



**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação**  
**Departamento de Sistemas e Controle de Energia**

# DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE UM ROBÔ MÓVEL BÍPEDE COM TRONCO

**Autor: Alberto Noboru Miyadaira**  
Orientador: Prof. Dr. Marconi Kolm Madrid

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Elétrica. Área de concentração: Automação

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marconi Kolm Madrid (presidente) - DSCE/FEEC/UNICAMP  
Prof. Dr. Fabrício Nicolato - Engenharia Elétrica e Mecatrônica/Faculdade Anhanguera de Jundiaí  
Prof. Dr. José Raimundo de Oliveira - DCA/FEEC/UNICAMP

Campinas,SP  
2011

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

M699d	<p>Miyadaira, Alberto Noboru Desenvolvimento, construção e controle de um robô móvel bípede com tronco / Alberto Noboru Miyadaira. -- Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientador: Marconi Kolm Madrid. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Robô. 2. Marcha. 3. Microcontroladores. 4. Dinâmica. I. Madrid, Marconi Kolm. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Development, building and control of a biped mobile robot with trunk

Palavras-chave em Inglês: Robot, Walk, Microcontrollers, Dynamic

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Fabrício Nicolato, José Raimundo de Oliveira

Data da defesa: 26/04/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Alberto Noboru Miyadaira

**Data da Defesa:** 26 de abril de 2011

**Título da Tese:** "Desenvolvimento, Construção e Controle de um Robô Móvel Bípede com Tronco"

Prof. Dr. Marconi Kolm Madrid (Presidente):

Prof. Dr. Fabricio Nicolato:

Prof. Dr. José Raimundo de Oliveira:



# Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver, construir e controlar um robô bípede dotado de oito Graus de Liberdade (GDL), sendo três GDL para cada perna e dois para o tronco. As características desta estrutura permitiram realizar uma marcha dinâmica no plano sagital, cuja trajetória das pernas foi definida por um modelo matemático baseado na geometria da estrutura. Além disso, foi utilizado um acelerômetro para informar a inclinação da pelve durante a movimentação da estrutura através de uma interface serial de comunicação (RS-232) entre o microcontrolador e o programa de monitoramento desenvolvido em LabVIEW. Os resultados deste trabalho demonstram ser possível realizar uma marcha dinamicamente estável utilizando a estrutura proposta. Aplicando-se o conceito de ZMP (em português: Ponto de Momento Zero, em inglês: *Zero Moment Point*) como parâmetro de estabilidade, também constatou-se que o microcontrolador LPC2138 de arquitetura ARM7, com frequência de *clock* igual a 60MHz, foi eficaz no controle da posição angular dos oito servomotores, além de fornecer a inclinação da pelve quando solicitada.

**Palavras-chave:** Robô Bípede, ZMP, marcha.



# Abstract

The subject of this work was to develop, build and control a biped robot equipped with eight degrees of freedom (DOF), three DOF for each leg and two for the trunk. The features of this structure allowed to accomplish a dynamic walk in the sagittal plane, whose the legs trajectory was defined by a mathematical model based on the structure geometry. An accelerometer was used as tilt sensor, which allow you to check the tilt of the pelvis during structure movement through a serial interface (RS-232) between the microcontroller and the monitoring program developed in LabVIEW. The results of this work demonstrated that it is possible to achieve a dynamically stable gait using the proposed structure. Applying the concept of ZMP (Zero Moment Point) as criterion of stability, it was checked that the LPC2138 microcontroller, with ARM architecture running at 60MHz, was effective in controlling the angular position of the eight actuators and sending information about the pelvis tilt when requested.

**Keywords:** Biped robot, ZMP, walk.



Dedico este trabalho à minha esposa Celenir Teló Miyadaira, aos meus pais Nelson e Natsue Miyadaira e aos meus irmãos Fernando e Cristina Miyadaira que nos momentos difíceis souberam me apoiar e incentivar para a continuidade deste trabalho.



# Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Marconi Kolm Madrid, o qual não mediu esforços e sempre se mostrou presente nos momentos em que precisei de sua orientação.

Agradeço ainda, aos colegas de laboratório, André Delai, Filipe Ieda Fazanaro e Leandro Guida, pela disposição e contribuição, nas trocas de conhecimentos.

Ao Srs. Magno Fernandes e Yoshinori Kanno, pela doação de alguns modelos de microcontroladores de 32bits da NXP.

Em fim, agradeço de forma geral a todos, os quais colaboraram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.



# Sumário

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Abreviaturas.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ambiente de Pesquisa e Desenvolvimento – LSMR.....	6
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Organização do Trabalho.....	7
<b>2. Dinâmica da Marcha Humana .....</b>	<b>9</b>
2.1 Estrutura Robótica .....	12
2.1.1 Descrição dos Corpos Rígidos.....	15
<b>3. Estudo do Movimento e Estabilidade .....</b>	<b>19</b>
3.1 Análise Cinemática.....	19
3.1.1 Modelo Cinemático da Estrutura Robótica .....	21
3.1.2 Posição das Juntas e Centro de Gravidade do Elo.....	24
3.1.3 Cinemática de Velocidade .....	30
3.1.4 Cinemática de Aceleração .....	32
3.2 Análise Dinâmica .....	32
3.2.1 Energia Cinética (K).....	33
3.2.2 Energia Potencial (P).....	34

3.2.3 Equação de Movimento .....	35
3.3 Análise de Estabilidade .....	36
3.3.1 Equações ZMP para o Robô Bípede.....	38
<b>4. Planejamento da Trajetória das Juntas .....</b>	<b>39</b>
4.1 Planejamento de Trajetórias .....	39
4.2 Planejamento da Trajetória do Membro Inferior.....	40
4.2.1 Funções das Trajetórias .....	41
4.2.2 Simulação em MATLAB.....	49
4.3 Planejamento da Trajetória do ZMP.....	50
4.3.1 Simulação em MATLAB.....	52
4.4 Controle do Tronco.....	52
4.4.1 ZMP Para Um Sistema Estático .....	53
4.4.2 ZMP Para Um Sistema Dinâmico .....	54
4.5 Suavização do Movimento das Juntas .....	57
<b>5. Simulações e Experimentos .....</b>	<b>59</b>
5.1 Simulações.....	59
5.1.1 Trajetória das Juntas do Membro Inferior .....	59
5.1.2 Controle do Tronco.....	65
5.1.3 Torque das Juntas .....	70
5.2 Resultados Experimentais .....	73
5.2.1 Materiais .....	73
5.2.2 Métodos Experimentais .....	80
<b>6. Conclusões .....</b>	<b>85</b>
6.1 Perspectivas para Trabalhos Futuros .....	86

<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>89</b>
<b>A. Medição de Inclinação com Acelerômetro .....</b>	<b>97</b>
A.1 Princípio de Funcionamento do Acelerômetro .....	97
A.2 Medição de Inclinação .....	98
A.2.1 Medição de Inclinação com Apenas um Eixo .....	98
A.2.2 Medição de Inclinação com a Associação de Dois Eixos.....	100
A.2.3 Medição de Inclinação com a Associação de Três Eixos.....	103



# Lista de Figuras

Figura 2.1: Planos de referência do corpo humano. Figura adaptada de [76].	9
Figura 2.2: Nomenclatura adotada. Figura adaptada de [79].	10
Figura 2.3: Ciclo da marcha humana. Figura adaptada de [79].	10
Figura 2.4: Eventos do ciclo de marcha. [79].	11
Figura 2.5: À esquerda (a) tem-se a primeira versão da estrutura bípede e à direita (b), a segunda versão.	13
Figura 2.6: Corpos rígidos da estrutura bípede modelada em SolidWorks.	14
Figura 2.7: Componentes que formam o tronco do robô bípede desenvolvido.	15
Figura 2.8: Ilustração da pelve do robô bípede.	15
Figura 2.9: Componentes que compõem a perna direita do robô bípede desenvolvido.	16
Figura 2.10: Componentes que compõem a perna esquerda do robô bípede desenvolvido.	16
Figura 2.11: À esquerda tem-se o modelo virtual do robô bípede e, à direita, a estrutura física.	17
Figura 3.1: Vista frontal da fixação dos sistemas de coordenadas.	21
Figura 3.2: Vista frontal da medida dos elos com seus respectivos centros de massa.	22
Figura 3.3: Estrutura bípede na posição ereta.	29
Figura 3.4: CG do robô bípede na posição ereta.	30
Figura 3.5: À esquerda (a) tem-se a região estável de um rb com apenas um dos pés em contato com a superfície e à direita tem-se a região estável quando os dois pés apoiados.	37
Figura 4.1: Planejamento da trajetória das juntas para uma marcha estável.	39
Figura 4.2: Planejamento da trajetória.	40

Figura 4.3: Trajetória do quadril e do joelho.....	42
Figura 4.4: Relação entre o deslocamento do joelho e do quadril, em relação ao eixo Y....	42
Figura 4.5: Trajetória do tornozelo.....	43
Figura 4.6: Trajetória do quadril.....	45
Figura 4.7: Trajetória do joelho da perna de balanço (perna esquerda). ....	45
Figura 4.8: Trajetória do joelho da perna de apoio (perna direita).....	47
Figura 4.9: Sentido de rotação das juntas. ....	48
Figura 4.10: Trajetória das juntas do membro inferior.....	49
Figura 4.11: Trajetória das juntas do membro inferior para um sequência de cinco passos.	50
Figura 4.12: Trajetória do CG. Figura adaptada de [5]. ....	51
Figura 4.13: Trajetória do ZMP.....	51
Figura 4.14: Trajetória do ZMP simulada. ....	52
Figura 4.15: Trajetória do tronco no modo estático. ....	53
Figura 4.16: Trajetória do tronco para o início e fim do ciclo.....	55
Figura 4.17: Avanço inicial do tronco. ....	55
Figura 4.18: Trajetória do tronco no modo dinâmico.....	56
Figura 4.19: Retorno do tronco. ....	56
Figura 4.20: Comparação da trajetória do ZMP. ....	57
Figura 5.1: Trajetória das juntas do membro inferior.....	60
Figura 5.2: Posição angular das juntas do membro inferior. ....	60
Figura 5.3: Aceleração angular das juntas do membro inferior. ....	61
Figura 5.4: Aceleração linear das juntas 1, 2 e 3.....	61
Figura 5.5: Aceleração linear das juntas 11, 12 e 13.....	62
Figura 5.6: Trajetória das juntas do membro inferior.....	62
Figura 5.7: Posição angular das juntas do membro inferior. ....	63
Figura 5.8: Aceleração angular das juntas do membro inferior. ....	63

Figura 5.9: Aceleração linear das juntas 1, 2 e 3.....	64
Figura 5.10: Aceleração linear das juntas 11, 12 e 13.....	64
Figura 5.11: Posição angular das juntas do tronco. ....	65
Figura 5.12: Aceleração angular das juntas do tronco.....	66
Figura 5.13: Aceleração linear das juntas 5 e 6.....	66
Figura 5.14: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Z.....	67
Figura 5.15: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Y. ....	67
Figura 5.16: Posição angular das juntas do tronco. ....	68
Figura 5.17: Aceleração angular das juntas do tronco.....	68
Figura 5.18: Aceleração linear das juntas 5 e 6.....	69
Figura 5.19: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Z.....	69
Figura 5.20: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Y. ....	70
Figura 5.21: Torque nas juntas do membro inferior para trajetória parabólica.....	71
Figura 5.22: Torque nas juntas do tronco para trajetória parabólica.....	71
Figura 5.23: Torque nas juntas do membro inferior para trajetória elíptica.....	72
Figura 5.24: Torque nas juntas do tronco para trajetória elíptica.....	72
Figura 5.25: Diagrama de blocos.....	73
Figura 5.26: Circuito de controle dos servomotores e aquisição de dados.....	74
Figura 5.27: Placa de controle dos servomotores e aquisição de dados. ....	75
Figura 5.28: Circuito de acionamento dos servomotores. ....	75
Figura 5.29: Placa de acionamento dos servomotores.....	76
Figura 5.30: Servomotor TowerPro MG995. ....	76
Figura 5.31: Sinal PWM para o controle do servomotor.....	77
Figura 5.32: Relação entre a posição angular e o sinal PWM.....	77
Figura 5.33: Pinagem do MMA7260Q. [29].....	78

Figura 5.34: Componente da gravidade de um acelerômetro inclinado. Figura adaptada de [28] .....	79
Figura 5.35: Saída analógica do acelerômetro MMA7260. [28].....	79
Figura 5.36: Sequência de passos para trajetória parabólica. ....	81
Figura 5.37: Reprodução da marcha sem antiderrapante (à esquerda) e com antiderrapante (à direita).....	82
Figura 5.38: Localização da placa de controle dos servomotores e aquisição de dados. ....	83
Figura 5.39: Interface de controle do robô bípede. ....	84
Figura A.1: Corpo de prova montado em uma estrutura de pêndulo. ....	98
Figura A.2: Acelerômetro de dois eixos com um eixo inclinado. [31] .....	98
Figura A.3: Saída de apenas um eixo do acelerômetro. [28].....	99
Figura A.4: Usando um acelerômetro de dois ou três eixos para medir a inclinação. [28]	100
Figura A.5: Função seno da saída do eixo X e cosseno da saída do eixo Y. [28] .....	100
Figura A.6: Trigonometria básica. [28] .....	101
Figura A.7: Ângulo de inclinação x Sensibilidade de inclinação. [28] .....	102
Figura A.8: Quadrantes de uma rotação de 3600. [28].....	102
Figura A.9: Inclinação medida nos três eixos. [28].....	103

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Parâmetros dos corpos rígidos.....	18
Tabela 3.1: Distância entre os sistemas de coordenadas. ....	22
Tabela 3.2: Distância do CG de cada elo referenciado ao sistema de coordenada $i-1$ . ....	23
Tabela 3.3: Massa dos corpos rígidos.....	23
Tabela 3.4: Parâmetros D-H. ....	23
Tabela 4.1: Valores das constantes apresentadas na figura 4.2:.....	41
Tabela 5.1: Características do servomotor TowerPro MG995.....	76
Tabela 5.2: Descrição dos pinos do MMA7260.....	78



# Lista de Abreviaturas

AIST	- <i>Advanced Institute of Science and Technology</i>
ARM	- <i>Advanced RISC Machine</i>
ASIMO	- <i>Advanced Step in Innovative Mobility</i>
ATX	- <i>Advanced Technology Extended</i>
CG	- Centro de Gravidade
CI	- Circuito Integrado
CP	- Centro de Pressão
D-H	- Denavit-Hartenberg
DOF	- <i>Degrees Of Freedom</i>
DSCE	- Departamento de Sistemas e Controle de Energia
fc	- Frequência de corte
FEM	- Faculdade de Engenharia Mecânica
FPGA	- <i>Field-Programmable Gate Array</i>
GDL	- Grau de Liberdade
HRP	- <i>Humanoid Robotics Project</i>
JSK	- <i>Jouhou System Kougaku</i>
KAIST	- <i>Korea Advanced Institute of Science and Technology</i>

LARP	- <i>Light Adaptive-Reactive biPed</i>
L-E	- Lagrange-Euler
LSMR	- Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos
MEMS	- <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
METI	- <i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i>
N-E	- Newton-Euler
PID	- Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	- <i>Pulse-width modulation</i>
Qrio	- <i>Quest for Curiosity</i>
rb	- robô bípede
RT-Linux	- <i>Real Time Linux</i>
SDR	- <i>SONY Dream Robot</i>
UNICAMP	- Universidade Estadual de Campinas
Wabian	- <i>Waseda Bipedal Humanoid</i>
WHL	- <i>Waseda Hitachi Leg</i>
WL	- <i>Waseda Leg</i>
ZMP	- <i>Zero Moment Point</i>

# Introdução

A reprodução da marcha humana em estruturas robóticas tem sido estudada por pesquisadores há muito tempo, uma vez que a locomoção sobre pernas possibilita que estruturas mecânicas sejam capazes de deslocar-se com destreza em terrenos com desníveis e degraus, os quais estão presentes no dia-a-dia dos seres humanos. Por este motivo, novas técnicas e métodos de controle de robôs bípedes têm sido propostos para que possam ser aplicados em robôs usados para exploração, transporte, entretenimento ou, então, para desenvolvimento de próteses inteligentes. Embora tenha evoluído consideravelmente nos últimos anos, a reprodução dos movimentos ainda não apresenta a naturalidade verificada em seres humanos. [10, 11, 41, 52, 63]

Em 1967, Ichiro Kato, da Universidade de Waseda, desenvolveu um sistema mecânico semelhante a uma perna humana, baseado em um servomecanismo eletro-hidráulico, para investigar o modo de andar, o qual foi batizado de robô WL-1 (*Waseda Leg*). Em 1969, surgiu a versão aprimorada do WL-1, batizada de WL-3, constituída apenas por pernas movidas pelo mesmo sistema do WL-1, cada uma com 3 GDL, capaz de realizar movimentos básicos semelhantes ao modo de andar humano através de um método mestre-escravo. No mesmo ano, Miomir Vukobratović e Juričić Davor, pioneiros no estudo de robôs humanoides, propuseram o conceito de ZMP como sendo um ponto localizado na superfície onde a soma de todos os momentos é igual a zero e, portanto, poderia ser usado como critério de estabilidade para estruturas bípedes. [12, 48, 77]

Em 1972, Kato e seus colaboradores desenvolveram uma nova estrutura bípede dotada de 11 GDL, batizada de WL-5, sendo cinco para cada perna e um para o tronco, cujo movimento das articulações era controlado por um minicomputador que possibilitava realizar uma marcha com mudança de direção através de um movimento programado. Em 1980, a mesma equipe construiu um novo robô sem tronco dotado de 10 GDL, denominado de WL-9DR, capaz de locomover-se à 0,10 passo/segundo, cujo controle das articulações era realizado por um

microcomputador de 16bits. No mesmo ano, Marc Raibert, fundador do MIT Leg Lab, desenvolveu o *Planar One-Leg Hopper*, o qual foi o primeiro robô capaz de locomover-se sobre uma única perna com estabilidade dinâmica graças a um conjunto de sensores fixados no corpo e atuadores pneumáticos no quadril, controlados por um controlador de velocidade, postura e altura do salto. [18, 48, 49, 77]

Em 1983, Kato e seus colaboradores construíram um novo rb sem tronco constituído de 12 GDL, denominado de WL-10R, cujas articulações eram movidas por servo-atuadores rotacionais acionados hidraulicamente, sendo capaz de locomover-se em qualquer direção graças ao acréscimo de 1 GDL em cada uma das pernas. No ano seguinte, a empresa Hitachi Ltd e a Universidade de Waseda, desenvolveram o rb WHL-11 (*Waseda Hitachi Leg*), cuja estrutura era semelhante ao rb WL-10R, porém, o microcomputador e a bomba hidráulica foram incorporadas em sua estrutura. Dois anos após o desenvolvimento do WL-10R, surgiu o modelo WL-10RD capaz de locomover-se com uma velocidade de 0,77 passo/segundo, cujas juntas do tornozelo e quadril possuíam sensores de torque para aumentar a flexibilidade no controle da mudança de fase, sendo este, o primeiro rb a obter sucesso na realização de uma marcha dinâmica aplicando o conceito de ZMP proposto por Vukobratović. [12, 43, 68, 77]

Em 1986, Kato e seus colaboradores criaram um novo robô bípede com um tronco de 2 GDL, batizado de WL-12, o qual era capaz de compensar os momentos gerados pela movimentação das pernas através do tronco tornando-se o primeiro rb com tronco a realizar uma marcha dinâmica aplicando o conceito de ZMP. Ainda no mesmo ano, a empresa Honda revelou a criação de um rb com um total de 6 GDL, sendo três para cada perna, capaz de realizar uma marcha com velocidade de 0,2 passo/segundo, batizado de E0 (*Experimental Model 0*). No ano seguinte, a Honda lançou o robô E1 dotado de 12 GDL, sendo seis para cada perna, capaz de realizar uma marcha com velocidade de 0,25Km/h e após dois anos, apresentou o modelo E2 com capacidade de movimentação dinâmica aplicando o conceito de ZMP, sendo capaz de movimentar-se a 1,2Km/h e, nos dois anos subsequentes, apresentou o modelo E3 capaz de movimentar-se a 3Km/h. [3, 5, 6, 39, 49, 77]

No período de 1991 a 1992, a Honda criou os modelos E4 e E5 objetivando aprimorar a estabilidade e velocidade dos movimentos. No ano subsequente, apresentou o modelo E6, o qual era capaz de realizar uma marcha dinâmica, subir escadas e transpor obstáculos, cujo controle era baseado em três técnicas de controle: controle da trajetória ZMP, controle de reação

da superfície e controle da localização do pé. Decorrente da evolução dos modelos E, entre os anos de 1993 e 1997, surgiram os modelos P1 (*Prototype Model 1*), P2 e P3, cujas principais diferenças em relação aos seus antecessores consistiam na adição de corpo e de braços com o intuito de aumentar a estabilidade e funcionalidade do robô. [5, 6, 39, 49, 77]

Em 1999 a 2000, a Kawada Industries, Inc. criou os robôs humanoide JSK-H6 (*Jouhou System Kougaku*) e JSK-H7 com um total de 35 GDL e 30 GDL respectivamente, dos quais seis eram para cada perna e os demais para o membro superior. O JSK-H6 media 1,37m de altura e pesava 55Kg, enquanto que o JSK-H7 media 1,468m e pesava 57Kg. Os robôs eram equipados com motores rotacionais DC, sistema de visão, sensor de força de 6 eixos fixado em cada pé e um sistema inercial constituído de um giroscópio e um acelerômetro de 3 eixos fixado no tronco. Estes robôs possuíam um computador de bordo composto por dois processadores PentiumIII-750MHz para a primeira versão e PentiumIII – 1,1GHz para a segunda, rodando um sistema operacional RT-Linux (*Real Time Linux*) responsável pelo reconhecimento do ambiente, planejamento do movimento das juntas e cálculos dinâmicos associados ao equilíbrio do sistema baseado no conceito de ZMP. [34, 44, 74]

