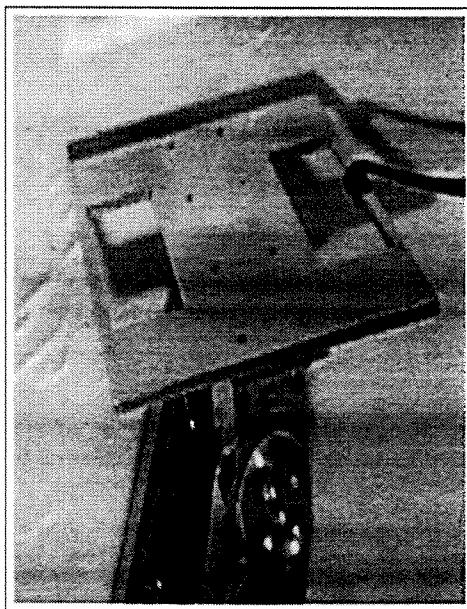
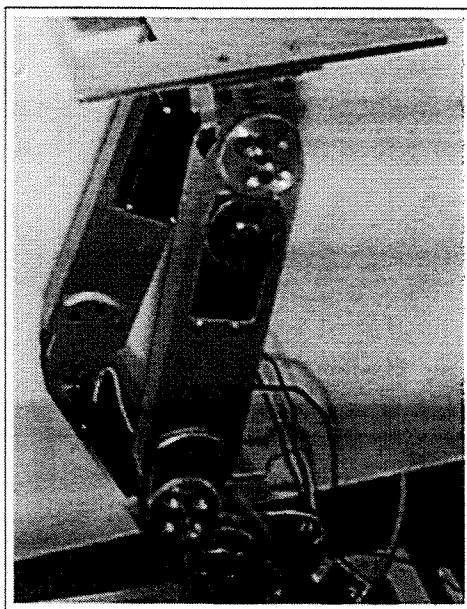


Figura 7.2: Coxa e Pelve do RB-1

Para o envio dos ângulos gerados na simulação foi desenvolvido o programa `rb1.exe`, em linguagem “C”, cuja tela principal se encontra representada na figura 7.3

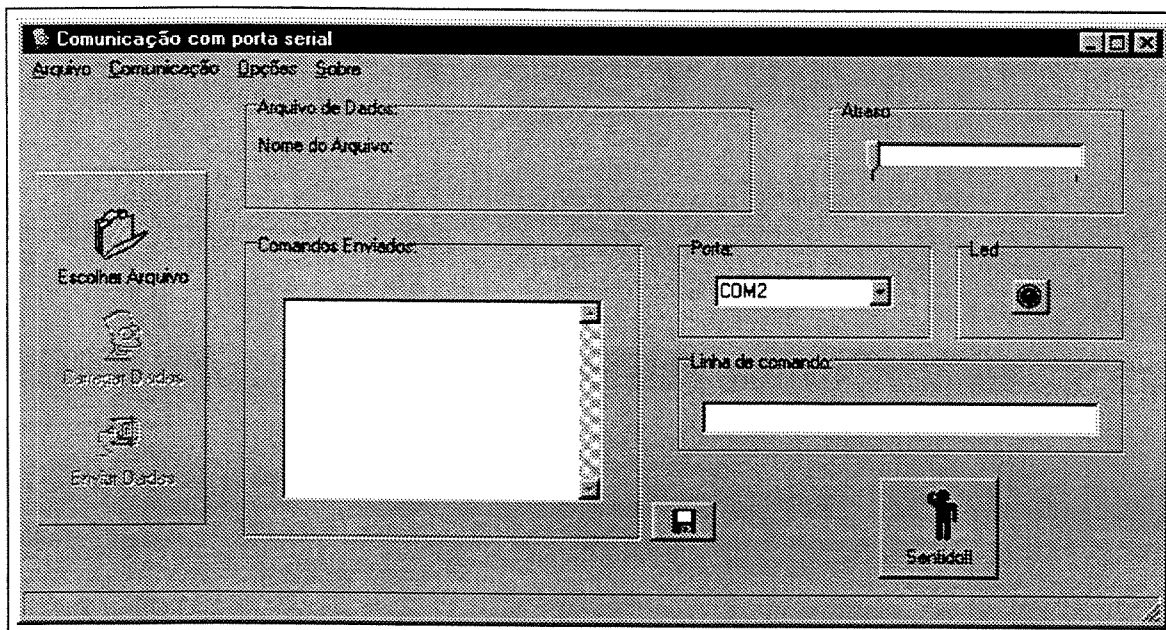


Figura 7.3: Software de interface do RB-1

7.2.1 Determinação do centro de gravidade do RB-1

O centro de gravidade de cada segmento do robô é utilizado na determinação da projeção do CG do robô no solo, necessário para manter o equilíbrio estático, e na matriz de inércia, necessária no modelo dinâmico. A determinação do CG do robô é obtida a partir do CG de cada segmento.

O centro de gravidade e o momento de inércia de cada corpo rígido do robô são obtidos a partir do programa `mominer.m` (Santos, 2001) feito em Matlab®. Com os valores da massa de cada corpo, dimensões e densidade do material, obtém-se os respectivos momentos de inércia. O programa também fornece o CG de cada corpo. Porém, tanto o CG como o momento de inércia são calculados em relação a um referencial específico localizado em cada corpo. A origem do sistema de coordenadas fixas do robô para a determinação do CG é o ponto $O(0,0,0)$, que foi escolhido como sendo a projeção vertical do CG da pelve no solo, quando o robô apresenta a postura ereta com os pés juntos, conforme a figura 7.4b.

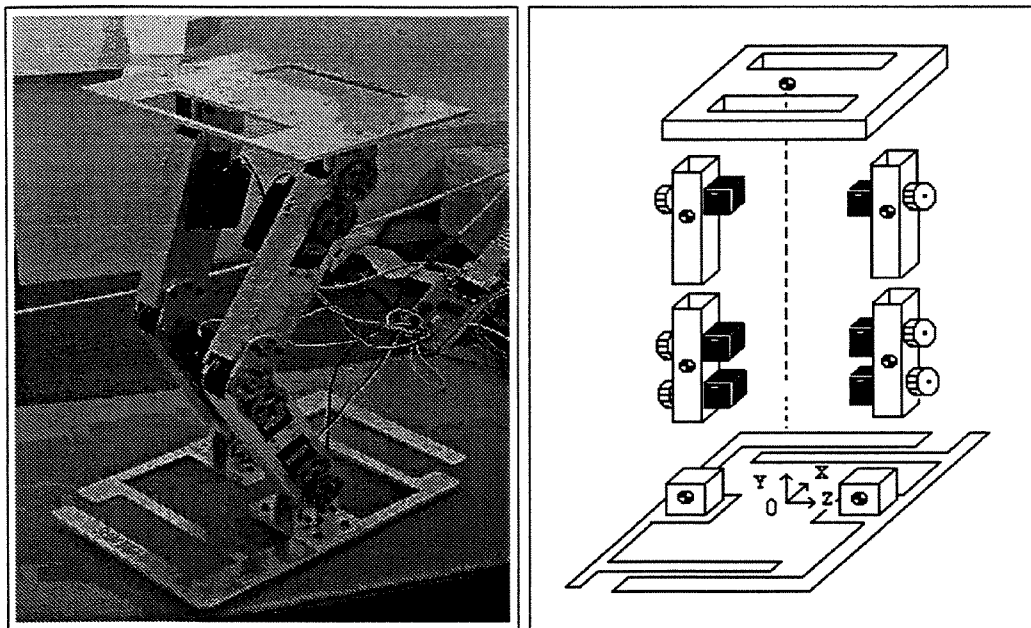


Figura 7.4: (a) Robô bípede RB-1

(b) Sistema de coordenadas do CG

Antes de iniciar-se a determinação dos CG, é necessário esclarecer que as articulações do robô foram modeladas como corpos rígidos pertencentes ao segmento a qual são solidárias. Por exemplo, o tornozelo faz parte do pé, pois ao ser movimentado o pé, todas os componentes do tornozelo giram juntos com ele. Já o joelho faz parte da coxa, pois está solidário a ela. Assim como os quadris pertencem à pelve. A seguir é descrita a determinação do centro de gravidade do robô e dos momentos de inércia de cada segmento do robô.

Pé

De acordo com a figura 7.4, pode-se observar que as articulações (tornozelo, joelho e quadril) não estão representadas. Na determinação do CG do pé, o tornozelo foi modelado como um paralelepípedo e incorporado ao pé. Como os pés são idênticos, apenas montados em direções contrárias, somente é necessário determinar o CG e momento de inércia de um deles, assim como todos os demais corpos do robô, com exceção da pelve. Com o objetivo de diminuir a inércia do pé em balanço, os servomotores não foram colocados nos pés.

Perna

A perna possui dois servomotores, um que atua no tornozelo e outro no joelho. O

critério de localização do servomotor do joelho foi baseado na condição de se baixar o CG do robô, pois o mesmo poderia ter sido projetado para possuir dois servomotores em cada coxa.

Coxa

A coxa possui um servomotor que atua no quadril do robô. O joelho é modelado junto a coxa.

Pelve

A pelve é o segmento do robô com maior massa. Ela deve ser suficientemente rígida para evitar qualquer movimento no plano frontal durante a fase de apoio simples.

Na tabela 7.1 tem-se a massa em gramas de cada segmento e os parâmetros relativos obtidos a partir do programa mominer.m: as coordenadas dos CG de cada segmento em mm e os momentos principais de inércia em $Kgf.m^4$. A massa total do RB-1 é de 2.312,58g,

Tabela 7.1: Parâmetros do RB-1

	Segmento	Massa(g)	x_{cg}	y_{cg}	z_{cg}	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	Peso%
1	Pé direito	316,92	-129,3	15,32	46,50	5,49e-4	1,95e-3	1,64e-3	13,70
2	Perna direita	325,45	0	103,91	18,81	8,74e-4	1,16e-4	8,34e-4	14,07
3	Coxa direita	266,11	0	55,08	14,92	1,52e-3	9,04e-5	1,12e-3	11,51
4	Pelve	495,62	75,00	-14,13	103,37	2,29e-3	2,47e-3	5,88e-4	21,44
5	Coxa esq.	266,11	0	103,91	18,81	1,52e-3	9,04e-5	1,12e-3	11,51
6	Perna esq.	325,45	0	55,08	14,92	8,74e-4	1,16e-4	8,34e-4	14,07
7	Pé esq.	316,92	-129,3	15,32	46,50	5,49e-4	1,95e-3	1,64e-3	13,70

As coordenadas relativas dos centros de gravidade de cada um dos sete segmentos são transformadas para o sistema de coordenadas fixo. Os valores estão na tabela 7.2.

Pode-se escrever as equações de posição para o CG de cada segmento como:

$$x_{cg} = \frac{(m_1 * x_1 + m_2 * x_2 + m_3 * x_3 + m_4 * x_4 + m_5 * x_5 + m_6 * x_6 + m_7 * x_7)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \quad (7.1)$$

$$y_{cg} = \frac{(m_1 * y_1 + m_2 * y_2 + m_3 * y_3 + m_4 * y_4 + m_5 * y_5 + m_6 * y_6 + m_7 * y_7)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \quad (7.2)$$

Tabela 7.2: Centros de gravidade absolutos dos segmentos do RB-1

	Segmento	x_{cg}	y_{cg}	z_{cg}
1	Pé direito	13,68	15,32	-56,70
2	perna direita	0	140,41	-53,59
3	Coxa direita	0	336,20	-57,28
4	Pelve	0	448,51	0
5	Coxa esquerda	0	336,20	57,28
6	Perna esquerda	0	141,41	53,39
7	Pé esquerdo	-13,68	15,32	56,70

$$z_{cg} = \frac{(m_1 * z_1 + m_2 * z_2 + m_3 * z_3 + m_4 * z_4 + m_5 * z_5 + m_6 * z_6 + m_7 * z_7)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \quad (7.3)$$

Substituindo-se os valores das tabelas 7.1 e 7.2 nas equações acima, tem-se os valores do CG do RB-1 em relação ao sistema de coordenadas absoluto representado na figura 7.4. Deve ser observado que à medida que o robô se desloca, todos os CG absolutos variam. Na figura 7.5 está representada a trajetória do CG do RB-1 por “*”.

7.3 RB-2

A segunda versão do robô, denominada de RB-2, também construída no Centro de Tecnologia em Outubro de 2001 a partir da estrutura do RB-1, é constituído das coxas, pernas e pés do RB-1. Já a pelve foi modificada com a inclusão de dois servomotores do mesmo tipo dos demais (Futaba S3801). Com isso o robô ganhou mais um gdl por perna, sendo capaz de girar em torno do eixo vertical (Y) de cada perna. Conforme a figura 7.6, observa-se o quadril esquerdo e o direito.

Outra característica do RB-2 é a relação de transmissão 1:2 em todas as engrenagens. Com isto aumentou-se o torque disponível nos segmentos do robô para compensar o aumento do peso do robô. Apesar da relação de transmissão ter sido reduzida, o modelo matemático do RB-1 não foi modificado, pois apenas o vetor das posições angulares ao robô foi multiplicado por 2.

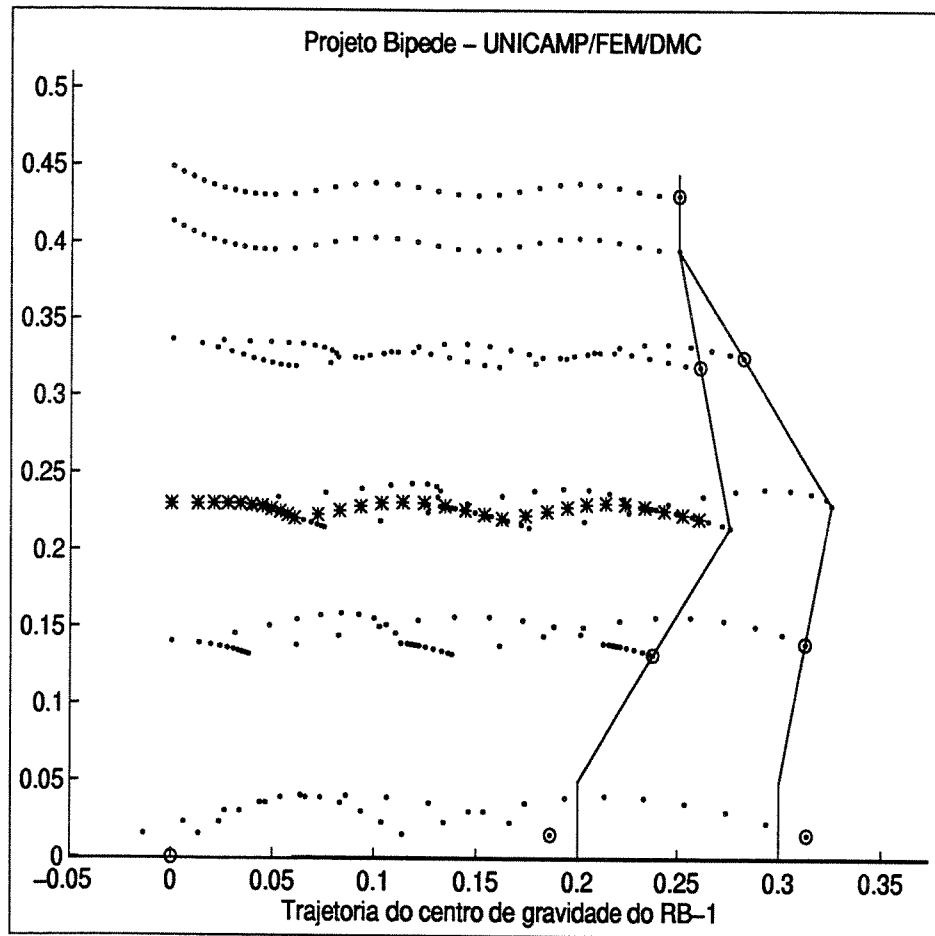


Figura 7.5: Representação da trajetória do CG do RB-1

7.3.1 Modelo matemático

O RB-2 também é constituído por 7 corpos rígidos. Além da capacidade de realizar curvas, a diferença entre o RB-1 e o RB-2, é que o RB-2 é mais pesado, conforme a tabela 7.3. Assim, as modelagens cinemática e dinâmica são idênticas, mudando-se apenas os parâmetros do robô.

7.3.2 Estratégia de giro

Inicialmente é definida “fase de giro” como sendo o movimento de rotação à esquerda ou à direita do robô. Para realizar este movimento, o robô realiza uma sucessão de passos no regime estacionário. Se o giro for à esquerda, então a perna esquerda inicia o passo, se o giro for à direita a perna direita inicia o passo. Tomando como exemplo um giro à direita, a perna

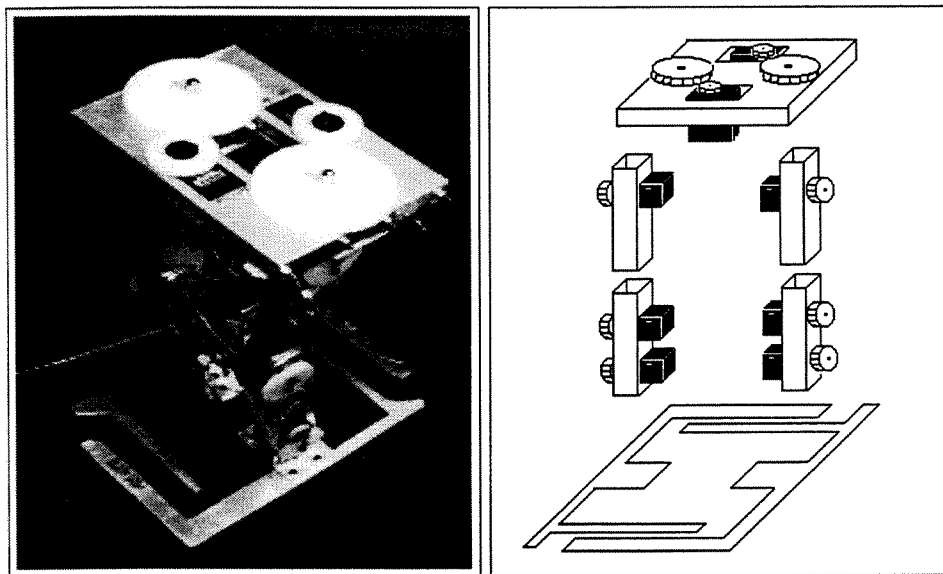


Figura 7.6: (a) Robô bípede 2

(b) Representação RB-2

direita inicia o passo (para trás), quando o pé direito atingir o ponto de maior amplitude (ponto mais alto em relação ao solo). Toda a perna em balanço é girada à direita pelo servomotor do quadril direito de um incremento de ângulo pré definido. Logo em seguida quando o pé direito toca o solo, o pé esquerdo inicia um novo passo em regime estacionário e ao atingir o ponto de maior amplitude em relação ao solo, o mesmo quadril direito gira à esquerda a pelve e a perna esquerda, da mesma quantidade que a perna direita foi girada. O robô executará quantos passos forem necessários para atingir 90° em função do incremento do ângulo. Por exemplo: se for desejado que o RB-2 gire à esquerda com incrementos de 5° , ele executará 18 passos com cada uma das pernas.

De acordo com a estratégia acima, pode-se observar que os dois servomotores da pelve são acionados exclusivamente, de tal modo que se o giro for à direita, somente o servomotor do quadril direito será atuado na mesma quantidade: ora no sentido horário, ora no sentido anti-horário, enquanto que o servomotor esquerdo permanece energizado e sem girar. Portanto, optou-se por apenas inserir no modelo geométrico, exatamente na fase de apoio simples e no ponto de maior amplitude do pé em balanço, o incremento de giro (direita ou esquerda). A principal característica da fase de giro é que ele é independente da marcha do robô.

Esta característica de giro do RB-2 possibilita analisar o movimento de marcha inde-

pendentemente do movimento de giro, pois eles ocorrem separadamente. De tal modo que somente foi estudado o comportamento dos ângulos a serem enviados aos atuadores da pelve, não sendo analisados os modelos cinemático e dinâmico durante a fase de giro. Muito embora a posição absoluta de todos os pontos que representam as juntas variem durante o giro, pois passam a apresentar uma componente no plano frontal, considerou-se que a variação é muito pequena, sendo desprezada a sua influência na velocidade e aceleração dos segmentos do robô no plano sagital.

7.3.3 Determinação do centro de gravidade do RB-2

Para a determinação do centro de gravidade do RB-2 foi realizado o mesmo procedimento adotado para o RB-1 , onde apenas os valores de massa, inércia e dimensões dos segmentos foram modificados, de acordo com a estrutura mecânica. As diferenças entre os robôs são as massas dos segmentos que variaram devido a substituição das peças de latão por *Nylon*, diminuição do pé e a nova pelve. Na tabela 7.3 tem-se os valores dos parâmetros utilizados no RB-2 . O centro de gravidade e o momento de inércia de cada corpo rígido do robô também são obtidos a partir do programa mominer.m feito em Matlab[®] .

Tabela 7.3: Parâmetros do RB-2

	Segmento	Massa(g)	x_{cg}	y_{cg}	z_{cg}	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	Peso %
1	Pé direito	286,00	-126,3	7,68	45,67	3,84e-4	1,75e-3	1,40e-3	10,13
2	Perna direita	284,30	0	103,9	20,38	8,44e-4	1,03e-4	8,12e-4	10,07
3	Coxa direita	220,90	0	63,22	16,14	8,25e-4	8,54e-5	8,02e-4	7,83
4	Pelve	1240,30	75,96	0	105,00	4,49e-3	5,94e-3	2,21e-3	43,94
5	Coxa esq.	220,90	0	63,22	16,14	8,25e-4	8,54e-5	8,02e-4	7,83
6	Perna esq.	284,30	0	103,9	20,38	8,44e-4	1,03e-4	8,12e-4	10,07
7	Pé esq.	286,00	-126,3	7,68	45,67	3,84e-4	1,75e-3	1,40e-3	10,13

Do mesmo modo, as coordenadas dos centros de gravidade de cada um dos sete segmentos são transformadas para o sistema de coordenadas fixas, de acordo com a tabela 7.4.

e as equações de posição para o CG de cada segmento podem ser escritas como:

$$x_{cg} = \frac{(m_1 * x_1 + m_2 * x_2 + m_3 * x_3 + m_4 * x_4 + m_5 * x_5 + m_6 * x_6 + m_7 * x_7)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \quad (7.4)$$

Tabela 7.4: Centros de gravidade absolutos dos segmentos do RB-2

	Segmento	x_{cg}	y_{cg}	z_{cg}
1	Pé direito	16,67	7,68	-61,18
2	perna direita	0	140,41	-55,97
3	Coxa direita	0	344,34	-60,21
4	Pelve	6,96	464,14	0
5	Coxa esquerda	0	344,34	60,21
6	Perna esquerda	0	140,41	55,97
7	Pé esquerdo	-16,67	7,68	61,18

$$y_{cg} = \frac{(m_1 * y_1 + m_2 * y_2 + m_3 * y_3 + m_4 * y_4 + m_5 * y_5 + m_6 * y_6 + m_7 * y_7)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \quad (7.5)$$

$$z_{cg} = \frac{(m_1 * z_1 + m_2 * z_2 + m_3 * z_3 + m_4 * z_4 + m_5 * z_5 + m_6 * z_6 + m_7 * z_7)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \quad (7.6)$$

Substituindo-se os valores das tabelas 7.3 e 7.4 nas equações acima, tem-se os valores do CG do RB-2 em relação ao sistema de coordenadas absoluto representado na figura 7.7.

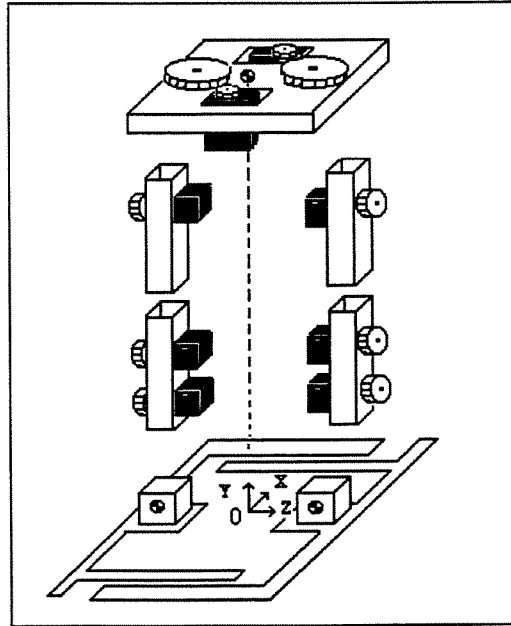


Figura 7.7: Representação do sistema de coordenadas do CG do RB-2

Deve ser observado que à medida que o robô se desloca, todos os CG absolutos variam. Na figura 7.8 tem representada a trajetória do CG do RB-2 por “*”.

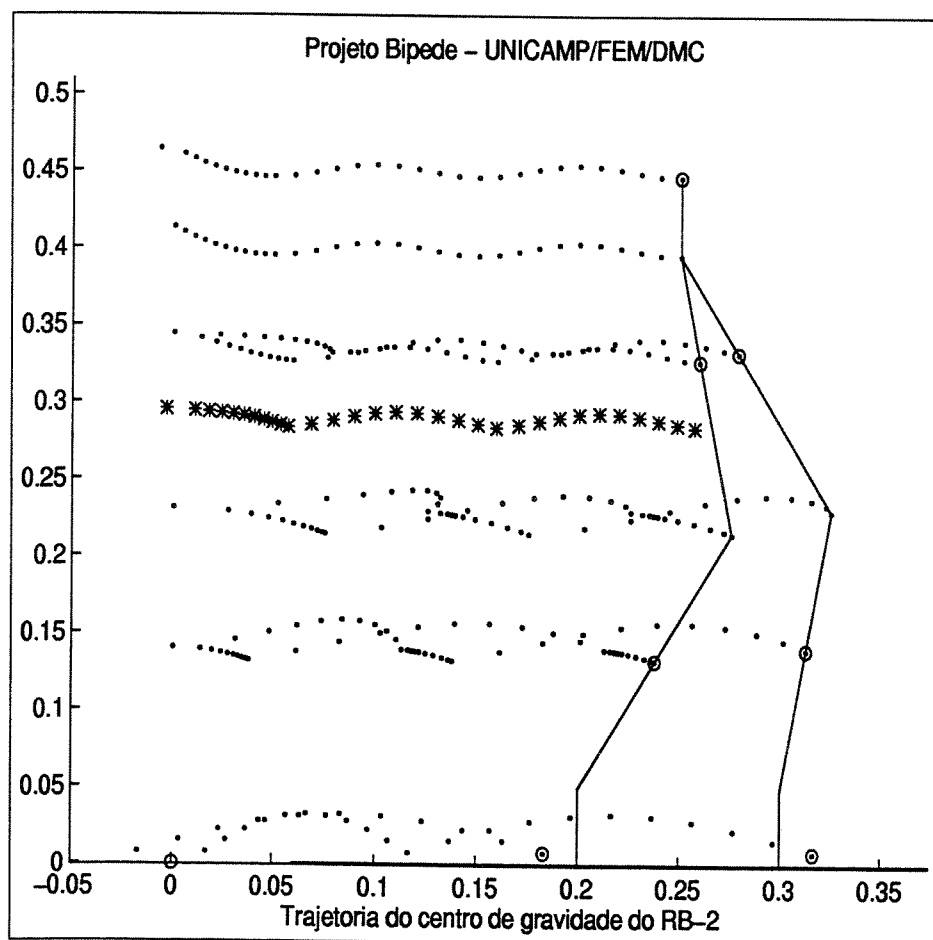


Figura 7.8: Representação da trajetória do CG do RB-2

7.3.4 Giro à direita e giro à esquerda

Como o RB-1 realiza a marcha estaticamente estável, foi desenvolvido um software para gerar os ângulos que cada perna deve girar em torno de si, de tal modo que não houvesse superposição dos pés, o que ocasionaria a perda de equilíbrio ou danos à estrutura. O novo robô deveria ser capaz de realizar curvas com os mesmos pés do RB-1.

A estratégia para possibilitar que o robô gire a sua perna descrita anteriormente, foi implementada em software. O software é capaz de gerar os ângulos necessários para as curvas de 90°, à esquerda ou à direita, e ainda configurar o robô na posição ideal para realizar o

próximo movimento, no caso a marcha. O programa computacional `robo1.m` foi modificado. Foram gerados mais três novos programas: o `rb2.m`, o `rb2gd.m` e o `rb2ge.m` capazes de gerar os ângulos para os oito servomotores. As modificações foram na amplitude do passo igual a zero, no número de divisões do passo e a inclusão do vetor dos ângulos da pelve.

Os softwares `rb2g*.m` permitem gerar padrões de giro de qualquer ângulo positivo com qualquer amplitude de passo. Porém, os valores para a amplitude do passo são limitados fisicamente pela restrições geométricas da estrutura mecânica e pelo torque máximo fornecido pelo servomotor, que é limitado a $14Kgf.cm$. De tal modo que sempre após serem gerados os ângulos para o movimento, deve-se executar o programa `robo1nej` para verificar o torque máximo em cada junta.

7.4 Simulação

Para verificar se os ângulos gerados em `rb2g*.m` são coerentes com o RB-2, se não ocorrerá a superposição dos pés, são realizadas simulações. Foram realizadas diversas simulações para os giros à direita e à esquerda de 90° , modificando-se a amplitude do passo e o incremento do ângulo.

Os softwares `rb2g*.m` permitem visualizar o movimento de giro do robô no plano transversal e no sagital, além de gerar o vetor dos ângulo e plotar os valores em graus. Na figura 7.9 pode-se observar um giro à direita e outro à esquerda, ambos no plano transversal. O principal objetivo da visualização destes softwares é verificar se não há superposição dos pés, através da escolha adequada do incremento do ângulo de giro.

Os principais parâmetros da marcha podem ser variados para gerar os mais diversos padrões de giro: A - amplitude que o pé levanta do solo, d - amplitude horizontal do passo, dg - incremento do ângulo e ig - tipo de giro. Para os experimentos realizados com o RB-2 (a ser detalhado no capítulo 8) foram adotados os seguintes valores para os parâmetros: $A = 2cm$, $d = 2cm$, $dg = 5^\circ$ e $ig =$ direita e esquerda. Na figura 7.10 tem-se representado os valores em graus para os parâmetros acima em função do número total divisões (*frames*), porém com $dg = 30^\circ$ para facilitar a visualização, onde Q1 é o vetor dos ângulos de referência para o tornozelo direito, Q2 para o joelho direito, Q3 para a articulação da coxa direita e Q7

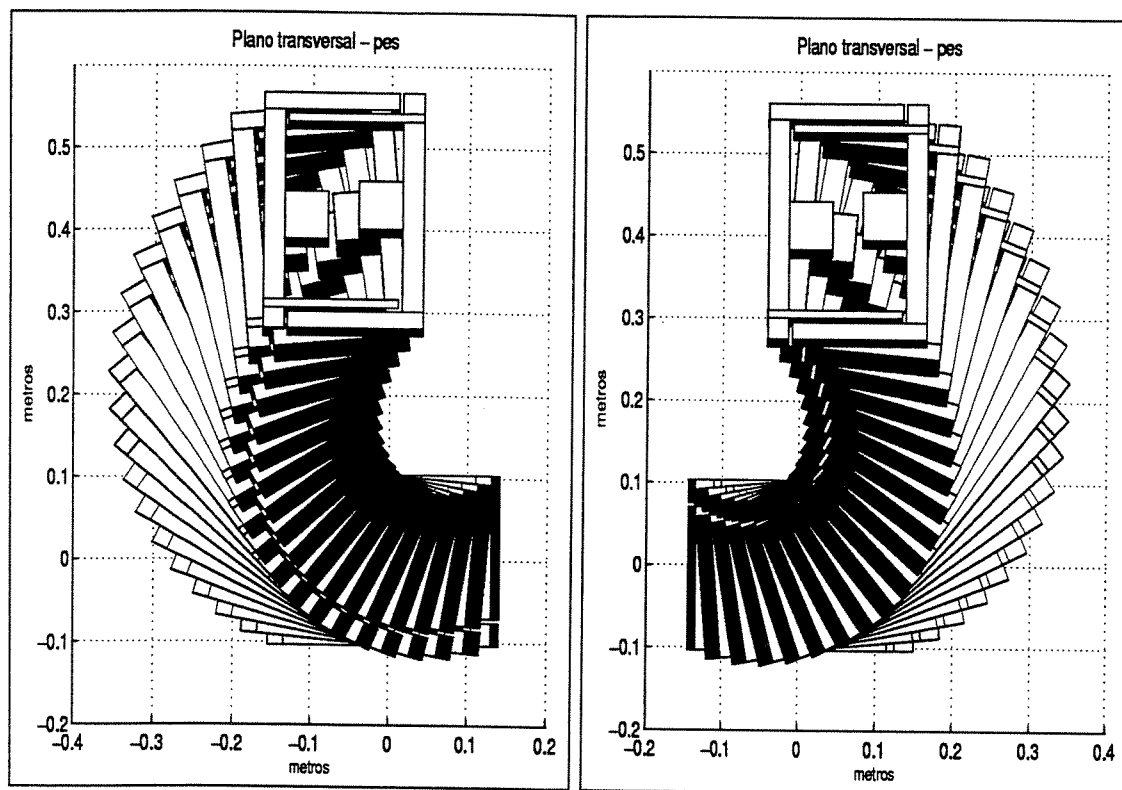


Figura 7.9: Vista superior (a) giro à direita; (b) giro à esquerda

para o quadril direito e, Q4, Q5, Q6 e Q8 os respectivos ângulos para a perna esquerda.

No próximo capítulo será descrita a parte experimental deste trabalho, realizada com o RB-2 .

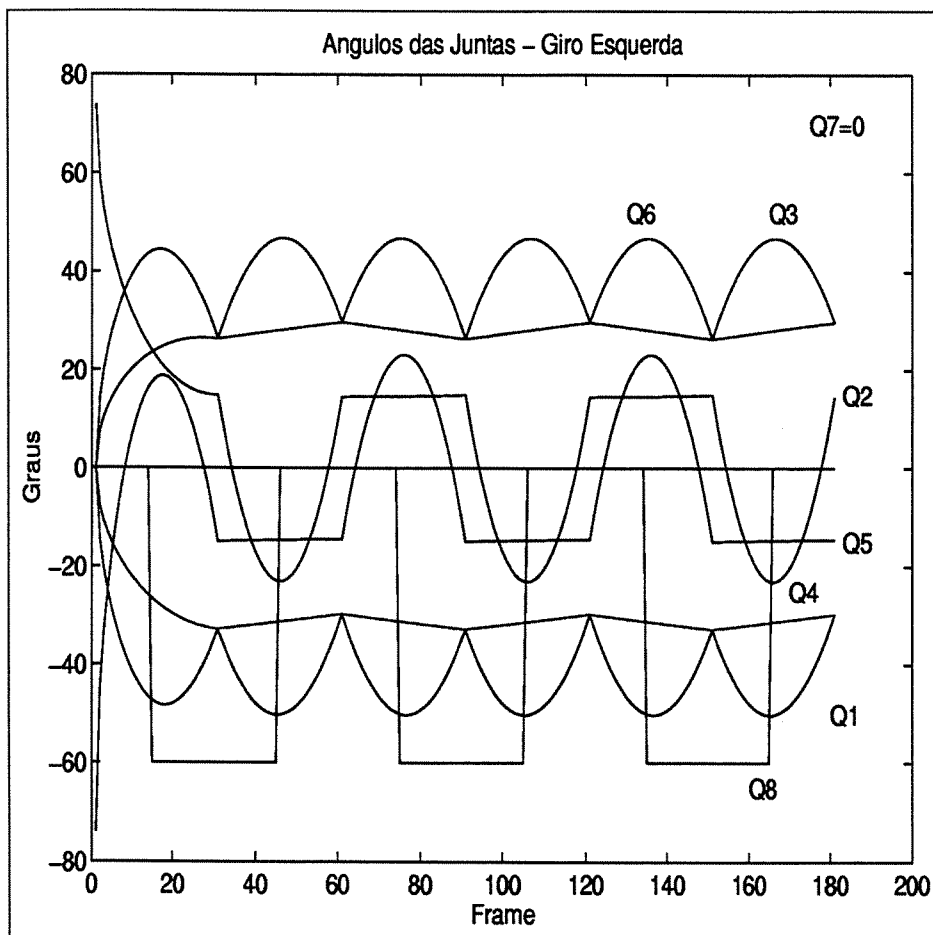


Figura 7.10: Ângulos do RB-2 para um giro à esquerda de 90°

Capítulo 8

Experimentos

8.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os materiais, o planejamento automático de trajetória e os métodos utilizados na obtenção dos resultados experimentais. Através dos experimentos realizados com o RB-1 foi possível implementar e testar o software e hardware para o controle dos servomotores , necessários para a realização da marcha no plano sagital. Já os experimentos realizados com o RB-2 foram a marcha, a curva à esquerda e a curva à direita no plano sagital. O objetivo foi validar a modelagem realizada com o RB-2 e o planejamento de trajetórias com o uso de sensores. Os materiais utilizados nos experimentos com o RB-2 foram o microcomputador Pentium III[®] 550MHz 128 Mb RAM, fonte simétrica digital de corrente contínua *MinipaMPC – 3006D* 12V a 6A, placa de controle dos servomotores , a placa dos sensores, software de interface necessário para envio dos ângulos de referência gerados no Matlab[®] e software responsável pela leitura dos sensores do RB-2 .