Em 2000, a empresa Honda apresentou um robô humanoide com um total de 26 GDL, o qual media 1,2m de altura, pesava 43Kg e era capaz de caminhar com uma velocidade de 1,6 Km/h, denominado de ASIMO (*Advanced Step in Innovative Mobility*). O robô era equipado com motores rotacionais DC, sistema de visão, sensor de força de 6 eixos fixado em cada um dos pés, além de um giroscópio e um sensor de desaceleração, ambos localizados no tronco. A estrutura era capaz de modificar a direção do movimento de forma suave graças a um computador de bordo capaz de antecipar o deslocamento do CG sempre que a direção do movimento fosse alterada, além disso, o robô apresentava uma grande estabilidade graças à associação de três controles: reação do solo, ZMP e apoio. [5, 6, 39]

Ainda em 2000, a empresa Sony anunciou um robô humanoide com 0,5m de altura, 5Kg de massa e 24 GDL, sendo seis para cada perna e os demais para o membro superior, denominado de SDR-3X (*SONY Dream Robot*). Este robô era equipado com motores rotacionais DC, sistema de visão, sensor de força de 6 eixos fixado em cada um dos pés, giroscópio fixado no tronco e sensores de contato nas solas dos pés, os quais eram usados para sincronização dos movimentos das juntas do corpo. A estrutura possuía dois processadores RISC de 64bits aplicados no controle dos atuadores e cálculos dinâmicos de movimento baseados no conceito de

ZMP, sendo capaz de realizar uma marcha com velocidade igual a 0,9 Km/h. Dois anos após o lançamento do SDR-3X, a Sony anunciou o desenvolvimento de um robô humanoide, denominado de SDR-4X, de 0,58m de altura, 6,5Kg de massa e 38 GDL, o qual era equipado com um sistema de controle de movimento adaptativo capaz de controlar todas as juntas em tempo real e caminhar sobre superfícies irregulares e inclinadas. Neste mesmo ano, a Sony anunciou uma nova versão, denominada de SDR-4XII, de 0,58m de altura, 7Kg de massa e 38 GDL. Esse robô era capaz de subir e descer escadas, levantar-se após uma queda, executar movimentos de dança sincronizados com outros robôs do mesmo modelo, além de desviar de obstáculos graças a um sistema de visão que permitia identificar objetos, determinar sua localização e automaticamente traçar uma rota ao redor do objeto. [3, 20, 69, 70, 71]

Entre os anos de 2000 e 2001, o laboratório de sistemas ativos e mecatrônica da UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), universidade localizada no Brasil, projetou dois rbs sem tronco, denominados de RB-1 e RB-2, sendo que o primeiro possuía 6 GDL e o segundo 8 GDL. O RB-1 era capaz de mover-se somente em uma direção, enquanto que o RB-2, com o acréscimo de 1 GDL em cada perna, era capaz de desviar de obstáculos usando sensores. [11]

Em 2002, a Kawada Industries, Inc. em parceria com o AIST (*Advanced Institute of Science and Technology*) desenvolveram um robô humanoide, denominado de HRP-2 (*Humanoid Robotics Project*), com 1,54m de altura, 58Kg de massa e um total de 30 GDL, sendo 6 GDL para cada perna. O robô era composto por motores rotacionais DC, sistema de visão, giroscópio e acelerômetro de 3 eixos no tronco e sensores de força de 6 eixos em cada um dos pés, além de possuir dois computadores de bordo, sendo um para controlar todas as juntas da estrutura para uma marcha dinâmica aplicando o conceito de ZMP e outro para processar imagem e som. Ele era capaz de andar com uma velocidade equivalente a 2,5Km/h, além de locomover-se em superfícies irregulares, levantar-se após uma queda e interagir com seres humanos em ambientes abertos. [3, 49]

Em 2003, a Sony decidiu nomear os robôs sucessores do SDR-4X como Qrio (*Quest for Curiosity*), cujo principal objetivo consistia na interação com seres humanos e na capacidade de explorar ambientes domésticos de forma autônoma. Este robô era capaz de correr, saltar e reagir quando alguma força externa fosse exercida sobre ele, além de ser o primeiro robô humanoide capaz de correr. No mesmo ano, o laboratório LAG (*Laboratoire Automatique de*

*Grenoble*), na França, apresentou um rb de 7 GDL composto por um tronco e duas pernas sem os pés, denominado de Rabbit, o qual era capaz de caminhar com uma velocidade de 5Km/h e correr à 12Km/h. Ainda no mesmo ano, na Itália, Giuseppina e sua equipe desenvolveram um rb, denominado de LARP (*Light Adaptive-Reactive biPed*), com 1 metro de altura, 5Kg de massa e 12 GDL, cujas articulações eram movidas por tendões conectados em servomotores presentes na pelve. [1, 2, 20, 21, 26, 69, 70, 71]

Em 2005, o laboratório KAIST (*Korea Advanced Institute of Science and Technology*), localizado na Coréia, apresentou um robô humanoide, denominado de HUBO, de 1,25m de altura, 55Kg de massa e um total de 41 GDL acionados por motores rotacionais DC, sendo seis para cada perna e os demais para o membro superior. Ele possuía um sistema de visão, audição, um sensor de força/torque de 3 eixos fixado em cada um dos pés e um acelerômetro para medição de sua inclinação, além de um giroscópio e um acelerômetro fixados no tronco. Este robô possuía um computador de bordo com processador Pentium-III 933MHz usado no controle e gerenciamento de todos os recursos do robô, o qual era capaz de realizar uma marcha dinâmica, baseada no conceito de ZMP, com velocidade de 1,5Km/h. [78, 38]

Em 2007, a Kawada Industries, Inc. em parceria com o AIST apresentou um novo robô humanoide com 1,60m de altura, 68Kg de massa e 42 GDL, denominado de HRP-3, o qual foi fruto do aprimoramento das versões anteriores, onde foram adicionados a capacidade de geração de trajetória amortecida e a implementação de tecnologia de detecção de deslizamento, permitindo que o robô pudesse se locomover em superfícies com baixa fricção. [50]

Em 2009, a empresa Boston Dynamics, localizada nos EUA, apresentou um rb construído para o exército americano e constituído apenas por pernas, denominado de PETMAN. Este robô acabou chamando atenção pela forma de mover-se, o qual assemelhava-se à dos seres humanos, além de ser capaz de recuperar o equilíbrio caso fosse empurrado. [14]

Em 2010, o *DLR Institute of Robotics and Mechatronics*, localizado na Alemanha, apresentou um rb constituído apenas por pernas, com 1,43m de altura, 68Kg de massa e um total de 12 GDL, capaz de realizar uma marcha dinâmica aplicando o conceito de ZMP, o qual foi chamado de DLR-Biped. Este robô estava equipado com sensores de posição e torque nas juntas, uma unidade de medida inercial e um computador de bordo localizado no tronco, além de um sensor de 6 eixos de força e torque em cada um dos pés. [47]

Como pode-se perceber, na atualidade existe um notável investimento econômico e grande interesse nos avanços tecnológicos na área a qual este trabalho de pesquisa se relaciona, tanto por parte de indústrias, como centros de pesquisas e universidades, e portanto ela deve incorporar enormes avanços em futuro de curto prazo.

## 1.1 Ambiente de Pesquisa e Desenvolvimento – LSMR

O Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos (LSMR) formou-se há quase três décadas e desde então a construção e o estudo de estruturas robóticas vem sendo estudadas. Neste laboratório já foram projetados e construídos alguns protótipos de robôs com cadeias seriais cinemáticas. [54, 55]

Além disso, existem alguns robôs de cunho educacional que são empregados tanto em projetos de graduação de iniciação científica [24] bem como trabalhos de mestrado onde são empregados estruturas robóticas disponíveis, dentre as quais destacam-se os modelos Rhino XR-3 e Rhino SCARA [37].

Ao longo dos anos, muitas outras linhas de pesquisas relacionadas à robótica foram e vem sendo desenvolvidas dentro do LSMR tais como, visão computacional [59], estudos de sistemas dinâmicos não lineares e comportamentos caóticos associados [22, 23, 61], controle de posicionamento e de trajetória baseado em *hardware* evolutivo e busca heurística [19, 60], bem como trabalhos na área de robótica móvel [57].

## 1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho de mestrado foram:

- Realizar um estudo sobre a marcha humana;
- Projetar uma estrutura bípede com tronco, dotado de 8 GDL, em SolidWorks;
- Realizar a modelagem cinemática e dinâmica da estrutura em MATLAB;
- Construir um robô bípede com tronco para o estudo da marcha dinâmica baseada no conceito de ZMP;
- Desenvolver um algoritmo em MATLAB para gerar as trajetórias das pernas e calcular as equações dinâmicas de movimento;

- Desenvolver uma interface em LabVIEW para capturar e mostrar a inclinação da pelve durante a movimentação da estrutura;
- Desenvolver um *hardware* para o controle dos servomotores rotacionais e aquisição de dados e, outro para o acionamento dos servomotores.

### 1.3 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 há um breve resumo sobre aspectos da dinâmica da marcha humana, onde são abordados conceitos básicos da marcha e as nomenclaturas adotadas ao longo deste trabalho. Neste mesmo capítulo também é apresentada a estrutura robótica bípede projetada para a análise da reprodução da marcha.

No Capítulo 3 está apresentado um estudo do movimento e da estabilidade da estrutura bípede. Este capítulo compreende a modelagem cinemática e dinâmica do robô bípede, além do conceito de ZMP.

O Capítulo 4 apresenta aspectos importantes sobre o planejamento da trajetória das juntas representado por quatro tópicos principais. O primeiro destina-se ao estudo do planejamento da trajetória do membro inferior, através da análise geométrica da estrutura, sem a preocupação com estabilidade do movimento. Em seguida, é apresentado o planejamento da trajetória do ZMP. Este capítulo ainda contempla o controle do tronco cujo resultado é proveniente dos parâmetros apresentados nos tópicos anteriores e, finalmente, é apresentada a técnica de interpolação cúbica aplicada à movimentação do tronco.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações realizadas para o movimento parabólico e elíptico dos pés, os quais permitem determinar quais são as especificações mínimas dos atuadores para que o robô bípede seja capaz de realizar os movimentos desejados. Neste capítulo também encontram-se os resultados dos experimentos realizados em laboratório.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, uma análise geral do trabalho, bem como perspectivas para trabalhos futuros.

No Apêndice A está uma breve introdução sobre o conceito de funcionamento de um acelerômetro.



# Capítulo 2

## Dinâmica da Marcha Humana

O corpo humano pode ser representado por três planos denominados de sagital, frontal e transversal. O plano frontal segmenta o corpo em frente e costas, enquanto que o plano sagital segmenta o corpo em lado direito e esquerdo. Além destes tem-se o plano transversal, onde o corpo é dividido na horizontal, resultando em parte superior e inferior. Trabalhos relacionados na literatura científica enfatizam o plano sagital e acabam ignorando os outros dois planos já que a maior parte dos movimentos ocorre no plano sagital. No entanto, os outros dois não devem ser ignorados uma vez que certas patologias podem ser melhor analisadas se forem observadas no plano frontal e transversal. A figura 2.1, adaptada de [76], ilustra a representação dos planos.

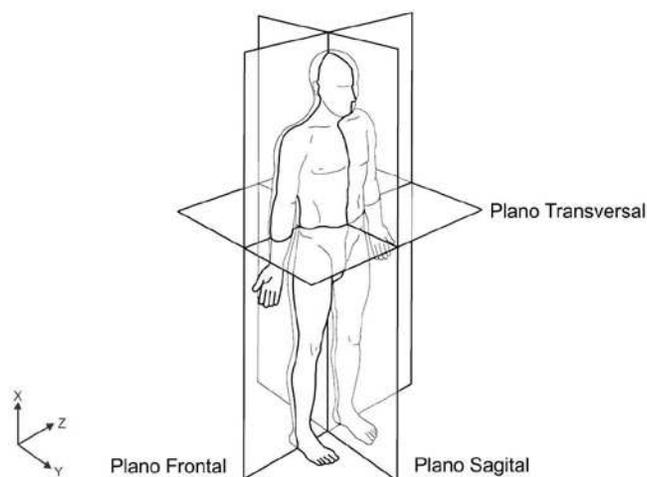


Figura 2.1: Planos de referência do corpo humano. Figura adaptada de [76].

A nomenclatura adotada para as juntas e para os segmentos do robô em estudo pode ser observada na figura 2.2 (adaptada de [79]). O robô bípede possui 8 GDL (Graus de Liberdade ou *Degrees Of Freedom* - DOF), sendo 3 GDL para cada perna e 2 GDL para o tronco. Os 2 GDL do tronco possibilitam uma marcha dinâmica além de permitirem o deslocamento do Centro de Gravidade (CG) do robô no plano sagital e frontal.

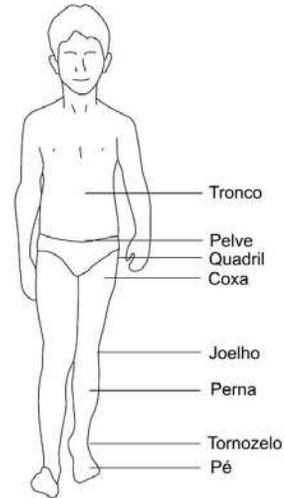


Figura 2.2: Nomenclatura adotada. Figura adaptada de [79].

O ciclo natural da marcha humana requer um movimento periódico da perna, cujo ciclo é iniciado quando um dos pés toca a superfície e finalizado quando o mesmo pé volta a tocá-la. [79]

A nomenclatura da figura 2.3, adaptada de [79], ilustra um ciclo de marcha de um garoto de 8 anos de idade, adotando o pé direito como referência. No entanto, a mesma terminologia pode ser adotada para o pé esquerdo dado a simetria dos lados. Porém, para uma marcha patológica pode haver uma assimetria nos lados, sendo necessária a análise individual de cada um dos lados. [79]

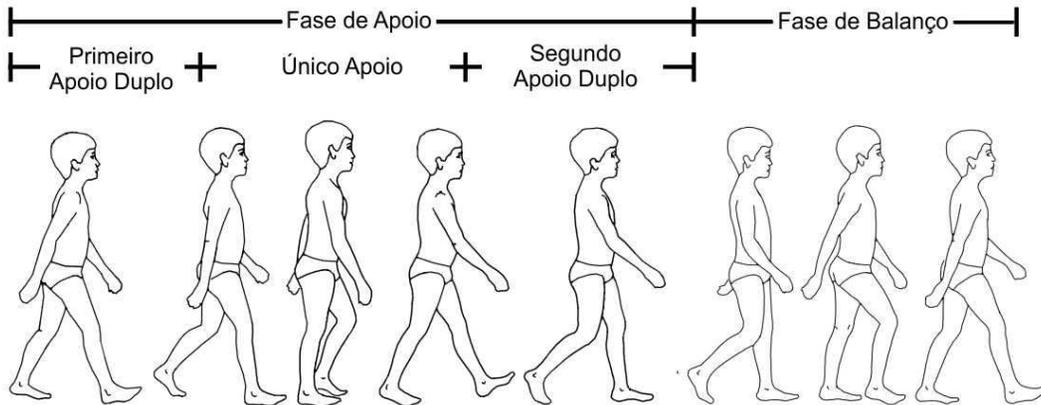


Figura 2.3: Ciclo da marcha humana. Figura adaptada de [79].

Da figura 2.3 é possível observar que o ciclo de marcha pode ser dividido em duas fases, sendo denominadas de Fase de Apoio e Fase de Balanço. A Fase de Apoio pode ainda ser subdividida em outras três subfases, denominadas de Primeiro Apoio Duplo, Apoio Simples e Segundo Apoio Duplo.

Adotando o pé direito como referência, a fase de apoio é caracterizada pelo contato do pé direito com a superfície. Dentro desta fase tem-se o primeiro apoio duplo, que corresponde ao instante em que os dois pés estão em contato com a superfície. Em seguida, tem-se o apoio simples, que corresponde ao momento em que o pé esquerdo se encontra suspenso e o pé direito está em contato com a superfície. Por último é observado o segundo apoio duplo, onde os dois pés voltam a estar em contato com a superfície. Durante a fase de balanço, o pé direito se encontra fora de contato com o solo e se prepara para tocá-lo novamente e dar início a um novo ciclo. Percebe-se então, que o ciclo de marcha possui 8 eventos ou períodos, conforme ilustrado na figura 2.4. [79]

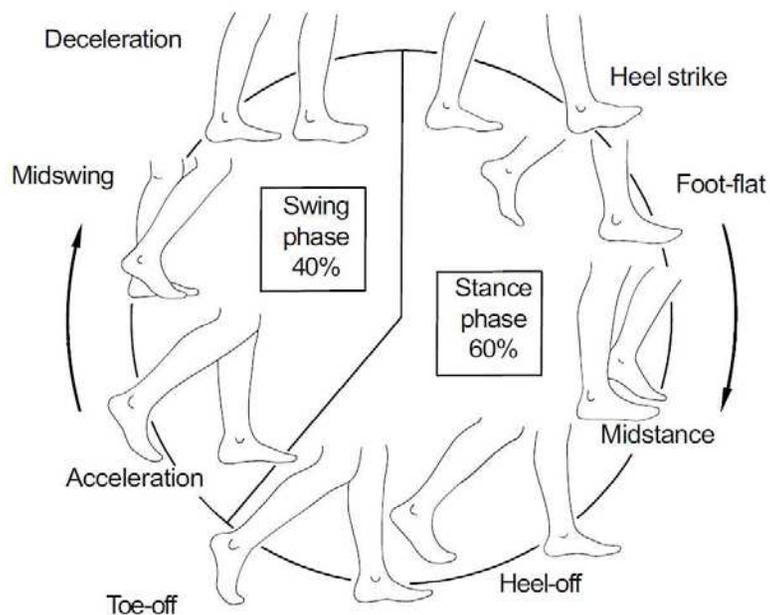


Figura 2.4: Eventos do ciclo de marcha. [79]

Durante a fase de apoio, tem-se cinco eventos distintos classificados da seguinte maneira:

1. *Heel strike*: Momento em que o calcanhar toca a superfície e dá início ao ciclo de marcha. Este é o ponto no qual o CG do corpo se encontra em sua posição mais baixa;
2. *Foot-flat*: Momento em que toda a planta do pé de apoio está em contato com a superfície;
3. *Midstance*: Momento em que o pé de balanço passa pelo pé de apoio. Neste instante, o CG do corpo atinge sua posição mais alta;
4. *Heel-of*: Momento em que o calcanhar perde o contato com a superfície;
5. *Toe-off*: Momento em que os dedos dos pés perdem contato com a superfície, sinalizando o fim da fase de apoio.

Durante a fase de balanço ocorrem três eventos:

6. *Acceleration*: Momento em que a perna é acelerada para frente, logo após o pé de apoio perder contato com o solo;
7. *Midswing*: Momento em que o pé de balanço passa pelo pé de apoio. Este evento coincide com o evento “*Midstance*” do outro pé;
8. *Decelaration*: Momento em que a perna é desacelerada e o pé preparado para tocar o solo novamente, indicando o fim de um ciclo e início de um novo.

A técnica aplicada à reprodução da marcha no rb proposta neste trabalho de mestrado consiste no planejamento da trajetória das pernas pelo uso de modelos matemáticos, obtidos a partir de sua geometria conforme os trabalhos. [11, 16]

## 2.1 Estrutura Robótica

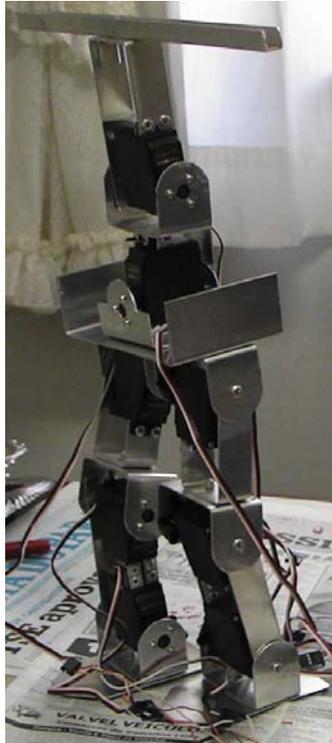
O robô bípede foi concebido com o objetivo de analisar a reprodução da marcha dinâmica, no plano sagital, em uma estrutura física constituída por nove corpos rígidos, os quais estão conectados por juntas rotacionais de 1 GDL cada, sendo 3 GDL para cada uma das pernas e 2 GDL para o tronco, totalizando 8 GDL.

As juntas estão distribuídas da seguinte forma:

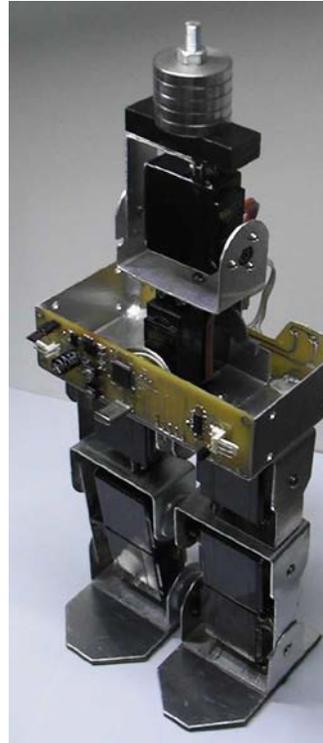
- Uma junta rotacional conectada no último elo do tronco que possibilita o movimento no plano sagital;

- Uma junta rotacional conectada no primeiro elo do tronco possibilitando o movimento no plano frontal;
- Duas juntas rotacionais localizadas na pelve, sendo uma delas alocada para o movimento do quadril direito e a outra para o esquerdo, permitindo o movimento no plano sagital;
- Uma junta rotacional bilateral para os joelhos que possibilita o movimento no plano sagital;
- Uma junta rotacional bilateral para os tornozelos possibilitando o movimento no plano sagital.