Também é apresentada a estratégia de desvio de obstáculos baseada no uso de sensores, que mudam a sua situação (são ativados) ao se aproximarem de obstáculos. A partir da combinação da situação de cada sensor, o RB-2 executará um determinado padrão de marcha, necessário para desviar do obstáculo.

8.2 Materiais

8.2.1 Placa de controle dos servomotores

A placa de controle usada é o módulo *SbServoControl*® (Solbet, 2002) capaz de controlar simultaneamente até oito servomotores do tipo utilizado em modelismo (Figura 8.1). A placa é conectada ao microcomputador do tipo PC através de um cabo serial com conector DB9, utilizando o protocolo de hardware RS232-C. A transmissão de dados é realizada a 4800 bps (bits por segundo), 8 (bit de dados), N (sem paridade) e 1 (bit de parada).

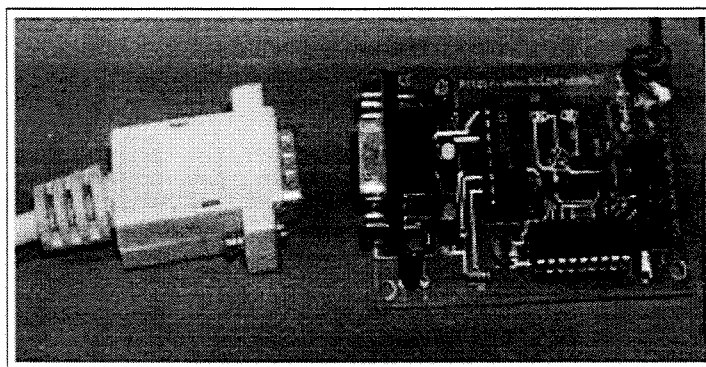


Figura 8.1: Placa de controle

A placa de controle *SbServoControl*® é baseada no microcontrolador programável PIC 16F84® (Microchip, 2002). O PIC (*Peripheral Interface Controller*) é um circuito integrado provido de memória de dados, porta de entrada e saída, timer, contadores, comunicação serial, PWM[†], conversores AD, entre outros, encapsulados em uma única pastilha de silício (Microchip, 2002). A estrutura de máquina interna é do tipo *Harvard* que é caracterizada por dois barramentos internos, um para dados e o outro para instruções. O barramento de dados é sempre de 8 bits e o de instruções 14 bits. Além disso, o PIC 16F84 possui 18 pinos, 13 portas configuráveis como entrada ou saída, 4 interrupções disponíveis, memória de programação que permite a regravação do programa diversas vezes (EEPROM Flash), memória não volátil interna (EEPROM) e 35 instruções de programação.

Tanto o RB-1 como o RB-2 usam servomotores do tipo Futaba S3801®, cujas características estão na tabela 8.1.

[†]*Pulse Width Modulator*

Tabela 8.1: Servomotor S3801

<i>Torque</i>	<i>Velocidade</i>	<i>Voltagem</i>	<i>Dimensões</i>	<i>Peso</i>
14 Kgf.cm	60° em 0.26s	4.8 V	59.2x28.8x49.8 mm	107g

O servomotor utilizado nos robôs (Figura 8.2) possui um circuito integrado responsável pelo posicionamento de seu eixo no ângulo desejado, não sendo necessário um dispositivo de controle para assegurar a precisão. Devido a este fato, o tipo de controle adotado neste trabalho para os robôs é em malha aberta.

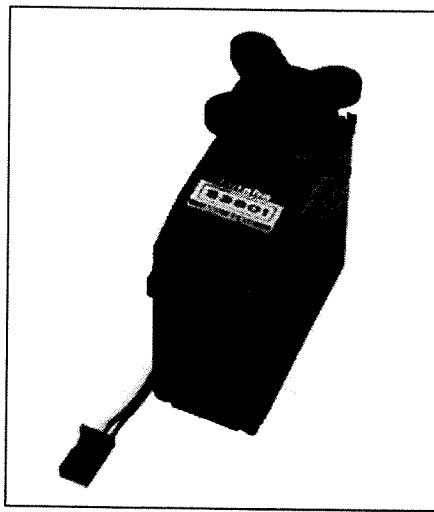


Figura 8.2: Servomotor Futaba S3801

O servomotor é controlado através de pulsos enviados para a sua entrada de controle. Para o servomotor Futaba S3801[®], os pulsos devem se repetir a cada 10 – 40ms, com duração entre 720 μ s e 2,16ms, com a forma representada na figura 8.3.

Assim, a largura do pulso necessária para girar o servo todo a esquerda é de 0,72ms, o que corresponde a -90°. Para girar todo à direita é de 2,16ms (90°) e para mantê-lo na posição central de 1,44ms 0°. Para gerar ângulos intermediários entre -90° e +90°, basta variar a largura de pulso linearmente. Ao ser energizada, a placa de controle envia pulsos de 1,44ms.

A placa de controle identifica, através das letras A,B,C,D,E,F,G e H, e envia comando aos servomotores. Os comandos são compostos de 3 campos, onde o primeiro campo indica o servomotor, o segundo indica a posição solicitada e o terceiro é o terminador (CR). Por

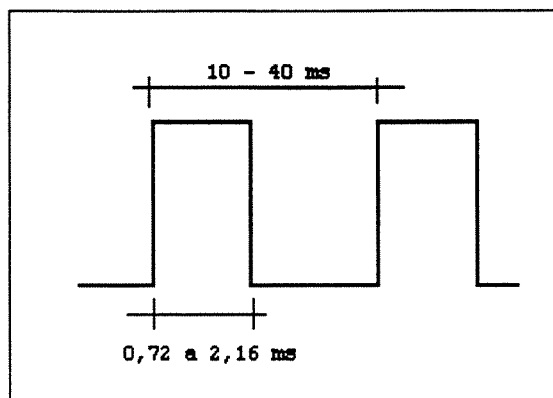


Figura 8.3: Pulsos do servomotor S3801

exemplo: ao receber o comando $A65 < CR >$, o programa gravado no microcontrolador PIC 16F84[®] da placa de controle *SbServoControl*[®] converte o valor recebido em uma largura de pulso correspondente e, envia a posição solicitada (65) para o servomotor conectado à saída A. A placa de controle é capaz de enviar simultaneamente os comandos para até oito servomotores .

Para a posição 65, valor correspondente a um deslocamento de 0° (pulso de 1,44ms). Para valores de posição acima de 65 e até 128 correspondem a deslocamentos no sentido horário e abaixo de 65, deslocamentos no sentido anti-horário.

Os valores aqui apresentados são válidos para o servomotor S3801 podendo haver variações em função do fabricante e modelo do servomotor .

Problema da correção dos ângulos

Devido a relação de transmissão ter sido mudada de 1:1 (RB-1) para 1:2 (RB-2), o vetor dos ângulos a ser enviado a placa de controle do RB-2 foi multiplicado por 2. Na figura 8.4 pode-se observar os valores em graus dos ângulos, onde Q1 é o vetor dos ângulos de referência para o tornozelo direito, Q2 para o joelho direito, Q3 para a articulação da coxa direita e Q7 para o quadril direito e, Q4,Q5,Q6 e Q8 os respectivos ângulos para a perna esquerda.

Como o programa residente no microcontrolador PIC 16F84 da placa de controle dos servomotores atribui o valor de referência 05 para a posição correspondente a 0° no servomotor e o valor de referência 130 para a posição correspondente a 180° . Ele inicializa todos os servomotores na posição de referência 65, que corresponde a 90° no servomotor .

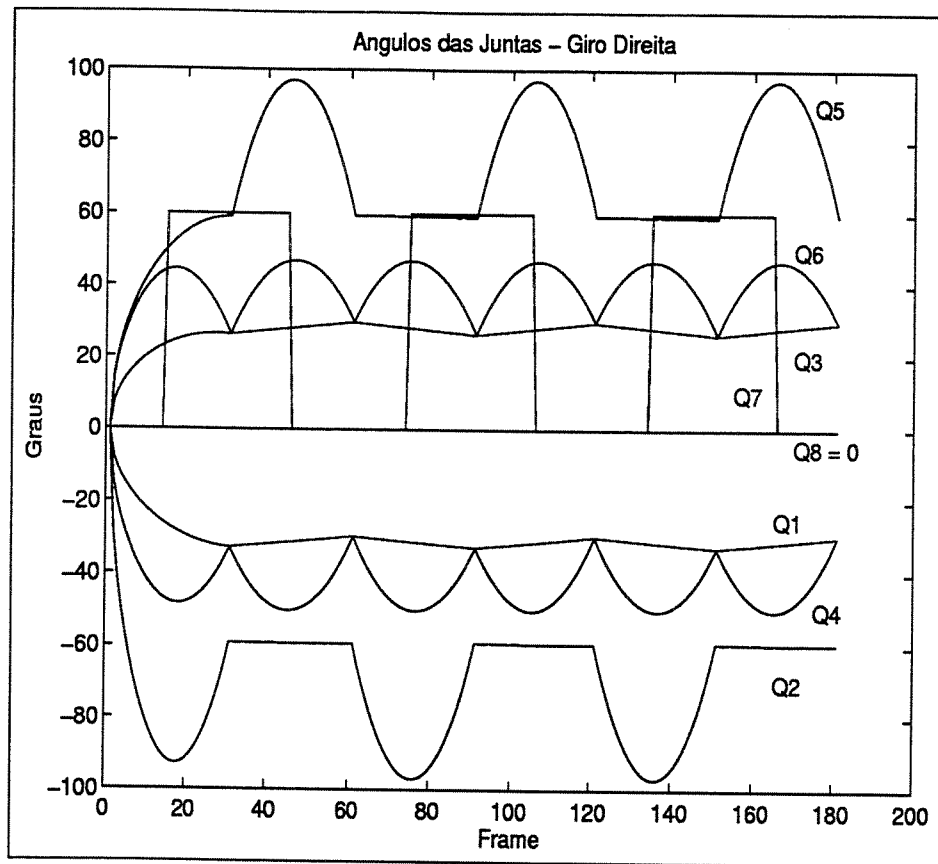


Figura 8.4: Ângulos do RB-2 sem correção

Como o servomotor S3801 tem um curso útil de aproximadamente 180° , a partir da posição de referência 65 ele pode girar aproximadamente 90° à esquerda e 90° à direita. Porém, observando-se na figura 8.4 os valores para os vetores Q2 e Q5, nota-se que eles excedem 90° . Na prática isto quer dizer que a partir da referência zero (65), o servomotor teria que girar mais que 90° . Além disso, o programa de interface da placa de controle somente enviará aos servomotores valores de no máximo $+90^\circ$, ocasionando um erro de posicionamento dos segmentos do robô.

Para solucionar este problema de limitação adotou-se um valor padrão para correção (cor), de todos os ângulos que após multiplicados por dois ultrapassem $\pm 90^\circ$, capaz de ajustar todos os vetores de ângulos entre as posições de referência $01 < 65 < 130$. São determinados os valores mínimos e máximos de todos os oito vetores de ângulos do RB-2. Caso algum destes valores superem 45° , eles devem ser corrigidos, porque após serem multiplicados por dois serão maiores do que 90° . A quantidade necessária para a correção é igual ao maior

valor absoluto destes ângulos multiplicado por um fator de segurança, para evitar valores próximos dos limites mínimos e máximos dos servomotores . Por exemplo: de acordo com a figura 8.4 o vetor Q2 possui um máximo em 96° , que multiplicado por dois excede a variação máxima de 90° que a placa de controle pode enviar para os servomotores . Logo, é necessário deslocar a curva deste ângulo do valor cor. No caso do RB-2 , o valor de cor é $36,97^\circ$. Isto implica que ao ser ligado o robô a placa de controle dos servomotores enviará os seguintes valores de referência: A65, B118, C65, D65, E16, F65, G65 e H65. O valor ideal para cor foi obtido em função de $A05 < \text{cor} < A130$ e das limitações mecânicas do RB-2 .

A correção devido à relação de redução das engrenagens está implementada em todos os softwares relacionados com o RB-2 : rb2.m, rb2gd.m e rb2ge.m.

8.2.2 Sensores de infravermelho

A estratégia adotada para o RB-2 desviar de obstáculos é baseada na navegação com sensores do tipo infravermelho. Cada sensor é constituído por um *LED* emissor, uma unidade receptora e um circuito eletrônico com um potenciômetro (Ortek, 2002). Através do potenciômetro é possível ajustar a sensibilidade, de tal modo que o sensor poderá ser ativado pelo obstáculo, a uma distância pré determinada pelo usuário.

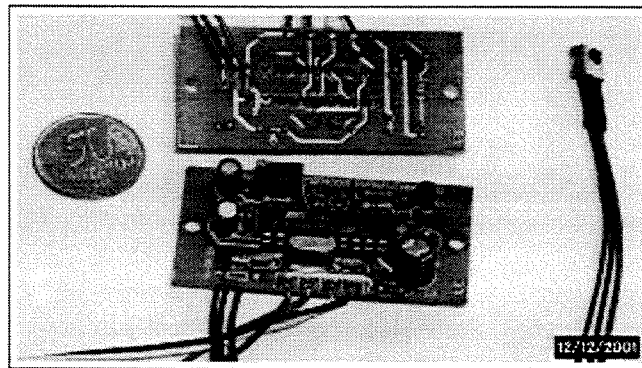


Figura 8.5: Sensor de infravermelho X – Ortek®

O sensor é alimentado a 5V com uma amperagem de 0.04A. Além dos dois fios de alimentação, cada sensor possui um fio de comando para a transmissão do sinal de saída. Na presença de um obstáculo, o sensor envia 5V para o fio de comando (saída), caso contrário

0V. O fio de saída é conectado à placa de controle dos sensores. Se o sinal recebido pela placa de controle for de 5V, o estado de sensor é dito ativado. Os sensores podem ser calibrados separadamente, através do potenciômetro, para detectarem objetos numa faixa de 50 a 10 cm de proximidade. Dependendo da cor, brilho e textura do obstáculo estes valores podem aumentar para cores claras e com bom polimento e diminuir para cores escuras, com superfícies foscas.

Os sensores foram colocados na pelve do RB-2 (Figura 8.6): um na direita e outro na esquerda. Na frente do RB-2 foi colocado um sensor mecânico de toque do tipo fim de curso. Este sensor mecânico é ativado ao tocar o obstáculo a uma distância de aproximadamente 30 cm. Ele possui 3 fios, força 5V, neutro e comando. Ao ser acionado, ele envia 5V pelo fio de comando a placa de controle. Na estratégia de desvio de obstáculos foi assumido que o RB-2 ao encontrar um obstáculo de frente, não realizará a marcha a ré. Por isso que o RB-2 não possui sensor na parte posterior da pelve.

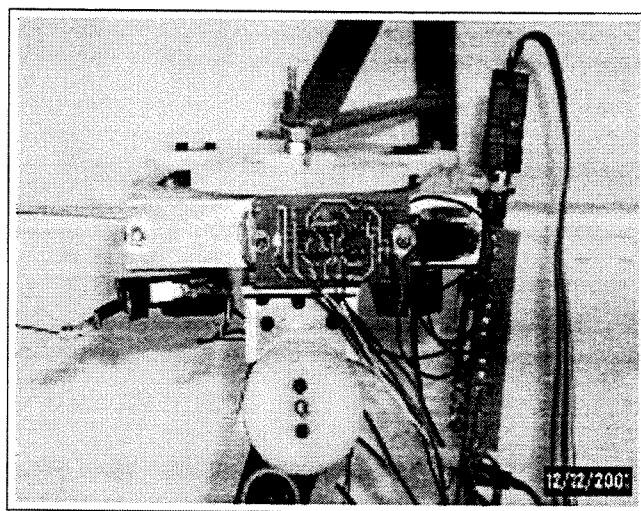


Figura 8.6: Localização dos sensores no RB-2

8.2.3 Placa dos sensores

A placa dos sensores é responsável pela leitura e envio da situação (*status*) de cada sensor. A partir desta leitura o robô identificará o obstáculo e adotará a estratégia de desvio. Somente o RB-2 possui esta placa.

A placa utilizada é o módulo *Sb877*® (Solbet, 2002), que é baseada no PIC 16F877 © (Microchip, 2002). Os três sensores de proximidade são alimentados a 5V e suas saídas são conectadas as entradas do PIC 16F877®. Um programa gravado na EEPROM deste microcontrolador realiza a leitura dos sensores toda vez que os pés do RB-2 tocam o solo. Em seguida, envia através do cabo serial DB9, usando o protocolo RS232-C, o valor de cada um dos 3 sensores para o microcomputador. Na figura 8.7 pode-se ver a placa de controle dos sensores.

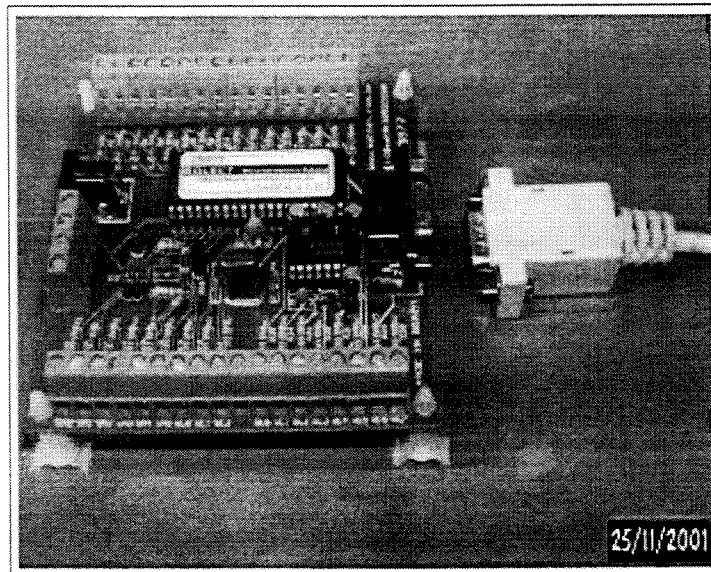


Figura 8.7: Placa de controle dos sensores no RB-2

8.2.4 Softwares de interface

Para que o robô consiga realizar a marcha e as curvas é necessário gerar o vetor com a trajetória de referência a ser seguida por cada um dos oito atuadores. Os ângulos necessários para a marcha no plano sagital foram gerados através do programa *rb2.m*, com Q7 e Q8 nulos. O vetor com os ângulos necessários para as curvas também foram gerados no Matlab®, a partir das simulações computacionais do giro à direita *rb2gd.m* e do giro à esquerda *rb2ge.m*. Todos estes programas apresentam como saída um arquivo com extensão **.dat* contendo os ângulos em graus, denominados de padrões de movimento. Em seguida estes valores

são enviados ao robô através da saída serial RS232-C do computador, usando os softwares desenvolvidos para ambiente *Windows*® : *rb2.exe* e *estrategia2.exe*.

O software de interface *rb2.exe* (Benzatti e Zampieri, 2001) foi escrito em linguagem computacional *C builder 3*®. Através dele pode-se ler e enviar os arquivos de marcha, giro à direita ou giro à esquerda, com os respectivos ângulos. O software converte os valores em graus para o protocolo de entrada da placa de controle (nome do servomotor , posição e terminador). O sinal enviado tem a forma de um trem de ondas quadradas de duração predeterminadas. Além disso, o *rb2.exe* possui a opção de enviar em tempo real valores unitários para cada atuador do RB-2 . De acordo com a figura 8.8, pode-se ver as seguintes características: Escolher arquivo - necessário para selecionar o arquivo a ser enviado; Carregar dados - necessário para carregar o arquivo selecionado, realizando a conversão dos ângulos no comando a ser enviado para a placa de controle ; Enviar dados - envia os comandos para a placa; Comandos enviados - mostra os comandos enviados; Linha de comando - permite enviar comandos unitário para cada servomotor ; Porta - serve para escolher qual porta serial será utilizada para envio dos comandos ao robô; Sentido - envia o comando de referência 65 para todos os servomotores ; e Cancelar - que interrompe a transmissão de comandos.

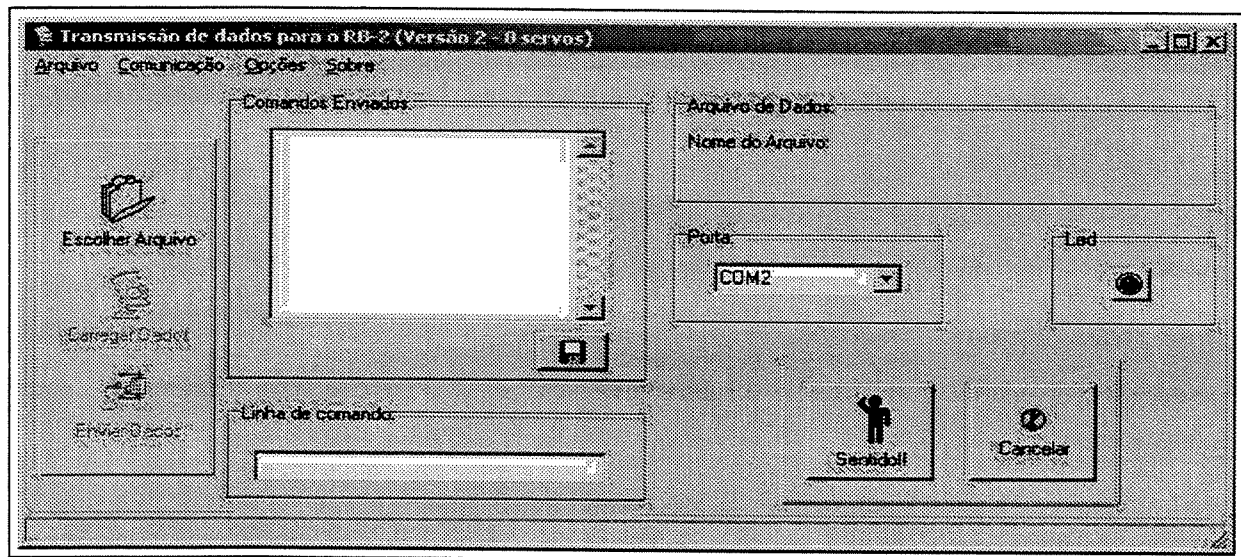


Figura 8.8: Tela principal do software de interface *rb2.exe*

Para testar a capacidade de o RB-2 para desviar de obstáculos de maneira automática, foi desenvolvida uma interface capaz de gerenciar os sinais recebidos dos sensores eletrônicos

e mecânico e o acionamento dos atuadores. O programa *estrategia2.exe* (Benzatti e Zampieri, 2001) também foi desenvolvido em linguagem computacional *C builder 3*®, sendo constituído do *rb2.exe* mais a característica de receber os sinais dos sensores e mudar automaticamente os padrões de movimento do RB-2. A estratégia contida neste software *estrategia2.exe* será abordada a seguir. Na figura 8.9 pode-se ver as características do programa, onde o único botão que pode ser acionado pelo usuário é o Iniciar. Os demais têm apenas caráter de informação visual.

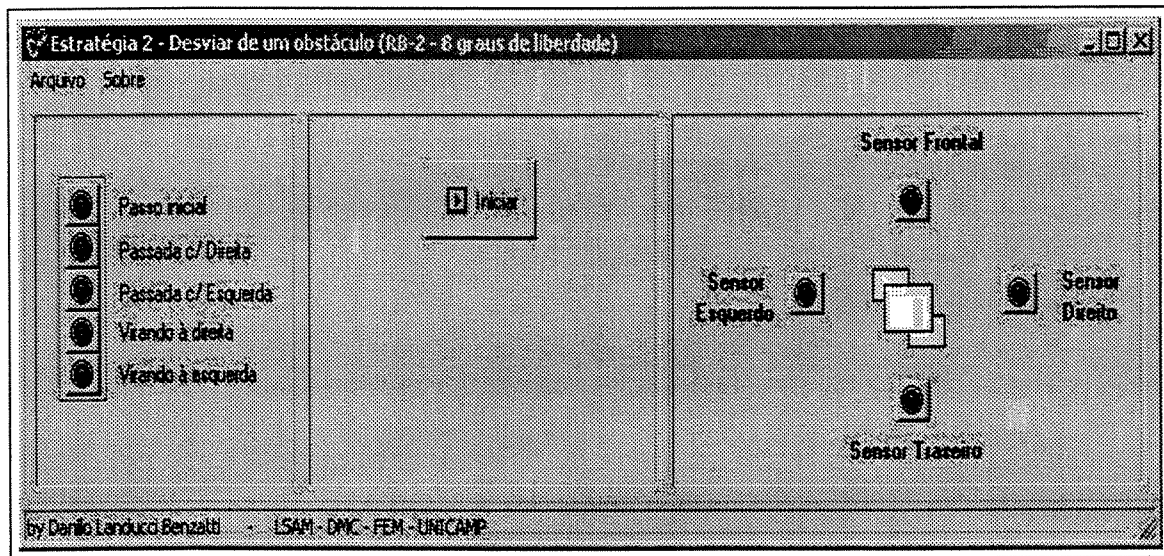


Figura 8.9: Tela principal do software de interface *estrategia2.exe*

8.3 Planejamento automático de trajetórias do RB-2

Em estudos realizados com indivíduos locomovendo-se na presença de obstáculos conhecidos ou colocados aleatoriamente na trajetória da marcha, foi observado que a estratégia adotada para desvio consiste somente na variação dos parâmetros do último passo, antes de uma eventual colisão com o obstáculo. Ou seja, somente o último passo tem as suas características alteradas para evitar a colisão. Baseado nesta observação, o RB-2 faz a leitura dos sensores cada vez que qualquer um dos pés tocar o solo. Ao localizar o obstáculo, ele muda o padrão de marcha com ajuda da estratégia de desvio de obstáculos implementada no software, realiza o desvio e retorna a marcha novamente até que seja localizado outro

obstáculo.

Denomina-se Planejamento de Trajetória o conjunto de procedimentos necessários para a geração de uma trajetória livre de obstáculos, a partir da informação obtida do ambiente. O termo Planejamento Automático de Trajetória foi utilizado por Yagi e Lumelsky (Yagi and Lumelsky, 2000) em seu trabalho. Eles o usaram como uma referência somente ao planejamento local, nas imediações do obstáculo em questão, não incluindo os efeitos sobre o movimento global resultante. O RB-2 deve ser capaz de realizar o planejamento automático de trajetória assegurando estabilidade de equilíbrio da estrutura e um padrão uniforme de marcha e de giro, a medida que vai interagindo com o ambiente. Para isto o RB-2 mantém sempre a projeção do CG dentro da área de suporte dos pés, tanto na marcha como durante a realização de curvas. Caso ele possuísse um mecanismo compensatório do movimento do centro de gravidade, seus pés poderiam ser reduzidos em função da área total percorrida pela projeção do CG no solo. Os mecanismos compensatórios mais utilizados são pêndulo invertido, massa com movimento de translação e a adição de mais graus de liberdade na juntas da pelve e do tornozelo. Porém, o RB-2 é capaz de realizar adequadamente a trajetória gerada.

8.3.1 Estratégia de desvio de obstáculos

O RB-2 interage com o ambiente através dos seus sensores montados em sua pelve. Os sensores implementados e testados foram de infravermelho e de toque. Cada sensor tem duas situações: 0 para desativado ou sem obstáculo e 1 para ativado ou com obstáculo, de tal modo que a placa de controle recebe a cada passo uma leitura dos três sensores. Os sensores são denominados de sensor frontal (F), sensor esquerdo (E) e sensor direito (D). A partir da situação (ativado ou desativado) de cada um dos três sensores o robô realiza um determinado padrão de locomoção. Ao ser energizada, a placa de controle realiza a leitura dos sensores, representado por [FED]. Se a situação for [000], indica que todos os sensores estão desativados e a trajetória está livre de obstáculos. Se a situação for [100], indica que o sensor frontal está ativado e que existe um obstáculo a frente do robô. As situações [010] e [001] indicam obstáculo à esquerda e à direita, respectivamente. Caso o robô encontre um obstáculo do tipo “L”, a situação será [110] ou [101]. Um corredor seria representado por

[011]. Na figura 8.10 estão representadas as situações [100], [010] e [001], respectivamente.

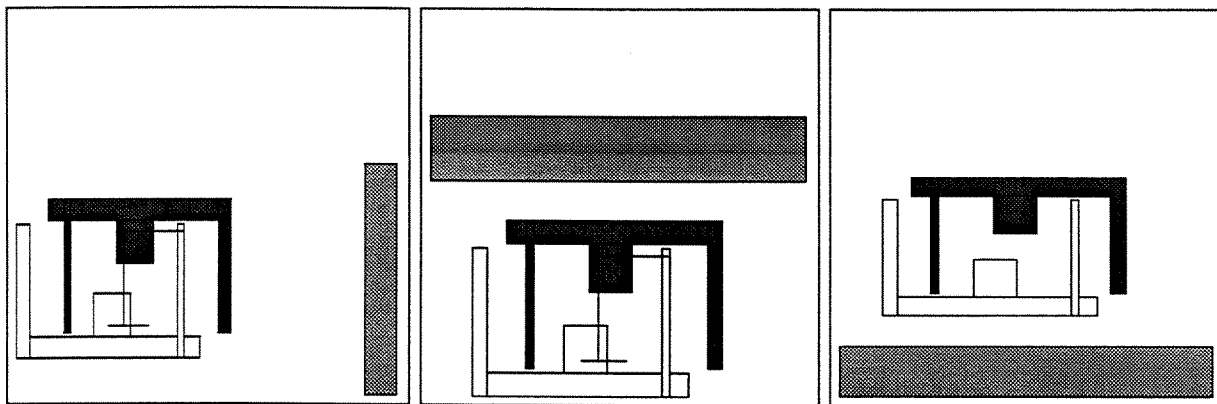


Figura 8.10: Situação dos sensores do RB-2 : a) [100]; b) [010]; c) [001]

O RB-2 não necessita da posição do seu pé em relação ao obstáculo para desviá-lo, porque os sensores foram calibrados para assegurarem uma distância segura de no mínimo uma passada entre o obstáculo e o robô. Os obstáculos utilizados nos experimentos foram blocos medindo 45cm de largura por 30cm de comprimento e com uma altura igual ou superior a 400mm, de tal modo que o robô deve sempre contorná-los. Não será abordado o problema da transposição sobre o obstáculo em virtude de que os sensores testados estão montados na pelve e não são capazes de identificar um obstáculo de pequenas proporções no solo. Nos experimentos a serem realizados somente um obstáculo será desviado.

A estratégia de desvio de obstáculo está implementada no software *estrategia2.exe*. Além de acionar o RB-2, este software seleciona automaticamente o tipo de movimento a ser realizado pelo robô a cada vez que um pé toca o solo, em função do sinal enviado pela placa de controle através do cabo serial ao computador, em tempo real, com a situação de cada um dos três sensores. Os seis tipos de padrões de movimento implementados para todos os experimentos são: PEI - passo inicial (sempre realizado com a perna esquerda), PPD - passada com a perna direita, PPE - passada com a perna esquerda, JPD - passo com a perna direita (juntando as pernas), GD - giro à direita e GE - giro à esquerda. Na figura 8.11 tem-se representado o fluxograma do algoritmo da estratégia de desvio de obstáculo.

Para a validação dos modelos, softwares e interfaces, foi dada ao robô a tarefa de realizar passos a frente. Caso ele encontre algum obstáculo, ele deve contorná-lo e continuar a marcha

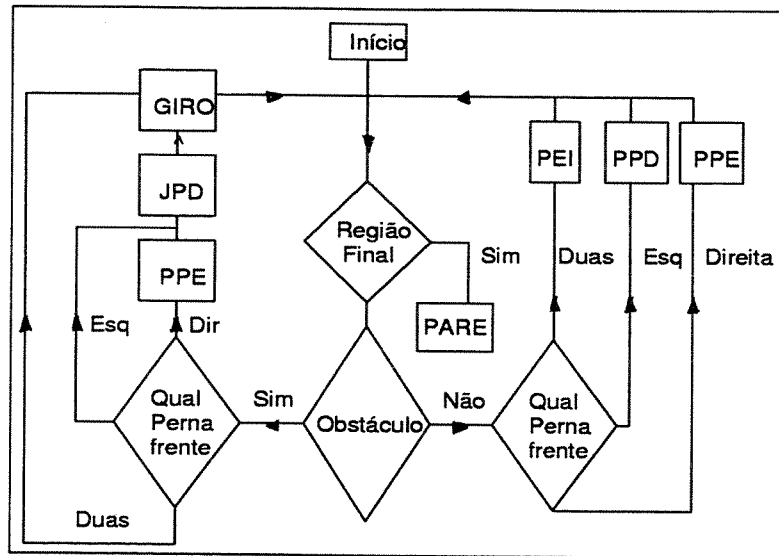


Figura 8.11: Fluxograma do algoritmo da estratégia de desvio de obstáculo

até completar os passos, não sendo contados os passos realizados durante os giros. Na figura 8.12 está representado o ambiente de trabalho com o obstáculo, e também a trajetória ideal a ser realizada pelo robô (linha pontilhada). Deve ser ressaltado que o robô não conhece o ambiente onde vai realizar a tarefa e nem a que distância se encontram os obstáculos.

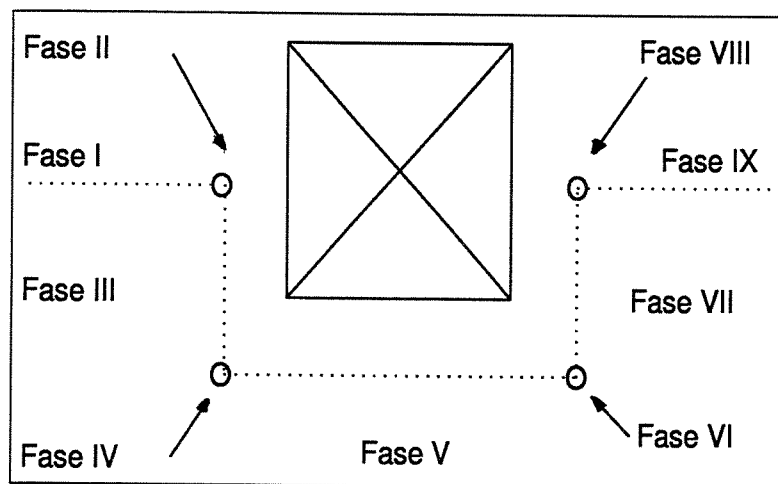


Figura 8.12: Representação do ambiente com obstáculo

De acordo com as figuras 8.12 e 8.11 são descritos os procedimentos necessários para o desvio do obstáculo:

1. Fase I - Marcha a frente sem obstáculo [0 0 0]

Enquanto o sensor frontal estiver desativado, o robô executará os passos. Quando o sensor frontal ativa, o software verifica qual pé se encontra mais próximo do obstáculo. Caso seja o pé esquerdo, o robô junta o pé direito. Caso seja o pé direito, o robô realiza mais uma passada com a perna esquerda e em seguida junta o pé direito. Após isto, o robô está em frente ao obstáculo na postura pés juntos.