A estrutura robótica desenvolvida para a realização dos experimentos de bancada passou por duas versões, conforme pode ser observado na figura 2.5.



(a)



(b)

Figura 2.5: À esquerda (a) tem-se a primeira versão da estrutura bípede e à direita (b), a segunda versão.

Na primeira versão do Rb, os contrapesos eram fixados em uma barra 'U' e as articulações eram movidas por servomotores FUTABA S3001, com capacidade de torque equivalente a 0,40N.m. Durante os experimentos foi constatado que os atuadores da perna estavam trabalhando em seu limite e, portanto, foi necessário realizar algumas modificações na estrutura tais como a redução do comprimento das pernas e a substituição dos servomotores FUTABA S3001 pelos TowerPro MG995, capazes de fornecer torque na faixa de 1,27N.m. Além das alterações realizadas nas pernas e atuadores, o sistema de contrapeso também foi aprimorado para facilitar a realização dos experimentos, através da substituição da barra 'U' por uma haste central para fixação de cilindros de contrapeso de 0,026Kg cada.

Ambas as estruturas físicas foram modeladas com o auxílio do *software* SolidWorks, sendo que a última versão pode ser vista na figura 2.6.

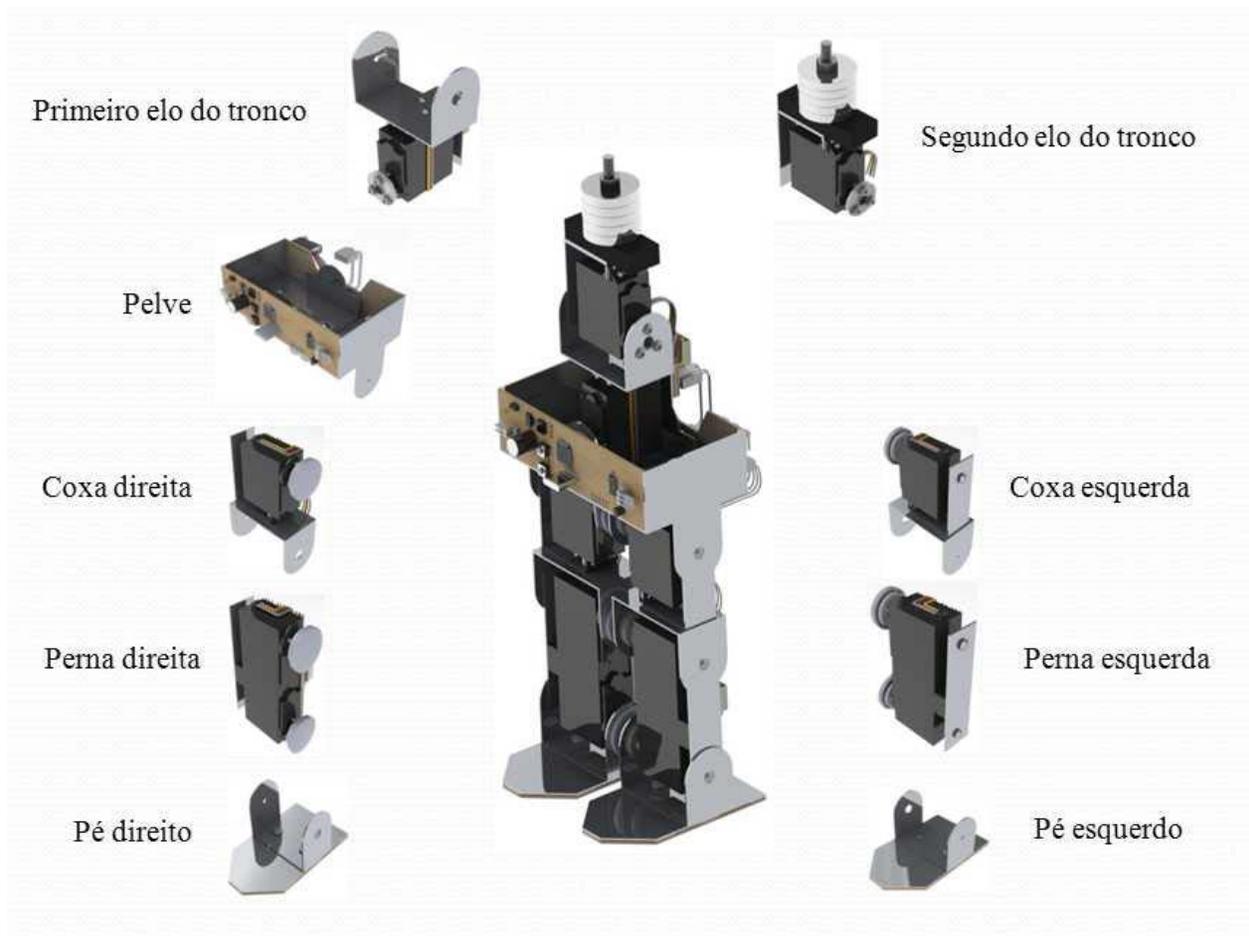


Figura 2.6: Corpos rígidos da estrutura bípede modelada em SolidWorks.

### 2.1.1 Descrição dos Corpos Rígidos

O tronco é composto por dois corpos, sendo o primeiro formado por uma estrutura de alumínio e um servomotor e, o segundo corpo, composto por uma estrutura de alumínio, um servomotor e alguns cilindros de contrapeso, que irão auxiliar no equilíbrio da estrutura durante a realização da marcha. Na figura 2.7 tem-se a ilustração dos componentes do tronco.



(a) Primeiro elo do tronco.



(b) Segundo elo do tronco.

Figura 2.7: Componentes que formam o tronco do robô bípede desenvolvido.

A pelve é composta pela estrutura de alumínio com os suportes para os servos motores, pela placa de acionamento e placa de controle dos oito servos motores, a qual também é utilizada na aquisição e tratamento do sinal enviado pelo acelerômetro. Na figura 2.8 tem-se a ilustração do formato final desse módulo.

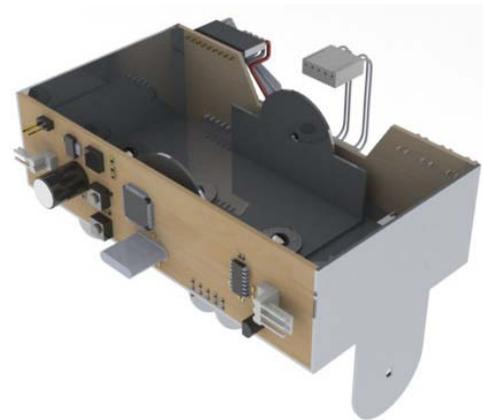


Figura 2.8: Ilustração da pelve do robô bípede.

A coxa é compreendida pela estrutura de alumínio e um servomotor, enquanto que a perna é constituída por uma estrutura de alumínio e dois servos motores, um dos quais é utilizado para realizar os movimentos rotacionais do joelho e o outro empregado no tornozelo. Os pés

consistem de estruturas simples de alumínio. Optou-se por alocar os servos motores que acionam os pés nas pernas com o objetivo de reduzir as suas inércias. Na figura 2.9 tem-se a ilustração da perna direita e, na figura 2.10, tem-se os componentes que formam a perna esquerda.

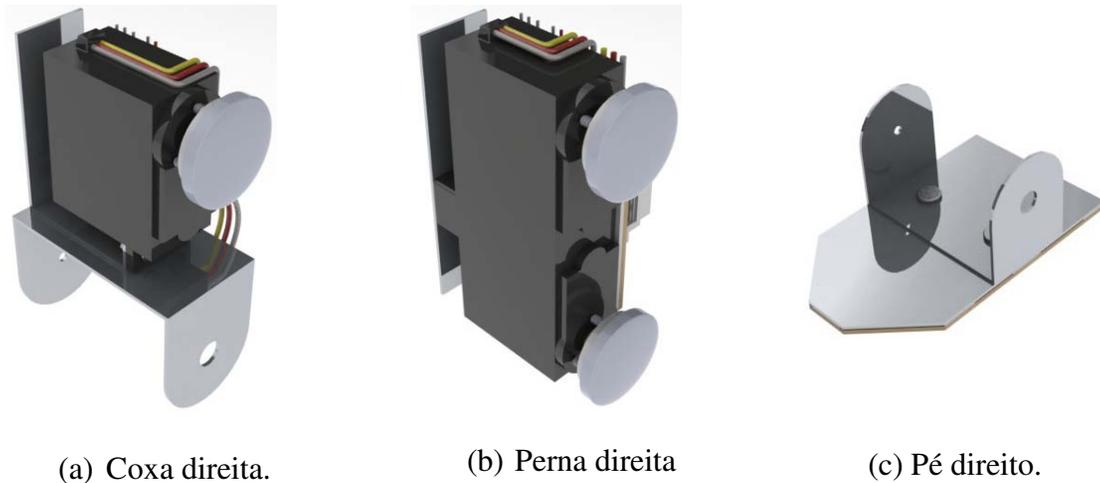
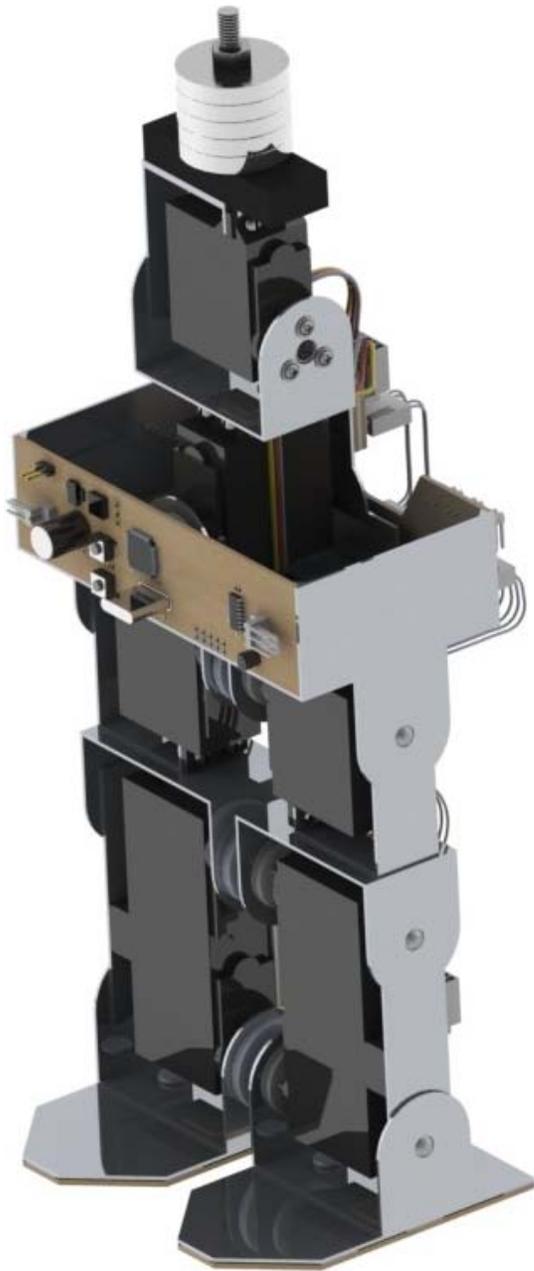


Figura 2.9: Componentes que compõem a perna direita do robô bíbepe desenvolvido.

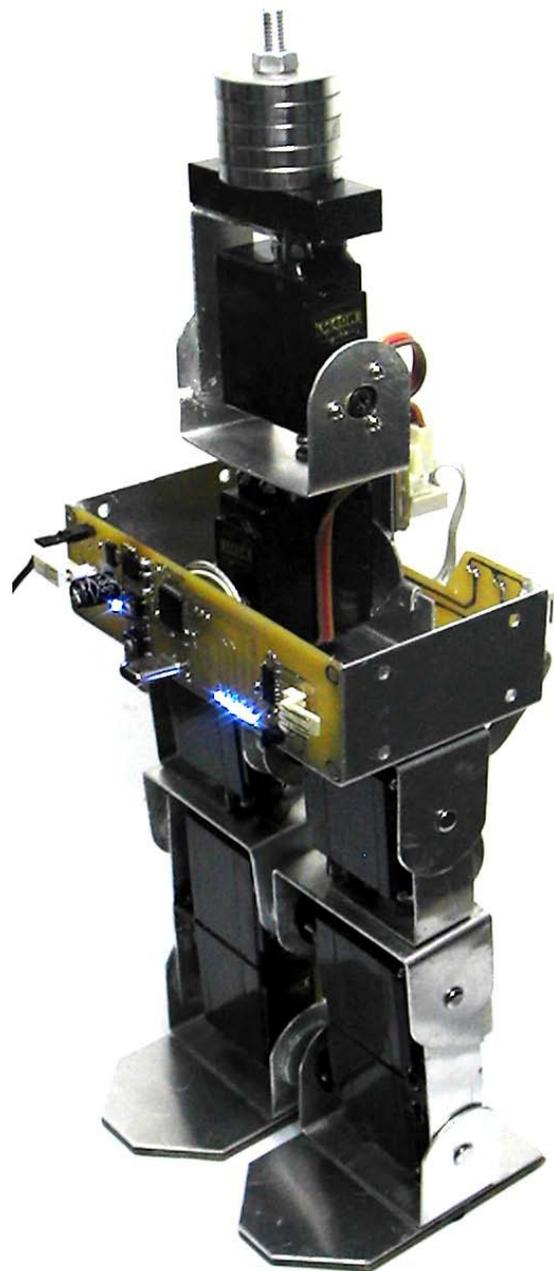


Figura 2.10: Componentes que compõem a perna esquerda do robô bíbepe desenvolvido

A figura 2.11 ilustra o modelo do robô bípede concebido no ambiente do SolidWorks e ao lado a estrutura física. Esta estrutura possui 0,333m de altura e pesa aproximadamente 0,96Kg.



(a) Modelo virtual.



(b) Estrutura física do robô bípede.

Figura 2.11: À esquerda tem-se o modelo virtual do robô bípede e, à direita, a estrutura física.

Na tabela 2.1 tem-se os parâmetros físicos obtidos via SolidWorks e que foram empregados ao longo do desenvolvimento da cinemática e da dinâmica do robô.

Tabela 2.1: Parâmetros dos corpos rígidos.

Nº	Segmento	Massa (Kg)	Coordenada			Momento de Inércia		
			Xcg (m)	Ycg (m)	Zcg (m)	Ixx (Kg.m <sup>2</sup> )	Iyy (Kg.m <sup>2</sup> )	Izz (Kg.m <sup>2</sup> )
0	Pé direito	0,0330	0,0049	0,0043	0,0274	0,0000246	0,0000123	0,0000160
1	Perna direita	0,1297	0,0295	-0,0012	0,0282	0,0000294	0,0000932	0,0000755
2	Coxa direita	0,0742	0,0436	-0,0006	0,0293	0,0000190	0,0000398	0,0000274
4	Pelve	0,1109	0,0258	-0,0025	0,0591	0,0002099	0,0000170	0,0000727
6	Coxa esquerda	0,0742	-0,0164	0,0006	0,0293	0,0000190	0,0000398	0,0000274
7	Perna esquerda	0,1297	-0,0305	0,0012	0,0282	0,0000294	0,0000932	0,0000755
8	Pé esquerdo	0,0330	-0,0171	-0,0043	0,0274	0,0000246	0,0000122	0,0000160
11	Primeiro seg. do tronco	0,0786	0,0181	0,0004	-0,0240	0,0000210	0,0000327	0,0000393
12	Segundo seg. do tronco	0,2960	0,0458	-0,0002	0,0285	0,0000532	0,0000176	0,0000150

# Capítulo 3

## Estudo do Movimento e Estabilidade

Este capítulo aborda três assuntos essenciais para a locomoção bípede. O primeiro tópico trata da modelagem cinemática do robô bípede e, em seguida, é apresentada a modelagem dinâmica da estrutura. Por último, é abordado o conceito de ZMP, o qual é largamente empregado como critério de estabilidade da locomoção bípede. Por se tratar de uma estrutura simétrica, está apresentado apenas o estudo de um dos lados, adotando o pé direito como sistema de referência (pé de apoio) e o pé esquerdo como balanço.

### 3.1 Análise Cinemática

Inicialmente é realizada uma análise cinemática da estrutura robótica, com o objetivo de estudar a posição, orientação, velocidade e aceleração das juntas, sem levar em consideração as forças atuantes.

A cinemática direta determina a localização do extremo de um membro, se forem conhecidos os valores das coordenadas articulares  $(r, \theta)$ . Uma das soluções mais eficientes é o método desenvolvido por Denavit-Hartenberg (D-H) que consiste na obtenção de quatro parâmetros  $(d, a, \alpha, \theta)$  para cada junta seguida do cálculo da matriz homogênea (convencionada  $A_i$ ) que é representada pelo produto de quatro transformações básicas (equação 3.1), sendo  $Rot_{z, \theta_i}$  uma rotação em torno do eixo z de  $\theta$  radianos,  $Trans_{z, d_i}$  uma translação ao longo do eixo z de  $d_i$ ,  $Trans_{x, a_i}$  uma translação ao longo do eixo x de  $a_i$  e por último a matriz  $Rot_{x, \alpha_i}$ , a qual corresponde a uma rotação em torno do eixo x de  $\alpha_i$  radianos. [32, 72]

$$A_i = \text{Rot}_{z, \theta_i} \text{Trans}_{z, d_i} \text{Trans}_{x, a_i} \text{Rot}_{x, \alpha_i} \quad (3.1)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} & 0 & 0 \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha_i} & -S_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Os parâmetros de D-H são obtidos após aplicar a regra da mão direita para fixar os sistemas de coordenadas na estrutura robótica, cuja interpretação física pode ser verificada da seguinte maneira [32, 72]:

- $\theta_i$ : o ângulo entre  $x_{i-1}$  e  $x_i$  medido no plano normal a  $z_{i-1}$  pela regra da mão direita;
- $a_i$ : a distância entre os eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$  medida na direção de  $x_i$ ;
- $d_i$ : a distância entre a origem de  $S_{i-1}$  e o ponto de intersecção entre  $x_i$  e  $z_{i-1}$  medida na direção de  $z_{i-1}$ ;
- $\alpha_i$ : o ângulo entre os eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$  medido no plano normal a  $x_i$  pela regra da mão direita.

Na representação D-H cada sistema é representado por uma matriz de transformação homogênea de dimensão 4x4 ( $A_i$ ), que descreve a relação de rotação e translação entre o sistema de coordenadas de um determinado elo, com relação ao sistema de coordenadas do elo anterior. Desta forma, é possível representar as coordenadas do extremo de um membro em relação a um sistema de coordenadas fixo, através de transformações sucessivas, conforme pode ser observado pela equação 3.4.

$$H_0^n = A_0^1 * A_1^2 * \dots * A_{n-1}^n \quad (3.4)$$

Na cinemática inversa a posição e a orientação do extremo de um membro são conhecidas e, através desta localização, obtém-se os ângulos das juntas de modo a alcançar o ponto desejado. Este método é largamente empregado, porém é o mais complexo, dada a existência de uma, múltiplas ou nenhuma solução possível para o problema, sendo esta, diretamente relacionada com a quantidade de graus de liberdade e o volume de trabalho do manipulador. [32, 72]

### 3.1.1 Modelo Cinemático da Estrutura Robótica

Neste tópico são apresentados todos os parâmetros necessários para o levantamento do modelo cinemático do robô bípede proposto ao longo deste trabalho, além de verificar informações que serão utilizadas na obtenção do modelo dinâmico. O diagrama cinemático aproximado da estrutura robótica pode ser observado na figura 3.1.

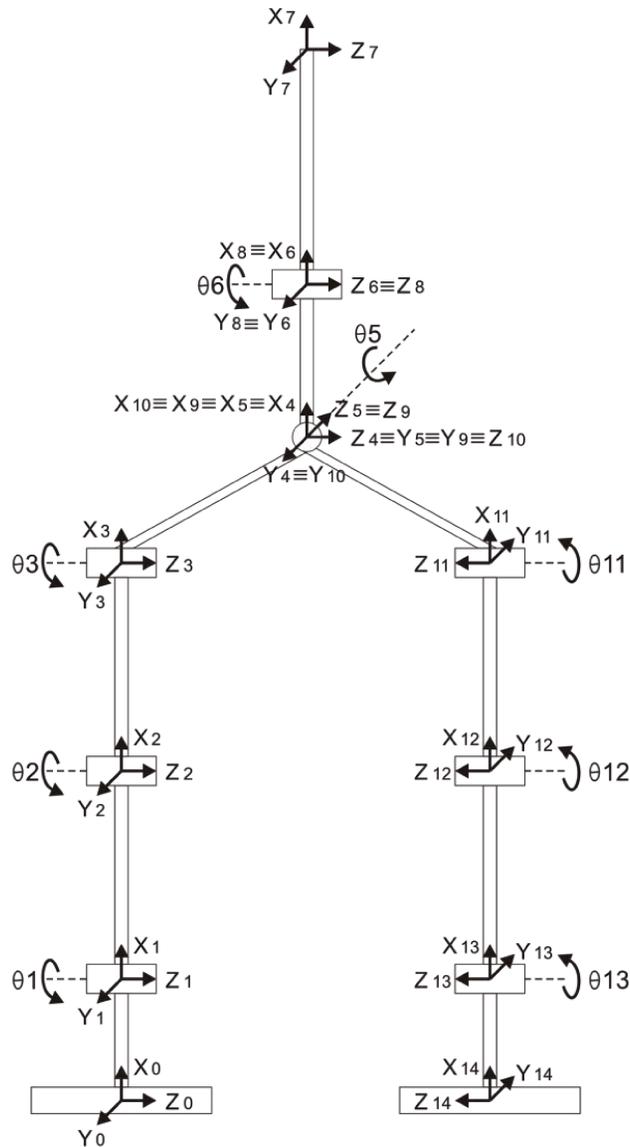


Figura 3.1: Vista frontal da fixação dos sistemas de coordenadas.