2. Fase II - Giro à direita [1 0 0]

Em seguida os sensores são lidos e considerando que o sensor frontal está ativado, se o sensor da direita estiver desativado o robô executa o giro à direita. O giro à direita é realizado com passos de dois ou três centímetros para trás. Foi adotado este procedimento para que o robô se afaste do obstáculo.

3. Fase III - Marcha a frente com obstáculo a esquerda [0 1 0]

Após o giro à direita, os sensores são lidos e se o sensor frontal estiver livre o robô realiza a marcha guardando na memória o número de passos realizados até que o sensor esquerdo seja desativado.

4. Fase IV - Giro à esquerda [0 0 0]

Quando o sensor esquerdo desativa, o robô executa o giro a esquerda. Este giro é realizado com passos de dois ou três centímetros para frente, para contribuir com a transposição do obstáculo. Ao finalizar o giro o sensor da esquerda deverá estar desativado. Então o robô realiza a marcha, memorizando o número de passos, até ativar o sensor da esquerda.

5. Fase V - Marcha a frente com obstáculo a esquerda [0 1 0]

Ele continua na marcha para frente contando os passos até que o sensor esquerdo desative.

6. Fase VI - Giro à esquerda [0 0 0]

Ao desativar, realiza o giro à esquerda, voltando a ativar o sensor esquerdo.

7. Fase VII - Marcha a frente com obstáculo a esquerda [0 1 0]

A partir de agora, o robô começa a decrementar o número de passos que realizou entre a primeira e a segunda curva.

8. Fase VIII - Giro à direita [0 1 0]

Ao zerar este número, ele executa o giro à direita.

9. Fase IX - Marcha a frente sem obstáculo [0 0 0]

O RB-2 marcha até completar os passos pré determinados ou a tarefa solicitada.

A tarefa pode ser modificada com a inclusão de mais passos, obstáculos e controle manual do robô.

8.4 Métodos

A seguir são apresentados os experimentos realizados com o RB-2 , com o objetivo de validar a modelagem realizada, testar o planejamento automático de trajetórias, avaliar o software de interface e estudar o erro entre o movimento simulado e o realizado pelo robô.

Foram realizados oito tipos de experimentos. O primeiro consiste na marcha no chão com pouco atrito. O segundo, na marcha numa manta de borracha de EVA (*Etil Vinil Acetato*) de 3 mm de espessura. O terceiro, num giro à esquerda e em seguida à direita no chão com pouco atrito. O quarto, idêntico ao terceiro, porém na manta de borracha. O quinto experimento consiste marcha a frente, giro à direita e à esquerda no chão com pouco atrito, através do uso de sensores. O sexto, idêntico ao quinto, mas com uma fita adesiva para aumentar o atrito entre os pés do robô e o chão. O sétimo idem, porém na manta de borracha. Já o oitavo experimento consiste na realização da tarefa representada na figura 8.12.

8.4.1 Marcha a frente do RB-2 sem os sensores

Para que o RB-2 realize a marcha no plano sagital, seus ângulos são gerados no programa rb2.m, sendo os mesmos enviados pelo software de interface rb2.exe.

Os experimentos de marcha têm a finalidade de medir o desvio da trajetória teórica, gerada no computador. O primeiro em uma superfície com baixo coeficiente de atrito e o

segundo, em uma superfície com elevado coeficiente de atrito. Tanto o primeiro como o segundo experimentos consistem da marcha de 10 passos, um giro à esquerda e um à direita. No primeiro, foi realizado a marcha no chão do laboratório com piso do tipo Pavflex. O segundo, sobre a manta de borracha de 3 mm de espessura. O objetivo do experimento é a determinação dos parâmetros distância percorrida (dp) e a deriva (dr), que é o ângulo entre a trajetória realizada pelo robô e a trajetória teórica.

Na figura 8.13 pode-se visualizar os instantes inicial e final da marcha no chão para o primeiro experimento (pouco atrito). Na figura 8.14, para o experimento 2 (com atrito). Na tabela 8.2 tem os valores para dp e dr medidos no chão para ambos os experimentos.

Tabela 8.2: Parâmetros dp (mm) e dr (graus)

	dp	dr
Teórico	550	0°
Experimento 1	354	14°
Experimento 2	321	3°

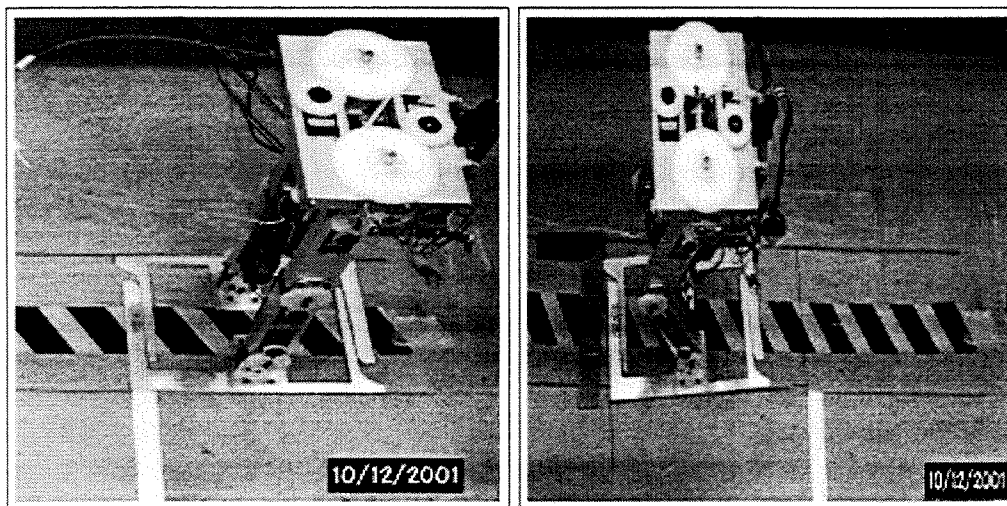


Figura 8.13: Posições inicial e final da marcha no chão

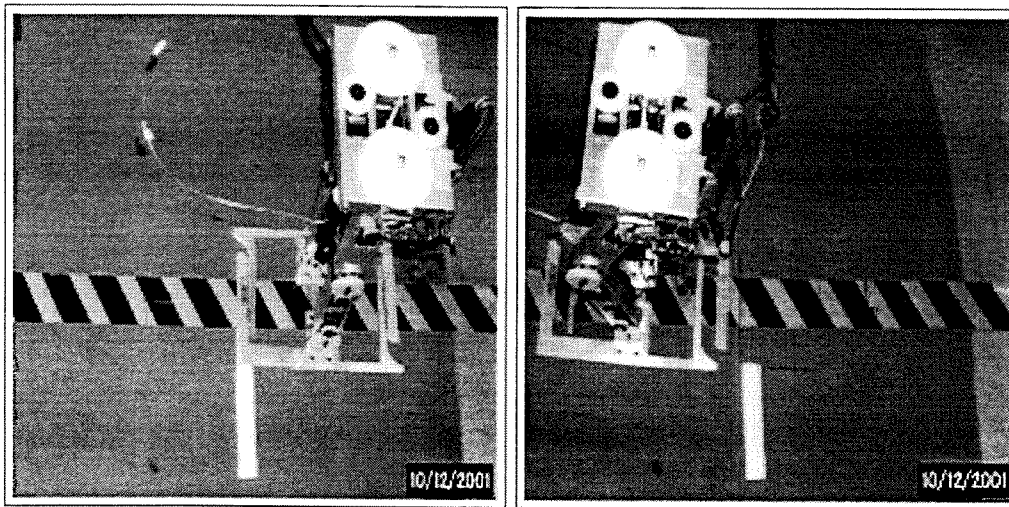


Figura 8.14: Posições inicial e final da marcha na manta

8.4.2 Giro à esquerda e à direita do RB-2 sem os sensores

Neste experimento, o RB-2 realizou uma curva à esquerda de 90° e em seguida outra à direita também de 90° . Nas figuras 8.15 e 8.16 pode-se ver a posição inicial e final dos experimentos 3 e 4.

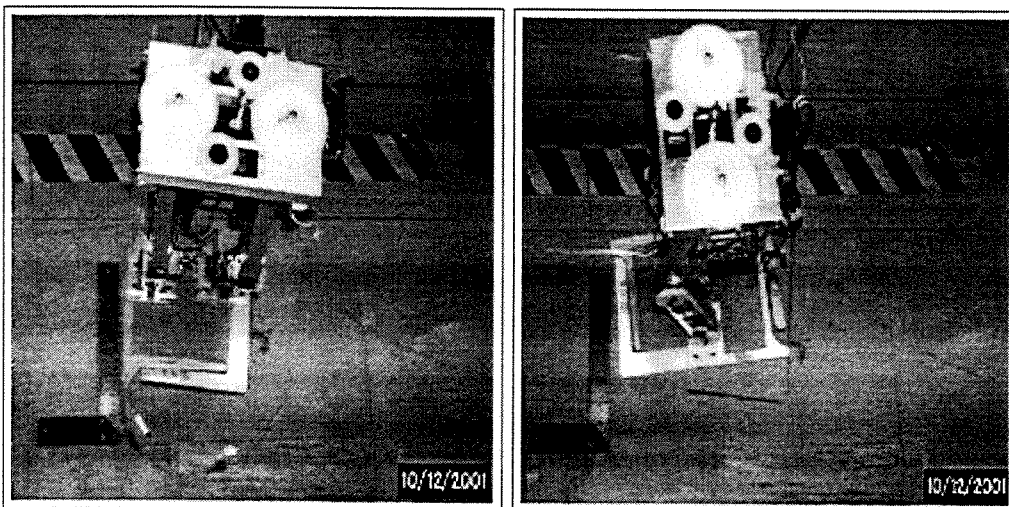


Figura 8.15: Posições inicial e final do giro no chão

Na tabela 8.3 estão os valores para a distância percorrida (dp) e os ângulos girados (ag)

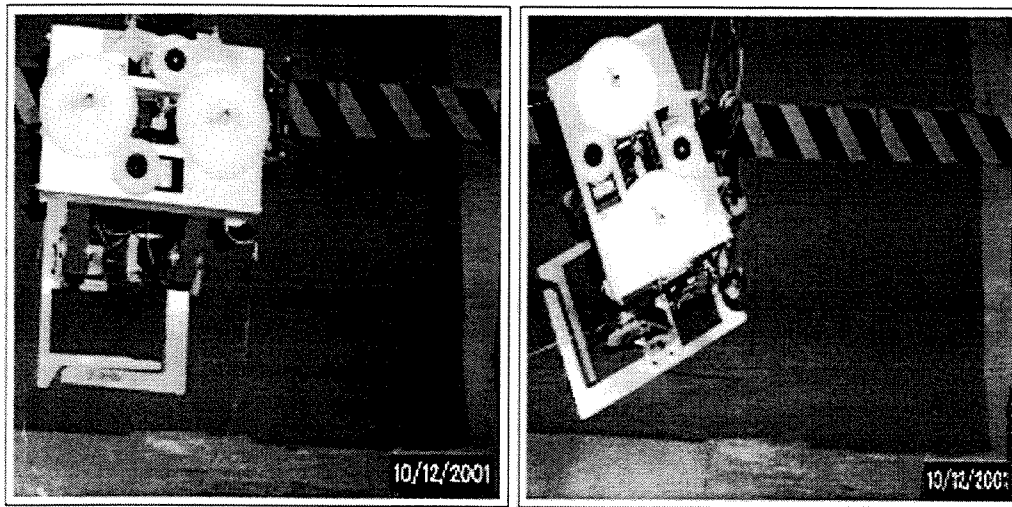


Figura 8.16: Posições inicial e final do giro na manta

para ambos os experimentos.

Tabela 8.3: Parâmetro ângulo girado em graus

	<i>Esquerda</i>	<i>Direita</i>
Teórico	90°	90°
Experimento 1	78°	84°
Experimento 2	82°	93°

8.4.3 Marcha a frente, giro à direita e à esquerda do RB-2 com sensores

Nestes experimentos o RB-2 realiza a marcha no plano sagital, identifica automaticamente um obstáculo, realiza o giro à direita, marcha até se livrar do obstáculo lateralmente, realiza um giro à esquerda, marcha até se livrar do obstáculo e finalmente, realiza um giro à esquerda. Nestes experimentos são testados o uso dos sensores e a geração automática de trajetória.

Os objetivos destes experimentos são : medir o desvio do robô para um percurso longo, avaliar a influência do tipo de piso, testar a interface dos sensores e testar os sensores de toque e de infravermelho. Usam-se os mesmos dados do programa rb2.m e o software de interface rb2.exe.

Foram realizadas três medições para cada um dos experimentos com sensores. No experimento 5, o robô desloca-se sobre o piso sem qualquer tipo de artifício que evite o deslizamento. No experimento 6, são colocados em cada pé, 2cm^2 de fita adesiva dupla face, para aumentar o atrito e evitar o deslizamento. E no experimento 7, as mesmas condições do experimento 5, porém na manta de borracha. Todos os procedimentos têm como objetivo quantificar o desvio da trajetória teórica em relação a realizada pelo robô.

Na figura 8.17 pode-se visualizar a representação do ponto de partida (0, 800), as posições intermediárias e a representação do ponto final da marcha (1200, 100), para o primeiro experimento com sensores.

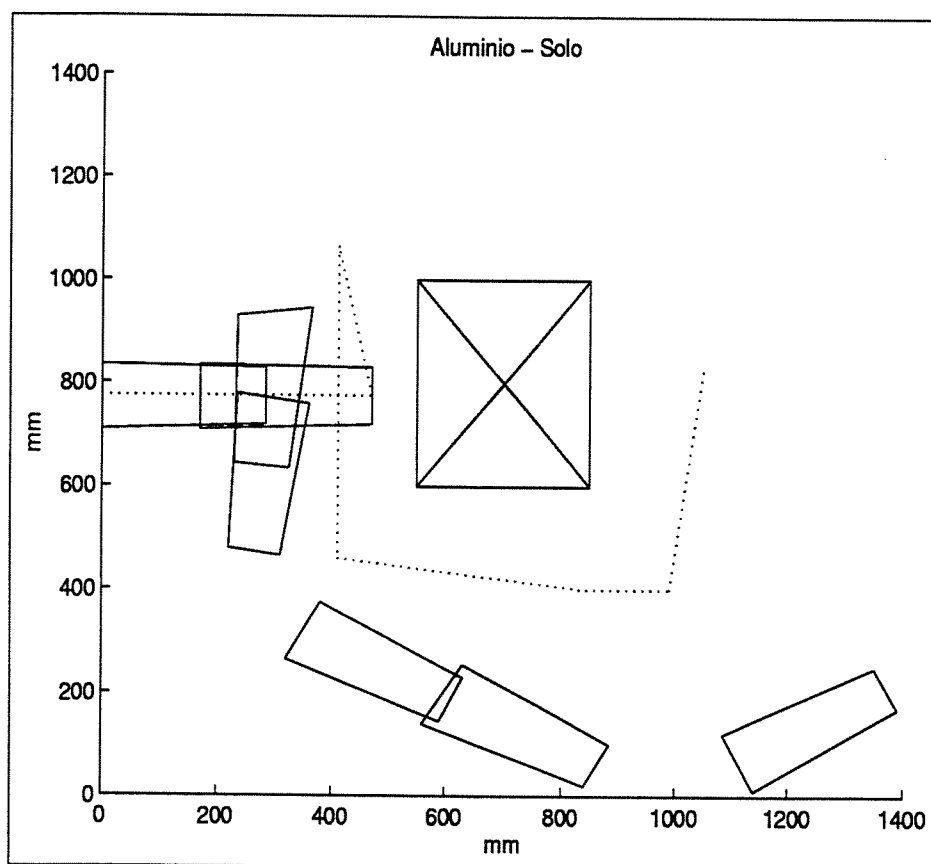


Figura 8.17: Experimento no piso

Do mesmo modo, na figura 8.18 pode-se visualizar a representação do ponto de partida (0,800), as posições intermediárias e a representação do ponto final da marcha (1200,100), para o segundo experimento com sensores.

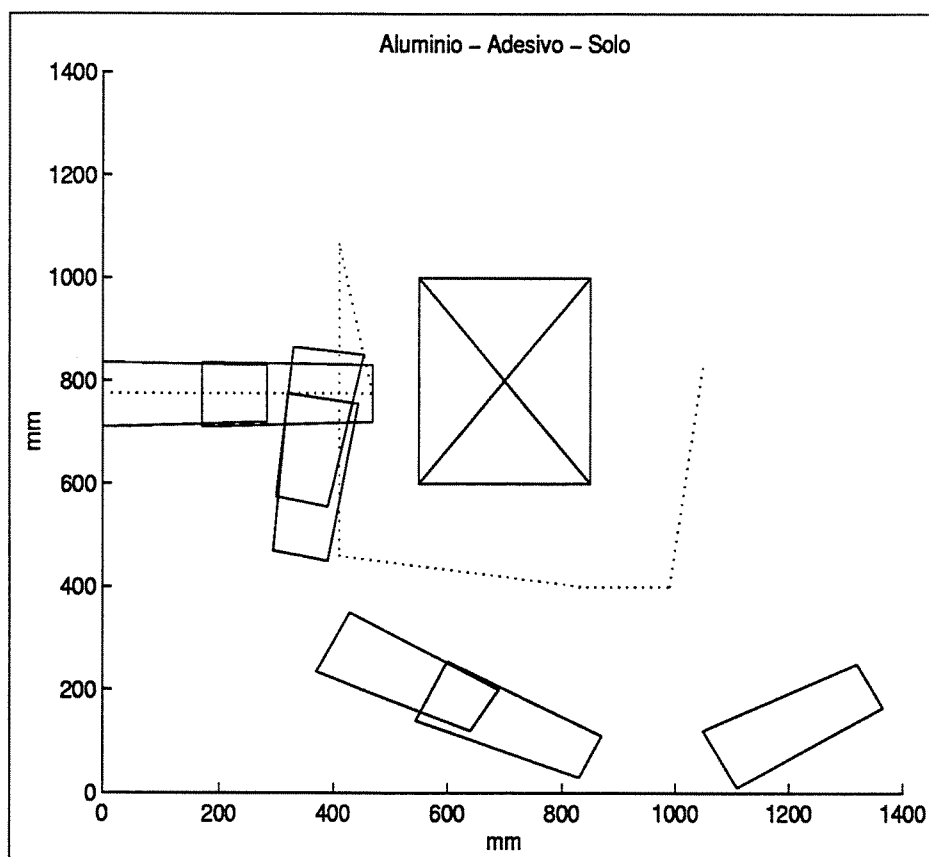


Figura 8.18: Experimento no piso com adesivo

E na figura 8.19 pode-se visualizar a representação do ponto de partida (0,800), as posições intermediárias e a representação do ponto final da marcha (1100,300), para o terceiro experimento com sensores.

É importante ressaltar que os resultados dos experimentos 5 e 6 são quase idênticos no final. Porém, no início os resultados são diferentes, sendo o resultado do experimento 6 mais próximo do ideal. Ou seja, à medida que as fitas adesivas vão perdendo a propriedade de aumentar o atrito, elas ficam sem efeito. O que não ocorre no experimento 7, pois o atrito entre os pés e a manta de borracha é praticamente constante.

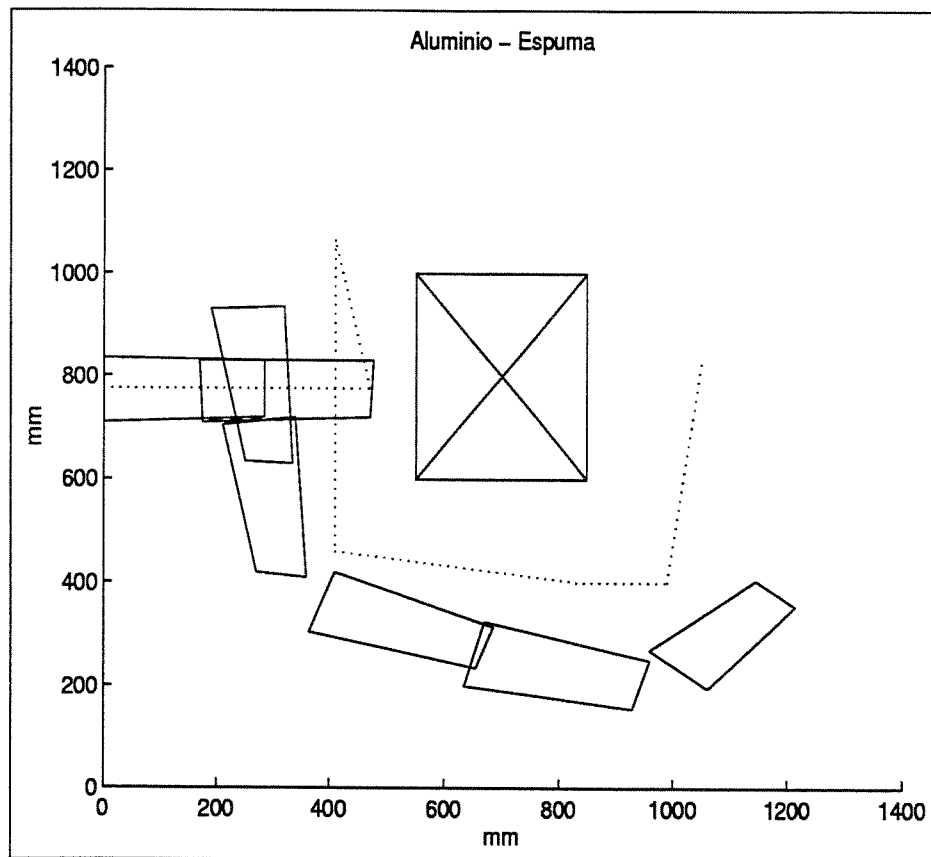


Figura 8.19: Experimento na manta de borracha EVA

8.4.4 Realização da tarefa de desvio de obstáculo com RB-2 e sensores

O oitavo experimento realizado com o RB-2 consistiu na implementação da tarefa representada na figura 8.12. Onde o robô foi capaz de realizar a marcha com um obstáculo entre o ponto inicial e final.

Foram realizadas onze medições registradas em vídeo. Apesar do robô ter executado todos os padrões de marcha criados pelo gerador automático de trajetórias, ter obtido todas as informações do ambiente através dos sensores e não ter colidido com o obstáculo durante todo o percurso, o RB-2 não atingiu o ponto final teórico e sim uma região final próxima. Os erros de desvio de trajetória foram se somando, de tal modo que o robô chegou no ponto final com um erro de aproximadamente 40% em sua orientação e aproximadamente 20% fora de sua posição, conforme registrado em vídeo.

Os outros experimentos que foram realizados sobre a manta de borracha apresentaram resultados mais próximos do teórico.

As principais justificativas e problemas encontrados são: soma dos erros de posicionamento, folgas, deslizamentos, precisão dos sensores, força externa provocadas pelos fios, velocidade de transmissão dos ângulos de referência, falta de uma estratégia de correção para o desvio, limitações do hardware (placas), incertezas (calibração e sincronismo), entre outros.

Uma estratégia para correção dos erros de posicionamento, dependendo do tipo de obstáculo considerado, é a utilização de sensores diferenciais, por exemplo. Estes sensores seriam montados dois a dois nos lados esquerdo e direito do robô, de tal modo que eles poderiam medir a distância entre a lateral do robô e o obstáculo, indicando através da defasagem de sinal recebido, o ângulo de inclinação entre robô / obstáculo no plano transversal. Em seguida o robô seria capaz de girar e compensar este ângulo. Assim, evita-se a soma de erros de posicionamento.

Capítulo 9

Conclusão

Os robôs bípedes têm despertado o interesse de diversos pesquisadores devido ao seu potencial de mobilidade semelhante ao ser humano. As pesquisas visam capacitá-lo a realizar tarefas no ambiente de trabalho do ser humano ou em ambientes onde o contato contínuo com o solo não é possível. Entretanto, este objetivo ainda está longe de ser atingido e as propostas atuais são direcionadas ao estudo de mecanismos eficientes de controle, estabilidade de locomoção e desvio de obstáculos.

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma metodologia para a concepção, modelagem, simulação, construção de um robô bípede capaz de interagir com o ambiente através de sensores e desviar dos obstáculos. Também foi implementada uma estratégia de desvio de obstáculo, que consiste na seleção autônoma, a partir da combinação da situação dos três sensores montados na pelve do robô, do padrão de marcha a ser adotado pelo robô. Além disso, a interface de geração de trajetórias pode receber outros tipos de estratégias de desvio.

As principais fases de uma pesquisa em Engenharia Mecatrônica foram abordadas neste trabalho. Desde a identificação de uma necessidade até a construção e testes com o robô.

A metodologia proposta descreve com detalhes a modelagem geométrica, cinemática e dinâmica, usando o método de Newton - Euler - Jourdain para modelagem dinâmica de robôs bípedes.

Foram desenvolvidos softwares para simulação, com o objetivo de verificar a admissibilidade da marcha e dos giros, antes da implementação no robô. Com isso, foi possível examinar a influência da variação dos parâmetros de marcha e do robô. Os códigos dos programas estão

disponíveis no apêndice B.

São apresentados também softwares para interface serial RS232-C dos computadores do tipo PC, capazes de estabelecer comunicação com as placas comerciais de controle de servomotores .

São apresentados dois robôs bípedes inéditos, de construção simples e capazes de realizar a marcha estaticamente estável em malha aberta. Os robôs foram construídos com componentes simples, associado a sensores de baixo custo com uma estratégia simples de desvio de obstáculo. Além disso, poucos protótipos de rbs no Brasil e no exterior têm a capacidade de desvio autônomo de obstáculos.

9.1 Trabalhos futuros

Os principais trabalhos a serem desenvolvidos a partir desta pesquisa são:

- desenvolvimento de um robô bípede capaz de andar no modo dinamicamente estável com controle em malha fechada;
- implementação de outras estratégias de desvio de obstáculos, entre elas um sistema neural para mapeamento do ambiente, desvio de obstáculo e otimização da trajetória;
- otimização dos parâmetros da marcha do robô visando diminuir o torque necessário para a realização da marcha e;
- uso de outros tipos de mecanismos de correção dos erros provocados pelas folgas da estrutura e deslizamento dos pés no solo. Estes mecanismos de correção podem ser sensores de ultrassom diferenciais, bússola eletrônica, uso de *landmarks*, entre outros.

Bibliografia

Bibliografia

- Allard, P., Stokes, A., and Blanchi, J. P. (1995). Three-dimensional analysis of human movement. *Human Kinetics*, USA.
- Aristotles (2001). *On the gait of animals*. Translated by A. S. L. Farquharson. Written 350 B.C.
- Asimov, I. (1950). *I, Robot*. Doubleday and Co, New York.
- Barros, R. M. L. (1993). Metodologia para descrição tridimensional do movimento humano. a partir de câmeras de vídeo não sincronizadas. Dissertação de mestrado, Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas.
- Barros, R. M. L., Brenzikofer, R., Leite, N., and Figueroa, P. J. (1999). Desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise cinemática tridimensional de movimentos humanos. *Brazilian Journal of Biomedical Engineering*, 15(1-2):79–86.
- Bay, J. S. and Hemami, H. (1997). Modeling of a neural pattern generator with coupled nonlinear oscillators. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, pages 123–145.
- Bennett, G. T. (Dec. 1903). A new mechanism. *Engineering*, 76:777–778.
- Benzatti, D. L. and Zampieri, D. E. (2001). Implementação em um microcontrolador real de um sistema de controle de robô bípede baseado em redes neurais. Relatório de bolsa de iniciação científica - Fapesp 99/10603-5.
- Berne, N. and Cappozzo, A. (1990). *Biomechanics of human movement: application in rehabilitation, sport and ergonomics*. Bertec Corporation, USA.

- Bezerra, C. A. D. (1996). Modelagem geométrica da estrutura cartesiana totalmente paralela. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- Boenick, U. and Näder, M. (1990). Gangbildanalyse - stand der meßtechnik und bedeutung für die orthopädie-technik. In und Verlag, M. D., editor, *Internationales Symposium Gangbildanalyse*, pages 1405–1411, Berlin. DE.
- Braune, W. and Fischer, O. (1987). *The human gait*. Springer Verlag.
- Campos, D. C., Zampieri, D. E., and Bezerra, C. A. D. (2000). Modelagem dinâmica e simulação de um robô bípede. Relatório de bolsa de iniciação científica - Fapesp 99/09602-4.
- Carvalho, J. C. M. and Dahan, M. (1995). Aplicação de estruturas paralelas em robótica. In *2o. Simpósio Sobre Robótica*, Março, São Paulo.
- Caux, S. and Zapata, R. (1999). Modeling and control of biped robot dynamics. *Robotica*, 17:413–426.
- Cavanah, P. R. (1990). Biomechanics: a bridge builder among the sport sciences. *Med. Sci. Sport Exerc.*, 22(5):546–557.
- Chace, M. A. (1963). Vector analysis of linkages. *J. Eng. Ind. ASME Trans.*, 85(3) B:289–297.
- Chakarov, D. and Parushev, P. (1994). Synthesis of parallel manipulator with linear drive modules. *Mechanism and Machine Theory*, 29(7):917–932.
- Cheng, M. Y. and Lin, C. S. (1997). Genetic algorithm for control design of biped locomotion. *Journal of Robotics Systems*, 14(5):365–373.
- Corke, P. I. (1999). Robotics toolbox for matlab. release 5. <http://www.cat.sciro.au/dmt/programs/autom/pic/matlab.html>.
- CT (Centro de Tecnologia da Unicamp). Cidade Universitária Zeferino Vaz. Campinas-SP. Cep 13083-970.
- Denavit, J. and Hartenberg, R. S. (1964). *Kinematic Synthesis of Linkages*. McGrall Hill, New York.

- der Linde, R. Q. V. (1998). Active leg compliance for passive walking. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2339–2344, Piscataway, NJ. IEEE Computer Society.
- Drew, T. (1994). Motor cortical activity during voluntary gait modifications in the cats. ii. cells related to the hindlimbs. *J. Neurophysiology*, 72:2070–2089.
- Dutra, M. S. (1997). Kinematical analysis of a six-legged walking machine. In *Proc. DINAME Dynamical Problems in Mechanics*, Angra dos Reis-RJ.
- Fichter, E. F. and McDowell, E. D. (1980). A novel design for a robot arm. In ASME, editor, *Proceedings of the International Computer Technology Conference*, pages 250–256, New York.
- Figliolini, C., Ceccarelli, M., and Aymerich, M. T. L. (2000). Logical sensors and control system programming for an autonomous biped walking robot. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*.
- Fischer, O. (1907). *Kinematik Organischer Gelenke*. R. Vierweg, Braunschweig.
- France, L., Girault, A., Gascuel, J.-D., and Espiau, B. (1999). Sensor modeling for a walking robot simulation. *http: www.inrialpes.fr/bip/people/france/cas99.html*.
- Frank, A. A. (1968). *Automatic control systems for legged locomotion machines*. PhD thesis, University of Southern California.
- Frank, A. A. (1970). An approach to the dynamic analysis and synthesis of biped locomotion machines. *Medical Bioll. Eng.*, 8:465–476.
- Fujimoto, Y. (1998). *Study on biped walking robot with environmental force interaction*. PhD thesis, Yokohama National University.
- Furusho, J. and Masubuchi, M. (1986). Control of a dynamical biped locomotion system for a steady walking. *J. of Dyn. Systems Meas. And Control. Transaction of ASME*, 108:111–118.

- Furusho, J. and Masubuchi, M. (1987). A theoretically motivated reduced order model for the control of dynamic biped locomotion. *J. of Dyn. Systems, Meas. and Control. Transaction of ASME*, 109:155–163.
- Furusho, J. and Sano, A. (1990). Sensor-based-control of a nine link biped. *Int. J. Robot. Res.*, 9(2):83–98.
- Garcia, M. S. (1999). *Stability, scaling, and chaos in passive-dynamics gait models*. PhD thesis, Cornell University.
- Géradin, M. and Rixen, D. (1997). *Mechanical Vibrations. Theory and Applications to Structural Dynamics*. John Willey and Sons, Chichester.
- Gomi, H., Kumagai, T., Hirose, M., and Nishikawa, M. (1992). Articulated structure for legged walking robot. In 3, N., editor, *U.S. Patent 5159988*.
- Gorce, P. and Hafi, F. E. (2000). Modelling of human body control scheme and learning in stepping motion over an obstacle. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intel. Robots and Systems*, Victoria B. C. Canada. October.
- Grillner, S. (1985). Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates. *Science*, 228:143–149.
- Grishin, A. A., Formalsky, A. M., Lensky, A. V., and Zhitomirsky, S. V. (1994). Dynamic walking of a vehicle with two telescopic legs controlled by two drivers. *Int. J. Robot. Res.*, 13(2):137–147.
- Hafi, F. E. and Gorce, P. (2000). Decision mechanisms analysis for the stepping motion over an obstacle based on a biomechanical approach. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*.
- Hasegawa, Y., Arakawa, T., and Fukuda, F. (2000). Trajectory generation for a biped locomotion robot. *Mechatronics*, 10:67–89.

- Hill, S. W., Patla, A. E., Ishac, M. G., Adkin, A. L., Supan, T. J., and Barth, D. G. (1999). Altered kinetic strategy for the control of swing limb elevation over obstacles in unilateral below-knee amputee gait. *Journal of Biomechanics*, 32:545–549.
- Hirai, K. (1997). The honda humanoid robot. In *Proc. IEEE-RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems*, pages 499–508, Grenoble, France.
- Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., and Takenaka, T. (1998). The development of honda humanoid robot. In *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1321–1326.
- Hodgins, J. (1988). Legged robots on rough terrain:experiments in adjusting step length. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 824–826.
- Hodgins, J. and Raibert, M. (1990). Biped gymnastics. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2).
- Hunt, K. H. (1983). Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms. *Journal of of Mechanisms , Transmission , and Automation in Design*, 105:705–712.
- Hurmuzlu, Y. (1993). Dynamics of bipedal gait: Part i. objective functions and the contact event of a planar five-link biped. *Journal of Applied Mechanics*, 60:331–336.
- Hurrell, S. (1994). *Dinosaurs and the Expanding Earth*. One-off Publishing, Great Britain.
- Jordan, M. (1990). Motor learning and the degrees of freedom problem. In Jeannerod, M., editor, *Attention and performance XIII*, pages 796–836. Erlbaum Hillsdale.
- Kajita, S. and Tani, K. (1991). Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain. In *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1405–1411, Sacramento. CA.
- Kajita, S. and Tani, K. (Feb 1996). Experimental study of biped dynamic walking. *IEEE Control Systems Magazine*, 16(1):13–19.

- Kajita, S., Yamaura, T., and Kobayashi, A. (1992). Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(4):431–438.
- Karsten, B. (2001). homepage <http://www.fzi.de>. Acessado em Dez. 2001.
- Kato, I., Ohteru, S., Kobayashi, H., Shirai, K., and Uchiyama, A. (1974). Information-power machine with senses and limbs. In *First CISM-IFTToMM Symp. On Theory and Practice of Robots and Manipulators*.
- Kato, T., Takanishi, A., Ishikawa, H., and Kato, I. (1983). The realization of quasidynamic walking by a biped walking machine. In *Fourt CISM-IFTToMM Symp. On Theory and Practice of Robots and Manipulators*, pages 341–351.
- Kato, R. and Mori, M. (1984). Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory. *Automatica*, 20(4):405–414.
- Kawato, M., Furukawa, K., and Suzuki, R. (1987). A hierarchical neuralnetwork model for control and learning of voluntary movement. *Biol. Cybernetics*, 57:169–185.
- Khalil, W. and Kleinfinger, J. F. (1986). A new geometric notation for open and closed-loop robots. *IEEE Jor. of Robotics and Automation*.
- Koopman, H. F. J. M. (1990). Mathematical methods of modeling. In und Verlag, M. D., editor, *Internationales Symposium Gangbildanalyse*, pages 170–178, Berlin. DE.
- Kuffner, J., Nishiwaki, K., Kagami, S., Inaba, M., and Inoue, H. (2001). Motion planning for humanoid robots under obstacle and dynamic balance constraints. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, May 21-26.
- Kumar, V. (1990). Instantaneous kinematics of parallel - chain robotic mechanisms. In *ASME Proc. of the 21st Biennial Mechanism Conference : Mechanism Synthesis and Analysis*, pages (25).279–288, Chicago, Illinois, September 16-19.
- Kuo, A. D. (1999). Stabilization of lateral motion in passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 18(9):917–930.