Na figura 3.2 tem-se o diagrama do robô contendo a medida dos elos e dos seus respectivos centros de massa.

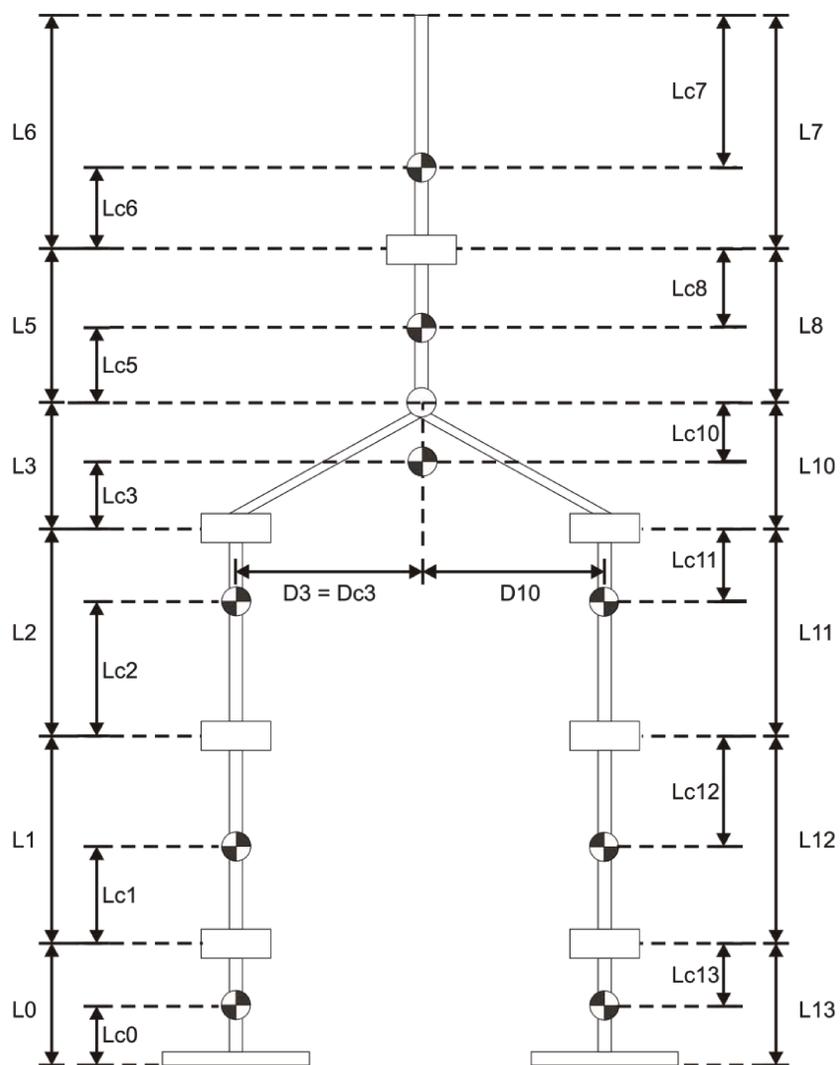


Figura 3.2: Vista frontal da medida dos elos com seus respectivos centros de massa.

A partir do modelamento apresentado nas figuras 3.1 e 3.2 tem-se que  $L$  representa a medida dos elos e  $Lc$  representa a posição do centro de massa de cada corpo rígido. Na tabela 3.1 e na tabela 3.2 tem-se todas as medidas da estrutura física do robô bípede desenvolvido. Já na tabela 3.3 é apresentada a massa de cada corpo rígido que compõe a estrutura do robô bípede.

Tabela 3.1: Distância entre os sistemas de coordenadas.

	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>D3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>
Distância (m)	0,0240	0,0590	0,0590	0,0400	0,0318	0,0000	0,0600	0,0892
	<b>L7</b>	<b>L8</b>	<b>L9</b>	<b>L10</b>	<b>D10</b>	<b>L11</b>	<b>L12</b>	<b>L13</b>
Distância (m)	0,0892	0,0600	0,0000	0,0400	0,0318	0,0590	0,0590	0,0240

Tabela 3.2: Distância do CG de cada elo referenciado ao sistema de coordenada i-1.

	<b>Lc0</b>	<b>Lc1</b>	<b>Lc2</b>	<b>Lc3</b>	<b>Dc3</b>	<b>Lc4</b>	<b>Lc5</b>	<b>Lc6</b>
Distância (m)	0,0049	0,0295	0,0436	0,0258	0,0306	0,0000	0,0180	0,0458
	<b>Lc7</b>	<b>Lc8</b>	<b>Lc9</b>	<b>Lc10</b>	<b>Dc10</b>	<b>Lc11</b>	<b>Lc12</b>	<b>Lc13</b>
Distância (m)	0,0435	0,0419	0,0000	0,0142	0,0000	0,0154	0,0295	0,0171

Tabela 3.3: Massa dos corpos rígidos.

	<b>m0</b>	<b>m1</b>	<b>m2</b>	<b>m3</b>	<b>m4</b>	<b>m5</b>	<b>m6</b>
Massa (Kg)	0,0333	0,1297	0,0742	0,1109	0,0000	0,0786	0,2960
	<b>m7</b>	<b>m8</b>	<b>m9</b>	<b>m10</b>	<b>m11</b>	<b>m12</b>	<b>m13</b>
Massa (Kg)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0742	0,1297	0,0333

Os parâmetros D-H do modelo proposto estão listados na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros D-H.

Parâmetros D-H	Junta													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha$	0	0	0	0	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\pi$	0	0	0
a	L0	L1	L2	L3	0	L5	L6	-L7	-L8	0	-L10	-L11	-L12	-L13
$\theta$	0	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	0	$\theta_5$	$\theta_6$	0	$-\theta_6$	$-\theta_5$	0	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$	$\theta_{13}$
d	0	0	0	D3	0	0	0	0	0	0	D10	0	0	0

Substituindo os parâmetros de D-H, localizados na tabela 3.4, na matriz de transformação homogênea (equação 3.3), tem-se as seguintes matrizes básicas de transformação:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(3.5) \quad A_1 = \begin{bmatrix} C01 & -S01 & L1*C01 & 0 \\ S01 & C01 & L1*S01 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C02 & -S02 & 0 & L2*C02 \\ S02 & C02 & 0 & L2*S02 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(3.7) \quad A_3 = \begin{bmatrix} C03 & -S03 & 0 & L3*C03 \\ S03 & C03 & 0 & L3*S03 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9) \quad A_5 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & -S\theta_5 & 0 & L_5 * C\theta_5 \\ S\theta_5 & C\theta_5 & 0 & L_5 * S\theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & L_6 * C\theta_6 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & L_6 * S\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11) \quad A_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -L_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A_8 = \begin{bmatrix} C\theta_6 - S\theta_6 L_8 * C\theta_6 \\ -S\theta_6 - C\theta_6 L_8 * S\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13) \quad A_9 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & S\theta_5 & 0 \\ -S\theta_5 & 0 & C\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$A_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -L_{10} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15) \quad A_{11} = \begin{bmatrix} C\theta_{11} & -S\theta_{11} & 0 & -L_{11} * C\theta_{11} \\ S\theta_{11} & C\theta_{11} & 0 & -L_{11} * S\theta_{11} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} C\theta_{12} & -S\theta_{12} & 0 & -L_{12} * C\theta_{12} \\ S\theta_{12} & C\theta_{12} & 0 & -L_{12} * S\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17) \quad A_{13} = \begin{bmatrix} C\theta_{13} & -S\theta_{13} & 0 & -L_{13} * C\theta_{13} \\ S\theta_{13} & C\theta_{13} & 0 & -L_{13} * S\theta_{13} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

### 3.1.2 Posição das Juntas e Centro de Gravidade do Elo

A posição de cada junta ( $j_x$ ) e o centro de gravidade (CG $_x$ ) de cada corpo rígido em relação ao sistema de coordenada S0 (pé de apoio) são obtidos através de transformações sucessivas conforme apresentada na equação 3.4, cuja forma geral pode ser descrita pela equação 3.19.

$$H_0^i = \begin{bmatrix} n_{xi} & s_{xi} & a_{xi} & d_{xi} \\ n_{yi} & s_{yi} & a_{yi} & d_{yi} \\ n_{zi} & s_{zi} & a_{zi} & d_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Considerando o comprimento dos elos L5 e L6 iguais ao comprimento dos elos L8 e L7 respectivamente, a localização do CG de cada junta e corpo rígido em relação ao sistema S0 pode ser representada conforme a seguir:

- Posição do CG do pé direito.

$$CG0 = \begin{bmatrix} Lc0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

- Posição da junta 1.

$$j1 = \begin{bmatrix} L0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

- Posição do CG da perna direita.

$$CG1 = \begin{bmatrix} L0+Lc1*\cos(\theta1) \\ Lc1*\sin(\theta1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

- Posição da junta 2.

$$j2 = \begin{bmatrix} L0+L1*\cos(\theta1) \\ L1*\sin(\theta1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

- Posição do CG da coxa direita.

$$CG2 = \begin{bmatrix} L0+Lc2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1) \\ Lc2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

- Posição da junta 3.

$$j3 = \begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

- Posição do CG da pelve.

$$CG3 = \begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)+Lc3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)+Lc3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \\ Dc3 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

- Posição da junta 5.

$$j5 = \begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \\ D3 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

- Posição do CG do primeiro elo do tronco.

CG5 =

$$\begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)+Lc5*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+Lc5*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \\ D3+Lc5*\sin(\theta5) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

-Posição da junta6.

j6 =

$$\begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)+L5*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L5*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \\ D3+L5*\sin(\theta5) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

-Posição do CG do segundo elo do tronco.

CG6 =

$$\begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)+L5*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L5*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \quad \dots \\ D3+L5*\sin(\theta5)+Lc6*\cos(\theta6)*\sin(\theta5) \\ -Lc6*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\sin(\theta6)+Lc6*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5)*\cos(\theta6) \\ \dots +Lc6*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\sin(\theta6)+Lc6*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5)*\cos(\theta6) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

- Posição do sistema de coordenada S7.

j7 =

$$\begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)+L5*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L5*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5) \quad \dots \\ D3+L5*\sin(\theta5)+L6*\cos(\theta6)*\sin(\theta5) \\ -L6*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\sin(\theta6)+L6*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5)*\cos(\theta6) \\ \dots +L6*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)*\sin(\theta6)+L6*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)*\cos(\theta5)*\cos(\theta6) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

- Posição da junta 11.

$$j11 = \begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)-L10*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)-L10*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \\ D10+D3 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

- Posição do CG da coxa esquerda.

$$CG11 = \begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)-Lc11*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)-Lc11*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \quad \dots \\ D10+D3 \\ -L10*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ \dots -L10*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

- Posição da junta 12.

$$j12 = \begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)-L11*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)+L1*\sin(\theta1)-L11*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \quad \dots \\ D10+D3 \\ -L10*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ \dots -L10*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

- Posição do CG da perna esquerda.

CG12 =

$$\begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)-L11*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L10*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)-Lc12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12)+L1*\sin(\theta1)-L11*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \dots \\ D10+D3 \\ +L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)-Lc12*\cos(\theta12)*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \\ \dots -L10*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \quad \dots \\ -Lc12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)*\sin(\theta12) \\ \dots \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

- Posição da junta 13.

j13 =

$$\begin{bmatrix} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)-L11*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L10*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)-L12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12)+L1*\sin(\theta1)-L11*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \dots \\ D10 + D3 \\ +L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)-L12*\cos(\theta12)*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11) \\ \dots -L10*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \quad \dots \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\dots \left. \begin{array}{l} -L12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)*\sin(\theta12) \\ \dots \end{array} \right] \dots$$

- Posição do CG do pé esquerdo.

CG13 =

$$\left[ \begin{array}{l} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)-L11*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L10*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)-Lc13*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12-\theta13)-L12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12) \dots \\ D10+D3 \\ +L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)-Lc13*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12)*\sin(\theta13) \\ \dots +L1*\sin(\theta1)-L11*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L10*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \dots \end{array} \right] \quad (3.37)$$

$$\dots \left. \begin{array}{l} -L12*\cos(\theta12)*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)*\sin(\theta12) \\ \dots \\ -Lc13*\cos(\theta13)*( \cos(\theta12)*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)+\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)*\sin(\theta12) ) \dots \end{array} \right] \dots$$

- Posição do sistema de coordenada 14.

j14 =

$$\left[ \begin{array}{l} L0+L2*\cos(\theta1+\theta2)+L1*\cos(\theta1)-L11*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L10*\cos(\theta1+\theta2+\theta3) \\ L2*\sin(\theta1+\theta2)-L13*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12-\theta13)-L12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12) \dots \\ D10+D3 \\ +L3*\cos(\theta1+\theta2+\theta3)-L13*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11-\theta12)*\sin(\theta13) \\ \dots +L1*\sin(\theta1)-L11*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L10*\sin(\theta1+\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta1+\theta2+\theta3) \dots \end{array} \right] \quad (3.38)$$

$$\dots \left. \begin{array}{l} -L12*\cos(\theta12)*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)-L12*\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)*\sin(\theta12) \\ \dots \\ -L13*\cos(\theta13)*( \cos(\theta12)*\cos(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)+\sin(\theta1+\theta2+\theta3-\theta11)*\sin(\theta12) ) \dots \end{array} \right] \dots$$

### 3.1.2.1 Simulação em MATLAB

A figura 3.3 ilustra a estrutura do robô bípede modelado no MATLAB na posição ereta, sendo o CG de cada corpo, representado pelo símbolo ‘\*’ e as juntas por ‘.’.

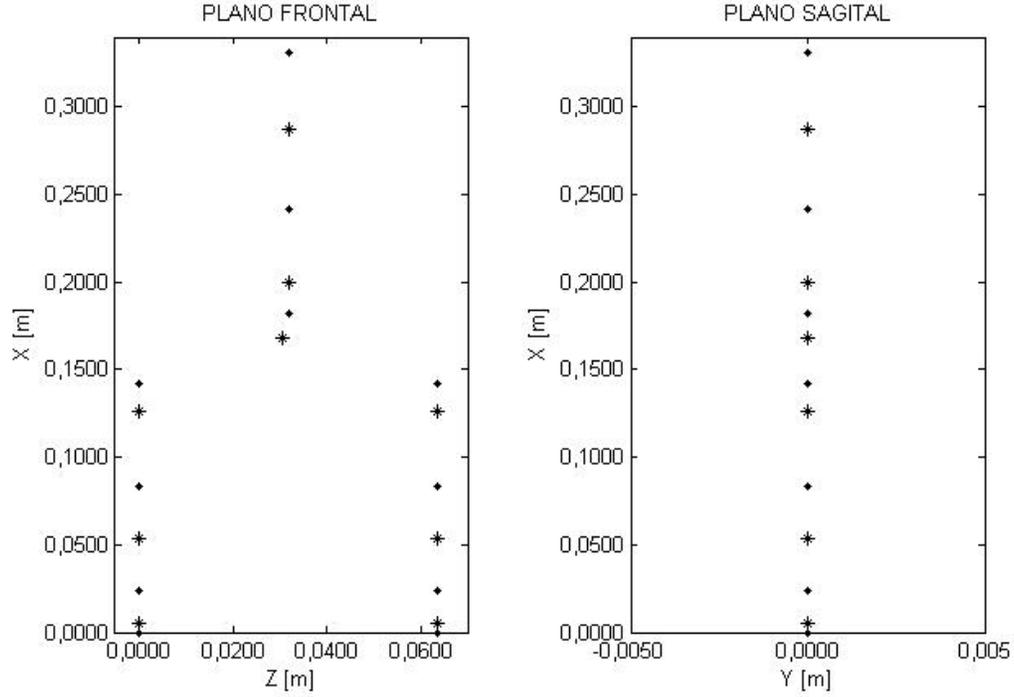


Figura 3.3: Estrutura bípede na posição ereta.

As equações para o cálculo da posição do CG do robô bípede podem ser expressadas pelas equações 3.39 a 3.41.

$$X_{CG} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i x_i}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (3.39) \quad Y_{CG} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i y_i}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (3.40) \quad Z_{CG} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i z_i}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (3.41)$$

Resolvendo as equações 3.39 a 3.41, tem-se as expressões que representam o CG do robô no espaço:

$$X_{CG} = \frac{m_0 x_0 + m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + m_5 x_5 + m_6 x_6 + m_{11} x_{11} + m_{12} x_{12} + m_{13} x_{13}}{m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_5 + m_6 + m_{11} + m_{12} + m_{13}} \quad (3.42)$$

$$Y_{CG} = \frac{m_0 y_0 + m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + m_5 y_5 + m_6 y_6 + m_{11} y_{11} + m_{12} y_{12} + m_{13} y_{13}}{m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_5 + m_6 + m_{11} + m_{12} + m_{13}} \quad (3.43)$$

$$Z_{CG} = \frac{m_0 z_0 + m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3 + m_5 z_5 + m_6 z_6 + m_{11} z_{11} + m_{12} z_{12} + m_{13} z_{13}}{m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_5 + m_6 + m_{11} + m_{12} + m_{13}} \quad (3.44)$$

Substituindo os valores físicos apresentados nas tabelas 3.1 a 3.4 nas equações 3.42, 3.43 e 3.44 tem-se os valores das coordenadas do CG para o robô bípede.

$$X_{CG}=0,1589\text{m} \quad (3.45)$$

$$Y_{CG}=0,0000\text{ m} \quad (3.46)$$

$$Z_{CG}=0,0317\text{m} \quad (3.47)$$

O CG do robô na posição ereta pode ser vista na figura 3.4, onde as juntas são representadas por um ponto '.' e o CG pelo losango.

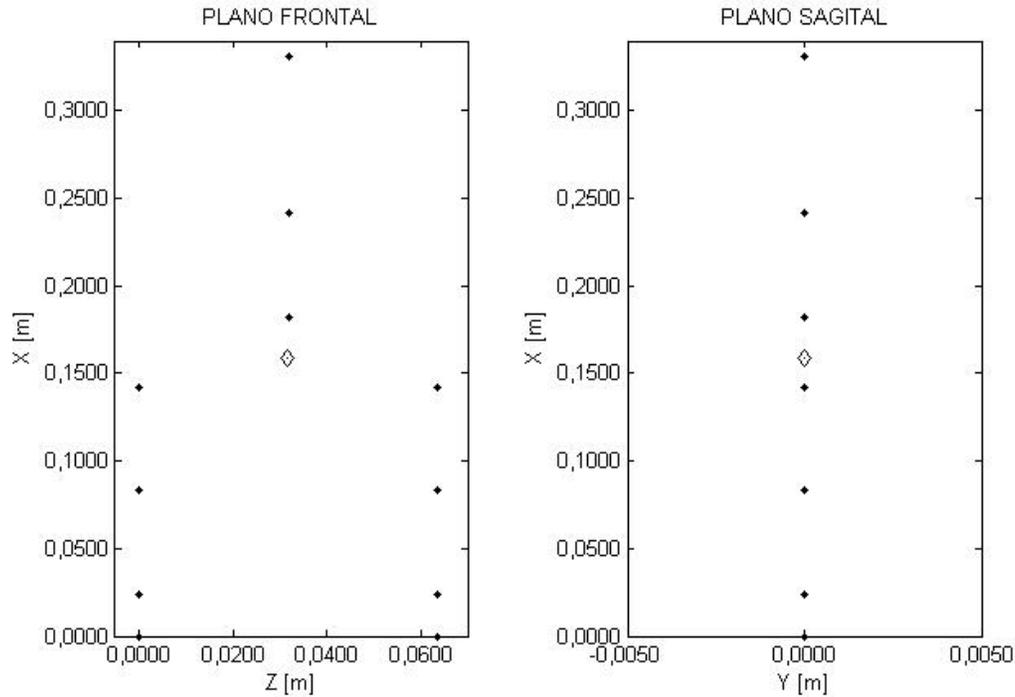


Figura 3.4: CG do robô bípede na posição ereta.

### 3.1.3 Cinemática de Velocidade

A matriz Jacobiana fornece a relação entre a velocidade no espaço de juntas com a velocidade no espaço de trabalho (cartesiano). Com a obtenção desta matriz é possível calcular a velocidade angular e linear de qualquer parte do robô. Sendo assim, as informações fornecidas pelo Jacobiano são essenciais para a análise e para o controle dos seus movimentos. Segundo o desenvolvimento apresentado em [32, 72], a matriz jacobiana para o tipo de junta prismática e rotacional assume a seguinte forma:

$$\begin{cases} J_i = \begin{bmatrix} Z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{Junta Prismática} \\ J_i = \begin{bmatrix} Z_{i-1} \times (O_n - O_{i-1}) \\ Z_{i-1} \end{bmatrix} & \text{Junta Rotacional} \end{cases} \quad (3.48)$$

Como a estrutura em estudo é formada por uma cadeia serial de apenas juntas rotacionais, tem-se que o Jacobiano assume o formato dado pela equação 3.49.

$$J_i = \begin{bmatrix} Z_{i-1} \times (O_n - O_{i-1}) \\ Z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Os parâmetros do Jacobiano são extraídos da matriz de transformação homogênea (equação 3.19) obtida do modelo cinemático, cujos campos correspondem aos elementos  $Z_i$  e  $O_i$  do Jacobiano.

$$H_0^i = \begin{bmatrix} n_{xi} & s_{xi} & a_{xi} & d_{xi} \\ n_{yi} & s_{yi} & a_{yi} & d_{yi} \\ n_{zi} & s_{zi} & a_{zi} & d_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Z_i = \begin{bmatrix} a_{xi} \\ a_{yi} \\ a_{zi} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$O_i = \begin{bmatrix} d_{xi} \\ d_{yi} \\ d_{zi} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

### 3.1.3.1 Velocidade Linear e Angular das juntas do Robô Bípede

Após o cálculo da matriz Jacobiana, as velocidades angulares e lineares podem ser obtidas por meio da seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \dots \\ W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = J^* \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

onde o parâmetro  $V$  representa a velocidade linear, o parâmetro  $W$  representa a velocidade angular,  $J$  é a matriz Jacobiana e  $\dot{q}$  consiste na velocidade angular da junta. Portanto, as velocidades lineares e angulares podem ser obtidas através das expressões 3.53 e 3.54.

$$V = J_v^* \dot{q} \quad (3.53)$$

$$W = J_w^* \dot{q} \quad (3.54)$$

### 3.1.4 Cinemática de Aceleração

A aceleração linear e angular das juntas do robô, relacionada à origem do sistema  $S_0$  ( $x_0, y_0, z_0$ ), é obtida derivando a expressão matemática descrita na cinemática de velocidade em relação ao tempo, conforme as equações 3.55 e 3.56. [32, 72]

$$V=J_v(q)*\dot{q} \quad (3.55)$$

$$W=J_w(q)*\dot{q} \quad (3.56)$$

Aplicando a derivada nas equações acima, obtém-se as expressões 3.57 e 3.58.

$$\dot{V}=J_v(q)*\ddot{q}+J_v(q)*\dot{q} \quad (3.57)$$

$$\dot{W}=J_w(q)*\ddot{q}+J_w(q)*\dot{q} \quad (3.58)$$

onde

$$J_w(q)=\frac{\partial J_w}{\partial J_{q1}}*\dot{q}_1+\frac{\partial J_w}{\partial J_{q2}}*\dot{q}_2\dots+\frac{\partial J_w}{\partial J_{qn}}*\dot{q}_n \quad (3.59)$$

$$J_v(q)=\frac{\partial J_v}{\partial J_{q1}}*\dot{q}_1+\frac{\partial J_v}{\partial J_{q2}}*\dot{q}_2\dots+\frac{\partial J_v}{\partial J_{qn}}*\dot{q}_n \quad (3.60)$$

## 3.2 Análise Dinâmica

Este tópico destina-se ao estudo da modelagem dinâmica do robô bípede, cujo conhecimento é essencial para o controle do mecanismo e sua respectiva simulação numérica, uma vez que se trata de formular equações matemáticas que descrevem as forças e torques nas juntas, conhecidos como forças generalizadas.

As equações dinâmicas de movimento de um manipulador são normalmente obtidas através das formulações de Newton-Euler (N-E) ou Lagrange-Euler (L-E) [32, 72]. A formulação de N-E consiste de um método numérico de cálculos iterativos, enquanto que a L-E é uma técnica baseada em cálculos algébricos.

Embora ambas as formulações apliquem métodos diferenciados para obtenção das forças generalizadas, suas representações são equivalentes à equação 3.61.

$$\tau=D(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q) \quad (3.61)$$

onde  $\tau$  é correspondente ao vetor de forças generalizadas.  $q$ ,  $\dot{q}$  e  $\ddot{q}$  representam, respectivamente, os vetores de posição, velocidade e aceleração das juntas.  $D(q)$  consiste na matriz de forças inerciais.  $C(q, \dot{q})$  é a matriz de forças centrípetas e Coriolis e  $g(q)$  é o vetor de forças gravitacionais.

Como o foco deste trabalho não está em realizar um controle do robô em tempo real, optou-se pela formulação de Lagrange-Euler por ser um método simples e sistemático, cujas equações dinâmicas podem ser escritas conforme a equação 3.62.

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3.62)$$

Sendo:

L: Função lagrangeana. Ela é a diferença entre a energia cinética (K) e a energia potencial (P) total no sistema físico.

$q$ : Vetor de posição das juntas.

$\dot{q}$ : Vetor de velocidade das juntas.

$\tau$ : Vetor das forças/torques aplicados às juntas do robô

### 3.2.1 Energia Cinética (K)

A energia cinética, também definida como energia de movimento, por estar associada ao movimento de um corpo, pode ser calculada somando as energias de translação e rotação do seu centro de massa, de acordo com a equação 3.63.

$$K = \frac{1}{2} m v^T v + \frac{1}{2} w^T I w \quad (3.63)$$

Sendo:

m: Massa do corpo

v: Velocidade linear do centro de massa em relação ao sistema S0.

w: Velocidade angular do centro de massa em relação ao sistema S0.

I: Momento de inércia em torno do centro de massa do corpo.

Na parte da energia cinética rotacional, não importa em qual sistema de coordenadas w e I são calculadas. Por essa razão, calcula-se a matriz I em relação aos eixos do sistema de

coordenadas fixado sobre o próprio objeto, tornando a tarefa mais simples do que se fosse relacionada ao sistema S0. Desta forma, a matriz I é independente do movimento do objeto mas, passa a ser necessário calcular a velocidade angular com relação ao mesmo sistema de coordenadas. Assim sendo, a velocidade linear e angular de qualquer ponto em qualquer elo pode ser expressa em termos da matriz Jacobiana e da derivada das variáveis das juntas, conforme as equações 3.64 e 3.65.

$$v_i = J_{v_i}(q)\dot{q} \quad (3.64)$$

$$w_i = R_i^T(q)J_{w_i}(q)\dot{q} \quad (3.65)$$

onde, R é a matriz de rotação que transforma os vetores do sistema de coordenadas fixado no objeto para o sistema de coordenadas inercial (S0).

Supondo que a massa do elo é  $m_i$  e que a matriz de inércia do elo i tenha sido calculada sobre um sistema de coordenadas paralelo ao sistema i, e cuja origem esteja sobre o centro de massa deste elo. Logo, a energia cinética total do robô pode ser expressa conforme a equação 3.66.

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{w_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{w_i}(q)] \dot{q} \quad (3.66)$$

ou na forma simplificada,

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.67)$$

onde D(q) é uma matriz simétrica e positiva chamada de matriz de inércia.

### 3.2.2 Energia Potencial (P)

A única fonte de energia potencial em sistemas rígidos é a gravidade. Representando a gravidade por um vetor  $g$  expressado no sistema de coordenadas S0, tem-se que a energia potencial de um corpo de massa  $m$  concentrada em seu centro de massa, localizado a uma distância  $r_c$  do sistema S0 pode ser expressada conforme a equação 3.68.

$$P(q) = g^T r_c m \quad (3.68)$$

Logo, a energia potencial total do robô pode ser representada de acordo com a equação 3.69.

$$P(q) = g^T \sum_{i=1}^n r_i m \quad (3.69)$$

### 3.2.3 Equação de Movimento

Após o levantamento da energia cinética e da energia potencial total do robô é possível obter seu Lagrangeano, conforme a equação 3.70.

$$L = K - P \quad (3.70)$$

Substituindo as equações (3.67) e (3.69) em (3.70), tem-se:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - P(q) \quad (3.71)$$

Logo,

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \dot{q}_j \quad (3.72)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \frac{d}{dt} d_{kj}(q) \dot{q}_j = \sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.73)$$

e, dessa maneira, pode-se obter

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial P}{\partial q_k} \quad (3.74)$$

Substituindo as equações 3.73 e 3.74 na equação dinâmica de L-E (3.62) tem-se:

$$\tau_k = \sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j=1}^n \left( \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right) \dot{q}_i \dot{q}_j + \frac{\partial P}{\partial q_k} \quad k=1,2,\dots,n \quad (3.75)$$

Sendo a matriz de inércia (D) simétrica, é possível mostrar que:

$$\sum_{i,j=1}^n \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \left( \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} \right) \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.76)$$

Portanto,

$$\sum_{i,j=1}^n \left( \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right) \dot{q}_i \dot{q}_j = \sum_{i,j=1}^n \underbrace{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right)}_{C_{ijk}} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.77)$$

Sendo os termos  $C_{ijk}$  conhecidos como símbolos de Christoffel. Dada a simetria da matriz D, tem-se que para um k fixo, a expressão  $C_{ijk} = C_{jik}$  é verdadeira. Definindo,

$$\phi_k = \frac{\partial P}{\partial q_k} \quad (3.78)$$

as equações de L-E podem ser escritas da seguinte maneira.

$$\tau_k = \sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j=1}^n C_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + \phi_k(q) \quad k=1,2,\dots,n \quad (3.79)$$

Dada a complexidade das equações dinâmicas de movimento do robô bípede proposto neste trabalho devido ao grande número de graus de liberdade que o compõem e à modelagem dinâmica adotada, optou-se por não apresentá-las neste texto. Entretanto, as equações podem ser obtidas executando o algoritmo implementado em MATLAB, o qual consta como documentação no LSMR.

### 3.3 Análise de Estabilidade

Robôs bípedes são estruturas que apresentam instabilidades em seus movimentos uma vez que a projeção de seu CG é constantemente alterada. O equilíbrio dinâmico deste tipo de estrutura pode ser alcançado aplicando o conceito de ZMP, o qual corresponde a um ponto localizado sobre a superfície onde a soma de todas as forças de rotação se anulam. Quando o ZMP é aplicado no algoritmo de estabilidade dinâmica de robôs bípedes, ele é calculado analiticamente conforme as equações 3.80 e 3.81. [12, 13, 42, 48, 64]

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g) y_i - \sum_{i=0}^n m_i \ddot{y}_i x_i - \sum_{i=0}^n I_{iz} \alpha_{iz}}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g)} \quad (3.80)$$

$$Z_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g) z_i - \sum_{i=0}^n m_i \ddot{z}_i x_i - \sum_{i=0}^n I_{iy} \alpha_{iy}}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g)} \quad (3.81)$$

Sendo:

$\ddot{x}_i, \ddot{y}_i$  e  $\ddot{z}_i$  : Aceleração linear dos vários elementos do corpo.

$I_{iz}, I_{iy}$  : Inércia dos vários elementos do corpo.

$\alpha_{iz}, \alpha_{iy}$  : Aceleração angular dos vários elementos do corpo.

$m_i$  : Massa dos vários elementos do corpo.

$g$  : Aceleração gravitacional.

Se o ZMP estiver localizado dentro da região formada pelos pontos de apoio do rb em relação a superfície, o movimento desejado é dinamicamente realizável, enquanto que a qualidade da estabilidade do movimento é definida pela margem de estabilidade, a qual corresponde a distância do ZMP em relação às extremidades da região de suporte. Quanto maior a margem, melhor será a qualidade da estabilidade apresentada pela estrutura. [12, 13, 16, 48, 64, 75]

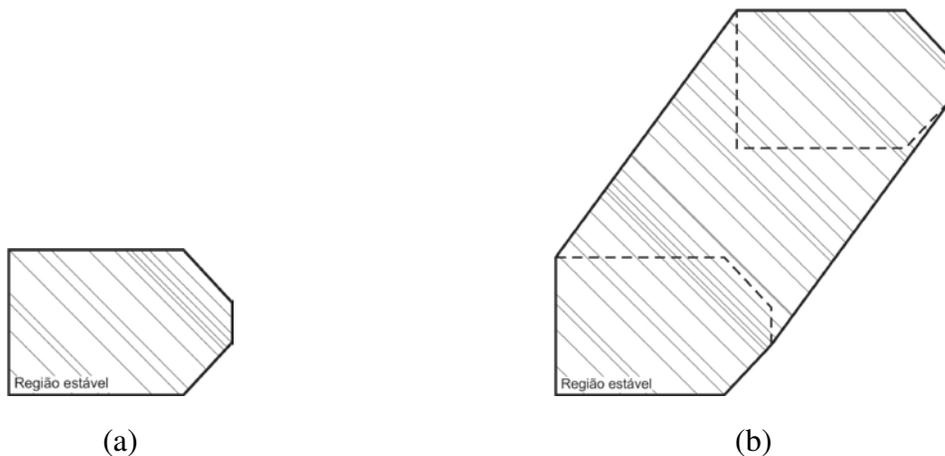


Figura 3.5: À esquerda (a) tem-se a região estável de um rb com apenas um dos pés em contato com a superfície e à direita tem-se a região estável quando os dois pés apoiados.

Quando o ZMP está dentro da região de suporte, ele é equivalente ao Centro de Pressão (CP), mas é comumente usado para representar o ponto analiticamente calculado com base no estado e aceleração do robô, enquanto que o CP é comumente usado para representar o ponto medido a partir das forças de reação do solo, os quais são frequentemente obtidos por sensores de pressão ou força localizado nas solas dos pés, conforme observado nos avançados

robôs humanoides QRIO, ASIMO e HRP. Por outro lado, se o ZMP estiver fora da região estável (figura 3.5), o movimento planejado é instável. [6, 49, 64, 69]

Além do sistema dinâmico, o ZMP também pode ser calculado para um sistema estático considerando todas as acelerações das equações 3.80 e 3.81 iguais a zero, obtendo assim, as equações 3.82 e 3.83, as quais são equivalentes à fórmula aplicada para o cálculo do CG (equações 3.40 e 3.41).

$$Z_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i z_i}{\sum_{i=0}^n m_i} = Z_{CG} \quad (3.82)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i y_i}{\sum_{i=0}^n m_i} = Y_{CG} \quad (3.83)$$

### 3.3.1 Equações ZMP para o Robô Bípede

Aplicando as equações 3.80 e 3.81 para a estrutura bípede projetada neste trabalho, obtêm-se as expressões 3.84 e 3.85.

$$Y_{zmp} = \frac{\text{Num}_Y}{\text{Den}} \quad (3.84)$$

$$Z_{zmp} = \frac{\text{Num}_Z}{\text{Den}} \quad (3.85)$$

Sendo,

$$\begin{aligned} \text{Num}_Y = & m_0 g y_0 + m_1 (\ddot{x}_1 + g) y_1 - m_1 \ddot{y}_1 x_1 - I_{1z} \alpha_{1z} + m_2 (\ddot{x}_2 + g) y_2 - m_2 \ddot{y}_2 x_2 - I_{2z} \alpha_{2z} + m_3 (\ddot{x}_3 + g) y_3 - m_3 \ddot{y}_3 x_3 \dots \\ & - I_{3z} \alpha_{3z} + m_5 (\ddot{x}_5 + g) y_5 - m_5 \ddot{y}_5 x_5 - I_{5z} \alpha_{5z} + m_6 (\ddot{x}_6 + g) y_6 - m_6 \ddot{y}_6 x_6 - I_{6z} \alpha_{6z} + m_{11} (\ddot{x}_{11} + g) y_{11} - m_{11} \ddot{y}_{11} x_{11} \dots \\ & - I_{11z} \alpha_{11z} + m_{12} (\ddot{x}_{12} + g) y_{12} - m_{12} \ddot{y}_{12} x_{12} - I_{12z} \alpha_{12z} + m_{13} (\ddot{x}_{13} + g) y_{13} - m_{13} \ddot{y}_{13} x_{13} - I_{13z} \alpha_{13z} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Num}_Z = & m_0 g z_0 + m_1 (\ddot{x}_1 + g) z_1 - m_1 \ddot{z}_1 x_1 - I_{1y} \alpha_{1y} + m_2 (\ddot{x}_2 + g) z_2 - m_2 \ddot{z}_2 x_2 - I_{2y} \alpha_{2y} + m_3 (\ddot{x}_3 + g) z_3 - m_3 \ddot{z}_3 x_3 \dots \\ & - I_{3y} \alpha_{3y} + m_5 (\ddot{x}_5 + g) z_5 - m_5 \ddot{z}_5 x_5 - I_{5y} \alpha_{5y} + m_6 (\ddot{x}_6 + g) z_6 - m_6 \ddot{z}_6 x_6 - I_{6y} \alpha_{6y} + m_{11} (\ddot{x}_{11} + g) z_{11} - m_{11} \ddot{z}_{11} x_{11} \dots \\ & - I_{11y} \alpha_{11y} + m_{12} (\ddot{x}_{12} + g) z_{12} - m_{12} \ddot{z}_{12} x_{12} - I_{12y} \alpha_{12y} + m_{13} (\ddot{x}_{13} + g) z_{13} - m_{13} \ddot{z}_{13} x_{13} - I_{13y} \alpha_{13y} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Den} = & m_0 g + m_1 (\ddot{x}_1 + g) + m_2 (\ddot{x}_2 + g) + m_3 (\ddot{x}_3 + g) + m_5 (\ddot{x}_5 + g) + m_6 (\ddot{x}_6 + g) + m_{11} (\ddot{x}_{11} + g) + m_{12} (\ddot{x}_{12} + g) \dots \\ & + m_{13} (\ddot{x}_{13} + g) \end{aligned}$$

# Capítulo 4

## Planejamento da Trajetória das Juntas

### 4.1 Planejamento de Trajetórias

Esta seção destina-se ao planejamento da trajetória das juntas do robô bípede para a realização de uma marcha dinamicamente estável no plano sagital, aplicando os passos ilustrados no diagrama da figura 4.1.

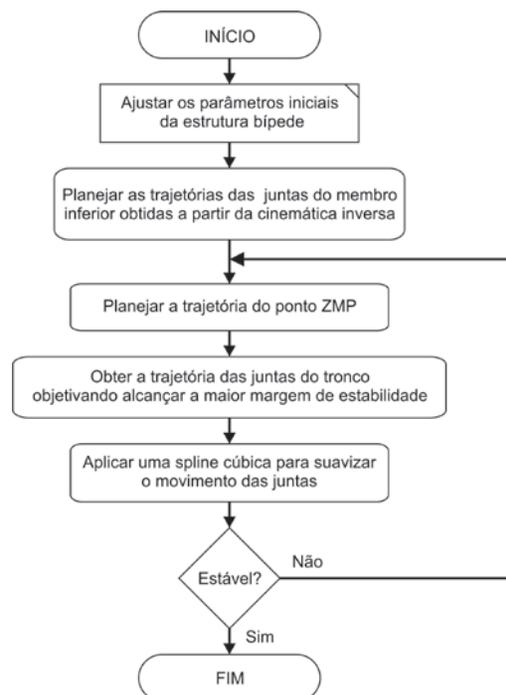


Figura 4.1: Planejamento da trajetória das juntas para uma marcha estável.

O planejamento do movimento das juntas da estrutura bípede consiste de cinco passos. O primeiro passo visa ajustar os parâmetros iniciais da estrutura bípede, ou seja, as constantes do sistema. Na sequência, há o planejamento da trajetória das pernas baseado na análise geométrica da estrutura, sem levar em consideração a estabilidade do movimento. Em seguida, define-se a trajetória do ZMP esperado para todo o movimento. No quarto passo, após definir a estabilidade desejada, calcula-se a trajetória das juntas do tronco de modo a alcançar a maior margem de estabilidade. Por fim, aplica-se uma spline cúbica [9] para a suavização do movimento das juntas e verificar se o movimento da estrutura é estável.

## 4.2 Planejamento da Trajetória do Membro Inferior

O planejamento da trajetória das juntas inicia-se com uma função entre o deslocamento do tornozelo e do quadril no plano sagital. Em seguida, obtém-se a função que descreve a trajetória do tornozelo acompanhada da função da trajetória do quadril. A associação destas três funções fornece a posição do joelho para cada instante de tempo  $t$ . As nomenclaturas adotadas nas equações de movimentos podem ser verificadas na figura 4.2.

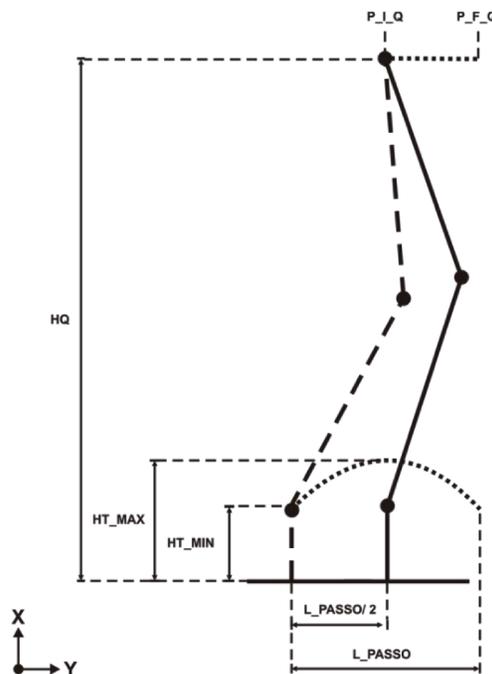


Figura 4.2: Planejamento da trajetória.

Onde:

HQ : Altura do quadril em relação a região de contato do pé com a superfície de apoio.

HT\_MIN : Altura mínima do tornozelo em relação a superfície de suporte.

HT\_MAX : Altura máxima do tornozelo em relação a superfície de suporte.

L\_PASSO : Largura do passo.

P\_I\_Q : Posição inicial do quadril.

P\_F\_Q : Posição final do quadril.

Os valores das variáveis e constantes apresentados na figura 4.2 os quais foram utilizados para obtenção das funções que descrevem a trajetória das juntas do membro inferior e estão listados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores das constantes apresentadas na figura 4.2:

<b>Nome</b>	<b>Valor</b>
HQ	0,1370 m
P_I_Q	0,0000 m
P_F_Q	0,0200 m
HT_MIN	0,0240 m
HT_MAX	0,0340 m
L_PASSO	0,0400 m

#### 4.2.1 Funções das Trajetórias

Neste tópico serão obtidas as equações que descrevem os movimentos de todas as juntas relacionadas ao membro inferior e superior, iniciando-se pela função que relaciona o deslocamento do joelho e do quadril no eixo Y. As trajetórias da junta do tornozelo e do quadril estão ilustradas na figura 4.3.