- Lum, H. K., Zribi, M., and Soh, Y. C. (1999). Planning and control of a biped robot. *Int.Journal of Engineering Science*, 37:1319–1349.
- McCown-McClintick, B. E. and Moskowitz, G. D. (1998). The behavior of a biped walking gait on irregular terrain. *The International Journal of Robotics Research*, 17(1):43–55.
- Mcfadyen, B. J., Winter, D. A., and Allard, F. (1994). Simulated control of unilateral, anticipatory locomotor adjustments during obstructed gait. *Biol. Cybernetics*, 72:151–160.
- McGeer, T. (1990). Passive dynamic walking. *International Journal of Robotics Research*, 9(2):62–82.
- Merlet, J. P. and Gosselin, C. (1991). Nouvelle architecture pour manipulateur parallele a six degrees de liberte. *Mechnism and Machine Theory*, 26(1):77–90.
- Microchip (2002). Microcontroladores pic. <http://www.microchip.com>.
- Miller-III, W. T. (1994). Real time neural network control of a biped walking robot. *IEEE Control Systems*, Feb:41–48.
- Minsky, M. (1972). Manipulator design vignettes. In *Artificial Intelligence Laboratory*, chapter Memo No. 267. Massachusetts Institute of Technology.
- Mita, T., Yamaguchi, T., Kashiwase, T., and Kawase, T. (1984). Realization of high speed biped using modern control theory. *International Journal of Control*, 40(1):107–119.
- Miura, H. and Shimoyama, I. (1984). Dynamic walk of a biped. *International Journal of Robotics Research*, 3(2):60–74.
- Miyazaki, F. and Arimoto, S. (1980). A control theoretic study on dynamical biped locomotion. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 102:233–239.
- Miyazaki, F. and Arimoto, S. (1981). Implementation of a hierarchical control for biped locomotion. In *Proceedings 8th IFAC Control Science and Technology Congress*, pages 1891–1896, Kyoto, Japan.

- Mohammed, M. G. and Duffy, J. (1985). A direct determination of the instantaneous kinematics of fully parallel robot manipulators. *ASME Journal of Mechanisms , Transmission , and Automation in Design*, 107:226–229.
- Muybridge, E. (1957). *Animals in Motion*. Dover Publications, New York.
- Onyshko, S. and Winter, D. A. (1980). A mathematical model for the dynamics of human locomotion. *Journal of Biomechanics*, 13:361–368.
- Ortek (2002). Sensores de infravermelho. <http://www.br>.
- Patla, A. E., Prentice, S. D., Robinson, C., and Neufeld, J. (1991). Visual control of locomotion: strategies for changing direction and for going over obstacles. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 17:603–634.
- Pedotti, A. (1990). Future perspectives in europe for quantitative analysis of movement. In Boenick, U. and Näder, E. H. M., editors, *Proceedings of the Gait Analysis. State-of-art of measuring systems and their importance in prosthetic and orthotic technology*, Berlin.
- Pinto, F. A. N. C. and Bevilacqua, L. (1991). Dynamical analysis of the biped machine. In *IV Simpósio International Sobre Sistemas Dinâmicos da Mecânica*, Pouso Alto, MG.
- Pratt, G. A. (2000). Legged robots at MIT: What's new since Raibert. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 7(3):15–19.
- Pratt, J. and Pratt, G. (1998). Intuitive control of a planar bipedal walking robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium.
- Raibert, M. H. (1986). *Legged Robots That Balance*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Salatian, A. W., Yi, K. Y., and Zheng, Y. F. (1997). Reinforcement learning for a biped robot to climb sloping surfaces. *Journal of Robotic Systems*, 14(4):283–296.
- Sandler, B. Z. (1991). *Robotics. Designing the mechanisms for automated machinery*. Solomon press book. Prentice-hall, New Jersey.

- Sano, A. and Furusho, J. (1988). 3d steady walking robot with kick-action. In Vol.II, editor, *Proc. USA-Japan Symp. on Flexible Automation*, Minneapolis.
- Sano, A. and Furusho, J. (1989). Dynamically stable quadruped locomotion - a pace gait in the colt-3. In *Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, Japan.
- Santos, I. F. (2001). *Cinemática e Dinâmica de Sistemas Mecânicos*. Makron, São Paulo.
- Sardain, P., Rostami, M., and Bessonnet, G. (1998). An anthropomorphic biped robot: dynamic concepts and technological design. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: systems and humans*, 28(6):823–838.
- Schammas, A., Valente, C. M. O., and Caurin, G. A. P. (1999). Modelling and control of a simulated one legged robot. In *Proceedings of the XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Aguas de Lindoia. São Paulo.
- Shih, C. L. (1999). Ascending and descending stairs for a biped robot. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 29(3):255–268.
- Shih, C. L. and Chiou, C. J. (1998). The motion control of a statically stable biped robot on an uneven floor. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: cybernetics*, 28(2):244–249.
- Shih, C. L. and Gruver, W. (1992). Control of a biped robot in the double-support phase. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22(4):729–735.
- Shih, C. L., Gruver, W., and Lee, T. (1993). Inverse kinematics and inverse dynamics for control of a biped walking machine. *Journal of Robotic Systems*, 10(4):531–555.
- Shin, D., Takanishi, A., Yoshigahara, T., Takeya, T., Ohteru, S., and Kato, I. (1989). Realization of obstacle avoidance by biped robot equipped with vision system. In *Proc. IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Sep, 4-6 Tsukuba. Japan.

- Smith, L. K., Weiss, E. L., and Lehmkuhl, L. D. (1997). *Cinesiologia Clínica de Brunnstrom*. Ed. Manole Ltda, São Paulo.
- Snyder, W. E. (1985). *Industrial Robots: Computer Interfacing and Control*. Prentice - Hall Inc., New Jersey.
- Solbet (2002). Sistemas para robótica móvel. <http://www.solbet.com.br>.
- Sony (2001). Sony corporation. homepage <http://www.sony.com.br>. html.
- Symon, K. R. (1982). *Mechanics*. Addison-Wesley Co. Inc., Massachusetts.
- Taga, G. (1995). A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. ii. real-time adaptability under various constraints. *Biol. Cybernetics*, 73:113–121.
- Taga, G. (1998). A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment of human locomotion during obstacle avoidance. *Biological Cybernetics*, 78:9–17.
- Taga, G., Yamaguchi, Y., and Shimizu, H. (1991). Self organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biol. Cybernetics*, 65:147–159.
- Takanishi, A. (1990). Robot biped walking stabilized with trunk motion. In *Mechanical Engineering, A. S. Symposium on Robotics*, volume 11, pages 271–291.
- Takanishi, A., Egusa, Y., Tochizawa, M., Takeda, T., and Kato, I. (1988). Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion. In *Proc. Rob. Manuf. Syst.*
- Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y., and Kato, I. (1985). The realization of dynamic walking by biped walking robot wl-10rd. In *Proceedings International Conference on Advanced Robotics*, pages 459–466.
- Takanishi, A., Lim, H. O., Tsuda, M., and Kato, I. (1990). Realization of dynamic biped walking stabilized by trunk motion on a sagittally uneven surface. In *Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots Systems*, pages 323–330, Tsuchiura, Ibaraki, Japan.
- Tzafestas, S., Raibert, M. H., and Tzafestas, C. (1996). Robust sliding-mode control applied to a 5-link biped robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 15:67–133.

- Vukobratovic, M. (1973). How to control artificial anthropomorphic systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3(5):497–507.
- Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D., and Stokic, D. (1990). *Scientific fundamentals of robotics 7. Biped locomotion: Dynamics stability, control and application*. Springer - Verlag, first edition.
- Vukobratovic, M. and Stepanenko, Y. (1973). Mathematical models of general anthropomorphic systems. *Mathematical Biosciences*, 17:191–242.
- Waldron, K. J., Raghavan, M., and Roth, B. (1989). Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 111(2):211–221.
- Wampler, C. (1985). Computer methods in manipulator kinematics, dynamics, and control: a comparative study. Ph.d. thesis, Stanford University.
- Wolovich, W. A. (1985). *Robotics : Basic Analysis and Design*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- World, A. (2001). <http://www.androidworld.com/index>.
- Yagi, M. and Lumelsky, V. (2000). Local on-line planning in biped robot locomotion amongst unknown obstacles. *Robotica*, 18:389–403.
- Yamada, M., Furusho, J., and Sano, A. (1985). Dynamic control of walking robot with kick-action. In *Proc. Int. Conf. on Advanced Robotics. ICAR'85*, pages 405–412, Tokyo.
- Yamaguchi, J., Takanishi, A., and Kato, I. (1995). Experimental development of foot mechanism with shock absorbing material for acquisition of landing surface position information and stabilization of dynamic biped walking. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automation*, pages 2892–2899.
- Zheng, Y. and Shen, J. (1990). Gait synthesis for the sd-2 biped robot to climb sloping surface. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(1):86–96.

Zheng, Y. and Sias, F. J. (1988). Design and motion control of practical biped robots.
International Journal of Robotics and Automation, 3(2):70–78.

Apêndice A

Método de Lagrange

A.1 Introdução

Para a determinação das equações de movimento de sistemas mecânicos, adota-se um sistema de coordenadas que podem ser cartesianas, esféricas, polares, entre outras. Tais sistemas de coordenadas podem ser transformados em sistemas de coordenadas generalizadas, onde as posições das partículas do sistema podem ser especificadas em função das coordenadas generalizadas (Symon, 1982). O método de Lagrange permite obter diretamente, e em certos casos resolver, as equações de movimento em termos de um conjunto de coordenadas generalizadas. Assim, uma partícula que se move no plano pode ser descrita por duas coordenadas generalizadas, q_1 e q_2 , que podem ser as coordenadas cartesianas x e y , ou as coordenadas polares r e θ , ou qualquer outro par adequado.

A abordagem variacional em mecânica é baseada nos conceitos de energia e trabalho, possibilitando uma melhor compreensão do fenômeno mecânico. O princípio variacional simplifica consideravelmente a formulação analítica das equações do movimento de sistemas mecânicos complexos.

A.1.1 Princípio do trabalho virtual

Ao se submeter uma partícula de massa m a um campo de força X , pode-se expressar o equilíbrio dinâmico da partícula na forma de d'Alembert (Gérardin and Rixen, 1997):

$$m\ddot{u}_i - X_i = 0 \longrightarrow i = 1, 2, 3 \quad (\text{A.1})$$

onde u_i é o deslocamento da partícula.

Considere que a partícula durante um intervalo $[t_i, t_f]$ descreve uma trajetória u_i^* diferente da trajetória real u_i . Então pode-se definir o deslocamento virtual da partícula δu_i como sendo :

$$\delta u_i = u_i^* - u_i \quad (\text{A.2})$$

Como a trajetória real $u_i(t)$ e a trajetória virtual $u_i(t)^*$ são coincidentes no ponto inicial e final

$$\delta u_i(t_1) = \delta u_i(t_2) = 0 \quad (\text{A.3})$$

pode-se substituir o operador variacional δ por $\frac{d}{dt}$, logo:

$$\frac{d}{dt}(\delta u_i) = \frac{d}{dt}(u_i^* - u_i) = \delta \dot{u}_i \quad (\text{A.4})$$

Multiplicando a equação A.1 pelo deslocamento virtual para cada i-ésimo elemento, obtém-se a expressão do trabalho virtual para a partícula:

$$\sum_{i=1}^3 (m\ddot{u}_i - X_i) \delta u_i = 0 \quad (\text{A.5})$$

Portanto, o trabalho virtual produzido por uma força efetiva atuando em uma partícula durante um deslocamento virtual δu_i é zero.

Pode-se escrever a equação A.1 para cada partícula k de um sistema com N partículas

$$m_k \ddot{u}_{ik} - X_{ik} = 0 \longrightarrow k = 1, \dots, N \quad (\text{A.6})$$

onde X_{ik} é formado pelas componentes das forças externas conhecidas e as componentes das reações resultantes das restrições impostas ao sistema.

O deslocamento virtual para cada partícula k pode ser escrito como

$$\delta u_{ik} = u_{ik}^* - u_{ik} \longrightarrow i = 1, 2, 3 \quad (\text{A.7})$$

$$\delta u_{ik}(t_1) = \delta u_{ik}(t_2) = 0 \longrightarrow k = 1, \dots, N \quad (\text{A.8})$$

Logo, o princípio do trabalho virtual para um sistema de pontos materiais é escrito como :

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 (m_k \ddot{u}_{ik} - X_{ik}) \delta u_{ik} = 0 \quad (\text{A.9})$$

Portanto, se a equação do trabalho virtual é satisfeita para qualquer deslocamento virtual compatível com as restrições cinemáticas, então, o sistema é dito estar em equilíbrio dinâmico.

A.1.2 Restrições Cinemáticas

A partir de uma configuração inicial de referência e sem as restrições cinemáticas, o estado de um sistema pode ser completamente definido por $3N$ componentes de deslocamento u_{ik} :

$$\xi_{ik}(t) = x_{ik} + u_{ik}(x_{ik}, t) \quad (\text{A.10})$$

Para $i = 1, 2, 3$ e $k = 1, \dots, N$, o sistema é dito possuir $3N$ graus de liberdade.

As partículas de um sistema mecânico podem estar submetidas a restrições cinemáticas que restringem seu movimento, através de uma relação de dependência entre as partículas. As restrições *holonômicas* são definidas por relações implícitas do tipo

$$f(\xi_{ik}, t) = 0 \quad (\text{A.11})$$

Se existe dependência explícita em relação ao tempo, as restrições são denominadas de *re-onômicas*, caso contrário são restrições *escleronômicas*.

A restrição holonômica reduz o número de graus de liberdade do sistema de uma unidade.

As restrições não holonômicas são aquelas que não podem ser colocadas na forma da equação A.11. Frequentemente as restrições não holonômicas aparecem na forma de relações diferenciais do tipo

$$f(\dot{\xi}_{ik}, \xi_{ik}, t) = 0 \quad (\text{A.12})$$

A.1.3 Deslocamentos Generalizados

Considerando um sistema com $3N$ componentes de deslocamento e R restrições cinemáticas holonômicas, o número de graus de liberdade é então reduzido para $3N-R$. Portanto, é necessário definir $n = 3N - R$ parâmetros, ou coordenadas generalizadas, denominadas de $(q_1, \dots, q_n)$, em função das quais os deslocamentos das partículas do sistema podem ser expressos sob a forma

$$u_{ik}(x_{jk}, t) = U_{ik}(q_1, \dots, q_n, t) \quad (\text{A.13})$$

Para fixar melhor as definições acima, considere o pêndulo duplo da figura A.1:

O sistema é composto de duas ($k = 1, 2$) esferas de massa m_1 e m_2 . O movimento é restrito ao plano bidimensional XY ($i = 1, 2$), de tal modo que o modelo cinemático é descrito por

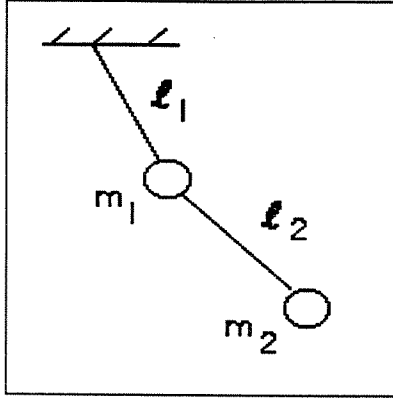


Figura A.1: Pêndulo duplo

4 componentes instantâneos de posição ξ_{ik} . As restrições holonômicas do sistema mecânico são os comprimentos dos segmentos l_1 e l_2

$$\begin{aligned}(\xi_{11} - 0)^2 + (\xi_{21} - 0)^2 &= l_1^2 \\ (\xi_{12} - \xi_{11})^2 + (\xi_{22} - \xi_{21})^2 &= l_2^2\end{aligned}$$

O modelo cinemático pode ser descrito em termos de $4 - 2 = 2$ coordenadas generalizadas. Adotando-se as duas rotações θ_1 e θ_2

$$\begin{aligned}\xi_{11} &= l_1 \cos(\theta_1) \\ \xi_{21} &= l_1 \sin(\theta_1) \\ \xi_{12} &= \xi_{11} + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \xi_{22} &= \xi_{21} + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\end{aligned}$$

Nos sistemas submetidos a somente restrições holonômicas, as coordenadas generalizadas q_s permanecem independentes e podem variar de maneira arbitrária sem violar as restrições cinemáticas. Os deslocamentos virtuais δu_{ik} compatíveis com as restrições holonômicas podem ser expressos na forma

$$\delta u_{ik} = \sum_{s=1}^n \frac{\partial U_{ik}}{\partial q_s} \delta q_s \quad (\text{A.14})$$

E o trabalho virtual

$$\sum_{s=1}^n [\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 (m_k \ddot{u}_{ik} - X_{ik}) \frac{\partial U_{ik}}{\partial q_s}] \delta q_s = 0 \quad (\text{A.15})$$

A.1.4 Princípio de Hamilton para sistemas conservativos

O princípio de Hamilton é a forma integral temporal da equação do trabalho virtual

$$\int_{t_1}^{t_2} [\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 (-m_k \ddot{u}_{ik} + X_{ik}) \delta u_{ik}] dt = 0 \quad (\text{A.16})$$

onde δu_{ik} são arbitrários, mas compatíveis com o deslocamento virtual da equação A.8.

Considerando-se que as forças generalizadas X_{ik} podem ser obtidas de um potencial ν , e o trabalho virtual pode ser obtido por

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 X_{ik} \delta u_{ik} = \sum_{s=1}^n Q_s \delta q_s = -\delta \nu \quad (\text{A.17})$$

As forças generalizadas são obtidas de um potencial ν através da relação

$$Q_s = -\frac{\partial \nu}{\partial q_s} \quad (\text{A.18})$$

Mudando a notação do termo associado com as forças de inércia,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (m_k \dot{u}_{ik} \delta u_{ik}) &= m_k \ddot{u}_{ik} \delta u_{ik} + m_k \dot{u}_{ik} \delta \dot{u}_{ik} \\ &= m_k \ddot{u}_{ik} \delta u_{ik} + \delta \left(\frac{1}{2} m_k \dot{u}_{ik} \dot{u}_{ik} \right) \end{aligned}$$

e da definição de energia cinética τ do sistema

$$\tau = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 m_k \dot{u}_{ik} \dot{u}_{ik} \quad (\text{A.19})$$

considerando a equação A.8, a equação A.16 pode ser reescrita na forma

$$\left[- \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 (m_k \ddot{u}_{ik} \delta u_{ik}) \right]_{t_1}^{t_2} + \delta \int_{t_1}^{t_2} (\tau - \nu) dt = 0 \quad (\text{A.20})$$

No qual o termo $\dot{u}_{ik}$ pode ser escrito em função das coordenadas generalizadas q_s

$$\dot{u}_{ik} = \frac{\partial U_{ik}}{\partial t} + \sum_{s=1}^n \frac{\partial U_{ik}}{\partial q_s} \dot{q}_s \quad (\text{A.21})$$

e os termos para a energia cinética τ e potencial ν

$$\begin{aligned}\tau &= \tau(q, \dot{q}, t) \\ \nu &= \nu(q, t)\end{aligned}\tag{A.22}$$

Usando as equações A.8 e A.14, pode-se escrever as seguintes condições de contorno

$$\delta q_s(t_1) = \delta q_s(t_2) = 0\tag{A.23}$$

O principio de Hamilton para sistemas conservativos pode ser dita sob a forma: “*A trajetória real de um sistema é tal que a integral*

$$\int_{t_1}^{t_2} (\tau - \nu) dt$$

permanece estacionária com relação a qualquer deslocamento virtual coerente e arbitrário entre os instantes t_2 e t_1 , mas se anula nos extremos do intervalo.”

$$\begin{aligned}\delta \int_{t_1}^{t_2} (\tau - \nu) dt &= 0 \\ \delta q(t_1) = \delta q(t_2) &= 0\end{aligned}\tag{A.24}$$

A partir da equação acima do principio de Hamilton, pode-se obter a equação do movimento em termos das coordenadas generalizadas. Da equação A.22:

$$\delta \tau = \sum_{s=1}^n \left(\frac{\partial \tau}{\partial q_s} \delta q_s + \frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \delta \dot{q}_s \right)$$

dando uma forma mais explícita da equação A.24

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum_{s=1}^n \left[\left(\frac{\partial \tau}{\partial q_s} + Q_s \right) \delta q_s + \frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \delta \dot{q}_s \right] dt = 0$$

integrando por partes o segundo termo

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \delta \dot{q}_s dt = \left[\frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \right]_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \right) \delta q_s dt$$

Considerando-se as condições iniciais, obtém-se uma expressão equivalente ao princípio de Hamilton

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum_{s=1}^n \left[-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \right) + \frac{\partial \tau}{\partial q_s} + Q_s \right] \delta q_s dt = 0 \quad (\text{A.25})$$

Se a variação δq_s , para $s = 1, 2, \dots, n$ for arbitrária em todo o intervalo de tempo, a equação do movimento resultante obtida por Lagrange será

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \right) + \frac{\partial \tau}{\partial q_s} + Q_s = 0 \quad (\text{A.26})$$

Os dois primeiros termos representam as forças de inércia generalizadas associadas com as coordenadas generalizadas q_s . O termo das forças generalizadas Q_s é composto por forças internas, oriunda da interação entre as partículas, e externa aplicada ao sistema.

A.1.5 Estrutura da energia cinética e classificação das forças inerciais

Substituindo-se as velocidades em termos das coordenadas generalizadas A.21 na equação geral da energia cinética A.19, a energia cinética é dividida em três termos

$$\tau(q, \dot{q}, t) = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 \quad (\text{A.27})$$

onde τ_0, τ_1 e τ_2 são respectivamente as formas homogêneas de grau 0, 1 e 2 para as velocidades generalizadas $\dot{q}_s$

- O primeiro termo

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 m_k \left(\frac{\partial U_{ik}}{\partial t} \right)^2 = \tau_0(q, t) \quad (\text{A.28})$$

é a *energia cinética de transporte* do sistema, que corresponde à situação onde os graus de liberdade $q_1, q_2, \dots, q_n$ estão congelados.

- O segundo termo

$$\tau_1 = \sum_{s=1}^n \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 \frac{\partial U_{ik}}{\partial t} m_k \frac{\partial U_{ik}}{\partial q_s} \dot{q}_s \quad (\text{A.29})$$

é a *energia cinética recíproca* do sistema,

- O terceiro termo

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^3 m_k \frac{\partial U_{ik}}{\partial q_s} \frac{\partial U_{ik}}{\partial q_r} \dot{q}_s \dot{q}_r \quad (\text{A.30})$$

é a *energia cinética relativa* do sistema, que corresponde ao que é deixado quando a dependência explícita da velocidade $\dot{u}_{ik}$ em relação ao tempo é suprimida.

Também pode-se escrever as seguintes expressões para τ_1 e τ_2

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \frac{\partial \tau_1}{\partial \dot{q}_s} \\ \tau_2 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \frac{\partial \tau_2}{\partial \dot{q}_s}\end{aligned}\tag{A.31}$$

A.1.6 Conservação de energia em sistemas com restrições esclerônicas

Para sistemas mecânicos submetidos à restrições cinemáticas independentes do tempo, a equação A.27 reduz-se ao termo T_2 podendo ser escrita na seguinte forma

$$2\tau = \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s}$$

Diferenciando em relação ao tempo

$$2 \frac{d\tau}{dt} = \sum_{s=1}^n \ddot{q}_s \frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} + \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \right)\tag{A.32}$$

Desde que as restrições são independente do tempo $\tau = \tau(q, \dot{q})$, pode-se escrever

$$\frac{d\tau}{dt} = \sum_{s=1}^n \ddot{q}_s \frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} + \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \left(\frac{\partial \tau}{\partial q_s} \right)\tag{A.33}$$

Subtraindo-se a equação acima da equação A.32 e usando a equação de Lagrange A.26

$$\frac{d\tau}{dt} = \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial \tau}{\partial q_s} \right] = \sum_{s=1}^n \dot{q}_s Q_s\tag{A.34}$$

Para sistemas conservativos, a força Q_s depende também de um potencial

$$\frac{d}{dt}(\tau + \nu) = 0\tag{A.35}$$

Integrando a equação acima

$$\tau + \nu = \varepsilon\tag{A.36}$$

A.1.7 Classificação das forças generalizadas

Classifica-se as forças em internas e externas ao sistema. Em ambos os casos elas são ditas conservativas se o trabalho virtual for recuperável.

Forças internas

Podem ser divididas em três tipos: forças de união, forças elásticas e forças dissipativas.

A *força de união* atua em uma conexão rígida entre duas partículas. Elas interagem entre si de tal modo que o sistema de forças está em equilíbrio. De acordo com a figura A.2:

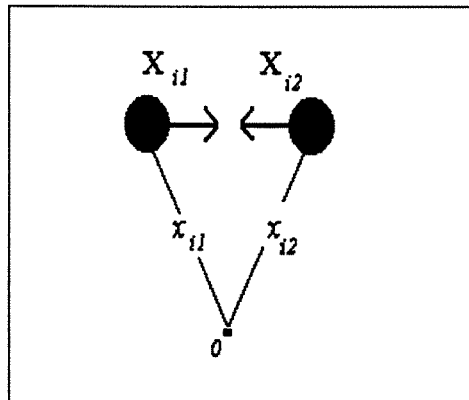


Figura A.2: Pêndulo duplo

$$X_{i1} + X_{i2}X = 0$$

O trabalho virtual associado com o deslocamento virtual $(\delta u_{i1}, \delta u_{i2})$ é

$$\begin{aligned} \delta \tau &= \sum_{i=1}^3 (X_{i1} \delta u_{i1} + X_{i2} \delta u_{i2}) \\ &= \sum_{i=1}^3 [X_{i1} (\delta u_{i1} - \delta u_{i2})] \\ &= 0 \end{aligned}$$

uma vez que os deslocamentos virtuais relativos não são compatíveis com as restrições. Consequentemente pode ser deduzido que as forças de união não contribuem para as forças

generalizadas atuando no sistema global. Esta ausência do cálculo das forças generalizadas é uma das características atraentes da mecânica lagrangeana.

Forças elásticas

Um corpo elástico pode ser definido como um corpo no qual qualquer trabalho produzido é armazenado de uma maneira recuperável, contribuindo para o aumento da variação de energia interna

$$\delta\nu_{int} = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N \frac{\partial\nu_{int}}{\partial u_{ik}} \delta u_{ik} = -\delta\tau$$

onde τ é o trabalho virtual das forças internas, que pode ser expresso em termos dos deslocamentos generalizados

$$\begin{aligned} \nu_{int} &= \nu_{int}(q, t) \\ \delta\tau &= \sum_{s=1}^n Q_s \delta q_s = -\delta\nu_{int} \end{aligned}$$

onde as forças generalizadas elásticas na forma

$$Q_s = -\frac{\partial\nu_{int}}{\partial q_s} \quad (\text{A.37})$$

Forças dissipativas

Uma força de dissipação ou dissipativa pode ser caracterizada pelo fato de que ela permanece paralela e na direção oposta ao vetor velocidade e é função de seu módulo. A força dissipativa atuando em uma partícula k tem a seguinte expressão

$$X_k = -C_k f_k(v_k) \frac{V_k}{v_k}$$

ou

$$X_{ik} = -C_k f_k(v_k) \frac{v_{ik}}{v_k} \quad (\text{A.38})$$

onde C_k é uma constante, $f_k(v_k)$ é a função que relaciona a dependência da velocidade e v_k é a velocidade da partícula absoluta:

$$v_k = |V_k| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 v_{ik}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \dot{u}_{ik}^2}$$

O trabalho virtual das forças dissipativas agindo no sistema é

$$\begin{aligned}\sum_{s=1}^n Q_s \delta q_s &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N X_{ik} \delta u_{ik} \\ &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N \sum_{s=1}^n X_{ik} \frac{\partial u_{ik}}{\partial q_s} \delta q_s\end{aligned}$$

dando

$$Q_s = - \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N C_k f_k(v_k) \frac{v_{ik}}{v_k} \frac{\partial u_{ik}}{\partial q_s} \quad (\text{A.39})$$

como

$$\begin{aligned}v_{ik} &= \frac{du_{ik}}{dt} = \frac{\partial u_{ik}}{\partial t} + \sum_{r=1}^n \frac{\partial u_{ik}}{\partial q_r} \dot{q}_r \\ \frac{\partial v_{ik}}{\partial \dot{q}_s} &= \frac{\partial u_{ik}}{\partial q_s}\end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

Então, a equação A.39 pode ser escrita da seguinte forma

$$\begin{aligned}Q_s &= - \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N C_k f_k(v_k) \frac{v_{ik}}{v_k} \frac{\partial v_{ik}}{\partial \dot{q}_s} \\ &= - \sum_{k=1}^N C_k \frac{f_k(v_k)}{v_k} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_s} \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 v_{ik}^2 \right] \\ &= - \sum_{k=1}^N C_k f_k(v_k) \frac{\partial v_k}{\partial \dot{q}_s}\end{aligned} \quad (\text{A.41})$$

Definindo-se a função de dissipação D como sendo

$$D = \sum_{k=1}^N \int_0^{v_k} C_k f_k(\gamma) d\gamma \quad (\text{A.42})$$

e ainda

$$Q_s = - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_s} \quad (\text{A.43})$$

A potência dissipada pode ser escrita como sendo

$$P = \sum_{s=1}^n Q_s \dot{q}_s = - \sum_{s=1}^n \dot{q}_s \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_s} \quad (\text{A.44})$$

Considerando-se que a função de dissipação D é homogênea de ordem m e da equação A.34, pode-se escrever a equação de dissipação de energia como

$$\frac{d}{dt}(\tau + \nu) = -mD \quad (\text{A.45})$$

A ordem m da função de dissipação de energia e ainda a ordem $m-1$ das forças generalizadas de dissipação Q_s descrevem o modo físico de dissipação

$m = 1 \longleftrightarrow$ atrito seco

$m = 2 \longleftrightarrow$ amortecimento viscoso

$m = 3 \longleftrightarrow$ arrasto aerodinâmico

Deve-se observar que as forças dissipativas podem ter origem externas também.

Forças externas

Durante um ciclo, o trabalho virtual permanece igual a zero quando as forças externas são conservativas.

$$\delta\tau = \oint Q_s \delta q_s = 0$$

e o potencial das forças externas $\nu_{ext}(q, t)$ é definido como

$$Q_s = -\frac{\partial \nu_{ext}}{\partial q_s} \quad (\text{A.46})$$

Forças não conservativas

Quando as forças externas são do tipo não conservativas, o cálculo das forças generalizadas é realizado através do uso da equação do trabalho virtual

$$\begin{aligned} \delta\tau = \sum_{s=1}^n Q_s \delta q_s &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N X_{ik} \delta u_{ik} \\ &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N \sum_{s=1}^n X_{ik} \frac{\partial u_{ik}}{\partial q_s} \delta q_s \end{aligned}$$

logo

$$Q_s = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N X_{ik} \frac{\partial u_{ik}}{\partial q_s} \quad (\text{A.47})$$

Considerando-se as forças externas não conservativas, o balanço de potência do sistema pode ser escrito na seguinte forma

$$\frac{d}{dt}(\tau + \nu) = -mD + \sum_{s=1}^n Q_s \dot{q}_s \quad (\text{A.48})$$

Onde o termo $-mD$ é denominado de potência dissipada pelas forças internas e o segundo termo, denominado de potência injetada pelas forças externas.

A.1.8 Equação de Lagrange para o caso geral

Para o caso geral de um sistema não conservativo com restrições reonômicas, as equações de movimento podem ser escrita na forma

$$-\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{q}_s}\right) + \frac{\partial \tau}{\partial q_s} - \frac{\partial \nu}{\partial q_s} - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_s} + Q_s(t) = 0 \longleftrightarrow s = 1, \dots, n \quad (\text{A.49})$$

ou explicitamente usando as forças de inércia relativas

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \tau_2}{\partial \dot{q}_s}\right) - \frac{\partial \tau_2}{\partial q_s} = -\frac{\partial \nu^*}{\partial q_s} - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_s} + Q_s(t) + F_s - \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \tau_1}{\partial \dot{q}_s}\right) \longleftrightarrow s = 1, \dots, n \quad (\text{A.50})$$

Onde:

$Q_s(t)$ - Forças generalizadas não conservativas

$\nu = \nu_{ext} + \nu_{int}$ - Energia potencial total

$\nu^* = \nu - \tau_0$ - Energia potencial modificada pela energia cinética de transporte

$F_s = \sum_{r=1}^n \dot{q}_r G_{rs}$ - Forças giroscópicas generalizadas

D - Função de dissipação

A.2 Equação de Lagrange para RB-1

Aplicando a metodologia descrita acima, será determinada a equação de movimento pelo método de Lagrange para o RB-1. Inicialmente é obtido o Lagrangeano. A partir das equações de posição do centro de gravidade de cada um dos sete segmentos do RRB-1, é obtida a energia cinética para cada segmento. Apenas a fase de balanço será analisada. De acordo com a figura A.3 tem-se os parâmetros:

a_i - distância entre o centro de massa do segmento i e a junta inferior

m_i - massa do segmento i

l_i - comprimento do segmento i

q_i - ângulo do segmento i em relação ao segmento $i-1$

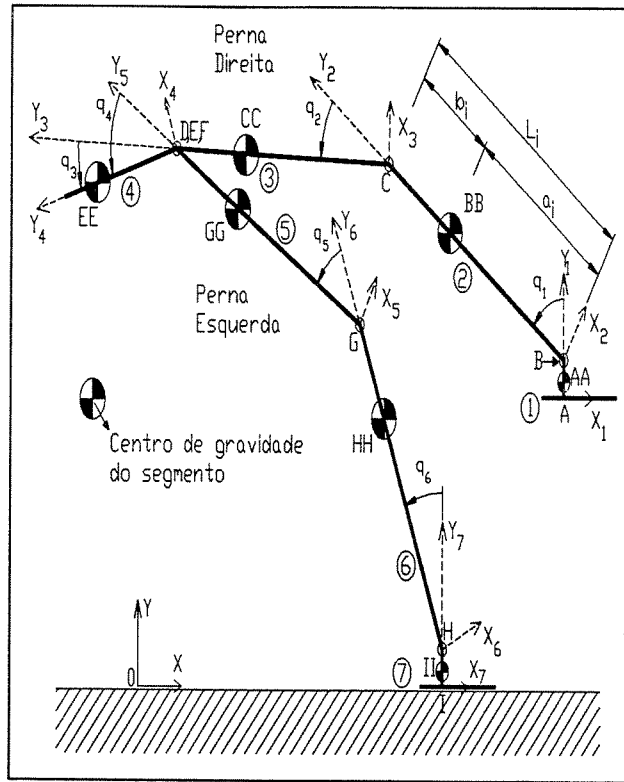


Figura A.3: Representação do Robô Bípede

(x_i, y_i) - coordenada cartesiana.

B,C,D,F,G e H - Servomotores

A,E e I - Pontos cartesianos

θ_i - Ângulo absoluto medidos a partir do eixo vertical Y

$$q_1 = \theta_1 - \theta_0$$

$$q_2 = \theta_2 - \theta_1$$

$$q_3 = \theta_3 - \theta_2$$

$$q_4 = \theta_3 - \theta_4$$

$$q_5 = \theta_4 - \theta_5$$

$$q_6 = \theta_5 - \theta_6$$

$$\mathbf{q}_i = [\mathbf{K}_t] \boldsymbol{\theta}_i = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_i \quad (\text{A.51})$$

Onde $[\mathbf{K}_t]$ é denominada de matriz de transformação entre as coordenadas absolutas e relativas. Nesta modelagem, quando o pé direito estiver no chão considera-se que $\theta_0 = 0$, e quando o pé esquerdo estiver no chão $\theta_6 = 0$. A partir desta consideração, pode-se obter a inversa $[\mathbf{K}_t]^{-1}$, pois a matriz torna-se quadrada, e relacionar as coordenadas relativas com as absolutas.