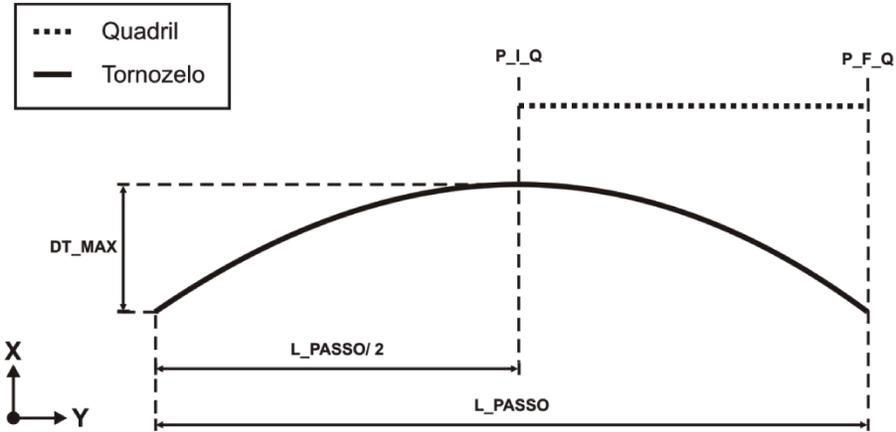


Figura 4.3: Trajetória do quadril e do joelho.

A trajetória para o tornozelo do pé de balanço adotada ao longo do desenvolvimento deste trabalho satisfaz uma função de segundo grau, descrevendo uma parábola com concavidade para baixo [11,16], enquanto que as trajetórias das juntas do quadril satisfazem uma reta.

A trajetória do joelho é resultante da associação da trajetória do tornozelo do pé de balanço e do quadril, cuja obtenção está dividida em quatro etapas.

#### 4.2.1.1 Relação Entre o Deslocamento do Tornozelo e do Quadril

A primeira etapa do processo de obtenção da trajetória do joelho consiste no levantamento da função que descreve a relação entre o deslocamento do tornozelo do pé de apoio e do quadril em relação ao eixo Y, conforme é ilustrado na figura 4.4.

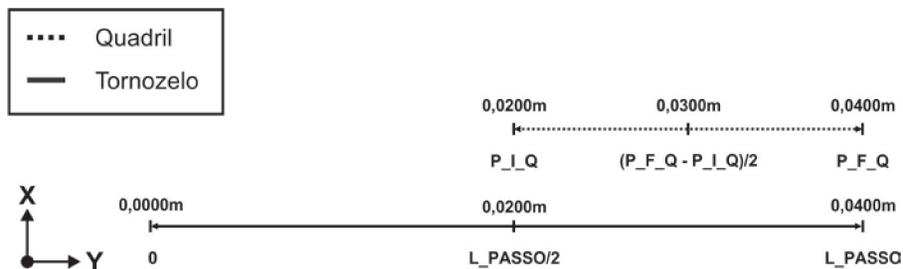


Figura 4.4: Relação entre o deslocamento do joelho e do quadril, em relação ao eixo Y.

Esta relação pode ser representada por uma função de primeiro grau, vista na equação 4.1.

$$YQ(YT\_BA)=a*YT\_BA+b \quad (4.1)$$

Sendo:

YQ : Deslocamento do quadril no eixo Y.

YT\_BA: Deslocamento do tornozelo do pé de balanço no eixo Y.

Logo, tem-se que para  $YT_{BA} = 0$ ,  $YQ(0)=b=0,020$ . Para  $YT_{BA} = 0,040$ ,

$$YQ(0,040)=a*0,040+0,020=0,040 \quad (4.2)$$

e, portanto,  $a=0,5$  e  $b=0,020$ . Substituindo as constantes a e b na equação 4.1, tem-se:

$$YQ(YT_{BA})=0,5*YT_{BA}+0,020 \quad (4.3)$$

que consiste em uma condição válida para o intervalo  $0 \leq YT_{BA} \leq 0,040$ . É importante observar que o pé de apoio é estático, logo, não há deslocamento em Y e, conseqüentemente, o valor de  $YT_{AP} = 0$ .

#### 4.2.1.2 Trajetória do Tornozelo

A segunda etapa consiste em levantar a função que descreve a trajetória das juntas do tornozelo, conforme a figura 4.5.

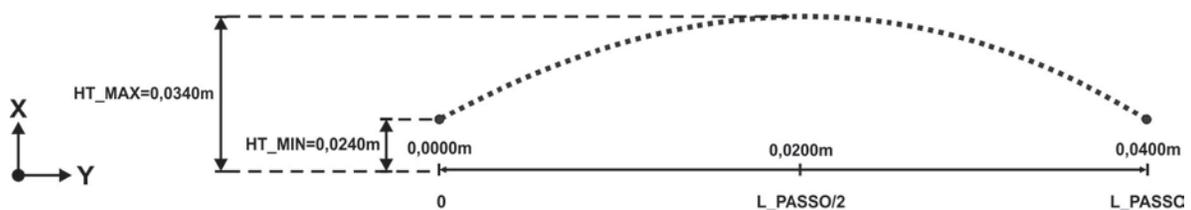


Figura 4.5: Trajetória do tornozelo.

A trajetória do tornozelo pode ser descrita por uma parábola com concavidade para baixo e, portanto, pode ser representada pela função a seguir:

$$XT_{BA}(YT_{BA})=a*YT_{BA}^2+b*YT_{BA}+c \quad (4.4)$$

Sendo:

XT\_BA : Altura do tornozelo do pé de balanço.

YT\_BA : Deslocamento do tornozelo do pé de balanço no eixo Y.

Logo, tem-se que para  $YT_{BA} = 0$ ,

$$X_{T\_BA}(0) = c = 0,024 \quad (4.5)$$

Para  $Y_{T\_BA} = 0,020$ ,

$$X_{T\_BA}(0,020) = a * 0,020^2 + b * 0,020 + 0,024 = 0,034 \quad (4.6)$$

e para  $Y_{T\_BA} = 0,040$ ,

$$X_{T\_BA}(0,040) = a * 0,040^2 + b * 0,040 + 0,024 = 0,024 \quad (4.7)$$

e, portanto,  $a = -0,025$ ,  $b = 1$  e  $c = 0,024$ .

Substituindo-se as constantes  $a$  e  $b$  na equação 4.4, obtém-se:

$$X_{T\_BA}(Y_{T\_BA}) = -0,025 * Y_{T\_BA}^2 + 1 * Y_{T\_BA} + 0,024 \quad (4.8)$$

que é uma condição válida para o intervalo  $0 \leq Y_{T\_BA} \leq 0,040$ .

A trajetória do joelho também pode ser descrita por uma elipse representada pela equação 4.9.

$$\frac{(X_{T\_BA} - HT_{MIN})^2}{(HT_{MAX} - HT_{MIN})^2} + \frac{(Y_{T\_BA} - \frac{L_{PASSO}}{2})^2}{(\frac{L_{PASSO}}{2})^2} = 1 \quad (4.9)$$

Colocando a equação 4.9 em função de  $Y_{T\_BA}$ , obtém-se:

$$X_{T\_BA}(Y_{T\_BA}) =$$

$$\sqrt{(HT_{MAX} - HT_{MIN})^2 - \frac{(Y_{T\_BA} - \frac{L_{PASSO}}{2})^2}{(\frac{L_{PASSO}}{2})^2} * (HT_{MAX} - HT_{MIN})^2} + HT_{MIN} \quad (4.10)$$

Substituindo as constantes na equação 4.10, obtém-se:

$$X_{T\_BA}(Y_{T\_BA}) = 0,010 * \sqrt{1 - \frac{(Y_{T\_BA} - 0,020)^2}{0,0400}} + 0,024 \quad (4.11)$$

que é uma condição válida para o intervalo  $0 \leq Y_{T\_BA} \leq 0,040$ . Observa-se que como não há deslocamento do pé de apoio, tanto a altura quanto o deslocamento em  $Y$  são fixos, portanto  $Y_{T\_AP} = 0$  e  $X_{T\_AP} = 0,024$ .

#### 4.2.1.3 Trajetória do Quadril

A terceira etapa consiste em obter a trajetória do quadril e, como se trata de uma reta sem variação na altura do quadril, tem-se que  $X_Q = 0,137$  para todo o ciclo.

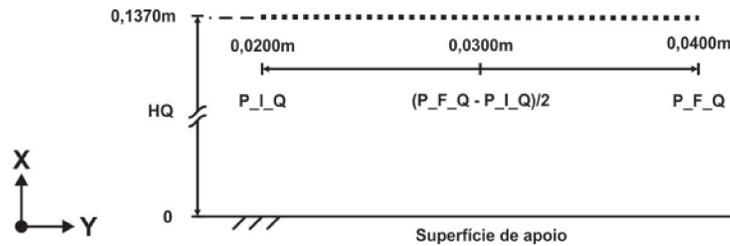


Figura 4.6: Trajetória do quadril.

#### 4.2.1.4 Trajetória do Joelho

Ao finalizar a terceira etapa, obtém-se as três funções necessárias para encontrar a posição das juntas dos joelhos a cada instante de tempo  $t$ . Considerando que a perna esquerda corresponde ao balanço tem-se, então, que a posição da junta do joelho pode ser obtida pela representação matemática proposta pelo diagrama ilustrado na figura 4.7.

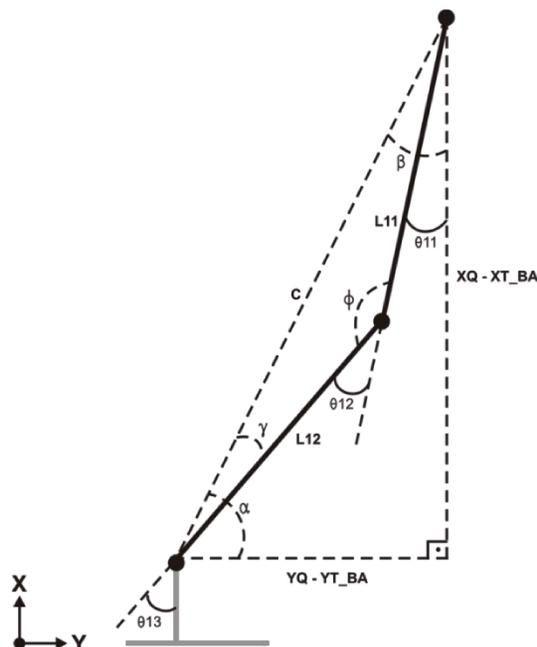


Figura 4.7: Trajetória do joelho da perna de balanço (perna esquerda).

Na sequência, tem-se as relações geométricas para obtenção dos ângulos das juntas da perna de balanço.

$$c = \sqrt{(YQ - YT\_BA)^2 + (XQ - XT\_BA)^2} \quad (4.12)$$

$$\phi = \alpha \cos \left( \frac{L11^2 + L12^2 - c^2}{2 * L11 * L12} \right) \quad (4.13)$$

$$\beta = \alpha \sin \left( \frac{YQ - YT\_BA}{c} \right) \quad (4.14)$$

$$\gamma = \left( \frac{180 - \phi}{2} \right) \quad (4.15)$$

$$\theta11 = \beta - \gamma \quad (4.16)$$

$$\theta12 = 180 - \phi \quad (4.17)$$

$$\theta13 = \theta11 + \theta12 \quad (4.18)$$

Após o levantamento dos ângulos das juntas, é possível expressar a posição do joelho da perna de balanço através das seguintes equações:

$$YJ\_BA = YQ - L11 * \sin(\theta11) \quad (4.19)$$

$$XJ\_BA = XQ - L11 * \cos(\theta11) \quad (4.20)$$

Em seguida faz-se a representação matemática da posição do tornozelo do pé da perna de apoio, conforme a figura 4.8.

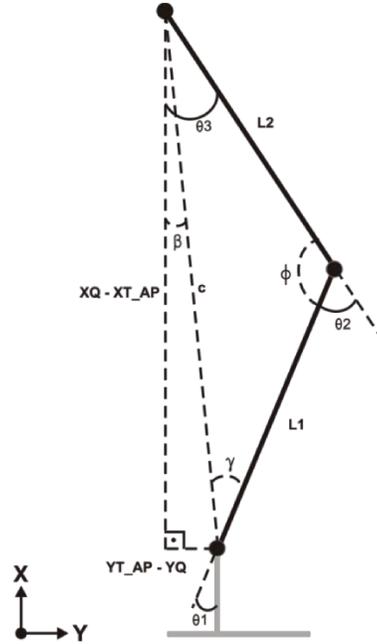


Figura 4.8: Trajetória do joelho da perna de apoio (perna direita).

Através da geometria apresentada na figura 4.8 pode-se determinar as relações geométricas para obtenção dos ângulos das juntas da perna de apoio.

$$c = \sqrt{(YQ - YT_{AP})^2 + (XQ - XT_{AP})^2} \quad (4.21)$$

$$\phi = \alpha \cos \left( \frac{L1^2 + L2^2 - c^2}{2 * L1 * L2} \right) \quad (4.22)$$

$$\beta = \alpha \tan \left( \frac{YT_{AP} - YQ}{XQ - XT_{AP}} \right) \quad (4.23)$$

$$\gamma = \left( \frac{180 - \phi}{2} \right) \quad (4.24)$$

$$\theta3 = \beta + \gamma \quad (4.25)$$

$$\theta2 = 180 - \phi \quad (4.26)$$

$$\theta1 = \gamma - \beta \quad (4.27)$$

Após o levantamento dos ângulos das juntas, é possível expressar a posição do joelho da perna de balanço através das equações abaixo.

$$YJ_{AP} = YQ + L2 * \sin(\theta3) \quad (4.28)$$

$$XJ_{AP} = XQ - L2 * \cos(\theta3) \quad (4.29)$$

Uma vez que os ângulos das juntas já foram obtidos geometricamente, não há necessidade de aplicar a cinemática inversa para suas obtenções. No entanto é necessário adaptá-los ao sentido de rotação dos atuadores rotacionais.

#### 4.2.1.5 Adaptação dos Ângulos para o Modelo Físico

Os ângulos obtidos através da análise da geometria das pernas do robô não levam em consideração o seu sentido de rotação. Desta forma, existe a necessidade de adaptá-los ao modelo cinemático, cujos sentidos de rotação das juntas estão ilustrados na figura 4.9.

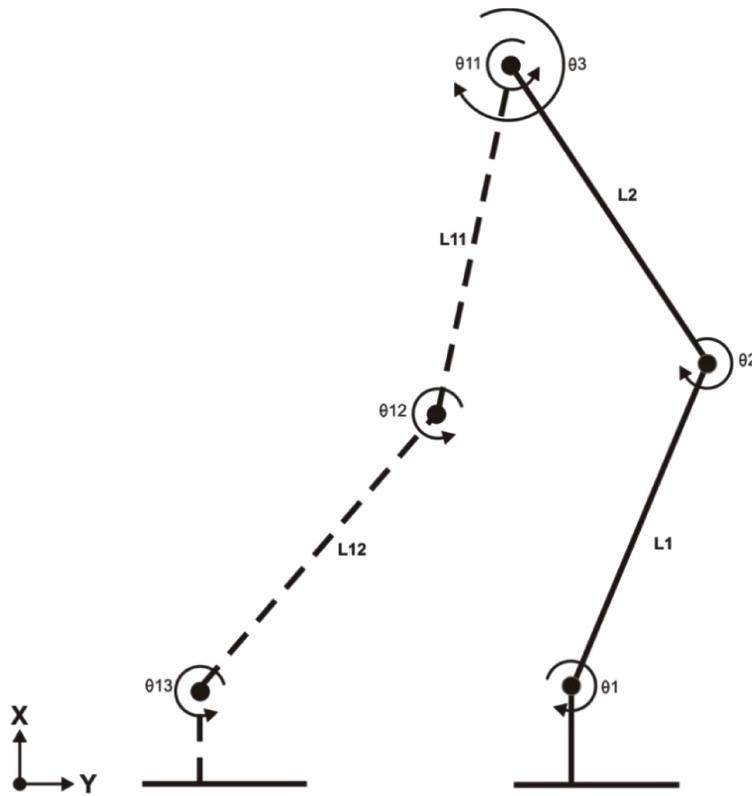


Figura 4.9: Sentido de rotação das juntas.

Conforme a análise do sentido de rotação das juntas ilustrado na figura 4.9, pode-se efetuar a seguinte associação.

$$\theta1_{cinemático} = \theta1_{geométrico} \quad (4.30)$$

$$\theta_{2\text{cinemático}} = -\theta_{2\text{geométrico}} \quad (4.31)$$

$$\theta_{3\text{cinemático}} = \theta_{3\text{geométrico}} \quad (4.32)$$

$$\theta_{11\text{cinemático}} = -\theta_{11\text{geométrico}} \quad (4.33)$$

$$\theta_{12\text{cinemático}} = -\theta_{12\text{geométrico}} \quad (4.34)$$

$$\theta_{13\text{cinemático}} = \theta_{13\text{geométrico}} \quad (4.35)$$

#### 4.2.2 Simulação em MATLAB

A trajetória apresentada na figura 4.10 foi obtida a partir do cálculo sequencial das equações 4.1 a 4.29 da cinemática inversa apresentada na seção anterior para 18 instantes de tempo assumindo o pé direito como referência, onde a altura do quadril foi mantida em 0,1370 m durante o deslocamento linear de 0,0200 a 0,0400 m, enquanto que a trajetória do pé de balanço foi descrita por uma parábola com concavidade para baixo, cuja altura variou de 0 a 0,0100 m e o deslocamento de 0 a 0,0400 m.

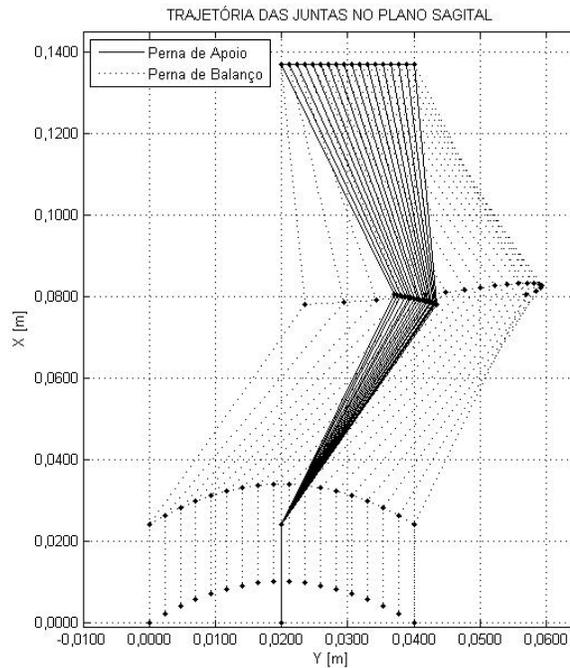


Figura 4.10: Trajetória das juntas do membro inferior.

Logo abaixo é possível observar a trajetória das juntas para uma sequência de cinco passos, iniciando o ciclo com o pé direito apoiado na superfície.

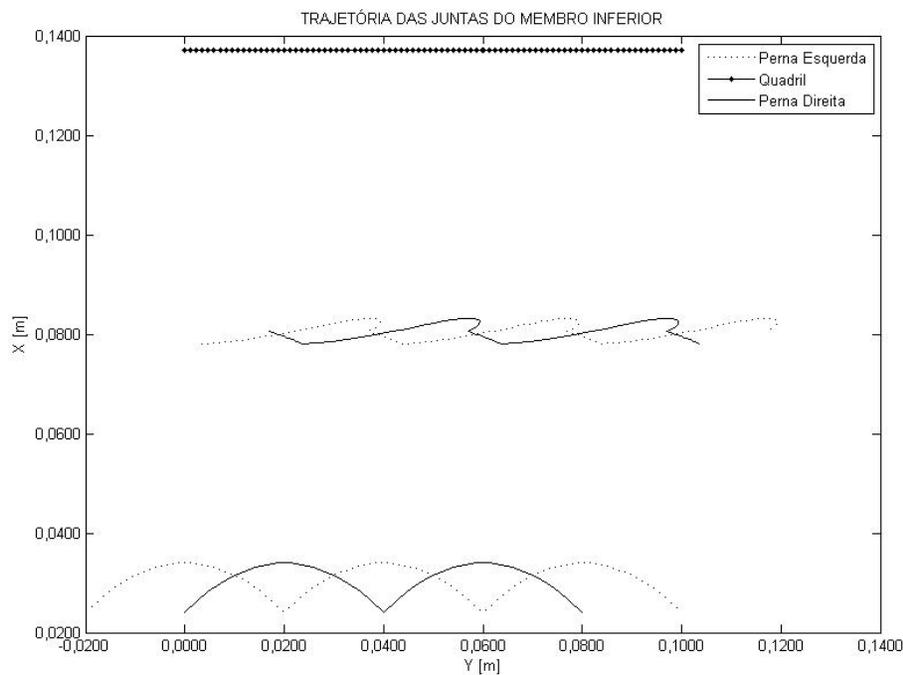


Figura 4.11: Trajetória das juntas do membro inferior para um sequência de cinco passos.