De acordo com a equação A.51 e com a figura A.3 obtém-se as seguintes relações entre as coordenadas absolutas θ_i e relativas q_i do rb:

$$\begin{aligned}\theta_3 &= \theta_0 + q_1 + q_2 + q_3 \\ \theta_3 &= \theta_6 + q_4 + q_5 + q_6 \\ &\text{ou} \\ \theta_6 &= \theta_0 + q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6\end{aligned}\tag{A.52}$$

A.2.1 Centro de Gravidade

Para a determinação da equação de movimento é necessário obter as coordenadas cartesianas do centro de gravidade de cada segmento do robô. De acordo com a equação A.51 e com a figura A.3:

$$\begin{aligned}x1 &= a1 * l1 * \text{sen}(\theta_1) \\ y1 &= a1 * l1 * \text{cos}(\theta_1) \\ x2 &= l1 * \text{sen}(\theta_1) + a2 * \text{sen}(\theta_2) \\ y2 &= l1 * \text{cos}(\theta_1) + a2 * \text{cos}(\theta_2) \\ x3 &= l1 * \text{sen}(\theta_1) + l2 * \text{sen}(\theta_2) + a3 * \text{sen}(\theta_3) \\ y3 &= l1 * \text{cos}(\theta_1) + l2 * \text{cos}(\theta_2) + a3 * \text{cos}(\theta_3) \\ x4 &= l1 * \text{sen}(\theta_1) + l2 * \text{sen}(\theta_2) + l3 * \text{sen}(\theta_3) + a4 * \text{sen}(\theta_4) \\ y4 &= l1 * \text{cos}(\theta_1) + l2 * \text{cos}(\theta_2) + l3 * \text{cos}(\theta_3) + a4 * \text{cos}(\theta_4) \\ x5 &= l1 * \text{sen}(\theta_1) + l2 * \text{sen}(\theta_2) + l3 * \text{sen}(\theta_3) + (l5 - a5) * \text{sen}(\theta_5)\end{aligned}\tag{A.53}$$

$$\begin{aligned}
y5 &= l1 * \cos(\theta_1) + l2 * \cos(\theta_2) + l3 * \cos(\theta_3) - (l5 - a5) * \cos(\theta_5) \\
x6 &= l1 * \sin(\theta_1) + l2 * \sin(\theta_2) + l3 * \sin(\theta_3) + (l5 - a5) * \sin(\theta_5) + (l6 - a6) * \sin(\theta_6) \\
y6 &= l1 * \cos(\theta_1) + l2 * \cos(\theta_2) + l3 * \cos(\theta_3) - (l5 - a5) * \cos(\theta_5) - (l6 - a6) * \cos(\theta_6) \\
x7 &= l1 * \sin(\theta_1) + l2 * \sin(\theta_2) + l3 * \sin(\theta_3) + (l5 - a5) * \sin(\theta_5) + (l6 - a6) * \sin(\theta_6) \\
&\quad + (l7 - a7) * \sin(\theta_7) \\
y7 &= l1 * \cos(\theta_1) + l2 * \cos(\theta_2) + l3 * \cos(\theta_3) - (l5 - a5) * \cos(\theta_5) - (l6 - a6) * \cos(\theta_6) \\
&\quad - (l7 - a7) * \cos(\theta_7)
\end{aligned}$$

e o centro de gravidade do rb pode ser escrito como :

$$x_{cg} = \left(\frac{m_1 * x_1 + m_2 * x_2 + m_3 * x_3 + m_4 * x_4 + m_5 * x_5 + m_6 * x_6 + m_7 * x_7}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \right) \quad (A.54)$$

$$y_{cg} = \left(\frac{m_1 * y_1 + m_2 * y_2 + m_3 * y_3 + m_4 * y_4 + m_5 * y_5 + m_6 * y_6 + m_7 * y_7}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \right) \quad (A.55)$$

Para simplificação da notação usada neste trabalho, será assumido que $\cos(\theta_i)$ será representado por C_i , $\sin(\theta_i)$ por S_i , $\cos(\theta_i \pm \theta_j)$ por $C_{i\pm j}$ e $\sin(\theta_i \pm \theta_j)$ por $S_{i\pm j}$.

A.2.2 Energia Cinética

Para o rb restrito ao plano sagital, a equação da energia cinética pode ser escrita da seguinte maneira:

$$T_i = \frac{1}{2} \sum [I_i \dot{\theta}_i^2 + m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) + \tilde{I}_i \dot{q}_i^2] \quad (A.56)$$

Com:

I_i - Momento de inércia em torno do CG do i-ésimo segmento,

$\dot{\theta}_i$ - Velocidade Angular absoluta do i-ésimo segmento,

m_i - Massa do i-ésimo segmento,

$\mathbf{x}_i$ - Velocidade linear na direção X do centro de gravidade do i-ésimo segmento,
 $\mathbf{y}_i$ - Velocidade linear na direção Y do centro de gravidade do i-ésimo segmento,
 $\tilde{I}_i$ - Momento de inércia do i-ésimo segmento considerando o atuador,
 $\dot{q}_i$ - Velocidade Angular relativa do i-ésimo segmento.

Aplicando-se a equação A.56 para cada segmento do rb e considerando-se que $q_0 = 0$ e $\theta_0 \neq 0$:

$$\begin{aligned}
 T_0 &= \frac{1}{2} \sum [I_0 \dot{\theta}_0^2 + m_0 (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2) + \tilde{I}_0 \dot{q}_0^2] \\
 T_0 &= \frac{1}{2} [(I_0 + m_0 a_0^2) \dot{\theta}_0^2] \\
 T_1 &= \frac{1}{2} \sum [I_1 \dot{\theta}_1^2 + m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \tilde{I}_1 \dot{q}_1^2] \\
 T_1 &= \frac{1}{2} [(I_1 + m_1 a_1^2 + \tilde{I}_1) \dot{\theta}_1^2 + (m_1 l_0^2 + \tilde{I}_1) \dot{\theta}_0^2 + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 (m_1 l_0 a_1 C_{0-1} - \tilde{I}_1)] \\
 T_2 &= \frac{1}{2} \sum [I_2 \dot{\theta}_2^2 + m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \tilde{I}_2 \dot{q}_2^2] \\
 T_2 &= \frac{1}{2} [m_2 l_0^2 \dot{\theta}_0^2 + (m_2 l_1^2 + \tilde{I}_2) \dot{\theta}_1^2 + (I_2 + m_2 a_2^2 + \tilde{I}_2) \dot{\theta}_2^2 + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 (m_2 l_0 l_1 C_{0-1}) \\
 &\quad + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 (m_2 l_0 a_2 C_{0-2}) + 2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (m_2 l_1 a_2 C_{1-2} - \tilde{I}_2)] \\
 T_3 &= \frac{1}{2} \sum [I_3 \dot{\theta}_3^2 + m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \tilde{I}_3 \dot{q}_3^2] \\
 T_3 &= \frac{1}{2} [m_3 l_0^2 \dot{\theta}_0^2 + m_3 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + (m_3 l_2^2 + \tilde{I}_3) \dot{\theta}_2^2 + (I_3 + m_3 a_3^2 + \tilde{I}_3) \dot{\theta}_3^2 + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 (m_3 l_0 l_1 C_{0-1}) \\
 &\quad + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 (m_3 l_0 l_2 C_{0-2}) + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_3 (m_3 l_0 a_3 C_{0-3}) + 2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (m_3 l_1 l_2 C_{1-2}) + 2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 (m_3 l_1 a_3 C_{1-3}) \\
 &\quad + 2 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 (m_3 l_2 a_3 C_{2-3} - \tilde{I}_3)] \\
 T_4 &= \frac{1}{2} \sum [I_4 \dot{\theta}_4^2 + m_4 (\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2) + \tilde{I}_4 \dot{q}_4^2] \\
 T_4 &= \frac{1}{2} [m_4 l_0^2 \dot{\theta}_0^2 + m_4 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + m_4 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + (I_4 + m_4 b_4^2 + \tilde{I}_4) \dot{\theta}_4^2 + \tilde{I}_4 \dot{\theta}_3^2 + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 (m_4 l_0 l_1 C_{0-1}) \\
 &\quad + 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 (m_4 l_0 l_2 C_{0-2}) + 2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (m_4 l_1 l_2 C_{1-2}) - 2 \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_4 (m_4 l_0 b_4 C_{0-4}) - 2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 (m_4 l_1 b_4 C_{1-4}) \\
 &\quad - 2 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 (m_4 l_2 b_4 C_{2-4}) - 2 \tilde{I}_4 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4]
 \end{aligned}$$

$$T_5 = \frac{1}{2} \sum [I_5 \dot{\theta}_5^2 + m_5 (\dot{x}_5^2 + \dot{y}_5^2) + \tilde{I}_5 \dot{q}_5^2]$$

$$\begin{aligned} T_5 = & \frac{1}{2} [m_5 l_0^2 \dot{\theta}_0^2 + m_5 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + m_5 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + (m_5 l_4^2 + \tilde{I}_5) \dot{\theta}_4^2 + (I_5 + m_5 b_5^2 + \tilde{I}_5) \dot{\theta}_5^2 + 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 (m_5 l_0 l_1 C_{0-1}) \\ & + 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 (m_5 l_0 l_2 C_{0-2}) + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (m_5 l_1 l_2 C_{1-2}) + 2\dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5 (m_5 l_4 b_5 C_{4-5}) - 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_4 (m_5 l_0 l_4 C_{0-4}) \\ & - 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_5 (m_5 l_0 b_5 C_{0-5}) - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 (m_5 l_1 l_4 C_{1-4}) - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_5 (m_5 l_1 b_5 C_{1-5}) - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 (m_5 l_2 l_4 C_{2-4}) \\ & - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_5 (m_5 l_2 b_5 C_{2-5}) - 2\tilde{I}_5 \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5] \end{aligned}$$

$$T_6 = \frac{1}{2} \sum [I_6 \dot{\theta}_6^2 + m_6 (\dot{x}_6^2 + \dot{y}_6^2) + \tilde{I}_6 \dot{q}_6^2]$$

$$\begin{aligned} T_6 = & \frac{1}{2} [m_6 l_0^2 \dot{\theta}_0^2 + m_6 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + m_6 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + m_6 l_4^2 \dot{\theta}_4^2 + (m_6 l_5^2 + \tilde{I}_6) \dot{\theta}_5^2 + (I_6 + m_6 b_6^2 + \tilde{I}_6) \dot{\theta}_6^2 \\ & + 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 (m_6 l_0 l_1 C_{0-1}) + 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 (m_6 l_0 l_2 C_{0-2}) - 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_4 (m_6 l_0 l_4 C_{0-4}) - 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_5 (m_6 l_0 l_5 C_{0-5}) \\ & - 2\dot{\theta}_0 \dot{\theta}_6 (m_6 l_0 b_6 C_{0-6}) + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (m_6 l_1 l_2 C_{1-2}) - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 (m_6 l_1 l_4 C_{1-4}) - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_5 (m_6 l_1 l_5 C_{1-5}) \\ & - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_6 (m_6 l_1 b_6 C_{1-6}) - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 (m_6 l_2 l_4 C_{2-4}) - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_5 (m_6 l_2 l_5 C_{2-5}) - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_6 (m_6 l_2 b_6 C_{2-6}) \\ & + 2\dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5 (m_6 l_4 l_5 C_{4-5}) + 2\dot{\theta}_4 \dot{\theta}_6 (m_6 l_4 l_6 C_{4-6}) + 2\dot{\theta}_5 \dot{\theta}_6 (m_6 l_5 b_6 C_{5-6}) - 2\tilde{I}_6 \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_6] \end{aligned}$$

A.2.3 Energia Potencial

A energia potencial do rb é atribuída somente aos efeitos gravitacionais. Logo :

$$U = m_i g d_i \cos \theta_i = m_i g y_i \quad (\text{A.57})$$

onde:

m - massa do i-ésimo segmento,

g - Força da gravidade ($g = 9.8m/s^2$),

d_i - Distância do centro de gravidade do i-ésimo segmento ao centro geométrico da junta,

y_i - componente vertical do CG ao solo

Portanto para cada segmento i do rb:

$$\begin{aligned}
U_0 &= m_0 g y_0 = m_0 g (a_0 C_0) \\
U_1 &= m_1 g y_1 = m_1 g (l_0 C_0 + a_1 C_1) \\
U_2 &= m_2 g y_2 = m_2 g (l_0 C_0 + l_1 C_1 + a_2 C_2) \\
U_3 &= m_3 g y_3 = m_3 g (l_0 C_0 + l_1 C_1 + l_2 C_2 + a_3 C_3) \\
U_4 &= m_4 g y_4 = m_4 g (l_0 C_0 + l_1 C_1 + l_2 C_2 - b_4 C_4) \\
U_5 &= m_5 g y_5 = m_5 g (l_0 C_0 + l_1 C_1 + l_2 C_2 - l_4 C_4 - b_5 C_5) \\
U_6 &= m_6 g y_6 = m_6 g (l_0 C_0 + l_1 C_1 + l_2 C_2 - l_4 C_4 - l_5 C_5 - b_6 C_6)
\end{aligned}$$

O modelo dinâmico é obtido a partir da equação de Lagrange (Géradin and Rixen, 1997):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\boldsymbol{\theta}}} \right) - \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{Q} \quad (\text{A.58})$$

podendo ser escrita como :

Pode-se relacionar na equação acima somente as coordenadas generalizadas do sistema, obtendo-se :

$$[\mathbf{P}]\ddot{\boldsymbol{\theta}} + [\mathbf{H}]\dot{\boldsymbol{\theta}}^2 + [\mathbf{D}]\dot{\boldsymbol{\theta}} + [\mathbf{G}] = [\mathbf{E}]\mathbf{u} \quad (\text{A.59})$$

Onde

P - matriz 7x7 de inércia do sistema

H - matriz 7x7 de amortecimento do sistema

D - matriz 7x7 de rigidez do sistema

E - matriz 7x6 de relação entre os torques nas juntas e segmentos

G - matriz 7x1 gravitacional do sistema

u - matriz 6x1 com os torques em cada junta

$\boldsymbol{\theta}$ - 7x1 coordenadas generalizadas do sistema

Como os momentos de inércia de cada segmento do robô foram calculados considerando a massa de cada atuador, foi adotado que $\tilde{I}_i = 0$. Assim os termos da matriz P ($i = j = 1 \dots 7$) são:

$$\begin{aligned}
P_{ij} &= S_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j) \\
S_{11} &= I_1 + m_1 * a_1^2 + (m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7) * l_1^2 \\
S_{22} &= I_2 + m_2 * a_2^2 + (m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7) * l_2^2 \\
S_{33} &= I_3 + m_3 * a_3^2 + l_3^2 * (m_4 + m_5 + m_6 + m_7) \\
S_{44} &= I_4 + m_4 * a_4^2 \\
S_{55} &= I_5 + m_5 * b_5^2 + l_5^2 * (m_6 + m_7) \\
S_{66} &= I_6 + m_6 * b_6^2 + m_7 * l_6^2 \\
S_{77} &= I_7 + m_7 * b_7^2 \\
S_{ij} &= S_{ji} \\
S_{12} &= m_2 * l_1 * a_2 + l_1 * l_2 * (m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7) \\
S_{13} &= m_3 * l_1 * a_3 + l_1 * l_3 * (m_4 + m_5 + m_6 + m_7) \\
S_{14} &= m_4 * l_1 * a_4 \\
S_{15} &= -m_5 * b_5 * l_1 - l_1 * l_5 * (m_6 + m_7) \\
S_{16} &= -m_6 * l_1 * b_6 - l_1 * l_6 * m_7 \\
S_{17} &= -l_1 * b_7 * m_7 \\
S_{23} &= m_3 * l_2 * a_3 + l_2 * l_3 * (m_4 + m_5 + m_6 + m_7) \\
S_{24} &= m_4 * l_2 * a_4 \\
S_{25} &= -m_5 * l_2 * b_5 - l_2 * l_5 * (m_6 + m_7) \\
S_{26} &= -m_6 * l_2 * b_6 - l_2 * l_6 * m_7 \\
S_{27} &= -m_7 * l_2 * b_7 \\
S_{34} &= m_4 * l_3 * a_4 \\
S_{35} &= -m_5 * l_3 * b_5 - l_3 * l_5 * (m_6 + m_7) \\
S_{36} &= -m_6 * l_3 * b_6 - m_7 * l_3 * l_6 \\
S_{37} &= -m_7 * l_3 * b_7 \\
S_{45} &= 0 \\
S_{46} &= 0 \\
S_{47} &= 0 \\
S_{56} &= m_6 * l_5 * b_6 + m_7 * l_5 * l_6 \\
S_{57} &= m_7 * l_5 * b_7 \\
S_{67} &= m_7 * l_6 * b_7
\end{aligned} \tag{A.60}$$

Para a matriz H

$$H_{ij} = S_{ij} \sin((\theta_i - \theta_j)) \tag{A.61}$$

Para a matriz D , Onde D_n ($n = 1 \dots 6$) é o coeficiente de atrito seco (para a simulação do RB-1, $D_n = 0$):

$$D = \begin{bmatrix} D1 & -D1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -D1 & D1 + D2 & -D2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -D2 & D2 + D3 & -D3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -D3 & D3 + D4 & -D4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -D4 & D4 + D5 & -D5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -D5 & D5 + D6 & -D6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -D6 & D6 \end{bmatrix} \quad (\text{A.62})$$

Para a matriz G , onde $g = 9,81m/s^2$

$$\begin{aligned} G_{1j} &= gz_{1j} \\ z_{11} &= -\text{sen}(\theta_1) * (m1 * a_1 + l_1 * (m2 + m3 + m4 + m5 + m6 + m7)) \\ z_{12} &= -\text{sen}(\theta_2) * (m2 * a_2 + l_2 * (m3 + m4 + m5 + m6 + m7)) \\ z_{13} &= -\text{sen}(\theta_3) * (m3 * a_3 + l_3 * (m4 + m5 + m6 + m7)) \\ z_{14} &= -\text{sen}(\theta_4) * m4 * a_4 \\ z_{15} &= \text{sen}(\theta_5) * (m5 * b_5 + l_5 * (m6 + m7)) \\ z_{16} &= \text{sen}(\theta_6) * (m6 * b_6 + l_6 * m7) \\ z_{17} &= \text{sen}(\theta_7) * m7 * b_7 \end{aligned} \quad (\text{A.63})$$

Para a matriz $E = K_q K_t^T$, onde K_q é o coeficiente de conversão torque / voltagem do atuador do robô ($K_q = 1$ para a simulação), que relaciona o número de segmentos do robô (sete) com o número de atuadores (seis) tem-se:

$$E = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.64})$$

Utilizando-se a equação A.59, as matrizes acima determinadas e os mesmos parâmetros físicos e de simulação utilizados no método de Newton - Euler - Jourdain, obteve-se os mesmos resultados, com um erro nas juntas dos tornozelos para alguns valores de torque durante a marcha, tanto para a trajetória senoidal como para elíptica. Na figura A.4 tem-se representado os valores do erro do torque para as juntas dos tornozelos, obtidos nos dois métodos. Nas demais juntas não houve erro.

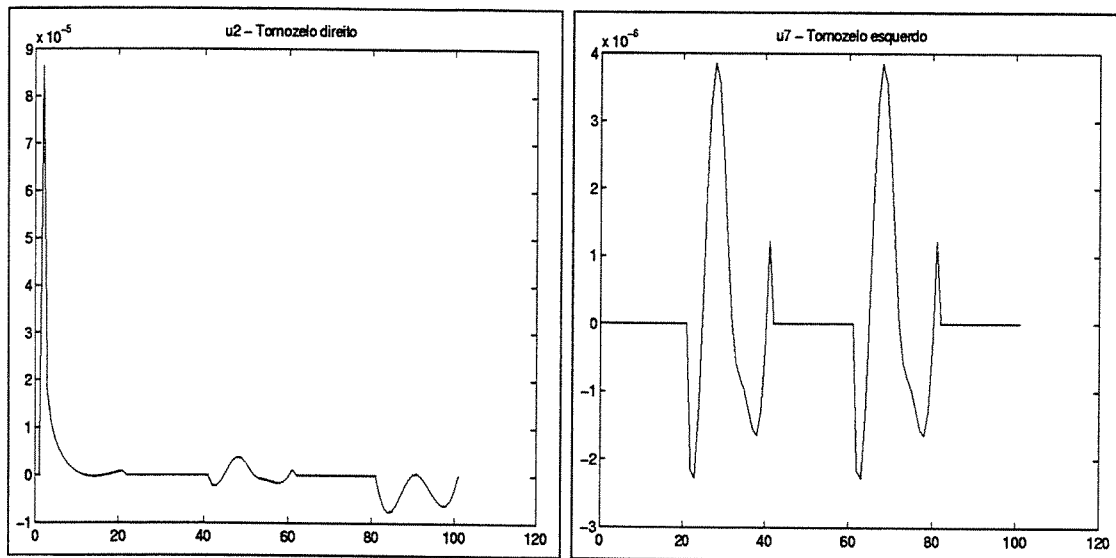


Figura A.4: Diferença entre os valores do torque

Como as equações de movimento obtidas nos dois métodos são diferentes, é impossível compará-las para verificar algum erro de digitação. Além disso, caso estivessem erradas as equações de movimentos, o erro deveria aparecer em todos os torques e não somente nos torques dos tornozelos. Uma provável explicação para este erro são as incertezas matemáticas relacionadas ao número de multiplicações que são feitas em cada método. Pois o torque no tornozelo é igual a soma de todos os torques das demais juntas para cada instante de tempo, o que pode ocasionar um erro acumulativo no torque total.

Apêndice B

Listagens dos programas

B.1 Programa robo1.m

```
%*****
% Programa Robo1
%
% Simulacao Cinematica do RB-1.
% A partir da trajetoria da pelve, dos pes e do tempo de cada passo.
% Calcula-se a posicao, a velocidade e a aceleracao das
% juntas ao longo do tempo, bem como a a variacao dos angulos das
% juntas tambem.
% O primeiro passo (regime transitorio) sempre e' realizado com a
% perna esquerda (Pontos P_G_H_I em balanço) e o regime permanente sempre se
% inicia com a PD em balanço (PD realiza o passo).
%
%
% Baseado em robo3.m Autor:Daniel Carmona de Campos Ra 950384
% Modificado por: Carlos Andre Dias Bezerra
%
% PARA GERAR OS VETORES Q.DAT, dq.DAT E ddq.DAT
% E Qa.DAT, dqa.DAT E ddqa.DAT ( CURVAS AJUSTADAS POR POLINOMIOS)
% A SEREM UTILIZADOS POR ROBO1LAG E ROBO1NEJ.M
%
% UNICAMP / FEM / DMC
%
% versao 16.08.2001, 18.01.2002
%
c%*****
% Dados da Simulacao
num_passos=3; %numero de passos no regime permanente (comecando com a PD)
transitorio=1; %Realiza o regime transitorio (inicio) se transitorio=1
permanente =1; %Realiza o regime permanente se permanente=1
elipse=0; %pes fazem trajetoria eliptica se elipse=0, senao fazem uma senoide
pelve_reta=0; %pelve permanece reta se pelve_reta=1, senao faz uma senoide
perna_esq=1; %plota perna esquerda se perna_esq=1;
perna_dir=1; %plota perna direita se perna_dir=1;
tronco =1; %plota tronco se tronco=1;
pes =1; %plota os pes, se pes=1
% Variaveis dos PASSOS
n_divisoes=20; %numero de divisoes em cada passo
tempo=8; %tempo [s] para um passo no regime permanente
A=.025; %amplitude que a perna levanta do chao
d=0.05; %distancia de um passo. No permanente:passada=2*passo
yE_final=0.39; %altura pelve final regime transitorio
tan_tronco=0.01; %altura do tronco a partir da pelve
pelve=0.009; %amplitude da movimentacao da pelve (a partir de yE_final)
delta_t=tempo/n_divisoes; %incremento de tempo em cada passo
t=0; %tempo inicial
% Variaveis Geometricas
l1= 49.5e-3; %altura do pe',ponto A - B [m]
l1a= 140e-3; %frente do pe' a partir de A [m]
l1b= -140e-3; %traseira do pe' a partir de A [m]
l2 = 181.82e-3; %canela,ponto B - C [m]
l3 = l2; %coxa, ponto C - D [m]
l4 = 49.5e-3; %bacia, ponto D - F [m]
l5 = l2; %181.82e-3; %coxa, ponto F - G [m]
l6 = l2; %181.82e-3; %canela,ponto G - H [m]
l7 = l1;l1; %altura do pe',ponto H - I [m]
l7a= l1a; %frente do pe' a partir de I [m]
l7b= l1b; %traseira do pe' a partir de I [m]
save rbdados % serao usados em robo1rr.m, robo1nej e robo1lag
% Iniciando os vetores de posicao, velocidade e aceleracao angular e linear
T=t;
Q1= 0; dq1=[0]; ddq1=[0]; %[graus]
```

```

Q2= 0; dQ2=[0]; ddQ2=[0]; Q3= 0; dQ3=[0]; ddQ3=[0]; Q4= 0;
dQ4=[0]; ddQ4=[0]; Q5= 0; dQ5=[0]; ddQ5=[0]; Q6= 0; dQ6=[0];
ddQ6=[0]; PA=[0 0]; VA=[0 0]; AA=[0 0]; PB=[0 11]; VB=[0 0];
AB=[0 0]; PC=[0 11+12]; VC=[0 0]; AC=[0 0]; PD=[0
11+12+13]; VD=[0 0]; AD=[0 0]; PE=[0 PD(1,2)]; VE=[0 0]; AE=[0 0];
PF=[0 PD(1,2)]; VF=[0 0]; AF=[0 0]; PG=[0 16+17]; VG=[0 0];
AG=[0 0]; PH=[0 17]; VH=[0 0]; AH=[0 0]; PI=[0 0]; VI=[0 0];
AI=[0 0];
%Desenhando as pernas
line([PB(1,1) PC(1,1)], [PB(1,2) PC(1,2)]);
line([PC(1,1) PE(1,1)], [PC(1,2) PE(1,2)]);
line([PE(1,1) PG(1,1)], [PE(1,2) PG(1,2)]);
line([PG(1,1) PH(1,1)], [PH(1,2) PH(1,2)]);
%Desenhando tronco
line([PE(1,1) PE(1,1)], [PE(1,2) PE(1,2)+tan_tronco]);
%Desenhando o pe' esquerdo
line([PB(1,1) PB(1,1)+11a], [PB(1,2)-11 PB(1,2)-11]);
line([PB(1,1) PB(1,1)+11b], [PB(1,2)-11 PB(1,2)-11]);
line([PB(1,1) PB(1,1)], [PB(1,2) PB(1,2)-11]);
%Desenhando o pe' direito
line([PH(1,1) PH(1,1)+17a], [PH(1,2)-17 PH(1,2)-17]);
line([PH(1,1) PH(1,1)+17b], [PH(1,2)-17 PH(1,2)-17]);
line([PH(1,1) PH(1,1)], [PH(1,2) PH(1,2)-17]);
%Desenhando a linha limite do calcanhar
line([0 dist_final], [11 11]);
t0=clock; %contagem do tempo real da simulacao
clc;clf; disp(' ----- INICIO DO REGIME TRANSITORIO
-----') if transitorio==1
    xB_ini=0;    yB_ini=11;    xE_ini=0;
    yE_ini=11 + 2*12;
    xH_ini=0;    yH_ini=11;
    for i=1:n_divisoes,
        hold
        plot(PB(:,1),PB(:,2),'.')
        plot(PC(:,1),PC(:,2),'.')
        plot(PG(:,1),PG(:,2),'.')
        % Calculando os pontos E, B e H
        x1=(d/2)/n_divisoes;
        y=((yE_ini-yE_final)/(d/2)^2)*x^2 -2*((yE_ini-yE_final)/(d))*x + yE_ini;
        xB=xB_ini;    yB=yB_ini;    xE=xE_ini +x;    yE=y;
        x2=i*d/n_divisoes;
        if ellipse ==1
            y2=sqrt(A^2*(1-(x2-d/2)^2/(d/2)^2));
        else
            y2= A*cos(pi*x2/d);
        end
        xH=xH_ini + x2;
        yH=yH_ini + y2;
        B=[xB yB];    E=[xE yE];    H=[xH yH];
        q1 =angle1(E,B,12); %[graus]
        q2 =angle2(E,B,12); %[graus]
        q6 =angle1(E,H,12); %[graus]
        q5 =angle2(E,H,12); %[graus]
        q3=-(q1+q2); %[graus]
        q4=-(q5+q6); %[graus]
        t=t+delta_t;
        T=[T t];
        Q1=[Q1 q1];    Q2=[Q2 q2];    Q3=[Q3 q3];    Q4=[Q4 q4];    Q5=[Q5 q5];    Q6=[Q6 q6];
        size_Q1=length(Q1);
        size_Q2=length(Q2);
        size_Q3=length(Q3);
        size_Q4=length(Q4);
        size_Q5=length(Q5);
        size_Q6=length(Q6);
        dQ1=[dQ1 (Q1(size_Q1)-Q1(size_Q1-1))/delta_t];
        dQ2=[dQ2 (Q2(size_Q2)-Q2(size_Q2-1))/delta_t];
        dQ3=[dQ3 (Q3(size_Q3)-Q3(size_Q3-1))/delta_t];
        dQ4=[dQ4 (Q4(size_Q4)-Q4(size_Q4-1))/delta_t];
        dQ5=[dQ5 (Q5(size_Q5)-Q5(size_Q5-1))/delta_t];
        dQ6=[dQ6 (Q6(size_Q6)-Q6(size_Q6-1))/delta_t];
        size_dQ1=length(dQ1);
        size_dQ2=length(dQ2);
        size_dQ3=length(dQ3);
        size_dQ4=length(dQ4);
        size_dQ5=length(dQ5);
        size_dQ6=length(dQ6);
        ddQ1=[ddQ1 (dQ1(size_dQ1)-dQ1(size_dQ1-1))/delta_t];
        ddQ2=[ddQ2 (dQ2(size_dQ2)-dQ2(size_dQ2-1))/delta_t];
        ddQ3=[ddQ3 (dQ3(size_dQ3)-dQ3(size_dQ3-1))/delta_t];
        ddQ4=[ddQ4 (dQ4(size_dQ4)-dQ4(size_dQ4-1))/delta_t];
        ddQ5=[ddQ5 (dQ5(size_dQ5)-dQ5(size_dQ5-1))/delta_t];
        ddQ6=[ddQ6 (dQ6(size_dQ6)-dQ6(size_dQ6-1))/delta_t];
        size_ddQ1=length(ddQ1);
        size_ddQ2=length(ddQ2);
        size_ddQ3=length(ddQ3);
        size_ddQ4=length(ddQ4);
        size_ddQ5=length(ddQ5);
        size_ddQ6=length(ddQ6);
        q1=q1*(pi/180); %angulos em RADIANOS
        q2=q2*(pi/180);    q3=q3*(pi/180);    q4=q4*(pi/180);    q5=q5*(pi/180);    q6=q6*(pi/180);
        xC= xB-12*sin(q1);    yC= yB+12*cos(q1);    xQ= xB-15*sin(q6);    yQ= yB+15*cos(q6);
        C=[xC yC];    G=[xG yG];

```

```

%Desenhando as pernas
if perna_dir==1
    line([xB xC],[yB yC]);
    line([xC xE],[yC yE]);
end
if perna_esq==1
    line([xE xG],[yE yG]);
    line([xG xH],[yG yH]);
end
%Desenhando tronco
if tronco ==1
    line([xE xE],[yE yE+tam_tronco]);
end
%Desenhando o pe' esquerdo
if pes==1 & perna_dir==1
    line([xB xB+11a],[yB-11 yB-11]);
    line([xB xB+11b],[yB-11 yB-11]);
    line([xB xB],[yB yB-11]);
end
%Desenhando o pe' direito
if pes==1 & perna_esq==1
    line([xE xE+17a],[yE-17 yE-17]);
    line([xE xE+17b],[yE-17 yE-17]);
    line([xE xE],[yE yE-17]);
end
%Desenhando a linha limite do calcanhar
if pes == 1 & (perna_esq==1 | perna_dir==1 | tronco ==1 | pes==1)
    line([O dist_final],[11 11]);
end
axis([-0.005 1.5*dist_final -0.0007 0.51]);
%Calculando a velocidade linear de cada ponto A..H
Q1_r=Q1*pi/180; dQ1_r=dQ1*pi/180; ddQ1_r=ddQ1*pi/180; %Convertendo os angulos de graus para rad
Q2_r=Q2*pi/180; dQ2_r=dQ2*pi/180; ddQ2_r=ddQ2*pi/180;
Q3_r=Q3*pi/180; dQ3_r=dQ3*pi/180; ddQ3_r=ddQ3*pi/180;
Q4_r=Q4*pi/180; dQ4_r=dQ4*pi/180; ddQ4_r=ddQ4*pi/180;
Q5_r=Q5*pi/180; dQ5_r=dQ5*pi/180; ddQ5_r=ddQ5*pi/180;
Q6_r=Q6*pi/180; dQ6_r=dQ6*pi/180; ddQ6_r=ddQ6*pi/180;
PA=[PA; xB yB-11]; PB=[PB; B ]; PC=[PC; C ]; PD=[PD; E ]; PE=[PE; ]; PF=[PF; G ];
PB=[PB; H ]; PI=[PI; xE yE-17 ];
VAr=0; VBy=0;
VBr=0; VBx=0;
VCr= -12* dQ1_r(size_dQ1) *cos( Q1_r(size_Q1) );
VCy= -12* dQ1_r(size_dQ1) *sin( Q1_r(size_Q1) );
VDr= VCr -13*( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2) ) *cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2) );
VDy= VCy -13*( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2) ) *sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2) );
VEx= VDr ; VEy= VDy ; VFx= VEx ; VFy= VEy ;
VGr= VFx +15*( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4) ) *
cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4) );
VGy= VFy +15*( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4) ) *
sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4) );
VHr= VGr +16*( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-
dQ5_r(size_dQ5) ) *cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-
Q5_r(size_Q5) );
VHy= VGy +16*( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-
dQ5_r(size_dQ5) ) *sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-
Q5_r(size_Q5) );
VIr= VBr; VLy= VHy; VA=[VA; 0 0 ]; VB=[VB; 0 0 ];
VC=[VC; VCr VCy]; VD=[VD; VDr VDy]; VE=[VE; VEx VEy]; VF=[VF; VFx VFy]; VG=[VG; VGr VGy];
VH=[VH; VHr VHy]; VI=[VI; VLi VLy]; AAr= 0; ALy= 0; ARr= 0; ARy= 0;
ACr= 12*( -ddQ1_r(size_ddQ1)*cos( Q1_r(size_Q1) )+ dQ1_r(size_dQ1)^2*sin( Q1_r(size_Q1)
) );
ACy= 12*( -ddQ1_r(size_ddQ1)*sin( Q1_r(size_Q1) )- dQ1_r(size_dQ1)^2*cos( Q1_r(size_Q1)
) );
ADr= ACr +13*( -(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2))*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2) )
+ (dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))^2*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2) ) );
ADy= ACy +13*( -(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2))*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2) )
- (dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))^2*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2) ) );
AEr= ADr; AEy= ADy; AFr= ARr; AFy= ARy;
AGr= AFr +15*( (ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4))*
cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4) ) -( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)
+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4) )^2*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4) ) );
AGy= AFy +15*( (ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4))*
sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4) ) +( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+
dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4) )^2*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4) ) );
A Hr= AGr +16*( (ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4)-
ddQ5_r(size_ddQ5))*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) -
(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-dQ5_r(size_dQ5))^2*sin( Q1_r(size_Q1)+
Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) );
AHy= AGy +16*( (ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4)-ddQ5_r(size_ddQ5))
*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) +(dQ1_r(size_dQ1)+
dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-dQ5_r(size_dQ5))^2*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+
Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) );
A Ir=AHr; A Ly=AHy;
AA=[AA; 0 0 ]; AB=[AB; 0 0 ]; AC=[AC; ACr ACy]; AD=[AD; ADr ADy]; AE=[AE; AEr AEy];
AF=[AF; AFr AFy]; AG=[AG; AGr AGy]; AH=[AH; A Hr AHy]; AI=[AI; A Ir A Ly];
pause(in);clf
end % end do for
else
    xB=0; yB=11; xE=d/2; yE=yE_final; %altura da pelve
    xH=d; yH=11;
end disp('----- FINAL DO REGIME TRANSITORIO
----- INICIO DO REGIME PERMANENTE

```

```

-----*)
passos_duplos=num_passos/2; %calcula o numero de passos duplos
if permanente==1 %Numero de Passos
for j=1:round(passos_duplos),
clf;axis([-0.005 1.5*dist_final -.0007 0.51]);
disp('Perna DIREITA realiza o passo - 1a FASE' );
%valores iniciais
xB_ini=xB; yB_ini=yB; xE_ini=xE; yE_ini=yE; xH_ini=xH; yH_ini=yH;
for i=1:n_divisoes,
hold;axis([-0.005 1.5*dist_final -.0007 0.51]);
% Calculando os pontos E, B e H
xi=2*d/n_divisoes;
if elipse==1
y=sqrt(A^2*(1-(x-d)^2/d^2));
else
y=A*abs(sin( pi*x/(2*d) ));
end
xB=xB_ini + x;
yB=yB_ini + y;
x2=1*d/n_divisoes;
y2=pelva*(-cos(2*pi*x2/d));
xE=xE_ini + x2;
if pelva_reta==1
yE=yE_ini;
else
yE=yE_ini + pelva + y2;
end
xH=xH_ini;
yH=yH_ini;
%Desenhando as pernas, dado o ponto E, B e H
B=[xB yB]; E=[xE yE]; H=[xH yH ];
q1 =angle1(E,B,12);
q2 =angle2(E,B,12);
q6 =angle1(E,H,12);
q5 =angle2(E,H,12);
q3=-(q1+q2); q4=-(q5+q6);
%Armacenamento dos angulos e do tempo
t=t+delta_t; T=[T t];
Q1=[Q1 q1]; Q2=[Q2 q2]; Q3=[Q3 q3]; Q4=[Q4 q4]; Q5=[Q5 q5]; Q6=[Q6 q6];
size_Q1=length(Q1); size_Q2=length(Q2); size_Q3=length(Q3); size_Q4=length(Q4);
size_Q5=length(Q5); size_Q6=length(Q6);
dQ1=[dQ1 (Q1(size_Q1)-Q1(size_Q1-1))/delta_t];
dQ2=[dQ2 (Q2(size_Q2)-Q2(size_Q2-1))/delta_t];
dQ3=[dQ3 (Q3(size_Q3)-Q3(size_Q3-1))/delta_t];
dQ4=[dQ4 (Q4(size_Q4)-Q4(size_Q4-1))/delta_t];
dQ5=[dQ5 (Q5(size_Q5)-Q5(size_Q5-1))/delta_t];
dQ6=[dQ6 (Q6(size_Q6)-Q6(size_Q6-1))/delta_t];
size_dQ1=length(dQ1); size_dQ2=length(dQ2); size_dQ3=length(dQ3);
size_dQ4=length(dQ4); size_dQ5=length(dQ5); size_dQ6=length(dQ6);
ddQ1=[ddQ1 (dQ1(size_dQ1)-dQ1(size_dQ1-1))/delta_t];
ddQ2=[ddQ2 (dQ2(size_dQ2)-dQ2(size_dQ2-1))/delta_t];
ddQ3=[ddQ3 (dQ3(size_dQ3)-dQ3(size_dQ3-1))/delta_t];
ddQ4=[ddQ4 (dQ4(size_dQ4)-dQ4(size_dQ4-1))/delta_t];
ddQ5=[ddQ5 (dQ5(size_dQ5)-dQ5(size_dQ5-1))/delta_t];
ddQ6=[ddQ6 (dQ6(size_dQ6)-dQ6(size_dQ6-1))/delta_t];
size_ddQ1=length(ddQ1); size_ddQ2=length(ddQ2); size_ddQ3=length(ddQ3);
size_ddQ4=length(ddQ4); size_ddQ5=length(ddQ5); size_ddQ6=length(ddQ6);
q1=q1*(pi/180); %angulos em RADIANS
q2=q2*(pi/180); q3=q3*(pi/180); q4=q4*(pi/180);
q5=q5*(pi/180); q6=q6*(pi/180);
xC= xB-12*sin(q1); yC= yB+12*cos(q1); xG= xH-15*sin(q6); yG= yH+15*cos(q6);
C=[xC yC]; G=[xG yG];
%Desenhando as pernas
if perna_dir==1
line([xB xC],[yB yC]);
line([xC xG],[yC yG]);
end
if perna_esq==1
line([xE xG],[yE yG]);
line([xE xH],[yE yH]);
end
%Desenhando tronco
if tronco ==1
line([xE xH],[yE yH+tam_tronco]);
end
%Desenhando o pe' esquerdo
if pes==1 & perna_dir==1
line([xB xB+11a],[yB-11 yB-11]);
line([xB xB+11b],[yB-11 yB-11]);
line([xB xB],[yB yB-11]);
end
%Desenhando o pe' direito
if pes==1 & perna_esq==1
line([xH xH+17a],[yH-17 yH-17]);
line([xH xH+17b],[yH-17 yH-17]);
line([xH xH],[yH yH-17]);
end
if pes ~= 1 & (perna_esq==1 | perna_dir==1 | tronco ==1 | pes==1)
line([0 dist_final],[11 11]); %altura do pe'
end
%Calculando a velocidade linear de cada ponto A..H
Q1_r=Q1*pi/180; dQ1_r=dQ1*pi/180; ddQ1_r=ddQ1*pi/180; %Convertendo os angulos de graus para rad

```



```

t=t+delta_t;      T=[T t];
Q1=[Q1 q1];      Q2=[Q2 q2];      Q3=[Q3 q3];      Q4=[Q4 q4];      Q5=[Q5 q5];      Q6=[Q6 q6];
size_Q1=length(Q1);      size_Q2=length(Q2);      size_Q3=length(Q3);      size_Q4=length(Q4);
size_Q5=length(Q5);      size_Q6=length(Q6);
dQ1=[dQ1 (Q1(size_Q1)-Q1(size_Q1-1))/delta_t];
dQ2=[dQ2 (Q2(size_Q2)-Q2(size_Q2-1))/delta_t];
dQ3=[dQ3 (Q3(size_Q3)-Q3(size_Q3-1))/delta_t];
dQ4=[dQ4 (Q4(size_Q4)-Q4(size_Q4-1))/delta_t];
dQ5=[dQ5 (Q5(size_Q5)-Q5(size_Q5-1))/delta_t];
dQ6=[dQ6 (Q6(size_Q6)-Q6(size_Q6-1))/delta_t];
size_dQ1=length(dQ1);      size_dQ2=length(dQ2);      size_dQ3=length(dQ3);      size_dQ4=length(dQ4);
size_dQ5=length(dQ5);      size_dQ6=length(dQ6);
ddQ1=[ddQ1 (dQ1(size_dQ1)-dQ1(size_dQ1-1))/delta_t];
ddQ2=[ddQ2 (dQ2(size_dQ2)-dQ2(size_dQ2-1))/delta_t];
ddQ3=[ddQ3 (dQ3(size_dQ3)-dQ3(size_dQ3-1))/delta_t];
ddQ4=[ddQ4 (dQ4(size_dQ4)-dQ4(size_dQ4-1))/delta_t];
ddQ5=[ddQ5 (dQ5(size_dQ5)-dQ5(size_dQ5-1))/delta_t];
ddQ6=[ddQ6 (dQ6(size_dQ6)-dQ6(size_dQ6-1))/delta_t];
size_ddQ1=length(ddQ1);      size_ddQ2=length(ddQ2);      size_ddQ3=length(ddQ3);
size_ddQ4=length(ddQ4);      size_ddQ5=length(ddQ5);      size_ddQ6=length(ddQ6);
q1=q1*(pi/180);      Xangulos em RADIANOS
q2=q2*(pi/180);      q3=q3*(pi/180);      q4=q4*(pi/180);      q5=q5*(pi/180);
q6=q6*(pi/180);      x0= xB-12*sin(q1);
y0= yB+12*cos(q1);      x0= xH-15*sin(q6);      y0= yH+15*cos(q6);
%Desenhando as pernas
if perna_dir==1
    line([xB xC],[yB yC]);
    line([xC xE],[yC yE]);
end
if perna_esq==1
    line([xB xD],[yB yD]);
    line([xD xG],[yD yG]);
end
%Desenhando tronco
if tronco ==1
    line([xE xH],[yE yE+tam_tronco]);
end
%Desenhando o pe' esquerdo
if pes==1 & perna_dir==1
    line([xB xB+11a],[yB-11 yB-11]);
    line([xB xB+11b],[yB-11 yB-11]);
    line([xB xB],[yB yB-11]);
end
%Desenhando o pe' direito
if pes==1 & perna_esq==1
    line([xH xH+17a],[yH-17 yH-17]);
    line([xH xH+17b],[yH-17 yH-17]);
    line([xH xH],[yH yH-17]);
end
if pes ~= 1 & (perna_esq==1 | perna_dir==1 | tronco ==1 | pes==1)
    line([0 dist_final],[11 11]); %altura do pe'
end
%Calculando a velocidade linear de cada ponto A..H
Q1_r=Q1*pi/180; dQ1_r=dQ1*pi/180; ddQ1_r=ddQ1*pi/180; %Convertendo os angulos de graus para rad
Q2_r=Q2*pi/180; dQ2_r=dQ2*pi/180; ddQ2_r=ddQ2*pi/180;
Q3_r=Q3*pi/180; dQ3_r=dQ3*pi/180; ddQ3_r=ddQ3*pi/180;
Q4_r=Q4*pi/180; dQ4_r=dQ4*pi/180; ddQ4_r=ddQ4*pi/180;
Q5_r=Q5*pi/180; dQ5_r=dQ5*pi/180; ddQ5_r=ddQ5*pi/180;
PA=[PA; xB yB-11]; PB=[PB; B ]; PC=[PC; C ]; PD=[PD; E ];
PE=[PE; xB yB]; PF=[PF; F ]; PG=[PG; G ]; PH=[PH; H ]; PI=[PI; xH yH-17 ];
VAr=0; VAy=0; VBx=0; VBx=0; VBy=0;
VCx=-12*dQ1_r(size_dQ1)*cos(Q1_r(size_Q1));
VCy=-12*dQ1_r(size_dQ1)*sin(Q1_r(size_Q1));
VDx=VCx-13*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
VDy=VCy-13*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
VEx=VDx; VEy=VDy; VFx=VEx; VFy=VEy;
VGx=VEx+15*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4))*cos(Q1_r(size_Q1)+
Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4));
VGy=VFy+15*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4));
VHx=VGx+16*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-Q4_r(size_Q4)-dQ5_r(size_dQ5))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5));
VHy=VGy+16*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-dQ5_r(size_dQ5))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5));
Vix=VHx; Viy=VHy;
VA=[VA; VAr VAy]; VB=[VB; VBx VBy]; VC=[VC; VCx VCy]; VD=[VD; VDx VDy];
VE=[VE; VEx VEy]; VF=[VF; VFx VFy]; VG=[VG; VGx VGy]; VH=[VH; VHx VHy]; VI=[VI; Vix Viy];
AAx=0; AAy=0; ABx=0; ABy=0;
ACx=12*(-ddQ1_r(size_ddQ1)*cos(Q1_r(size_Q1))+dQ1_r(size_dQ1)^2*sin(Q1_r(size_Q1)));
ACy=12*(-ddQ1_r(size_ddQ1)*sin(Q1_r(size_Q1))-dQ1_r(size_dQ1)^2*cos(Q1_r(size_Q1)));
ADx=ACx+13*(-ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2))+
(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))^2*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
ADy=ACy+13*(-ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2))-
(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))^2*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
AEx=ADx; AEy=ADy; AFx=AEy; AFy=AEy;
AGx=AFx+15*(-ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4))*cos(
Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4))-
(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4))^2*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-
Q4_r(size_Q4));
AGy=AFy+15*(-ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4))

```

```

)%sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4) ) +( dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_
r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4) )^2*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(si
ze_Q3)-Q4_r(size_Q4) ) );
AHx= AHx + 16*( +(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4)
)-ddQ5_r(size_ddQ5))*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(si
ze_Q5) ) ) -(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-dQ5_r(size_dQ5)
)^2*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) );
AHy= AHy + 16*( +(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4)
)-ddQ5_r(size_ddQ5))*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5)
) +(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-dQ5_r(size_dQ5))^2*cos(
Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) );
AIX=AHx; AIY=AHy; AA=[AA; 0 0 ]; AB=[AB; 0 0 ];
AC=[AC; ACx ACy]; AD=[AD; ADx ADy]; AE=[AE; AEx AEy]; AF=[AF; AFx AFy];
AG=[AG; AGx AGy]; AH=[AH; AHx AHy]; AI=[AI; AIx AIy];
plot(PB(:,1),PB(:,2),'r')
plot(PC(:,1),PC(:,2),'r')
plot(PG(:,1),PG(:,2),'w')
pause(in)
end % Final 2a FASE
end; pause(in);
end %Final Numero de Fases
% ----- FINAL DO REGIME PERMANENTE -----
% ===== JUNTANDO AS PERNAS =====
if xB>xB,
disp('Perna esquerda na frente');
disp('Levando direita a frente');
d=d/2;
xB_ini=xB; yB_ini=yB; xE_ini=xE; yE_ini=yE; xH_ini=xH; yH_ini=yH;
for i=1:n_divisoes,
x=i*2*d/n_divisoes;
if elipse==1
y=sqrt(A^2*(1-(x-d)^2/d^2));
else
y=A*abs(sin( pi*x/(2*d) ));
end
xB=xB_ini + x; yB=yB_ini + y;
x2=i*d/n_divisoes;
y2=pelva*(-cos(2*pi*x2/d));
xE=xE_ini + x2;
if pelva_reta==1
yE=yE_ini;
else
yE=yE_ini + pelva + y2;
end
%Desenhando as pernas, dado o ponto E, B e H
B=[xB yB]; E=[xE yE]; H=[xH yH ];
q1=angle1(E,B,12);
q2=angle2(E,B,12);
q6=angle1(E,H,12);
q5=angle2(E,H,12);
q3=-(q1+q2);
q4=-(q5+q6);
%Armazenamento dos angulos e do tempo
t=t+delta_t; T=[T t];
Q1=[Q1 q1]; Q2=[Q2 q2]; Q3=[Q3 q3]; Q4=[Q4 q4]; Q5=[Q5 q5]; Q6=[Q6 q6];
size_Q1=length(Q1); size_Q2=length(Q2); size_Q3=length(Q3); size_Q4=length(Q4);
size_Q5=length(Q5); size_Q6=length(Q6);
dQ1=[dQ1 (Q1(size_Q1)-Q1(size_Q1-1))/delta_t];
dQ2=[dQ2 (Q2(size_Q2)-Q2(size_Q2-1))/delta_t];
dQ3=[dQ3 (Q3(size_Q3)-Q3(size_Q3-1))/delta_t];
dQ4=[dQ4 (Q4(size_Q4)-Q4(size_Q4-1))/delta_t];
dQ5=[dQ5 (Q5(size_Q5)-Q5(size_Q5-1))/delta_t];
dQ6=[dQ6 (Q6(size_Q6)-Q6(size_Q6-1))/delta_t];
size_dQ1=length(dQ1); size_dQ2=length(dQ2); size_dQ3=length(dQ3);
size_dQ4=length(dQ4); size_dQ5=length(dQ5); size_dQ6=length(dQ6);
ddQ1=[ddQ1 (dQ1(size_dQ1)-dQ1(size_dQ1-1))/delta_t];
ddQ2=[ddQ2 (dQ2(size_dQ2)-dQ2(size_dQ2-1))/delta_t];
ddQ3=[ddQ3 (dQ3(size_dQ3)-dQ3(size_dQ3-1))/delta_t];
ddQ4=[ddQ4 (dQ4(size_dQ4)-dQ4(size_dQ4-1))/delta_t];
ddQ5=[ddQ5 (dQ5(size_dQ5)-dQ5(size_dQ5-1))/delta_t];
ddQ6=[ddQ6 (dQ6(size_dQ6)-dQ6(size_dQ6-1))/delta_t];
size_ddQ1=length(ddQ1); size_ddQ2=length(ddQ2); size_ddQ3=length(ddQ3);
size_ddQ4=length(ddQ4); size_ddQ5=length(ddQ5); size_ddQ6=length(ddQ6);
q1=q1*(pi/180); %angulos em RADIANS
q2=q2*(pi/180); q3=q3*(pi/180); q4=q4*(pi/180); q5=q5*(pi/180); q6=q6*(pi/180);
xC= xB-12*sin(q1); yC= yB+12*cos(q1); xE= xH-15*sin(q6); yE= yH+15*cos(q6);
C=[xC yC]; G=[xE yE];
clf;hold;axis([-0.005 1.5*dist_final -0.0007 0.51]);
%Desenhando as pernas
if perna_dir==1
line([xB xC],[yB yC],'color','w');
line([xE xG],[yE yG],'color','w');
end
if perna_esq==1
line([xE xG],[yE yG],'color','r');
line([xB xH],[yB yH],'color','r');
end
%Desenhando tronco
if tronco ==1
line([xE xE],[yE yE+tam_tronco]);
end
%Desenhando o pe' direito

```

```

if pes==1 & perna_dir==1
    line([xB xB+11a],[yB-11 yB-11],'color','w');
    line([xB xB+11b],[yB-11 yB-11],'color','w');
    line([xB xB],[yB yB-11],'color','w');
end
%Desenhando o pe'esquerdo
if pes==1 & perna_esq==1
    line([xH xH+17a],[yH-17 yH-17],'color','r');
    line([xH xH+17b],[yH-17 yH-17],'color','r');
    line([xH xH],[yH yH-17],'color','r');
end
if pes == 1 & (perna_esq==1 | perna_dir==1 | tronco ==1 | pes==1)
    line([0 dist_final],[11 11]); %altura do pe'
end
%Calculando a velocidade linear de cada ponto A..H
Q1_r=Q1*pi/180; dQ1_r=dQ1*pi/180; ddQ1_r=ddQ1*pi/180; %Convertendo os angulos de graus para rad
Q2_r=Q2*pi/180; dQ2_r=dQ2*pi/180; ddQ2_r=ddQ2*pi/180;
Q3_r=Q3*pi/180; dQ3_r=dQ3*pi/180; ddQ3_r=ddQ3*pi/180;
Q4_r=Q4*pi/180; dQ4_r=dQ4*pi/180; ddQ4_r=ddQ4*pi/180;
Q5_r=Q5*pi/180; dQ5_r=dQ5*pi/180; ddQ5_r=ddQ5*pi/180;
Q6_r=Q6*pi/180; dQ6_r=dQ6*pi/180; ddQ6_r=ddQ6*pi/180;
PA=[PA; xB yB-11]; PB=[PB; B ]; PC=[PC; C ]; PD=[PD; E ]; PE=[PE; F ]; PF=[PF; G ];
PG=[PG; G ]; PH=[PH; H ]; PI=[PI; xH yH-17 ]; Vix=0; Viy=0; Vix=0; Viy=0; Vix=0; Viy=0;
VGx=-16*dQ6_r(size_dQ6)*cos(Q6_r(size_Q6));
VGy=-16*dQ6_r(size_dQ6)*sin(Q6_r(size_Q6));
VFx=VGx-15*(dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*cos(Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
VFy=VGy-15*(dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*sin(Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
VEx=VFx; VEy=VFy; VEx=VEx; VEy=VEy;
VCx=VEx+13*(-dQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*cos(-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
VCy=VEx+13*(-dQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*sin(-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
VEx=VCx+12*(-dQ2_r(size_dQ2)-dQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*cos(-Q2_r(size_Q2)-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
VEx=VCy+12*(-dQ2_r(size_dQ2)-dQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*sin(-Q2_r(size_Q2)-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
VEx=VEx; VEy=VEy; VEx=VEx; VEy=VEy; VC=[VC; VCx VCy];
VD=[VD; VEx VEy]; VE=[VE; VEx VEy]; VF=[VF; VFx VFy]; VG=[VG; VGx VGy];
VH=[VH; VEx VEy]; VI=[VI; Vix Viy]; A1x=0; A1y=0; A2x=0; A2y=0;
AGx=16*(-ddQ6_r(size_dQ6)*cos(Q6_r(size_Q6))+dQ6_r(size_dQ6)^2*sin(Q6_r(size_Q6)));
AGy=16*(-ddQ6_r(size_dQ6)*sin(Q6_r(size_Q6))-dQ6_r(size_dQ6)^2*cos(Q6_r(size_Q6)));
AFx=AGx+15*(-ddQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*cos(Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6))+dQ6_r(size_dQ6)+dQ6_r(size_dQ6)^2*sin(Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
AFy=AGy+15*(-ddQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*sin(Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6))-dQ6_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6)^2*cos(Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
ARx=AFx; ARy=AFy; ADx=ARx; ADy=ARy;
ACx=ARx+13*(-ddQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*cos(-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6))-dQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6)^2*sin(-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
ACy=ARx+13*(-ddQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6))*sin(-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6))-dQ3_r(size_dQ3)+dQ4_r(size_dQ4)+dQ5_r(size_dQ5)+dQ6_r(size_dQ6)^2*cos(-Q3_r(size_Q3)+Q4_r(size_Q4)+Q5_r(size_Q5)+Q6_r(size_Q6));
ARx=ACx; ARy=ACy; AI=[AI; 0 0]; AH=[AH; 0 0];
AQ=[AQ; AGx AGy]; AF=[AF; AFx AFy]; AE=[AE; ARx ARy]; AD=[AD; ARx ARy];
AC=[AC; ACx ACy]; AB=[AB; ARx ARy]; AA=[AA; ARx ARy];
pause(in);clf
end %Final junta direita
else
    disp('Perna direita na frente')
    disp('Levando esquerda frente')
    d=d/2; %meia passada = 1 passo
    xB_ini=xB; yB_ini=yB; xE_ini=xE;
    yE_ini=yE; %pelve mantem altura constante
    xH_ini=xH; yH_ini=yH;
    for i=1:n_divisoes,
        %Calculando os pontos E, B e H
        x=1+2*d/n_divisoes;
        y=sqrt(1-(x-d)^2/d^2);
        xB=x*xB_ini; yB=y*yB_ini;
        x2=i*d/n_divisoes;
        y2=pelve*(-cos(2*pi*x2/d));
        xE=x*xE_ini + x2;
        if pelve_rsta==1
            yE=y*yE_ini;
        else
            yE=y*yE_ini + pelve + y2;
        end
        xH=x*xB_ini + x; yH=y*yH_ini + y;
        %Desenhando as pernas, dado o ponto E, B e H
        B=[xB yB]; E=[xE yE]; H=[xH yH];
        q1=angle1(E,B,12);
        q2=angle2(E,B,12);
        q6=angle1(E,H,12);
        q5=angle2(E,H,12);
        q3=-(q1+q2); %Calculo de q3 baseado em q1 e q2
        q4=-(q5+q6); %Calculo de q4 baseado em q5 e q6
        %Armazenamento dos angulos
        t=t+delta_t; T=[T t];
    end
end

```

```

Q1=[Q1 q1]; Q2=[Q2 q2]; Q3=[Q3 q3]; Q4=[Q4 q4]; Q5=[Q5 q5]; Q6=[Q6 q6];
size_Q1=length(Q1); size_Q2=length(Q2); size_Q3=length(Q3);
size_Q4=length(Q4); size_Q5=length(Q5); size_Q6=length(Q6);
dQ1=[dQ1 (Q1(size_Q1)-Q1(size_Q1-1))/delta_t];
dQ2=[dQ2 (Q2(size_Q2)-Q2(size_Q2-1))/delta_t];
dQ3=[dQ3 (Q3(size_Q3)-Q3(size_Q3-1))/delta_t];
dQ4=[dQ4 (Q4(size_Q4)-Q4(size_Q4-1))/delta_t];
dQ5=[dQ5 (Q5(size_Q5)-Q5(size_Q5-1))/delta_t];
size_dQ1=length(dQ1); size_dQ2=length(dQ2); size_dQ3=length(dQ3);
size_dQ4=length(dQ4); size_dQ5=length(dQ5); size_dQ6=length(dQ6);
ddQ1=[ddQ1 (dQ1(size_dQ1)-dQ1(size_dQ1-1))/delta_t];
ddQ2=[ddQ2 (dQ2(size_dQ2)-dQ2(size_dQ2-1))/delta_t];
ddQ3=[ddQ3 (dQ3(size_dQ3)-dQ3(size_dQ3-1))/delta_t];
ddQ4=[ddQ4 (dQ4(size_dQ4)-dQ4(size_dQ4-1))/delta_t];
ddQ5=[ddQ5 (dQ5(size_dQ5)-dQ5(size_dQ5-1))/delta_t];
ddQ6=[ddQ6 (dQ6(size_dQ6)-dQ6(size_dQ6-1))/delta_t];
size_ddQ1=length(ddQ1); size_ddQ2=length(ddQ2); size_ddQ3=length(ddQ3);
size_ddQ4=length(ddQ4); size_ddQ5=length(ddQ5); size_ddQ6=length(ddQ6);
q1=q1+(pi/180); %angulos em RADIANS
q2=q2+(pi/180); q3=q3+(pi/180); q4=q4+(pi/180);
q5=q5+(pi/180); q6=q6+(pi/180); xC= xB-12*sin(q1);
yC= yB+12*cos(q1); xD= xH-15*sin(q6); yD= yH+15*cos(q6);
C=[xC yC]; D=[xD yD];
clf;hold;axis([-0.005 1.5*dist_final -.0007 0.51]);
%Desenhando as pernas
if perna_dir==1
line([xB xC],[yB yC],'color','w');
line([xC xD],[yC yD],'color','w');
end
if perna_esq==1
line([xH xD],[yH yD],'color','r');
line([xH xC],[yH yC],'color','r');
end
%Desenhando tronco
if tronco ==1
line([xB xH],[yB yH+tam_tronco]);
end
%Desenhando o pe' direito
if pes==1 & perna_dir==1
line([xB xB+11a],[yB-11 yB-11],'color','w');
line([xB xB+11b],[yB-11 yB-11],'color','w');
line([xB xB],[yB yB-11],'color','w');
end
%Desenhando o pe' esquerdo
if pes==1 & perna_esq==1
line([xH xH+17a],[yH-17 yH-17],'color','r');
line([xH xH+17b],[yH-17 yH-17],'color','r');
line([xH xH],[yH yH-17],'color','r');
end
if pes == 1 & (perna_esq==1 | perna_dir==1 | tronco ==1 | pes==1)
line([0 dist_final],[11 11]); %altura do pe'
end
%Calculando a velocidade linear de cada ponto A..H
Q1_r=Q1*pi/180; dQ1_r=dQ1*pi/180; ddQ1_r=ddQ1*pi/180; %Convertendo os angulos de graus para rad
Q2_r=Q2*pi/180; dQ2_r=dQ2*pi/180; ddQ2_r=ddQ2*pi/180;
Q3_r=Q3*pi/180; dQ3_r=dQ3*pi/180; ddQ3_r=ddQ3*pi/180;
Q4_r=Q4*pi/180; dQ4_r=dQ4*pi/180; ddQ4_r=ddQ4*pi/180;
Q5_r=Q5*pi/180; dQ5_r=dQ5*pi/180; ddQ5_r=ddQ5*pi/180;
Q6_r=Q6*pi/180; dQ6_r=dQ6*pi/180; ddQ6_r=ddQ6*pi/180;
PA=[PA; xB yB-11]; PB=[PB; B ]; PC=[PC; C ]; PD=[PD; D ];
PE=[PE; xB yB-11]; PF=[PF; B ]; PG=[PG; G ]; PH=[PH; H ]; PI=[PI; xH yH-17 ];
VAX=0; VAY=0; VBx=0; VBx=0; VBy=0;
VCx=-12*dQ1_r(size_dQ1)*cos(Q1_r(size_Q1));
VCy=-12*dQ1_r(size_dQ1)*sin(Q1_r(size_Q1));
VDx=VCx-13*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
VDy=VCy-13*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
VEx=VDx; VEy=VDy; VFx=VBx; VFy=VBy; VGr=VFx+15*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4));
VGy=VFy+15*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4));
VHx=VGx+15*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-dQ5_r(size_dQ5))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5));
VHy=VGy+15*(dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)-dQ5_r(size_dQ5))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5));
VA=[VA; VAX VAY]; VB=[VB; VBx VBy]; VC=[VC; VCx VCy]; VD=[VD; VDX VDY];
VE=[VE; VEx VEy]; VF=[VF; VFx VFy]; VG=[VG; VGx VGy]; VH=[VH; VHx VHy];
VI=[VI; VIX VIY]; AIX=0; AIY=0; AEX=0; AEY=0;
ACx=12*(-ddQ1_r(size_ddQ1)*cos(Q1_r(size_Q1))+dQ1_r(size_dQ1)^2*sin(Q1_r(size_Q1)));
ACy=12*(-ddQ1_r(size_ddQ1)*sin(Q1_r(size_Q1))-dQ1_r(size_dQ1)^2*cos(Q1_r(size_Q1)));
ADx=ACx+13*(-ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2))+dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)^2*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
ADy=ACy+13*(-ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2))-dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)^2*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2));
AEx=ADx; AEy=ADy; AFx=AEx; AFy=AEy;
AGx=AFx+15*(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4))*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4))-dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)^2*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4));
AGy=AFy+15*(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4))*sin(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4))+dQ1_r(size_dQ1)+dQ2_r(size_dQ2)+dQ3_r(size_dQ3)-dQ4_r(size_dQ4)^2*cos(Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4));
AHx=AGx+15*(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4)-ddQ5_r(size_ddQ5))*

```

```

cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) -(dq1_r(size_dQ1)+dq2_r(size_dQ2)
+ddQ3_r(size_dQ3)-ddQ4_r(size_dQ4)-ddQ5_r(size_dQ5))~2*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) );
ABY= ABy + 16*( +(ddQ1_r(size_ddQ1)+ddQ2_r(size_ddQ2)+ddQ3_r(size_ddQ3)-ddQ4_r(size_ddQ4)-ddQ5_r(size_ddQ5))*sin( Q1_r(size_Q1)+Q2_r
(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) +(dq1_r(size_dQ1)+dq2_r(size_dQ2)+ddQ3_r(size_dQ3)-ddQ4_r(size_dQ4)-ddQ5_r(size_d
Q5))~2*cos( Q1_r(size_Q1)+Q2_r(size_Q2)+Q3_r(size_Q3)-Q4_r(size_Q4)-Q5_r(size_Q5) ) );
AIY=ABY;      AA=[AA; 0 0];      AB=[AB; 0 0];      AC=[AC; ACx ACy];
AD=[AD;      ADx ADy];      AE=[AE;      AEx AEy];
AF=[AF;      AFx AFy];      AG=[AG;      AGx AGy];
AH=[AH;      AHx AHy];      AI=[AI;      AIx AIy];
pause(in);clf
end% Final junta esquerda
end
% ----- final juntando as pernas -----
arq1=fopen('Q.dat','w'); arq2=fopen('dQ.dat','w');
arq3=fopen('ddQ.dat','w'); arq4=fopen('T.dat','w');
arq5=fopen('Ptos.dat','w'); ccc=n_divisoes/(num_passos+1)+1; for
i=1:ccc,
fprintf(arq1,'%12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f \n', Q1(i), Q2(i), Q3(i), Q4(i), Q5(i), Q6(i));
fprintf(arq2,'%12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f \n', dq1(i), dq2(i), dq3(i), dq4(i), dq5(i), dq6(i));
fprintf(arq3,'%12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f \n', ddq1(i), ddq2(i), ddq3(i), ddq4(i), ddq5(i), ddq6(i));
fprintf(arq4,'%12.8f \n',T(i));
fprintf(arq5,'%12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f \n',PA(i,1),PA(i,2),PB(i,1),PB(i,2),PC(i,1),PC(i,2),PD(i,1),P
D(i,2),PE(i,1),PE(i,2),PF(i,1),PF(i,2),PG(i,1),PG(i,2),PH(i,1),PH(i,2),PI(i,1),PI(i,2));
end fclose(arq1); fclose(arq2); fclose(arq3); fclose(arq4);
fclose(arq5);
%Calculo do tempo real total da simulacao
fprintf('Tempo Real total da simulacao: %7.2f min \n',etime(clock,t0)/60);

```

B.2 Programa robolnej.m

```

%*****
% Programa ROBO BIPEDE vinej
% Simulacao Dinamica do RS-1.
%
%
% Este programa gera o torque ou o vetor ac. angular a
% partir da eq. de mov. obtida pelo met. Newton-Euler-Jordain
% As curvas dos torques serao comparadas no programa
% robolag.m
%
% Carlos Andre Dias Bezerra
% Baseado em robo6.m Daniel Carmona de Campos - IC
%
% fev/maio/set2001 Jan/2002
%
load rbridados
xd=0; %posicao inicial do pe'
xe=0; %posicao inicial do pe'
perna_balanco='esq'; %perna em balanco no transitorio
g=9.81; %[m/s^2] aceleracao gravitacional
% Parametros de Massa
% [kg] Massa do Corpo i %[kg.m^2] Mom. Inercia em Z do Corpo i
m1= 0.31692; Ixx1= 1.649e-3; m2= 0.32545; Ixx2= 8.343826e-4;
m3= 0.26611; Ixx3= 1.127465e-3; m4= 0.49562; Ixx4=
5.886819e-4; m5= m3; Ixx5= Ixx3; m6= m2; Ixx6= Ixx2; m7=
m1; Ixx7= Ixx1;
% Parametros geometricos
%[m]Comp. dos segmentos %[m]Comp. Junta - CM segmento
l1= 0.0495; a1=1.531687e-2; b1=l1-a1; %[m]
l2= 0.18182; a2=1.03912e-1-13e-3; b2=l2-a2; %[m]
l3= l2; a3=5.507933e-2+49.8e-3; b3=l3-a3; %[m]
l4= 0.0495; a4=14-4e-3-1.4139e-2;%[m]
l5= l3; a5=a3; b5=b3; %[m]
l6= l2; a6=a2; b6=b2; %[m]
l7= l1; a7=a1; b7=b1; %[m]
%***** Integracao Numerica *****
t = 0.0; %[s] tempo inicial
n=n_divisoes;
delta_t=(tempo-t)/n;
intervalo_armaz=i;
%*****
% {u}={A}*{q''}-{bb}. Os torques sao dados de
% saida, logo a variacao de qi, qi' e qi''
% ao longo do tempo deve ser fornecido com
% o programa Robol.m
fim=0;
t0=clock; %contagem do tempo real de simulacao
% Condicoes Iniciais
arq2=fopen('piinej.dat','w');
arq3=fopen('uiinej.dat','w');
%Carrega os dados gerados por Robol.m
load Q.dat;
load dQ.dat;
load ddQ.dat;
load T.dat;