### 4.3 Planejamento da Trajetória do ZMP

O planejamento da trajetória do ZMP pode ser adquirido levando-se em consideração a velocidade da marcha. Se a velocidade da marcha for lenta então é possível desconsiderar os momentos causados pela aceleração da massa. Conseqüentemente, a projeção do CG deve estar localizada dentro da região de suporte conforme as equações 3.82 e 3.83. Por outro lado, se a marcha for rápida, a projeção do CG do robô não necessita estar localizada dentro do polígono de suporte devido à aceleração do CG do robô. Portanto as equações 3.80 e 3.81 são válidas. [5, 58]

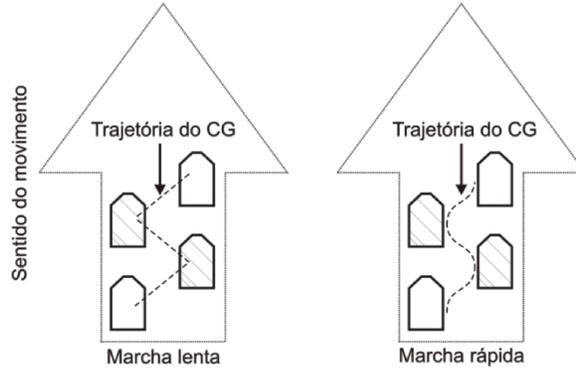


Figura 4.12: Trajetória do CG. Figura adaptada de [5].

A trajetória do ZMP proposta neste trabalho para uma marcha dinâmica pode ser observada na figura 4.13.

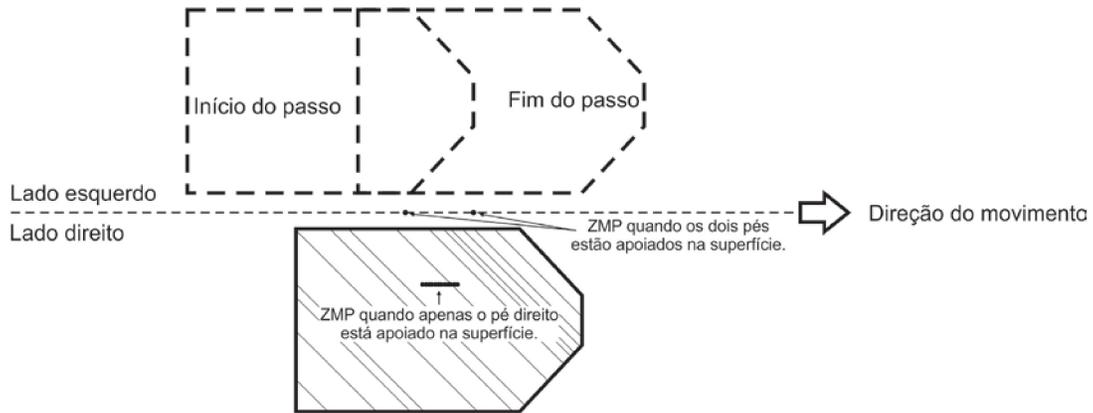


Figura 4.13: Trajetória do ZMP.

Os dois pontos que se encontram entre os pés, tanto no início quanto no fim de cada passo, correspondem à projeção do CG do robô no momento em que ambos os pés estão em contato com a superfície e o tronco se encontra na vertical, sendo  $\theta_5$  e  $\theta_6$  iguais a zero. Tem-se, então, que a trajetória do ZMP pode ser descrita pelas expressões 4.36 e 4.37.

$$Y_{ZMP}(i) = \begin{cases} i=1 & : -0,2522 \\ 1 < i \leq \text{amostras}-1 & : 5+(10*(i-2))/(\text{amostras}-2) \\ i=\text{amostras} & : 19,76 \end{cases} \quad (4.36)$$

$$Z_{ZMP}(i) = \begin{cases} i=1 & : 31,67 \\ 1 < i \leq \text{amostras}-1 & : 10 \\ i=\text{amostras} & : 31,67 \end{cases} \quad (4.37)$$

Onde:

$Y_{ZMP}$ : Trajetória do ZMP no eixo Y.

$Z_{ZMP}$ : Trajetória do ZMP no eixo Z.

amostras: Quantidade de pontos reproduzindo a trajetória das juntas.

### 4.3.1 Simulação em MATLAB

A trajetória apresentada na figura 4.14 foi gerada a partir das equações 4.36 e 4.37 para 18 instantes de tempo associados com o movimento das juntas do membro inferior.

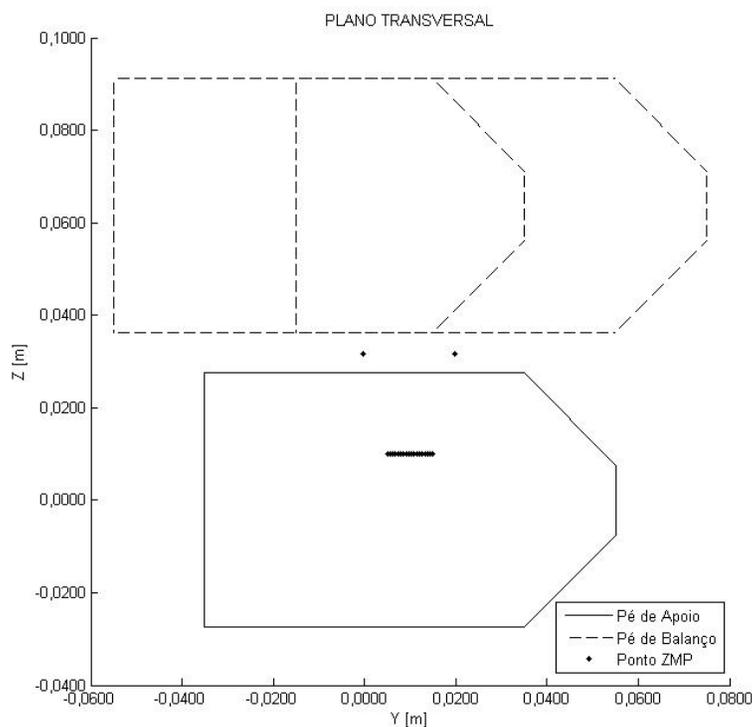


Figura 4.14: Trajetória do ZMP simulada.

## 4.4 Controle do Tronco

Após a definição da trajetória das juntas do membro inferior e o ZMP, resta definir qual deverá ser o movimento gerado pelo tronco a fim de alcançar uma marcha dinamicamente estável. Este problema pode ser tratado de duas formas distintas: a primeira consiste na realização do movimento a uma velocidade extremamente baixa, onde as acelerações passam a ser

desprezíveis e portanto, a equação do ZMP pode ser aproximada à equação do CG. O segundo modo de resolver este problema é considerar toda dinâmica envolvida.

#### 4.4.1 ZMP Para Um Sistema Estático

Em uma locomoção lenta, as acelerações das juntas podem ser desconsideradas de modo que o ZMP coincide com a posição do CG, de acordo com as equações 4.38 e 4.39.

$$Z_{zmp}=Z_{CG}=\frac{\sum_{i=0}^n m_i z_i}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (4.38)$$

$$Y_{zmp}=Y_{CG}=\frac{\sum_{i=0}^n m_i y_i}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (4.39)$$

Portanto, o equilíbrio do sistema dependerá unicamente da posição angular das juntas do tronco,  $\theta_5$  e  $\theta_6$ , sendo a posição  $Y_{zmp}$  dependente apenas do  $\theta_6$  e  $Z_{zmp}$  função da posição angular de ambas as juntas. A figura 4.15 ilustra a posição angular das juntas para diferentes instantes de tempo.

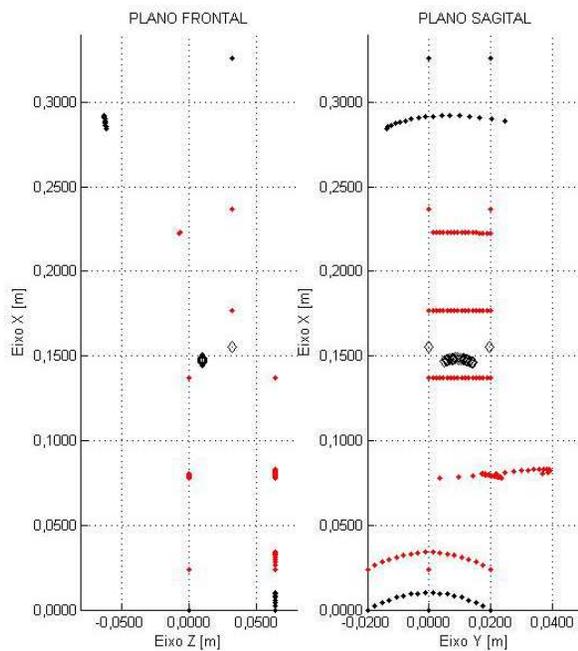


Figura 4.15: Trajetória do tronco no modo estático.

Observando a figura 4.15 é possível verificar que no início e no fim do passo, o tronco se desloca bruscamente para alcançar o ZMP almejado.

#### 4.4.2 ZMP Para Um Sistema Dinâmico

Em um movimento onde toda a dinâmica do robô é levada em consideração, o deslocamento do tronco observado no modo estático acaba gerando instabilidade na estrutura física devido à inércia dos corpos que constituem o tronco e, muitas vezes, pode perder a estabilidade e cair. Desta forma, para se realizar uma marcha dinamicamente estável e contínua, o segundo modo de tratar o problema torna necessária a adição de uma função intermediária que permita deslocar o tronco suavemente no início e no fim do passo. Conseqüentemente, a realização de um movimento contínuo apresenta baixas oscilações. Deste modo, optou-se por uma função exponencial e, a partir dos resultados apresentados na figura 4.17, é ilustrado que as acelerações das juntas 5 e 6 são aceleradas ou desaceleradas suavemente, tanto no início quanto no fim do movimento. Portanto, a instabilidade ocasionada pela movimentação brusca do tronco não é mais verificada.

$$ACM(IT) = \frac{1}{1+e^{-IT}} \quad (4.40)$$

$$RCM(IT) = \frac{1}{1+e^{IT}} \quad (4.41)$$

Onde:

ACM: É a função do coeficiente de multiplicação para o avanço do tronco.

RCM: É a função do coeficiente de multiplicação para o retorno do tronco.

IT: É o intervalo válido para a função.  $-7 \leq IT \leq 7$

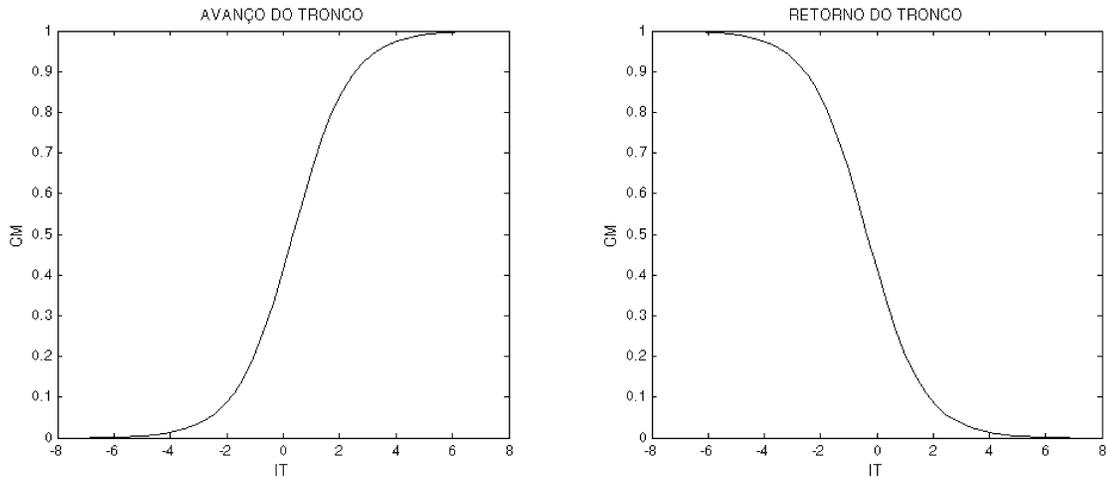


Figura 4.16: Trajetória do tronco para o início e fim do ciclo.

Aplicando a equação 4.40 para o movimento inicial do tronco em um intervalo de tempo igual a 3 segundos, tem-se as seguintes respostas para um sistema dinâmico:

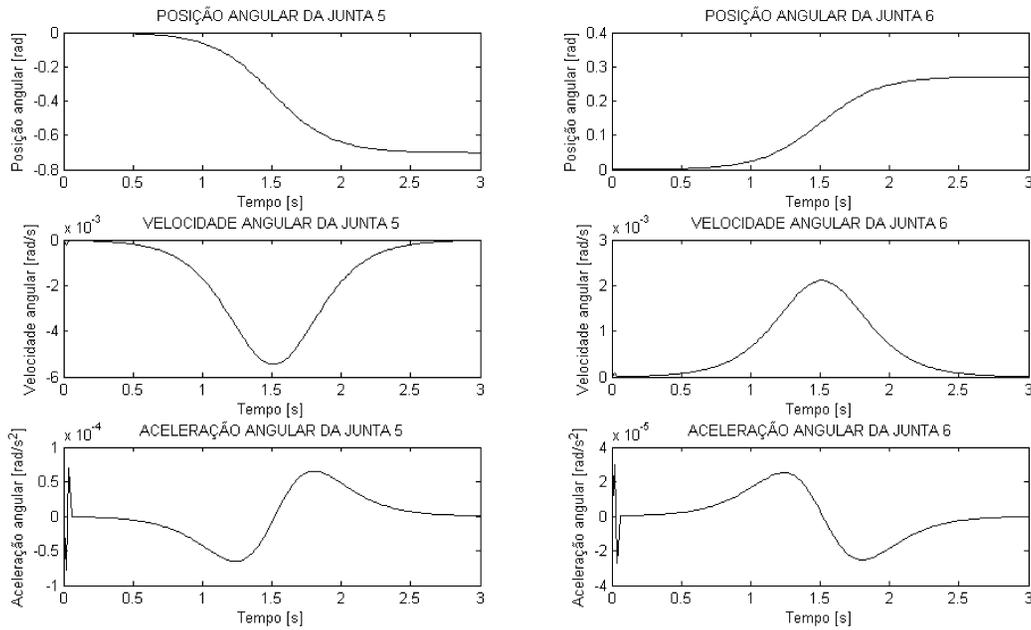


Figura 4.17: Avanço inicial do tronco.

Partindo dos parâmetros finais da movimentação do tronco, obtém-se a trajetória dinâmica ilustrada na figura 4.18, para um passo de 6 segundos.

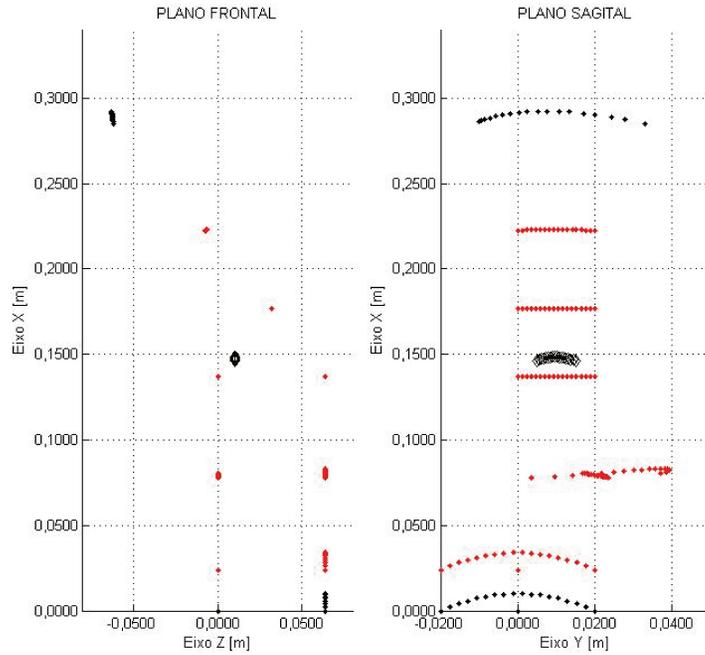


Figura 4.18: Trajetória do tronco no modo dinâmico.

Tomando os parâmetros da última posição do tronco, aplica-se a equação 4.41 para a movimentação de retorno do tronco em 3 segundos.

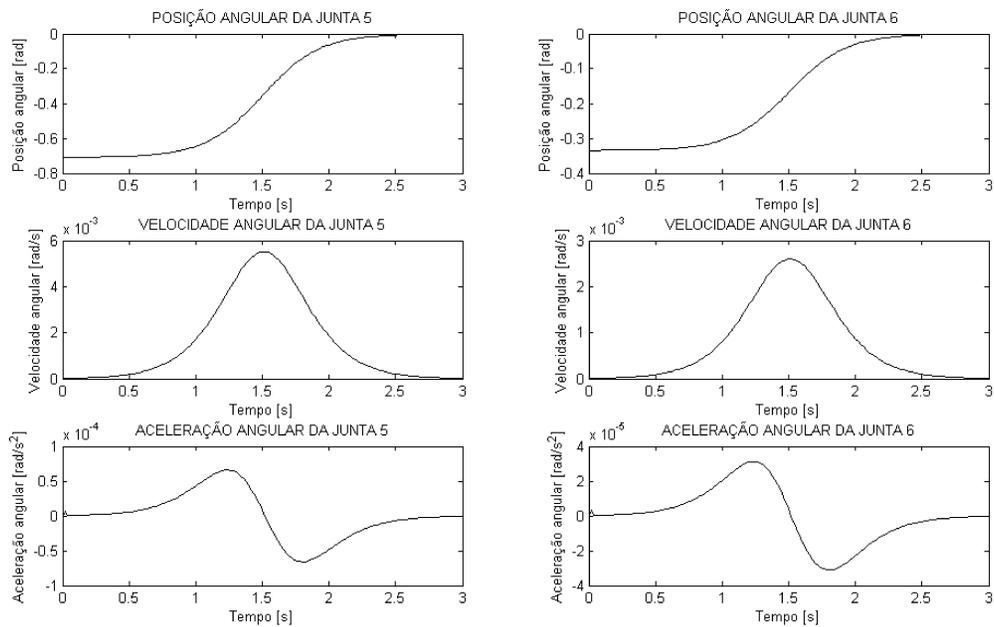


Figura 4.19: Retorno do tronco.

## 4.5 Suavização do Movimento das Juntas

Todos os movimentos das juntas foram estimados em 18 amostras objetivando reduzir o esforço computacional associado aos cálculos das equações dinâmicas de movimento. No entanto, é necessário aplicar uma spline cúbica de modo a estimar valores intermediários e, conseqüentemente, obter uma continuidade no movimento das juntas.

A figura 4.20 compara a trajetória do ZMP de referência e a trajetória do ZMP alcançada após a aplicação de uma spline no movimento de todas as juntas.

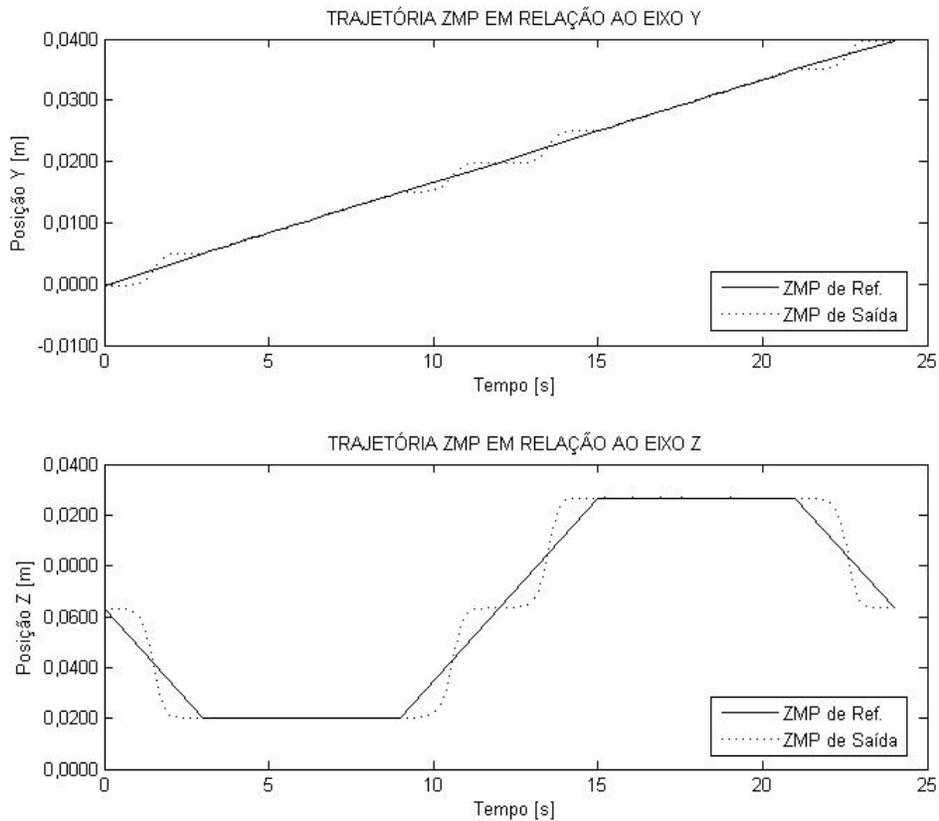


Figura 4.20: Comparação da trajetória do ZMP.



# Capítulo 5

## Simulações e Experimentos

Este capítulo está dividido em dois tópicos: simulação e experimento. Os resultados apresentados no tópico de simulação foram obtidos a partir do ambiente de desenvolvimento MATLAB, o qual consta como documentação no LSMR. Para tais simulações, utilizou-se as equações apresentadas no planejamento da trajetória das juntas presentes no Capítulo 4. O segundo tópico concentra os resultados obtidos no modelo físico, cujos parâmetros foram retirados das simulações.

### 5.1 Simulações

As simulações apresentadas neste tópico obedecem a sequência de passos apresentado no diagrama ilustrado na figura 4.1. Primeiramente, planejou-se a trajetória das pernas e, em seguida, foi proposta a trajetória do ZMP no plano YZ. Na sequência, foi obtida a trajetória do tronco para que o robô apresentasse uma marcha dinamicamente estável e finalmente as forças generalizadas.