```

```

i=1;
n_final= n*(2 + num_passos) + 1;
while i<=n_final,
% Mudanca de perna
if rem(fix((i-2)/n),2)==0,perna_balanco='esq';end
if rem(fix((i-2)/n),2)==1,perna_balanco='dir';end
%Valores q1, dq1, ddq1 e uH
q1= Q(1,1)*pi/180; %[rad]
q2= Q(1,2)*pi/180; %[rad]
q3= Q(1,3)*pi/180; %[rad]
q4= Q(1,4)*pi/180; %[rad]
q5= Q(1,5)*pi/180; %[rad]
q6= Q(1,6)*pi/180; %[rad]
dq1= dQ(1,1)*pi/180; %[rad/s]
dq2= dQ(1,2)*pi/180; %[rad/s]
dq3= dQ(1,3)*pi/180; %[rad/s]
dq4= dQ(1,4)*pi/180; %[rad/s]
dq5= dQ(1,5)*pi/180; %[rad/s]
dq6= dQ(1,6)*pi/180; %[rad/s]
ddq1= ddQ(1,1)*pi/180; %[rad/s^2]
ddq2= ddQ(1,2)*pi/180; %[rad/s^2]
ddq3= ddQ(1,3)*pi/180; %[rad/s^2]
ddq4= ddQ(1,4)*pi/180; %[rad/s^2]
ddq5= ddQ(1,5)*pi/180; %[rad/s^2]
ddq6= ddQ(1,6)*pi/180; %[rad/s^2]
if perna_balanco=='dir'
l1_temp=l1; l2_temp=l2; l3_temp=l3; l5_temp=l5; l6_temp=l6; l7_temp=l7;
a1_temp=a1; a2_temp=a2; a3_temp=a3; a5_temp=a5; a6_temp=a6; a7_temp=a7;
b1_temp=b1; b2_temp=b2; b3_temp=b3; b5_temp=b5; b6_temp=b6; b7_temp=b7;
l1=l7_temp; l2=l6_temp; l3=l5_temp; l5=l3_temp; l6=l2_temp; l7=l1_temp;
a1=a7_temp; a2=a6_temp; a3=a5_temp; a5=a3_temp; a6=a2_temp; a7=a1_temp;
b1=b7_temp; b2=b6_temp; b3=b5_temp; b5=b3_temp; b6=b2_temp; b7=b1_temp;
q1_temp= q1; q2_temp= q2; q3_temp= q3; q4_temp= q4; q5_temp= q5; q6_temp= q6;
dq1_temp= dq1; dq2_temp= dq2; dq3_temp= dq3; dq4_temp= dq4; dq5_temp= dq5; dq6_temp= dq6;
ddq1_temp=ddq1; ddq2_temp=ddq2; ddq3_temp=ddq3; ddq4_temp=ddq4; ddq5_temp=ddq5; ddq6_temp=ddq6;
q1= q6_temp; q2= q5_temp; q3= q4_temp; q4= q3_temp; q5= q2_temp; q6= q1_temp;
dq1= dq6_temp; dq2= dq5_temp; dq3= dq4_temp; dq4= dq3_temp; dq5= dq2_temp; dq6= dq1_temp;
ddq1=ddq6_temp; ddq2=ddq5_temp; ddq3=ddq4_temp; ddq4=ddq3_temp; ddq5=ddq2_temp; ddq6=ddq1_temp;
end
ddq=[ddq1 ddq2 ddq3 ddq4 ddq5 ddq6]';
% Termos da Matriz [A] e do vetor {bb}
a11= -lxx2 - lxx3 - lxx4 - lxx5 - lxx6 - lxx7 - a2^2*m2 - a3^2*m3
-
12^2*m3 - a4^2*m4 - 12^2*m4 - 13^2*m4 - b5^2*m5 -
12^2*m5 - 13^2*m5 - b6^2*m6 - 12^2*m6 - 13^2*m6 -
15^2*m6 - b7^2*m7 - 12^2*m7 - 13^2*m7 - 15^2*m7 -
16^2*m7 - 2*l2*(a3*m3 + l3*(m4 + m5 + m6 + m7))*cos(q2) -
2*a4*l3*m4*cos(q3) - 2*a4*l2*m4*cos(q2 + q3) +
2*b5*l3*m5*cos(q3 - q4) + 2*l3*l5*m6*cos(q3 - q4) +
2*l3*l5*m7*cos(q3 - q4) + 2*b5*l2*m5*cos(q2 + q3 - q4) +
2*l2*l5*m6*cos(q2 + q3 - q4) + 2*l2*l5*m7*cos(q2 + q3 - q4) +
2*b6*l3*m6*cos(q3 - q4 - q5) + 2*l3*l6*m7*cos(q3 - q4 - q5) +
2*b6*l2*m6*cos(q2 + q3 - q4 - q5) +
2*l2*l6*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5) - 2*b6*l5*m6*cos(q5) -
2*l5*l6*m7*cos(q5) + 2*b7*l3*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) +
2*b7*l2*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*l6*m7*cos(q6) -
2*b7*l5*m7*cos(q5 + q6) ;
a12= -lxx3 - lxx4 - lxx5 - lxx6 - lxx7 - a3^2*m3 - a4^2*m4 -
13^2*m4 -
b5^2*m5 - 13^2*m5 - b6^2*m6 - 13^2*m6 - 15^2*m6 -
b7^2*m7 - 13^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 -
12*(a3*m3 + l3*(m4 + m5 + m6 + m7))*cos(q2) - 2*a4*l3*m4*cos(q3) -
a4*l2*m4*cos(q2 + q3) + 2*b5*l3*m5*cos(q3 - q4) +
2*l3*l5*m6*cos(q3 - q4) + 2*l3*l5*m7*cos(q3 - q4) +
b5*l2*m5*cos(q2 + q3 - q4) + 12*l5*m6*cos(q2 + q3 - q4) +
12*l5*m7*cos(q2 + q3 - q4) + 2*b6*l3*m6*cos(q3 - q4 - q5) +
2*l3*l6*m7*cos(q3 - q4 - q5) + b6*l2*m6*cos(q2 + q3 - q4 - q5) +
12*l6*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5) - 2*b6*l5*m6*cos(q5) -
2*l5*l6*m7*cos(q5) + 2*b7*l3*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) +
b7*l2*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*l6*m7*cos(q6) -
2*b7*l5*m7*cos(q5 + q6) ;
a13= -lxx4 - lxx5 - lxx6 - lxx7 - a4^2*m4 - b5^2*m5 - b6^2*m6
-
15^2*m6 - b7^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 -
a4*l3*m4*cos(q3) - a4*l2*m4*cos(q2 + q3) + b5*l3*m5*cos(q3 - q4) +
13*l5*m6*cos(q3 - q4) + 13*l5*m7*cos(q3 - q4) +
b5*l2*m5*cos(q2 + q3 - q4) + 12*l5*m6*cos(q2 + q3 - q4) +
12*l5*m7*cos(q2 + q3 - q4) + b6*l3*m6*cos(q3 - q4 - q5) +
13*l6*m7*cos(q3 - q4 - q5) + b6*l2*m6*cos(q2 + q3 - q4 - q5) +
12*l6*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5) - 2*b6*l5*m6*cos(q5) -
2*l5*l6*m7*cos(q5) + b7*l3*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) +
b7*l2*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*l6*m7*cos(q6) -
2*b7*l5*m7*cos(q5 + q6) ;
a14= lxx5 + lxx6 + lxx7 + b5^2*m5 + b6^2*m6 + 15^2*m6 + b7^2*m7
+
15^2*m7 + 16^2*m7 - 13*(b5*m5 + l5*(m6 + m7))*cos(q3 - q4) -
12*(b5*m5 + l5*(m6 + m7))*cos(q2 + q3 - q4) -
b6*l3*m6*cos(q3 - q4 - q5) - 13*l6*m7*cos(q3 - q4 - q5) -
b6*l2*m6*cos(q2 + q3 - q4 - q5) -

```

```

12*16*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5) + 2*b6*15*m6*cos(q5) + ...
2*15*16*m7*cos(q5) - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) - ...
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + 2*b7*16*m7*cos(q6) + ...
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a15= Ixx6 + Ixx7 + b6^2*m6 + b7^2*m7 + 16^2*m7
-
13*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q3 - q4 - q5) - ...
12*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q2 + q3 - q4 - q5) + b6*15*m6*cos(q5) + ...
15*16*m7*cos(q5) - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) - ...
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + 2*b7*16*m7*cos(q6) + ...
b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a16= Ixx7 + b7^2*m7 - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6)
-
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + b7*16*m7*cos(q6) + ...
b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a21= -Ixx3 - Ixx4 - Ixx5 - Ixx6 - Ixx7 - a3^2*m3 - a4^2*m4 -
13^2*m4 -
b5^2*m5 - 13^2*m5 - b6^2*m6 - 13^2*m6 - 15^2*m6 - ...
b7^2*m7 - 13^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 - ...
12*(a3*m3 + 13*(m4 + m5 + m6 + m7))*cos(q2) - 2*a4*13*m4*cos(q3) - ...
a4*12*m4*cos(q2 + q3) + 2*b5*13*m5*cos(q3 - q4) + ...
2*13*15*m6*cos(q3 - q4) + 2*13*15*m7*cos(q3 - q4) + ...
b5*12*m5*cos(q2 + q3 - q4) + 12*15*m6*cos(q2 + q3 - q4) + ...
12*15*m7*cos(q2 + q3 - q4) + 2*b6*13*m6*cos(q3 - q4 - q5) + ...
2*13*16*m7*cos(q3 - q4 - q5) + b6*12*m6*cos(q2 + q3 - q4 - q5) + ...
12*16*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5) - 2*b6*15*m6*cos(q5) - ...
2*15*16*m7*cos(q5) + 2*b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) + ...
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*16*m7*cos(q6) - ...
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a22= -Ixx3 - Ixx4 - Ixx5 - Ixx6 - Ixx7 - a3^2*m3 - a4^2*m4 -
13^2*m4 -
b5^2*m5 - 13^2*m5 - b6^2*m6 - 13^2*m6 - 15^2*m6 - ...
b7^2*m7 - 13^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 - ...
2*a4*13*m4*cos(q3) + 2*13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*cos(q3 - q4) + ...
2*b6*13*m6*cos(q3 - q4 - q5) + 2*13*16*m7*cos(q3 - q4 - q5) - ...
2*b6*15*m6*cos(q5) - 2*15*16*m7*cos(q5) + ...
2*b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*16*m7*cos(q6) - ...
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a23= -Ixx4 - Ixx5 - Ixx6 - Ixx7 - a4^2*m4 - b5^2*m5 - b6^2*m6
-
15^2*m6 - b7^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 - ...
a4*13*m4*cos(q3) + 13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*cos(q3 - q4) + ...
b6*13*m6*cos(q3 - q4 - q5) + 13*16*m7*cos(q3 - q4 - q5) - ...
2*b6*15*m6*cos(q5) - 2*15*16*m7*cos(q5) + ...
b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*16*m7*cos(q6) - ...
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a24= Ixx5 + Ixx6 + Ixx7 + b5^2*m5 + b6^2*m6 + 15^2*m6 + b7^2*m7
+
15^2*m7 + 16^2*m7 - 13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*cos(q3 - q4) - ...
13*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q3 - q4 - q5) + 2*b6*15*m6*cos(q5) + ...
2*15*16*m7*cos(q5) - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) + ...
2*b7*16*m7*cos(q6) + 2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a25= Ixx6 + Ixx7 + b6^2*m6 + b7^2*m7 + 16^2*m7
-
13*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q3 - q4 - q5) + 15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) - ...
b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) + 2*b7*16*m7*cos(q6) + ...
b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a26= Ixx7 + b7^2*m7 - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6)
+
b7*16*m7*cos(q6) + b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a31= -Ixx4 - Ixx5 - Ixx6 - Ixx7 - a4^2*m4 - b5^2*m5 - b6^2*m6
-
15^2*m6 - b7^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 - ...
a4*13*m4*cos(q3) - a4*12*m4*cos(q2 + q3) + b5*13*m5*cos(q3 - q4) + ...
13*15*m6*cos(q3 - q4) + 13*15*m7*cos(q3 - q4) + ...
b5*12*m5*cos(q2 + q3 - q4) + 12*15*m6*cos(q2 + q3 - q4) + ...
12*15*m7*cos(q2 + q3 - q4) + b6*13*m6*cos(q3 - q4 - q5) + ...
13*16*m7*cos(q3 - q4 - q5) + b6*12*m6*cos(q2 + q3 - q4 - q5) + ...
12*16*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5) - 2*b6*15*m6*cos(q5) - ...
2*15*16*m7*cos(q5) + b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) + ...
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*16*m7*cos(q6) - ...
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a32= -Ixx4 - Ixx5 - Ixx6 - Ixx7 - a4^2*m4 - b5^2*m5 - b6^2*m6
-
15^2*m6 - b7^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 - ...
a4*13*m4*cos(q3) + 13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*cos(q3 - q4) + ...
b6*13*m6*cos(q3 - q4 - q5) + 13*16*m7*cos(q3 - q4 - q5) - ...
2*b6*15*m6*cos(q5) - 2*15*16*m7*cos(q5) + ...
b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) - 2*b7*16*m7*cos(q6) - ...
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

```

```

a33= -Ixx4 - Ixx5 - Ixx6 - Ixx7 - a4^2*m4 - b5^2*m5 - b6^2*m6
-
15^2*m6 - b7^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 -
2*15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) - 2*b7*16*m7*cos(q6) -
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a34= Ixx5 + Ixx6 + Ixx7 + b5^2*m5 + b6^2*m6 + 15^2*m6 + b7^2*m7
+
15^2*m7 + 16^2*m7 + 2*15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) +
2*b7*16*m7*cos(q6) + 2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a35= Ixx6 + Ixx7 + b6^2*m6 + b7^2*m7 + 16^2*m7
+
15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) + 2*b7*16*m7*cos(q6) + b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a36= Ixx7 + b7^2*m7 + b7*16*m7*cos(q6) + b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a41= Ixx5 + Ixx6 + Ixx7 + b5^2*m5 + b6^2*m6 + 15^2*m6 + b7^2*m7
+
15^2*m7 + 16^2*m7 - 13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*cos(q3 - q4) -
12*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*cos(q2 + q3 - q4) -
b6*13*m6*cos(q3 - q4 - q5) - 13*16*m7*cos(q3 - q4 - q5) -
b6*12*m6*cos(q2 + q3 - q4 - q5) -
12*16*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5) + 2*b6*15*m6*cos(q5) +
2*15*16*m7*cos(q5) - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) -
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + 2*b7*16*m7*cos(q6) +
2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a42= Ixx5 + Ixx6 + Ixx7 + b5^2*m5 + b6^2*m6 + 15^2*m6 + b7^2*m7
+
15^2*m7 + 16^2*m7 - 13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*cos(q3 - q4) -
13*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q3 - q4 - q5) + 2*b6*15*m6*cos(q5) +
2*15*16*m7*cos(q5) - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) +
2*b7*16*m7*cos(q6) + 2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a43= Ixx5 + Ixx6 + Ixx7 + b5^2*m5 + b6^2*m6 + 15^2*m6 + b7^2*m7
+
15^2*m7 + 16^2*m7 + 2*15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) +
2*b7*16*m7*cos(q6) + 2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a44= -Ixx5 - Ixx6 - Ixx7 - b5^2*m5 - b6^2*m6 - 15^2*m6
-
b7^2*m7 - 15^2*m7 - 16^2*m7 - 2*15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) -
2*b7*16*m7*cos(q6) - 2*b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a45= -Ixx6 - Ixx7 - b6^2*m6 - b7^2*m7 - 16^2*m7
-
15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) - 2*b7*16*m7*cos(q6) - b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a46= -Ixx7 - b7^2*m7 - b7*16*m7*cos(q6) - b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

a51= Ixx6 + Ixx7 + b6^2*m6 + b7^2*m7 + 16^2*m7
-
13*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q3 - q4 - q5) -
12*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q2 + q3 - q4 - q5) + b6*15*m6*cos(q5) +
15*16*m7*cos(q5) - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) -
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + 2*b7*16*m7*cos(q6) +
b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a52= Ixx6 + Ixx7 + b6^2*m6 + b7^2*m7 + 16^2*m7
-
13*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q3 - q4 - q5) + 15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) -
b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6) + 2*b7*16*m7*cos(q6) +
b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a53= Ixx6 + Ixx7 + b6^2*m6 + b7^2*m7 + 16^2*m7
+
15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) + 2*b7*16*m7*cos(q6) + b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a54= -Ixx6 - Ixx7 - b6^2*m6 - b7^2*m7 - 16^2*m7
-
15*(b6*m6 + 16*m7)*cos(q5) - 2*b7*16*m7*cos(q6) - b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a55= -Ixx6 - Ixx7 - b6^2*m6 - b7^2*m7 - 16^2*m7 -
2*b7*16*m7*cos(q6) ;
a56= -Ixx7 - b7^2*m7 - b7*16*m7*cos(q6) ;

a61= Ixx7 + b7^2*m7 - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6)
-
b7*12*m7*cos(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + b7*16*m7*cos(q6) +
b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a62= Ixx7 + b7^2*m7 - b7*13*m7*cos(q3 - q4 - q5 - q6)
+
b7*16*m7*cos(q6) + b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a63= Ixx7 + b7^2*m7 + b7*16*m7*cos(q6) + b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;
a64= -Ixx7 - b7^2*m7 - b7*16*m7*cos(q6) - b7*15*m7*cos(q5 + q6) ;

```

```

a65= -Imz7 - b7^2*m7 - b7*16*m7*cos(q6) ;
a66= -Imz7 - b7^2*m7 ;

bb1= - a2*g*m2*sin(q1) - g*12*m3*sin(q1) - g*12*m4*sin(q1)
-
g*12*m5*sin(q1) - g*12*m6*sin(q1) - g*12*m7*sin(q1) -
a3*g*m3*sin(q1 + q2) - g*13*m4*sin(q1 + q2) -
g*13*m5*sin(q1 + q2) - g*13*m6*sin(q1 + q2) -
g*13*m7*sin(q1 + q2) - a4*g*m4*sin(q1 + q2 + q3) +
b5*g*m5*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
g*15*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
g*15*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
b6*g*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) +
g*16*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) +
b7*g*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5 - q6) -
12*(a3*m3 + 13*(m4 + m5 + m6 + m7))*sin(q2) + a4*m4*sin(q2 + q3) -
b5*m5*sin(q2 + q3 - q4) - 15*m6*sin(q2 + q3 - q4) -
15*m7*sin(q2 + q3 - q4) - b6*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
b7*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6))*dq2^2 -
a4*13*m4*sin(q3)*dq3^2 -
a4*12*m4*sin(q2 + q3)*dq3^2 +
b5*13*m5*sin(q3 - q4)*dq3^2 +
13*15*m6*sin(q3 - q4)*dq3^2 +
13*15*m7*sin(q3 - q4)*dq3^2 +
b5*12*m5*sin(q2 + q3 - q4)*dq3^2 +
12*15*m6*sin(q2 + q3 - q4)*dq3^2 +
12*15*m7*sin(q2 + q3 - q4)*dq3^2 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq3^2 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq3^2 +
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq3^2 +
12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq3^2 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3^2 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq3^2 -
2*b5*13*m5*sin(q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*13*15*m6*sin(q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*13*15*m7*sin(q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*b5*12*m5*sin(q2 + q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*12*15*m6*sin(q2 + q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*12*15*m7*sin(q2 + q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq4 -
2*13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq4 -
2*b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq3*
dq4 - 2*12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*
dq3*dq4 -
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3*
dq4 - 2*b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*
dq3*dq4 +
b5*13*m5*sin(q3 - q4)*dq4^2 +
13*15*m6*sin(q3 - q4)*dq4^2 +
13*15*m7*sin(q3 - q4)*dq4^2 +
b5*12*m5*sin(q2 + q3 - q4)*dq4^2 +
12*15*m6*sin(q2 + q3 - q4)*dq4^2 +
12*15*m7*sin(q2 + q3 - q4)*dq4^2 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq4^2 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq4^2 +
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq4^2 +
12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq4^2 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq4^2 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq4^2 -
2*b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq5 -
2*13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq5 -
2*b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq3*
dq5 - 2*12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*
dq3*dq5 -
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq3*dq5 -
2*15*16*m7*sin(q5)*dq3*dq5 -
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3*
dq5 - 2*b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*
dq3*dq5 -
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq5 +
2*b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq4*dq5 +
2*13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq4*dq5 +
2*b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq4*
dq5 + 2*12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*
dq4*dq5 +
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq4*dq5 +
2*15*16*m7*sin(q5)*dq4*dq5 +
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq4*
dq5 + 2*b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*
dq4*dq5 +
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq5 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq5^2 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq5^2 +
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq5^2 +
12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq5^2 +
b6*15*m6*sin(q5)*dq5^2 +
15*16*m7*sin(q5)*dq5^2 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5^2 +

```

```

b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq5^2 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5^2 -
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3*
dq6 - 2*b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*
dq3*dq6 - 2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq6 +
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq4* dq6 + 2*b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*
dq4*dq6 + 2*b7*16*m7*sin(q6)*dq4*dq6 +
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq6 + 2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5*
dq6 + 2*b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*
dq5*dq6 +
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq5*dq6 +
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5*dq6 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq6^2 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq6^2 +
b7*16*m7*sin(q6)*dq6^2 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6^2 -
2*dq1*(12*(a3*m3 + 13*(m4 + m5 + m6 + m7))*sin(q2) +
a4*m4*sin(q2 + q3) - b5*m5*sin(q2 + q3 - q4) -
15*m6*sin(q2 + q3 - q4) - 16*m7*sin(q2 + q3 - q4) -
b6*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) - 18*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
b7*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6))*dq2 +
(a4*13*m4*sin(q3) + a4*12*m4*sin(q2 + q3) - b5*13*m5*sin(q3 - q4) -
13*15*m6*sin(q3 - q4) - 13*15*m7*sin(q3 - q4) -
b5*12*m5*sin(q2 + q3 - q4) - 12*15*m6*sin(q2 + q3 - q4) -
12*15*m7*sin(q2 + q3 - q4) - b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5) -
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5) - b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) - b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6) -
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6))*dq3 + b5*13*m5*sin(q3 - q4)*dq4 + 13*15*m6*sin(q3 - q4)*dq4 +
13*15*m7*sin(q3 - q4)*dq4 +
b5*12*m6*sin(q2 + q3 - q4)*dq4 + 12*15*m6*sin(q2 + q3 - q4)*dq4 +
12*15*m7*sin(q2 + q3 - q4)*dq4 + b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq4 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq4 + b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq4 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq4 + b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 +
12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq5 +
b6*15*m6*sin(q5)*dq5 + 15*16*m7*sin(q5)*dq5 + b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq5 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq6 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq6 +
b7*16*m7*sin(q6)*dq6 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6) -
2*dq2*((a4*13*m4*sin(q3) + a4*12*m4*sin(q2 + q3) -
b5*13*m5*sin(q3 - q4) - 13*15*m6*sin(q3 - q4) -
13*15*m7*sin(q3 - q4) - b5*12*m5*sin(q2 + q3 - q4) -
12*15*m6*sin(q2 + q3 - q4) - 12*15*m7*sin(q2 + q3 - q4) -
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5) - 13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5) -
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) - 12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6) -
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6))*dq3 +
(13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) + 12*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q2 + q3 - q4) +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5) + 13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5) +
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) + 12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*dq4 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 + 13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 +
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq5 + 12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5)*dq5 +
b6*15*m6*sin(q5)*dq5 +
15*16*m7*sin(q5)*dq5 + b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq5 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5 + b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq6 +
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6)*dq6 + b7*16*m7*sin(q6)*dq6 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6) ;
bb2= - a3*g*m3*sin(q1 + q2) - g*13*m4*sin(q1 + q2) -
g*13*m5*sin(q1 + q2) - g*13*m6*sin(q1 + q2) -
g*13*m7*sin(q1 + q2) - a4*g*m4*sin(q1 + q2 + q3) +
b5*g*m5*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
g*15*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
g*15*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
b6*g*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) +
g*16*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) +
b7*g*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5 - q6) +
12*((a3*m3 + 13*(m4 + m5 + m6 + m7))*sin(q2) + a4*m4*sin(q2 + q3) -
b5*m5*sin(q2 + q3 - q4) - 15*m6*sin(q2 + q3 - q4) -
15*m7*sin(q2 + q3 - q4) - b6*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
b7*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6))*dq1^2 -
a4*13*m4*sin(q3)*dq3^2 +
b5*13*m5*sin(q3 - q4)*dq3^2 +
13*15*m6*sin(q3 - q4)*dq3^2 +
13*15*m7*sin(q3 - q4)*dq3^2 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq3^2 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq3^2 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3^2 -
2*b5*13*m5*sin(q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*13*15*m6*sin(q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*13*15*m7*sin(q3 - q4)*dq3*dq4 -
2*b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq4 -
2*13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq4 -
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3*

```

```

dq4 + b5*13*m5*sin(q3 - q4)*dq4^2 +
13*15*m6*sin(q3 - q4)*dq4^2 +
13*15*m7*sin(q3 - q4)*dq4^2 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq4^2 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq4^2 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq4^2 -
2*b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq5 -
2*13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq3*dq5 -
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq3*dq5 -
2*15*16*m7*sin(q5)*dq3*dq5 -
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3*
dq5 - 2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*
dq5 + 2*b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq4*
dq5 + 2*13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq4*
dq5 + 2*b6*15*m6*sin(q5)*dq4*
dq5 + 2*15*16*m7*sin(q5)*dq4*
dq5 + 2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*
dq4*dq5 +
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq5 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq5^2 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq5^2 +
b6*15*m6*sin(q5)*dq5^2 +
15*16*m7*sin(q5)*dq5^2 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5^2 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5^2 -
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq3*
dq6 - 2*b7*16*m7*sin(q6)*dq3*
dq6 - 2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*
dq6 + 2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*
dq4*dq6 +
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq4*dq6 +
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq6 +
2*b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5*
dq6 + 2*b7*16*m7*sin(q6)*dq5*
dq6 + 2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5*
dq6 + b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*
dq6^2 + b7*16*m7*sin(q6)*dq6^2 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6^2 -
2*dq1*(13*(a4*m4*sin(q3) -
(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) - b6*m6*sin(q3 - q4 - q5) -
16*m7*sin(q3 - q4 - q5) - b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*
dq3 + 13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) +
(b6*m6 + 16*m7)*sin(q3 - q4 - q5) +
b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*dq4 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 +
b6*15*m6*sin(q5)*dq5 +
15*16*m7*sin(q5)*dq5 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq6 +
b7*16*m7*sin(q6)*dq6 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6) -
2*dq2*(13*(a4*m4*sin(q3) -
(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) - b6*m6*sin(q3 - q4 - q5) -
16*m7*sin(q3 - q4 - q5) - b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*
dq3 + 13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) +
(b6*m6 + 16*m7)*sin(q3 - q4 - q5) +
b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*dq4 +
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 +
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5)*dq5 +
b6*15*m6*sin(q5)*dq5 +
15*16*m7*sin(q5)*dq5 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq5 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5 +
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6)*dq6 +
b7*16*m7*sin(q6)*dq6 +
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6) ;
bb3= - a4*g*m4*sin(q1 + q2 + q3) + b5*g*m5*sin(q1 + q2 + q3 -
q4) +
g*15*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
g*15*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4) +
b6*g*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) +
g*16*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) +
b7*g*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5 - q6) +
(a4*13*m4*sin(q3) + a4*12*m4*sin(q2 + q3) - b5*13*m5*sin(q3 - q4) -
13*15*m6*sin(q3 - q4) - 13*15*m7*sin(q3 - q4) -
b5*12*m5*sin(q2 + q3 - q4) - 12*15*m6*sin(q2 + q3 - q4) -
12*15*m7*sin(q2 + q3 - q4) - b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5) -
13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5) -
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) -
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6) -
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6))*dq1^2
+ 13*(a4*m4*sin(q3) - (b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) -
b6*m6*sin(q3 - q4 - q5) - 16*m7*sin(q3 - q4 - q5) -
b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*dq2^2 -
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq3*dq5 -
2*15*16*m7*sin(q5)*dq3*dq5 -
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq5 +
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq4*dq5 +

```

```

2*15*16*m7*sin(q5)*dq4*dq5 + ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq5 + ...
b6*15*m6*sin(q5)*dq5^2 + ...
15*16*m7*sin(q5)*dq5^2 + ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5^2 - ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq3*dq6 - ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq6 + ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq4*dq6 + ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq6 + ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq5*dq6 + ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5*dq6 + ...
b7*16*m7*sin(q6)*dq6^2 + ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6^2 + ...
2*dq1*(13*(m4*m4*sin(q3) - ...
(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) - b6*m6*sin(q3 - q4 - q5) - ...
16*m7*sin(q3 - q4 - q5) - b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))* ...
dq2 - b6*15*m6*sin(q5)*dq5 - ...
15*16*m7*sin(q5)*dq5 - ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5 - ...
b7*16*m7*sin(q6)*dq5 - ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6 - ...
2*dq2*(15*((b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + b7*m7*sin(q5 + q6)))* ...
dq5 + b7*m7*(16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))* ...
dq6) ;

bb4= - b5*g*m5*sin(q1 + q2 + q3 - q4) -
...
g*15*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4) - ...
g*15*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4) - ...
b6*g*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) - ...
g*16*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) - ...
b7*g*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + ...
(13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) + ...
12*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q2 + q3 - q4) + ...
b6*13*m6*sin(q3 - q4 - q5) + 13*16*m7*sin(q3 - q4 - q5) + ...
b6*12*m6*sin(q2 + q3 - q4 - q5) + ...
12*16*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5) + ...
b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6) + ...
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6))*dq1^2 ...
+ 13*((b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) + ...
(b6*m6 + 16*m7)*sin(q3 - q4 - q5) + ...
b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*dq2^2 + ...
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq3*dq5 + ...
2*15*16*m7*sin(q5)*dq3*dq5 + ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq5 - ...
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq4*dq5 - ...
2*15*16*m7*sin(q5)*dq4*dq5 - ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq5 - ...
b6*15*m6*sin(q5)*dq5^2 - ...
15*16*m7*sin(q5)*dq5^2 - ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5^2 + ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq3*dq6 + ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq6 - ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq4*dq6 - ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4*dq6 - ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq5*dq6 - ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq5*dq6 - ...
b7*16*m7*sin(q6)*dq6^2 - ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq6^2 + ...
2*dq2*(15*((b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + b7*m7*sin(q5 + q6)))* ...
dq5 + b7*m7*(16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))* ...
dq6) + 2*dq1* ...
(13*(b5*m5 + 15*(m6 + m7))*sin(q3 - q4) + ...
(b6*m6 + 16*m7)*sin(q3 - q4 - q5) + ...
b7*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6))*dq2 + ...
15*((b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + b7*m7*sin(q5 + q6))*dq5 + ...
b7*m7*(16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))*dq6) ;

bb5= - b6*g*m6*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5)
-
...
g*16*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5) - ...
b7*g*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + ...
(13*(b6*m6 + 16*m7)*sin(q3 - q4 - q5) + ...
12*(b6*m6 + 16*m7)*sin(q2 + q3 - q4 - q5) + b6*15*m6*sin(q5) + ...
15*16*m7*sin(q5) + b7*13*m7*sin(q3 - q4 - q5 - q6) + ...
b7*12*m7*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + b7*15*m7*sin(q5 + q6))* ...
dq1^2 + ...
(13*(b6*m6 + 16*m7)*sin(q3 - q4 - q5) + 15*(b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + ...
b7*m7*(13*sin(q3 - q4 - q5 - q6) + 15*sin(q5 + q6)))* ...
dq2^2 + b6*15*m6*sin(q5)*dq3^2 + ...
15*16*m7*sin(q5)*dq3^2 + ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3^2 - ...
2*b6*15*m6*sin(q5)*dq3*dq4 - ...
2*15*16*m7*sin(q5)*dq3*dq4 - ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq4 + ...
b6*15*m6*sin(q5)*dq4^2 + ...
15*16*m7*sin(q5)*dq4^2 + ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4^2 + ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq3*dq6 - ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq4*dq6 - ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq5*dq6 - ...
b7*16*m7*sin(q6)*dq6^2 + ...

```

```

2*dq1*((13*(b6*m6 + 16*m7)*sin(q3 - q4 - q5) + ...
15*(b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + ...
b7*m7*(13*sin(q3 - q4 - q5 - q6) + 15*sin(q5 + q6)))= ...
dq2 + 15*((b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + b7*m7*sin(q5 + q6))= ...
dq3 - b6*15*m6*sin(q5)*dq4 - ...
15*16*m7*sin(q5)*dq4 - ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4 + ...
b7*16*m7*sin(q6)*dq6 + ...
2*dq2*(15*((b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + b7*m7*sin(q5 + q6))= ...
dq3 - 15*((b6*m6 + 16*m7)*sin(q5) + b7*m7*sin(q5 + q6))= ...
dq4 + b7*16*m7*sin(q6)*dq6) ;

bb6= - b7*g*m7*sin(q1 + q2 + q3 - q4 - q5 - q6)
+
b7*m7*(13*sin(q3 - q4 - q5 - q6) + ...
12*sin(q2 + q3 - q4 - q5 - q6) + 16*sin(q6) + ...
15*sin(q5 + q6))*dq1^2 + ...
b7*m7*(13*sin(q3 - q4 - q5 - q6) + 16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))* ...
dq2^2 + b7*16*m7*sin(q6)*dq3^2 + ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3^2 - ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq3*dq4 - ...
2*b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq3*dq4 + ...
b7*16*m7*sin(q6)*dq4^2 + ...
b7*15*m7*sin(q5 + q6)*dq4^2 - ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq3*dq5 + ...
2*b7*16*m7*sin(q6)*dq4*dq5 + ...
b7*16*m7*sin(q6)*dq5^2 + ...
2*b7*m7*dq1*((13*sin(q3 - q4 - q5 - q6) + ...
16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))*dq2 + ...
(16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))*dq3 - ...
16*sin(q6)*dq4 - 15*sin(q5 + q6)*dq4 - ...
16*sin(q6)*dq5) + ...
2*b7*m7*dq2*((16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))* ...
dq3 - (16*sin(q6) + 15*sin(q5 + q6))* ...
dq4 - 16*sin(q6)*dq5) ;

%% Montando a matriz [A] e os vetores {bb} e {u}
A=[ a11 a12 a13 a14 a15 a16
a21 a22 a23 a24 a25 a26
a31 a32 a33 a34 a35 a36
a41 a42 a43 a44 a45 a46
a51 a52 a53 a54 a55 a56
a61 a62 a63 a64 a65 a66];
bb=[bb1 bb2 bb3 bb4 bb5 bb6]';
disp('Calculando.....')
% Resolucao do Sistema
u=A\ddq-bb;
% Calculando os torques nas juntas
uB=-u(1) ;
uC=-u(2) ;
uD=-u(3) ;
uF=-u(4) ;
uG=-u(5) ;
uB=-u(6) ;
if perna_balanco=='dir'
uB=-u(1) ;
uG=-u(2) ;
uF=-u(3) ;
uD=-u(4) ;
uC=-u(5) ;
uB=-u(6) ;
end
%% Posicao das juntas
if perna_balanco=='esq'
PAr=xd; PAr=0;
PBx=xd; PBy=11;
PCx=PBx -12*sin(q1);
PCy=PBy +12*cos(q1);
PDx=PCx -13*sin(q1+q2) ;
PDy=PCy +13*cos(q1+q2) ;
PEx=PDx; PEy=PDy;
PFx=PEx; PFy=PEy;
PGx=PFx +15*sin(q1+q2+q3-q4);
PGy=PFy -15*cos(q1+q2+q3-q4);
PHx=PGx +16*sin(q1+q2+q3-q4-q5);
PHY=PGy -16*cos(q1+q2+q3-q4-q5);
PIx=PHx +17*sin(q1+q2+q3-q4-q5-q6);
PIy=PHY -17*cos(q1+q2+q3-q4-q5-q6);
PERx=PIx -14*sin(q1+q2+q3);
PERy=PIy +14*cos(q1+q2+q3);
if rem(i,n)==1,xd=PERx;xe=PERx;end
end
if perna_balanco=='dir'
PIx=xe; PIy=0;
PBx=xe; PBy=11;
PGx=PBx -12*sin(q1);
PGy=PBy +12*cos(q1);
PFx=PGx -13*sin(q1+q2) ;
PFy=PGy +13*cos(q1+q2) ;
PEx=PFx; PEy=PFy;
PDx=PEx; PDy=PEy;

```



```

% coef da conversao torque voltagem
kt=1; Kxt=1.683;
% K - relaciona q (coord. relativa) com teta (coord. absoluta) .
K=[-1, 1,0,0,0,0,0 ; % q=[X]teta
    0,-1,1,0,0,0,0 ;
    0,0,-1,1,0,0,0 ;
    0,0,0,1,-1,0,0 ;
    0,0,0,0,1,-1,0 ;
    0,0,0,0,0,1,-1];
% Kt0 - relaciona q (coord. relativa) com teta (coord. absoluta) fix.
Kt0=[ 1,0,0,0,0,0,0 ; % teta0=0
    -1,1,0,0,0,0,0 ;
    0,-1,1,0,0,0,0 ;
    0,0,1,-1,0,0,0 ;
    0,0,0,1,-1,0,0 ;
    0,0,0,0,1,-1,0];
% E - matriz 5x5 com os termos de atrito para cd junta.
Ea=kt*K';
% [p] - matriz que multiplica o termo teta dois pontos. var pag. T4

p00=I0+I1b+m0*a0^2+10^2*(m1+m2+m3+m4+m5+m6);
p01=m1*10*a1+10*11*(m2+m3+m4+m5+m6);
p02=m2*10*a2+10*12*(m3+m4+m5+m6); p03=m3*10*a3;
p04=-m4*b4*10-10*14*(m5+m6); p05=-m5*10*b5-10*15*m6;
p06=-10*b6*m6; p10=p01;
p11=I1+I1b+I2b+m1*a1^2+11^2*(m2+m3+m4+m5+m6);
p12=m2*11*a2+11*12*(m3+m4+m5+m6); p13=m3*11*a3;
p14=-m4*11*b4-11*14*(m5+m6); p15=-m5*11*b5-11*15*m6;
p16=-m6*11*b6; p20=p02; p21=p12;
p22=I2+I2b+I3b+m2*a2^2+12^2*(m3+m4+m5+m6); p23=m3*12*a3;
p24=-m4*12*b4-12*14*(m5+m6); p25=-m5*12*b5-m6*12*15;
p26=-m6*12*b6; p30=p03; p31=p13; p32=p23; p33=I3+I3b+I4b+m3*a3^2;
p34=-I4b; p35=0; p36=0; p40=p04; p41=p14; p42=p24; p43=p34;
p44=I4+I4b+I5b+m4*b4^2+14^2*(m5+m6); p45=m5*14*b5+m6*14*15;
p46=m6*14*b6; p50=p05; p51=p15; p52=p25; p53=p35; p54=p45;
p55=I5+I5b+I6b+m5*b5^2+m6*15^2; p56=m6*15*b6; p60=p06; p61=p16;
p62=p26; p63=p36; p64=p46; p65=p56; p66=I6+I6b+m6*b6^2;
% ++++++ Integracao Numerica
fim=0; n=n_divisoes;
delta_t=(tempo-t)/n; %[n] passo da integracao
intervalo_arma=1;
arq3=fopen('uillag.dat','w');
arq2=fopen('p1lag.dat','w');
%Carrega os dados gerados por Robo3.m
load Q.dat;
load dQ.dat;
load ddQ.dat;
load T.dat;
i=1;n_final= n*(2 + num_passos) + 1

while i<=n_final,
    clf
    % Mundaca da perna
    if rem(fix((i-2)/n),2)==0,perna_balanco='esq';end
    if rem(fix((i-2)/n),2)==1,perna_balanco='dir';end
    u=0;
    %Valores q1, dq1, ddq1 e uH
    q1= Q(i,1) *pi/180; %[rad]
    q2= Q(i,2) *pi/180; %[rad]
    q3= Q(i,3) *pi/180; %[rad]
    q4= Q(i,4) *pi/180; %[rad]
    q5= Q(i,5) *pi/180; %[rad]
    q6= Q(i,6) *pi/180; %[rad]
    dq1= dQ(i,1) *pi/180; %[rad/s]
    dq2= dQ(i,2) *pi/180; %[rad/s]
    dq3= dQ(i,3) *pi/180; %[rad/s]
    dq4= dQ(i,4) *pi/180; %[rad/s]
    dq5= dQ(i,5) *pi/180; %[rad/s]
    dq6= dQ(i,6) *pi/180; %[rad/s]
    ddq1= ddQ(i,1) *pi/180; %[rad/s^2]
    ddq2= ddQ(i,2) *pi/180; %[rad/s^2]
    ddq3= ddQ(i,3) *pi/180; %[rad/s^2]
    ddq4= ddQ(i,4) *pi/180; %[rad/s^2]
    ddq5= ddQ(i,5) *pi/180; %[rad/s^2]
    ddq6= ddQ(i,6) *pi/180; %[rad/s^2]
    if perna_balanco=='dir'
        10_temp=10; 11_temp=11; 12_temp=12; 14_temp=14; 15_temp=15; 16_temp=16;
        a0_temp=a0; a1_temp=a1; a2_temp=a2; a4_temp=a4; a5_temp=a5; a6_temp=a6;
        b0_temp=b0; b1_temp=b1; b2_temp=b2; b4_temp=b4; b5_temp=b5; b6_temp=b6;
        10=10_temp; 11=11_temp; 12=12_temp; 14=14_temp; 15=15_temp; 16=16_temp;
        a0=a0_temp; a1=a1_temp; a2=a2_temp; a4=a4_temp; a5=a5_temp; a6=a6_temp;
        b0=b0_temp; b1=b1_temp; b2=b2_temp; b4=b4_temp; b5=b5_temp; b6=b6_temp;

        q1_temp= q1; q2_temp= q2; q3_temp= q3; q4_temp= q4; q5_temp= q5; q6_temp= q6;
        dq1_temp= dq1; dq2_temp= dq2; dq3_temp= dq3; dq4_temp= dq4; dq5_temp= dq5; dq6_temp= dq6;
        ddq1_temp=ddq1; ddq2_temp=ddq2; ddq3_temp=ddq3; ddq4_temp=ddq4; ddq5_temp=ddq5; ddq6_temp=ddq6;
        q1= q6_temp; q2= q5_temp; q3= q4_temp; q4= q3_temp; q5= q2_temp; q6= q1_temp;
        dq1= dq6_temp; dq2= dq5_temp; dq3= dq4_temp; dq4= dq3_temp; dq5= dq2_temp; dq6= dq1_temp;
        ddq1=ddq6_temp; ddq2=ddq5_temp; ddq3=ddq4_temp; ddq4=ddq3_temp; ddq5=ddq2_temp; ddq6=ddq1_temp;
    end
    teta=inv(Kt0)*[q1 q2 q3 q4 q5 q6]';
    t0=0;

```

```

t1=teta(1);
t2=teta(2);
t3=teta(3);
t4=teta(4);
t5=teta(5);
t6=teta(6);
dt=inv(Kt0)*[dq1 dq2 dq3 dq4 dq5 dq6]';
dt0=0;
dt1=dt(1);
dt2=dt(2);
dt3=dt(3);
dt4=dt(4);
dt5=dt(5);
dt6=dt(6);
dt=[dt0 dt1 dt2 dt3 dt4 dt5 dt6]';
ddt=inv(Kt0)*[ddq1 ddq2 ddq3 ddq4 ddq5 ddq6]';
ddt=[0 ddt'];
ddt0=ddt(1);
ddt1=ddt(2);
ddt2=ddt(3);
ddt3=ddt(4);
ddt4=ddt(5);
ddt5=ddt(6);
ddt6=ddt(7);
% considerando que a eq mov tem a seguinte forma :
%
% [P]=ddt + [X]*dt^2 + [DY]*dt + [G] = [K]*u
%
% ou
%
% [P]*tpp = [K]*u - ( [X]*dt^2 + [DY]*dt + [G] ) = [ b ]
%
% onde [b] = 7x1

P=[p00 , -I1b*cos(t0-t1)*p01, p02*cos(t0-t2) , p03*cos(t0-t3) , p04*cos(t0-t4) , p05*cos(t0-t5) , p06*cos(t0-t6);
p10*cos(t0-t1)-I1b , p11 , cos(t1-t2)*p12-I2b, p13*cos(t1-t3) , p14*cos(t1-t4) , p15*cos(t1-t5) , p16*cos(t1-t6);
p20*cos(t0-t2) , p21*cos(t1-t2)-I2b, p22 , p23*cos(t2-t3)-I3b, p24*cos(t2-t4) , p25*cos(t2-t5) , p26*cos(t2-t6);
p30*cos(t0-t3) , p31*cos(t1-t3) , p32*cos(t2-t3)-I3b, p33 , p34 , 0 , 0 ;
p40*cos(t0-t4) , p41*cos(t1-t4) , p42*cos(t2-t4) , p34 , p44 , p45*cos(t4-t5)-I5b, p46*cos(t4-t6);
p50*cos(t0-t5) , p51*cos(t1-t5) , p52*cos(t2-t5) , 0 , p54*cos(t4-t5)-I5b, p55 , p56*cos(t5-t6)-I6b;
p60*cos(t0-t6) , p61*cos(t1-t6) , p62*cos(t2-t6) , 0 , p64*cos(t4-t6) , p65*cos(t5-t6)-I6b, p66 ];

H=[ 0 , p01*sin(t0-t1), p02*sin(t0-t2), p03*sin(t0-t3), p04*sin(t0-t4), p05*sin(t0-t5), p06*sin(t0-t6);
-p01*sin(t0-t1) , 0 , p12*sin(t1-t2), p13*sin(t1-t3), p14*sin(t1-t4), p15*sin(t1-t5), p16*sin(t1-t6);
-p02*sin(t0-t2) , -p12*sin(t1-t2), 0 , p23*sin(t2-t3), p24*sin(t2-t4), p25*sin(t2-t5), p26*sin(t2-t6);
-p03*sin(t0-t3) , -p13*sin(t1-t3), -p23*sin(t2-t3), 0 , 0 , 0 , 0 ;
-p04*sin(t0-t4) , -p14*sin(t1-t4), -p24*sin(t2-t4), 0 , 0 , p45*sin(t4-t5), p46*sin(t4-t6);
-p05*sin(t0-t5) , -p15*sin(t1-t5), -p25*sin(t2-t5), 0 , -p45*sin(t4-t5), 0 , p56*sin(t5-t6);
-p06*sin(t0-t6) , -p16*sin(t1-t6), -p26*sin(t2-t6), 0 , -p64*sin(t4-t6), -p56*sin(t5-t6), 0 ];

G=g*[-sin(t0)*(m0*a0+10*(m1+m2+m3+m4+m5+m6));
-sin(t1)*(m1*a1+11*(m2+m3+m4+m5+m6));
-sin(t2)*(m2*a2+12*(m3+m4+m5+m6));
-sin(t3)*m3*a3;
sin(t4)*(m4*b4+14*(m5+m6));
sin(t5)*(m5*b5+15*m6);
sin(t6)*m6*b6];

DY=[D1 , -D1 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 ;
-D1 , D1+D2, -D2, 0 , 0 , 0 , 0 ;
0 , -D2 , D2+D3, -D3, 0 , 0 , 0 ;
0 , 0 , -D3, D3+D4, -D4, 0 , 0 ;
0 , 0 , 0 , -D4, D4+D5, -D5, 0 ;
0 , 0 , 0 , 0, -D5, D5+D6, -D6;
0 , 0 , 0 , 0 , 0 , -D6, D6];

E=[ 0 -1 0 0 0 0 0 ;
0 1 -1 0 0 0 0 ;
0 0 1 -1 0 0 0 ;
0 0 0 1 -1 0 0 ;
0 0 0 0 1 1 0 ;
0 0 0 0 0 -1 1 ;
0 0 0 0 0 0 -1 1 ;
0 0 0 0 0 0 0 -1];

E_0=[ 1 -1 0 0 0 0 0 ;
0 1 -1 0 0 0 0 ;
0 0 1 1 0 0 0 ;
0 0 0 -1 1 0 0 ;
0 0 0 0 -1 1 1 ;
0 0 0 0 0 0 -1 1 ;
0 0 0 0 0 0 -1 1];

bs0=E(1,:)*u-(H(1,:)*dt.^2+DY(1,:)*dt+G(1));
bs1=E(2,:)*u-(H(2,:)*dt.^2+DY(2,:)*dt+G(2));
bs2=E(3,:)*u-(H(3,:)*dt.^2+DY(3,:)*dt+G(3));
bs3=E(4,:)*u-(H(4,:)*dt.^2+DY(4,:)*dt+G(4));
bs4=E(5,:)*u-(H(5,:)*dt.^2+DY(5,:)*dt+G(5));
bs5=E(6,:)*u-(H(6,:)*dt.^2+DY(6,:)*dt+G(6));
bs6=E(7,:)*u-(H(7,:)*dt.^2+DY(7,:)*dt+G(7));
% Montando o vetor {b}
b=[bs0 bs1 bs2 bs3 bs4 bs5 bs6]';
% Resolucao do Sistema => u=[P]\ddt + resto

```



```

plot(ui(1:nop),ui(:,2),'y+') title('u2 - tornozelo fixo') figure
hold plot(ui(1:nop),ui(:,3),'ro') plot(ui(1:nop),ui(:,3),'y+')
title('u3 - joelho fixo') figure hold
plot(ui(1:nop),ui(:,4),'ro') plot(ui(1:nop),ui(:,4),'y+')
title('u4 - quadril fixo') figure hold
plot(ui(1:nop),ui(:,5),'ro') plot(ui(1:nop),ui(:,5),'y+')
title('u5 - quadril em balanço') figure hold
plot(ui(1:nop),ui(:,6),'ro') plot(ui(1:nop),ui(:,6),'y+')
title('u6 - joelho em balanço') figure hold
plot(ui(1:nop),ui(:,7),'ro') plot(ui(1:nop),ui(:,7),'y+')
title('u7 - tornozelo em balanço')
c% grafico de linha
load uilag.dat; uil=uilag; load uilnej.dat; ui=uilnej;
nop=size(ui,1); plot(uil(:,2)-ui(:,2),'y-') title('u2 - Tornozelo
direito') figure plot(uil(:,3)-ui(:,3),'y-') title('u3 - Joelho
direito') figure plot(uil(:,4)-ui(:,4),'y-') title('u4 - Quadril
direito') figure plot(uil(:,5)-ui(:,5),'y-') title('u5 - Quadril
esquerdo') figure plot(uil(:,6)-ui(:,6),'y-') title('u6 - Joelho
esquerdo') figure plot(uil(:,7)-ui(:,7),'y-') title('u7 -
Tornozelo esquerdo')

```

B.4 Programa rb2g*.m

```

%*****
% Programa Rb2gd
%
% Simulacao Cinematica do giro a direita do RB-2.
%
% Carlos Andre Dias Bezerra
% Baseado em robo3.m Autor: Daniel Carmona de Campos 950384
%
% QERA OS VETORES Q2gd*.DAT % pronto para o rb-2
% Q7 - quadril direito
%
% UNICAMP / FEM / DMC
%
% versao 13.10.2001, 15.10.2001, 17.10.01, 24.10.2001, 08.11.2001
%
c%*****
disp('Giro 90 graus do RB-2 a Direita'); dg=input('Entre com o
incremento do angulo : '); in=input('Entre com o intervalo da
pausa [s] : ');
ts=clock; %contagem do tempo real da simulacao
gd=linspace(0,90,(90/dg+1)); xi=-0.255;xf=0.255; yi=0;yf=0.51;
% Dados da Simulacao
num_passos=0; %numero de passos no regime permanente (comecando com a PD)
transitorio=1; %Realiza o regime transitorio (inicio) se transitorio=1
permanente=0; %Realiza o regime permanente se permanente=1
elipse=0; %pes fazem trajetoria eliptica se elipse=0, senao fazem uma senoide
pelve_reta=0; %pelve permanece reta se pelve_reta=1, senao faz uma senoide
n_divisoes=30; %numero de divisoes em cada passo
A=20e-3; %amplitude que a perna levanta do chao
d=2e-2; %distancia de um passo. No permanente:passada=2*passo
yE_final=401e-3;%395e-3;%altura pelve final regime transitorio
tam_tronco=49.5e-3; %altura do tronco a partir da pelve
pelve=9e-3; %amplitude da movimentacao da pelve (a partir de yE_final)
l1= 49.5e-3; %altura do pe',ponto A - B [m]
l1a= 140e-3; %frente do pe' a partir de A [m]
l1b= -140e-3; %traseira do pe' a partir de A [m]
l2 = 181.82e-3; %canela,ponto B - C [m]
l3 = 181.82e-3; %coxa, ponto C - D [m]
l4 = 130e-3; %pelve, ponto D - E [m]
l5 = 181.82e-3; %coxa, ponto E - F [m]
l6 = 181.82e-3; %canela,ponto F - G [m]
l7 = l1; %altura do pe',ponto H - I [m]
l7a= l1a; %frente do pe' a partir de I [m]
l7b= l1b; %traseira do pe' a partir de I [m]
ox=61.35e-3; PA=[0 0 -103.2e-3];PB=[0 l1 -61.35e-3];PC=[0 l1+l2
-61.35e-3];PD=[0 l1+l2+l3 -61.35e-3];PE=[0 PD(1,2) 0];PF=[0
PD(1,2) -PD(1,3)];PG=[0 l6+l7 -PG(1,3)];PH=[0 l7 -PB(1,3)];PI=[0
0 -PA(1,3)];
% configurando as figuras
scrsz = get(0,'ScreenSize');
hmd=0;fts=10;
figure(hmd+1);%setsize(300,240);
set(hmd+1,'Position',[scrsz(3)/2 scrsz(3)/2-5 scrsz(4)/2-45])
set(gca,'FontSize',fts)
figure(hmd+2);%setsize(300,240);
set(hmd+2,'Position',[ scrsz(3)/2 scrsz(4)/25 scrsz(3)/2-5 scrsz(4)/2.5])
figure(1)
%Desenhando as pernas
line([PB(1,1) PC(1,1)],[PB(1,2) PC(1,2)],'color','w');
line([PC(1,1) PE(1,1)],[PC(1,2) PE(1,2)],'color','w');
line([PE(1,1) PG(1,1)],[PE(1,2) PG(1,2)],'color','r');
line([PG(1,1) PH(1,1)],[PH(1,2) PE(1,2)],'color','r');

```

```

line([PB(1,1) PB(1,1)], [PB(1,2) PB(1,2)+tam_tronco], 'color', 'b');
line([PB(1,1) PB(1,1)+11a], [PB(1,2)-11 PB(1,2)-11], 'color', 'w');
line([PB(1,1) PB(1,1)+11b], [PB(1,2)-11 PB(1,2)-11], 'color', 'w');
line([PB(1,1) PB(1,1)], [PB(1,2) PB(1,2)-11], 'color', 'w');
line([PB(1,1) PB(1,1)+17a], [PB(1,2)-17 PB(1,2)-17], 'color', 'r');
line([PB(1,1) PB(1,1)+17b], [PB(1,2)-17 PB(1,2)-17], 'color', 'r');
line([PB(1,1) PB(1,1)], [PB(1,2) PB(1,2)-17], 'color', 'r');
line([0 dist_final], [11 11]);
% Iniciando a perna l=1 esq e l=-1 dir
clf; hold; axis([xi xf yi yf]);

for j=1:(90/dg), % j = no vezes que a perna levanta do solo
if j==1,
    xE_ini=0;        yB_ini=11;        xE_ini=0;
    yE_ini=11 + 2*12;    xH_ini=0;        yH_ini=11;
else % mostra o deslocamento p/ frente
    xB_ini=xB;        yB_ini=yB;        xE_ini=xE;
    yE_ini=yE;        xH_ini=xH;        yH_ini=yH;
end
for i=1:n_divisoes, clc % para a 1a perna que levanta do chao
figure(1); axis([xi xf yi yf]);
    x=i*(d/2)/n_divisoes;
    y=((yE_ini-yE_final)/(d/2)^2)*x^2 - 2*((yE_ini-yE_final)/(d/2))*x + yE_ini;
    xE=xE_ini - x; % desloca a pelve
    yE=y;
    x2=i*d/n_divisoes;
    if ellipse ==1
        y2=sqrt(1-2*(1-(x2-d/2)^2/(d/2)^2));
    else
        y2=A*abs(sin(pi*x2/d));
    end
    xB=xH_ini; yB=yH_ini; id=1; ie=0;
    xB=xB_ini - x2; yB=yB_ini + y2; B=[xB yB];
    E=[xE yE]; H=[xH yH];
    q1=angle1gd(E,B,12); % [graus]
    q2=angle2(E,B,12); % [graus]
    q6=angle1gd(E,H,12); % [graus]
    q5=angle2(E,H,12); % [graus]
    q3=-(q1+q2); % [graus]
    q4=-(q5+q6); % [graus]
    q7=0; q8=0; Q1=[q1 q1]; Q2=[q2 q2];
    Q3=[q3 q3]; Q4=[q4 q4];
    Q5=[q5 q5]; Q6=[q6 q6];
    Q7=[q7 q7]; Q8=[q8 q8];
    q1=q1*(pi/180); % angulos em RADIANS
    q2=q2*(pi/180); q3=q3*(pi/180); q4=q4*(pi/180); q5=q5*(pi/180); q6=q6*(pi/180);
    xC= xB-12*sin(q1); yC= yB+12*cos(q1); xG= xB-15*sin(q6); yG= yB+15*cos(q6);
    C=[xC yC]; G=[xG yG];
    %Desenhando as pernas
    line([xB xC], [yB yC], 'color', 'w'); plot(xB, yB, 'wo');
    line([xC xG], [yC yG], 'color', 'w'); plot(xC, yC, 'wo');
    line([xB xG], [yB yG], 'color', 'r'); plot(xG, yG, 'ro');
    line([xB xH], [yB yH], 'color', 'r'); plot(xH, yH, 'ro');
    line([xB xE], [yB yE+tam_tronco], 'color', 'w');
    line([xB xB+11a], [yB-11 yB-11], 'color', 'w');
    line([xB xB+11b], [yB-11 yB-11], 'color', 'w');
    line([xB xB], [yB yB-11], 'color', 'w');
    line([xB xB+17a], [yB-17 yB-17], 'color', 'r');
    line([xB xB+17b], [yB-17 yB-17], 'color', 'r');
    line([xB xH], [yB yB-17], 'color', 'r');
    line([0 dist_final], [11 11]);
    PA=[PA; xB yB-11 PA(1,3)];
    PB=[PB; B PB(1,3)];
    PC=[PC; C PC(1,3)];
    PD=[PD; E PD(1,3)];
    PE=PD;
    PF=PE;
    PG=[PG; G PG(1,3)];
    PH=[PH; H PH(1,3)];
    PI=[PI; xH yH-17 PI(1,3)];
    pause(1a);
if i<n_divisoes, figure(1); clf; hold; axis([xi xf yi yf]); end
tv=size(Q1,2);
if i>n_divisoes/2,
    Q7(tv-1)=dg; Q8(tv-1)=0; ai=dg;
else
    Q7(tv-1)=0; Q8(tv-1)=0; ai=0;
end
% =====
figure(2); clf; hold; axis([xi xf -0.2 .2]);
% Desenhando o pe' esquerdo
alf=1-(j-1)*dg)*pi/180;
q1r=cos(alf)*[xB+17a xB+17a xB+17a-.02 xB+17a-.02]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox);
q1s=sin(alf)*[xB+17a xB+17a xB+17a-.02 xB+17a-.02]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox)+ox;
q2r=cos(alf)*[xB+17a-.02 xB+17a-.02 xB+17a-.251 xB+17a-.251]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox);
q2s=sin(alf)*[xB+17a-.02 xB+17a-.02 xB+17a-.251 xB+17a-.251]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox)+ox;
q3r=cos(alf)*[xB+17a-.12 xB+17a-.12 xB+17a-.178 xB+17a-.178]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0837 PI(1,3)-.0275]-ox);
q3s=sin(alf)*[xB+17a-.12 xB+17a-.12 xB+17a-.178 xB+17a-.178]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0837 PI(1,3)-.0837 PI(1,3)-.0275]-ox)+ox;
q4r=cos(alf)*[xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.251]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox);
q4s=sin(alf)*[xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.251]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox)+ox;
q5r=cos(alf)*[xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.286 xB+17a-.286]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox);
q5s=sin(alf)*[xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.286 xB+17a-.286]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox)+ox;

```

```

fill(q1x,q1z,'r');fill(q2x,q2z,'r');fill(q3x,q3z,'r');fill(q4x,q4z,'r');fill(q5x,q5z,'r');
%Desenhando o pe DIREITO
alf=1+(j-1)*dg)*pi/180;
q1x=sin(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a xB+11a xB+11a-.025 xB+11a-.025]-sin(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q1z=-cos(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a xB+11a xB+11a-.025 xB+11a-.025]+sin(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q2x=sin(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.025 xB+11a-.025 xB+11a-.035 xB+11a-.035]-sin(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
q2z=-cos(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.025 xB+11a-.025 xB+11a-.035 xB+11a-.035]+sin(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
q3x=sin(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.035 xB+11a-.035 xB+11a-.266 xB+11a-.266]-sin(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q3z=-cos(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.035 xB+11a-.035 xB+11a-.266 xB+11a-.266]+sin(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q4x=sin(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.108 xB+11a-.108 xB+11a-.166 xB+11a-.166]-sin(alf)*([PA(1,3)+.0837 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0837]);
q4z=-cos(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.108 xB+11a-.108 xB+11a-.166 xB+11a-.166]+sin(alf)*([PA(1,3)+.0837 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0837]);
q5x=sin(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.266 xB+11a-.266 xB+11a-.266 xB+11a-.266]-sin(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
q5z=-cos(alf)*cos(cos(alf)*[xB+11a-.266 xB+11a-.266 xB+11a-.266 xB+11a-.266]+sin(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
fill(q1x,q1z,'r');fill(q2x,q2z,'r');fill(q3x,q3z,'r');fill(q4x,q4z,'r');fill(q5x,q5z,'r');
axis('square')
hold off
% =====
end % end for i
clf;
xB_ini=xB; yB_ini=yB;
xE_ini=xR; yE_ini=yR;
xB_ini=xB; yB_ini=yB;

for i=1:n_divisoes,clc
figure(1);axis([xi xf yi yf]);
% Calculando os pontos E, B e H
r=i*(d/2)/n_divisoes;
y=((yE_ini-yE_final)/(d/2)^2)*x^2 -2*((yE_ini-yE_final)/(d/2))*x + yE_ini;
xE=xR_ini -x; % desloca a palva
yE=y;
x2=i*d/n_divisoes;
if ellipse ==1
y2=sqrt(A^2*(1-(x2-d/2)^2/(d/2)^2));
else
y2=A*abs(sin(pi*x2/d));
end
xB=xB_ini; yB=yB_ini;
xH=xR_ini - x2; yH=yB_ini + y2;
B=[xB yB]; E=[xE yE]; H=[xH yH];
q1=angle(gd(E,B,12)); %[graus]
q2=angle(gd(E,B,12)); %[graus]
q6=angle(gd(E,H,12)); %[graus]
q5=angle(gd(E,H,12)); %[graus]
q3=(q1+q2); %[graus]
q4=(q5+q6); %[graus]
q7=0;q8=0;
Q1=[Q1 q1];Q2=[Q2 q2];Q3=[Q3 q3];Q4=[Q4 q4];Q5=[Q5 q5];Q6=[Q6 q6];Q7=[Q7 q7];Q8=[Q8 q8];
q1=q1*(pi/180); %angulos em RADIANS
q2=q2*(pi/180); q3=q3*(pi/180); q4=q4*(pi/180);
q5=q5*(pi/180); q6=q6*(pi/180);
x0= xB-12*sin(q1); y0= yB+12*cos(q1); x0= xH-15*sin(q6);
y0= yH+15*cos(q6); C=[x0 y0]; G=[x0 y0];
line([xB x0],[yB y0],'color','w');plot(xB,yB,'wo')
line([x0 xE],[y0 yE],'color','w');plot(x0,y0,'wo')
line([xE x0],[yE y0],'color','r');plot(xE,yE,'ro')
line([x0 xH],[y0 yH],'color','r');plot(xH,yH,'ro')
line([xE xE],[yE yE+tan_tromco], 'color','w');
line([xB xB+11a],[yB-11 yB-11], 'color','w');
line([xB xB+11b],[yB-11 yB-11], 'color','w');
line([xB xB],[yB yB-11], 'color','w');
line([xE xH+17a],[yH-17 yH-17], 'color','r');
line([xE xH+17b],[yH-17 yH-17], 'color','r');
line([xE xH],[yH yH-17], 'color','r');
line([O dist_final],[11 11]);
PA=[PA; xB yB-11 PA(1,3)];PB=[PB; B PB(1,3)];PC=[PC; C PC(1,3)];PD=[PD; E PD(1,3)];
PE=[PE; xE yE];PF=[PF; G PG(1,3)];PH=[PH; H PH(1,3)];PI=[PI; xH yH-17 PI(1,3)];
pause(1n);if i<n_divisoes,figure(1);clf;hold;axis([xi xf yi yf]);end
% =====
tv=size(Q1,2);
if i>n_divisoes/2,
Q7(tv-1)=0;Q8(tv-1)=0;
ce=dg;
else
Q7(tv-1)=-dg;Q8(tv-1)=0;
ce=0;
end
figure(2);clf;hold;axis([xi xf -0.2 .2]);
% Desenhando o pe' esquerdo
alf=1+(ce+(j-1)*dg)*pi/180;
q1x=cos(alf)*[xB+17a xB+17a xB+17a-.02 xB+17a-.02]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox);
q1z=sin(alf)*[xB+17a xB+17a xB+17a-.02 xB+17a-.02]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox)+ox;
q2x=cos(alf)*[xB+17a-.02 xB+17a-.02 xB+17a-.251 xB+17a-.251]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox);
q2z=sin(alf)*[xB+17a-.02 xB+17a-.02 xB+17a-.251 xB+17a-.251]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox)+ox;
q3x=cos(alf)*[xB+17a-.12 xB+17a-.12 xB+17a-.178 xB+17a-.178]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0837 PI(1,3)-.0837 PI(1,3)-.0275]-ox);
q3z=sin(alf)*[xB+17a-.12 xB+17a-.12 xB+17a-.178 xB+17a-.178]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0837 PI(1,3)-.0837 PI(1,3)-.0275]-ox)+ox;
q4x=cos(alf)*[xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.261 xB+17a-.261]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox);
q4z=sin(alf)*[xB+17a-.251 xB+17a-.251 xB+17a-.261 xB+17a-.261]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.1739 PI(1,3)-.1739 PI(1,3)]-ox)+ox;
q5x=cos(alf)*[xB+17a-.261 xB+17a-.261 xB+17a-.286 xB+17a-.286]-sin(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox);
q5z=sin(alf)*[xB+17a-.261 xB+17a-.261 xB+17a-.286 xB+17a-.286]+cos(alf)*([PI(1,3) PI(1,3)-.0275 PI(1,3)-.0275 PI(1,3)]-ox)+ox;
fill(q1x,q1z,'r');fill(q2x,q2z,'r');fill(q3x,q3z,'r');fill(q4x,q4z,'r');fill(q5x,q5z,'r');
%Desenhando o pe DIREITO
alf=1+(id*(dg/n_divisoes)+(j-1)*dg)*pi/180;

```

```

q1x=sin(alf)*ox+cos(alf)*[xB+11a xB+11a xB+11a-.025 xB+11a-.025]-sin(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q1z=-cos(alf)*ox+ox+sin(alf)*[xB+11a xB+11a xB+11a-.025 xB+11a-.025]+cos(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q2x=sin(alf)*ox+cos(alf)*[xB+11a-.025 xB+11a-.025 xB+11a-.035 xB+11a-.035]-sin(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
q2z=-cos(alf)*ox+ox+sin(alf)*[xB+11a-.025 xB+11a-.025 xB+11a-.035 xB+11a-.035]+cos(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
q3x=sin(alf)*ox+cos(alf)*[xB+11a-.035 xB+11a-.035 xB+11a-.266 xB+11a-.266]-sin(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q3z=-cos(alf)*ox+ox+sin(alf)*[xB+11a-.035 xB+11a-.035 xB+11a-.266 xB+11a-.266]+cos(alf)*([PA(1,3)+.0275 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.0275]);
q4x=sin(alf)*ox+cos(alf)*[xB+11a-.108 xB+11a-.108 xB+11a-.166 xB+11a-.166]-sin(alf)*([PA(1,3)+.0837 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0837]);
q4z=-cos(alf)*ox+ox+sin(alf)*[xB+11a-.108 xB+11a-.108 xB+11a-.166 xB+11a-.166]+cos(alf)*([PA(1,3)+.0837 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0275 PA(1,3)+.0837]);
q5x=sin(alf)*ox+cos(alf)*[xB+11a-.266 xB+11a-.266 xB+11a-.286 xB+11a-.286]-sin(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
q5z=-cos(alf)*ox+ox+sin(alf)*[xB+11a-.266 xB+11a-.266 xB+11a-.286 xB+11a-.286]+cos(alf)*([PA(1,3)+.1739 PA(1,3) PA(1,3) PA(1,3)+.1739]);
fill(q1x,q1z,'w');fill(q2x,q2z,'w');fill(q3x,q3z,'w');fill(q4x,q4z,'w');fill(q5x,q5z,'w');
axis('square')
hold off
% =====
end % end for i
if j==(90/dg),figure(1);clf;end
ie=i;% guarda o ultimo valor de i da perna direita
end % end for j

figure(1) title('Plano Sagital') xlabel('metros','FontSize',fts)
ylabel('metros','FontSize',fts) figure(2) title('Plano
transversal - pes') xlabel('metros','FontSize',fts)
ylabel('metros','FontSize',fts) clc;disp(' Correcao dos angulos -
Rodar rb2.m') load corb2;cor

% corrigindo os angulos que passam de 45 graus para o bart2
cor1=0;cor2=0;cor3=0;cor4=0;cor5=0;cor6=0;cor7=0;cor8=0; if
min(Q1)<-am, cor1=min(Q1)/2;Q1=Q1+cor;end if max(Q2)> am,
cor2=max(Q2)/2;Q2=Q2-cor;end if min(Q3)<-am,
cor3=min(Q3)/2;Q3=Q3+cor;end if min(Q4)<-am,
cor4=min(Q4)/2;Q4=Q4+cor;end if max(Q5)> am,
cor5=max(Q5)/2;Q5=Q5-cor;end if min(Q6)<-am,
cor6=min(Q6)/2;Q6=Q6+cor;end if max(Q7)> am,
cor7=max(Q7)/2;Q7=Q7-cor;end if max(Q8)> am,
cor8=max(Q8)/2;Q8=Q8-cor;end corb2g=[cor1 cor2 cor3 cor4 cor5
cor6 cor7 cor8]; save corb2gd corb2g arq1=fopen('Q2gd.dat','w');
for i=1:(size(gd,2)-1)*2:n_divisoes*(num_passos+1)+1,
fprintf(arq1,'%12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f \n', 2*Q1(i), -2*Q2(i), -2*Q3(i), 2*Q4(i), 2*Q5(i), -2*Q6(i), -2*Q7(i), -2*Q8(i));
end fclose(arq1); pause;c load q2gd.dat;q2g=q2gd; plot(q2g)
legend('Q1','Q2','Q3','Q4','Q5','Q6','Q7','Q8','-i' if
norm(q2g(:,8))==0,
title('Angulos das Juntas - Giro Direita')
else
title('Angulos das Juntas - Giro Esquerda')
end
grid;ylabel('Graus');xlabel('Frame')

```

B.5 Programa angle1.m

```

%=====
function [q1]=angle1(vec_a,vec_b,1) x=vec_a(1)-vec_b(1);
y=vec_a(2)-vec_b(2); r=sqrt(x^2 + y^2); if r>2*1,
fprintf('Distancia entre a bacia e o pe maior que o comprimento da
perna! \n'); else
alpha=acos(1-r^2/(2*1^2)) *180/pi;
beta=(180-alpha)/2;
gamma=atan(y/x) *180/pi;
if x<0
gamma=-gamma;
elseif x>0
gamma=180-gamma;
else
gamma=90;
end
total=90-(gamma+beta);
q1=total;
teta2=90-gamma+beta;
q2=teta2-total;end

```

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Apêndice C

Desenho RB-1