#### 5.1.1 Trajetória das Juntas do Membro Inferior

A trajetória de cada junta do membro inferior foi obtida aplicando as equações apresentadas no tópico 4.1, e os resultados apresentados a seguir levaram em consideração os parâmetros listados na tabela 4.1.

### 5.1.1.1 Trajetória do Tornozelo Representada por uma Parábola

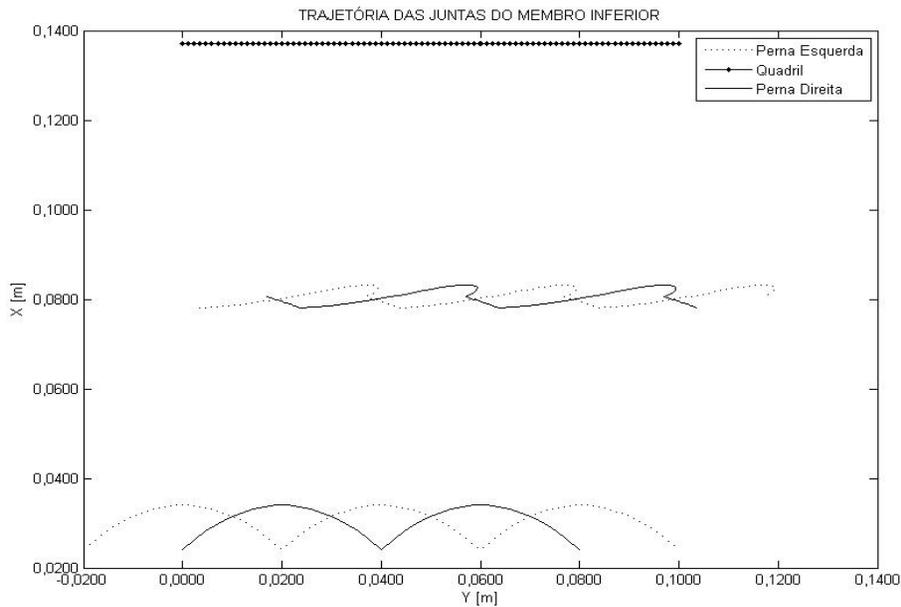


Figura 5.1: Trajetória das juntas do membro inferior.

A figura 5.2 ilustra as posições angulares das juntas do membro inferior para a realização das trajetórias observadas na figura 5.1.

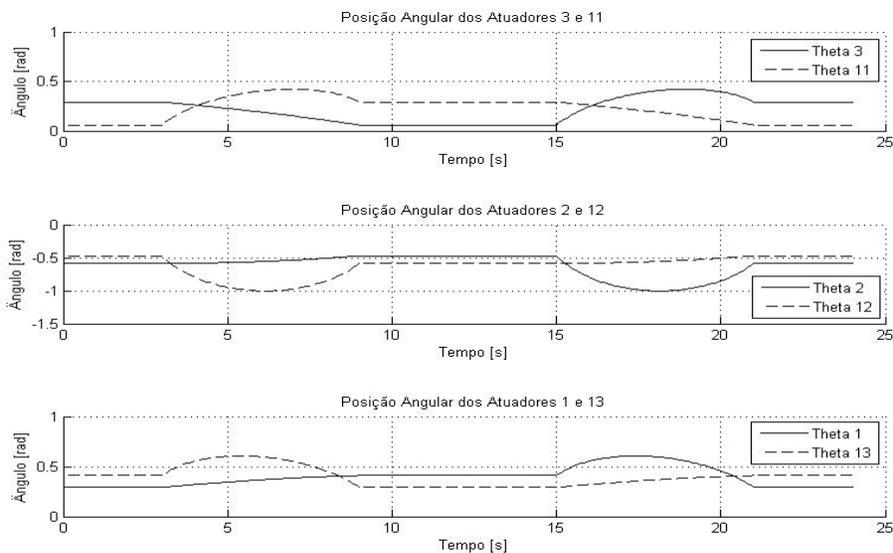


Figura 5.2: Posição angular das juntas do membro inferior.

Em seguida, tem-se suas respectivas acelerações angulares para realização de um passo com duração de 6 segundos.

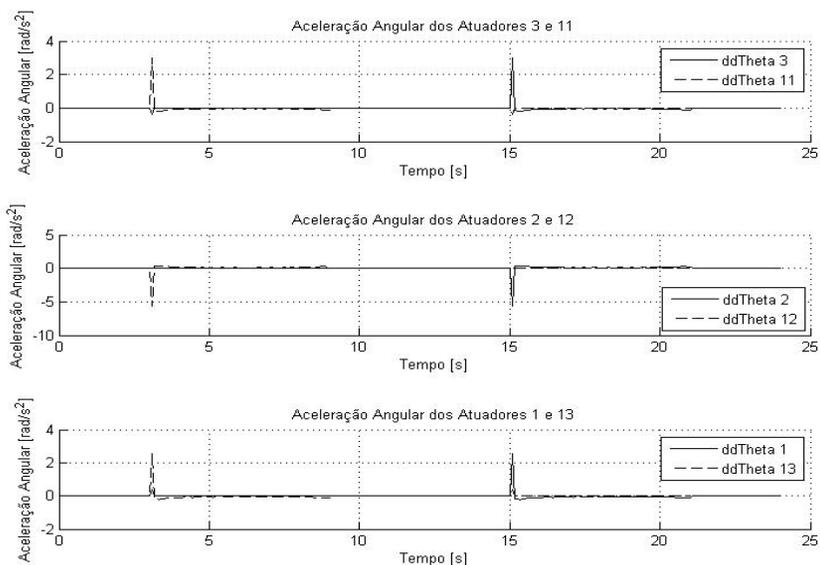


Figura 5.3: Aceleração angular das juntas do membro inferior.

Analisando os gráficos de aceleração angular das juntas do membro inferior é possível notar que há um pico nas acelerações iniciais das juntas do pé de balanço, uma vez que partem do repouso. Este mesmo comportamento é verificado nas acelerações lineares.

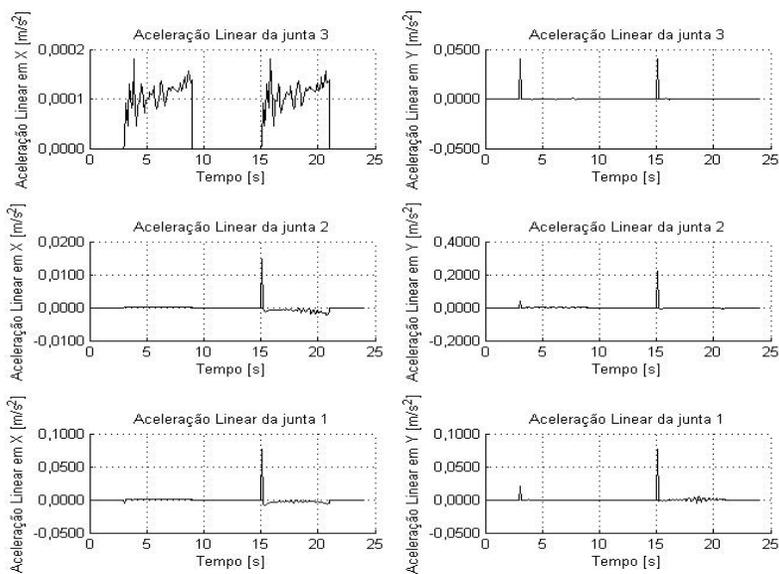


Figura 5.4: Aceleração linear das juntas 1, 2 e 3.

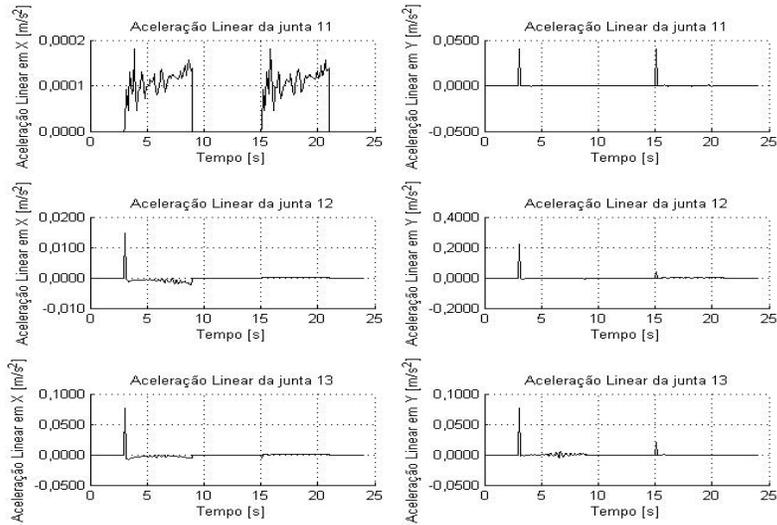


Figura 5.5: Aceleração linear das juntas 11, 12 e 13.

Observando os gráficos ilustrados nas figuras 5.4 e 5.5 é possível verificar que as acelerações lineares das juntas 3 e 11 são idênticas visto que ambas estão fixadas na pelve.

### 5.1.1.2 Trajetória do Tornozelo Representada por uma Elipse

Aplicando os mesmos parâmetros de entrada vistos na trajetória parabólica, tem-se trajetória das juntas para o modo elíptico.

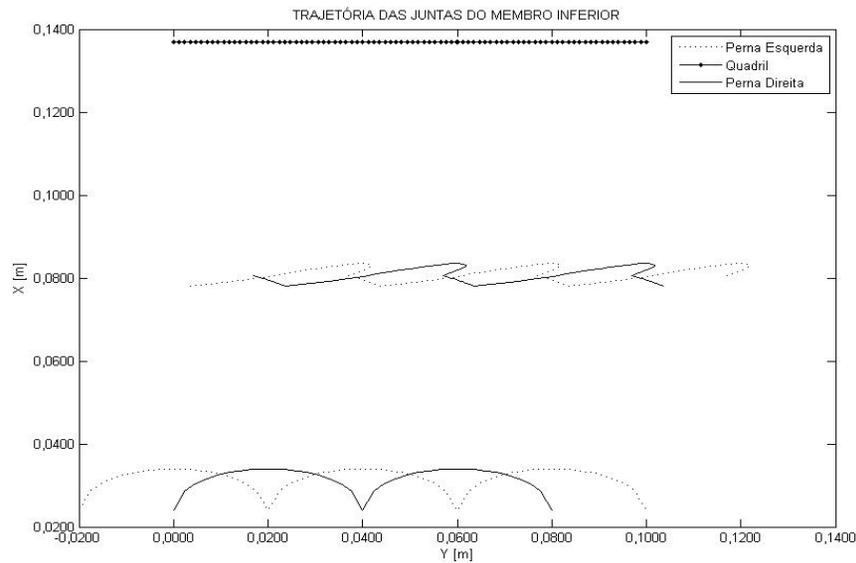


Figura 5.6: Trajetória das juntas do membro inferior.

A figura 5.7 ilustra as posições angulares das juntas do membro inferior para a realização das trajetórias observadas na figura 5.6.

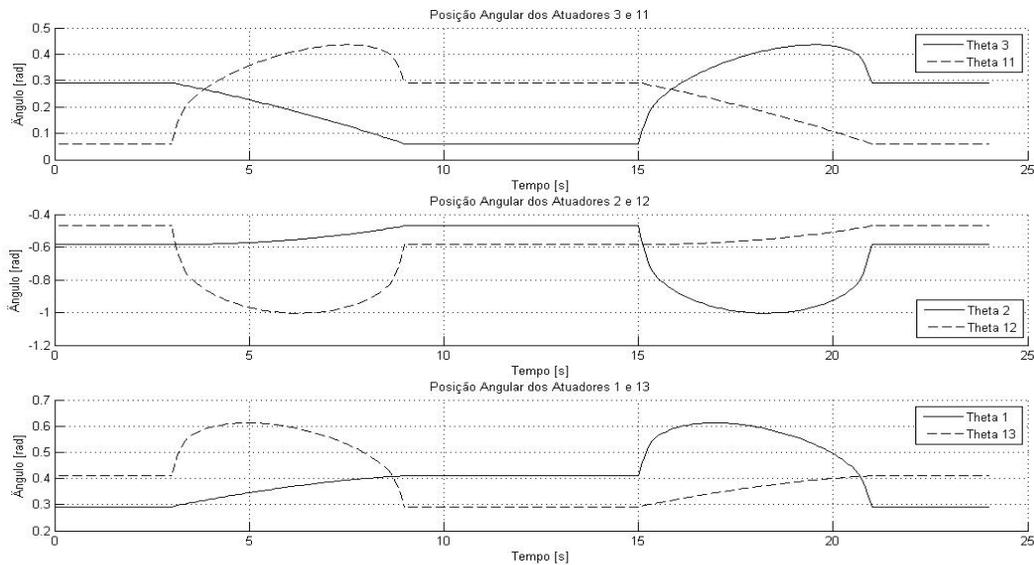


Figura 5.7: Posição angular das juntas do membro inferior.

Em seguida, tem-se suas respectivas acelerações para a duração de um passo equivalente a 6 segundos.

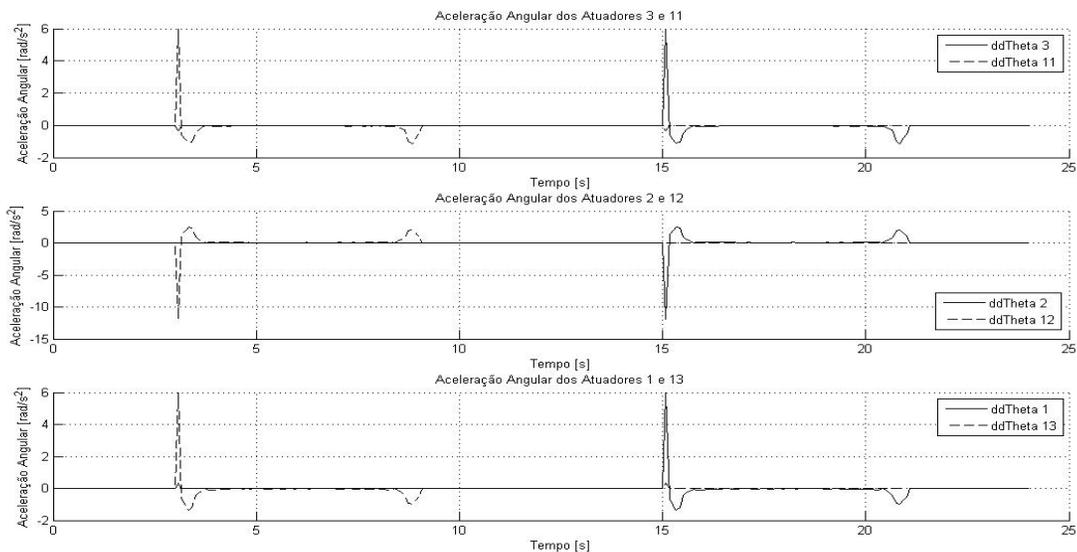


Figura 5.8: Aceleração angular das juntas do membro inferior.

Analisando as figuras 5.3 e 5.8 é possível notar que as acelerações angulares iniciais das juntas do membro inferior para a trajetória elíptica são mais acentuadas do que na parabólica,

levando em consideração os mesmos parâmetros de entrada. Isso se deve ao fato de que na trajetória elíptica, o deslocamento inicial da perna de balanço é ligeiramente maior em relação a parabólica, conforme as figuras 5.1 e 5.6.

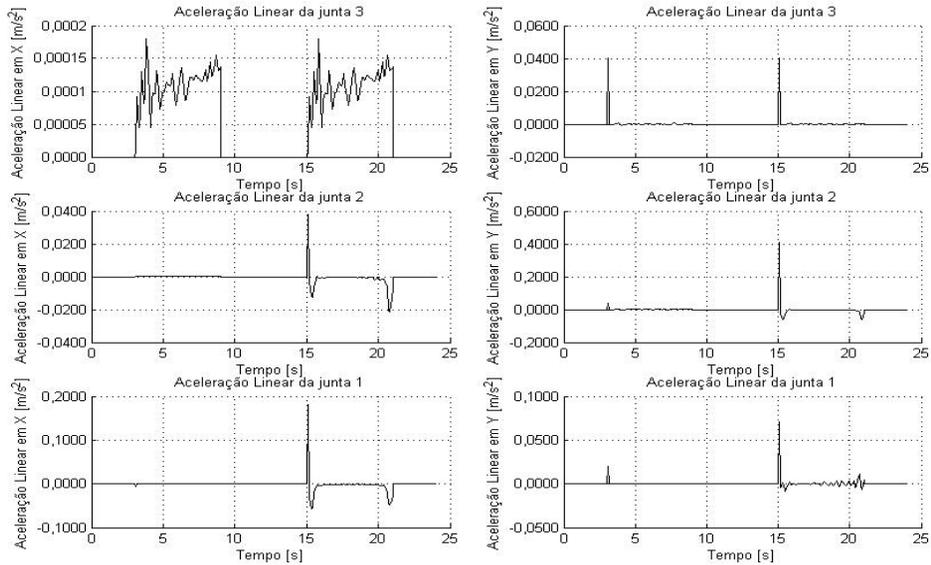


Figura 5.9: Aceleração linear das juntas 1, 2 e 3.

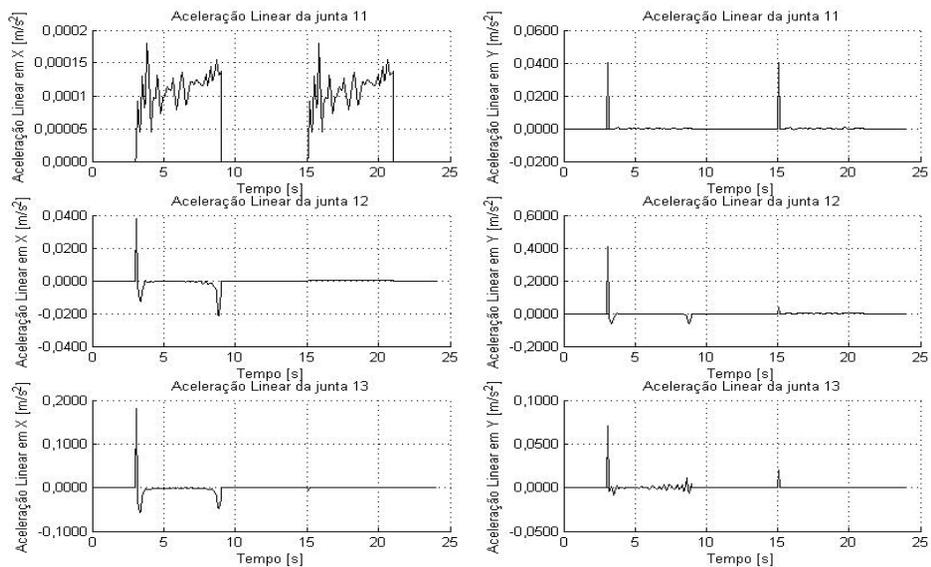


Figura 5.10: Aceleração linear das juntas 11, 12 e 13.

## 5.1.2 Controle do Tronco

O controle do tronco foi efetuado de modo que a trajetória do ZMP fosse alcançada aplicando as equações 3.80 e 3.81.

As posições angulares das juntas do tronco e suas respectivas acelerações para uma marcha dinamicamente estável serão ilustradas neste tópico.

### 5.1.2.1 Trajetória Parabólica

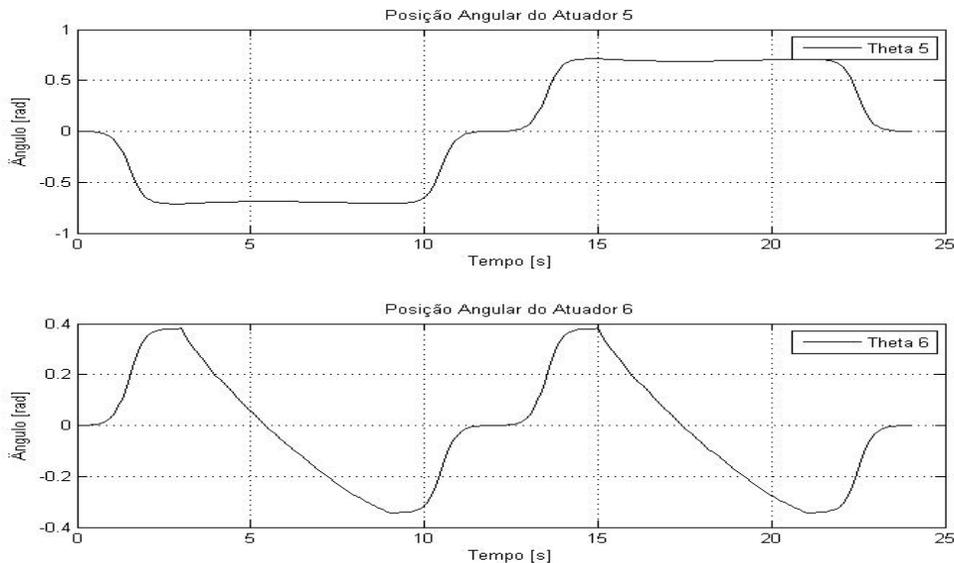


Figura 5.11: Posição angular das juntas do tronco.

Verifica-se na figura 5.11 que os ângulos das juntas 5 e 6 são inicialmente acentuadas, assumindo valores, respectivamente, iguais a  $-0,710\text{rad}$  e  $0,380\text{rad}$ . Este comportamento está diretamente relacionado a diversos fatores, tais como a trajetória do ZMP, trajetória do pé de balanço, além das limitações físicas de movimento do robô.

Nota-se na figura 5.12 que após o movimento inicial do tronco há uma elevada desaceleração na junta 6 resultante das acelerações do quadril e da junta 5. O mesmo comportamento é observado nas acelerações lineares ilustradas na figura 5.13.

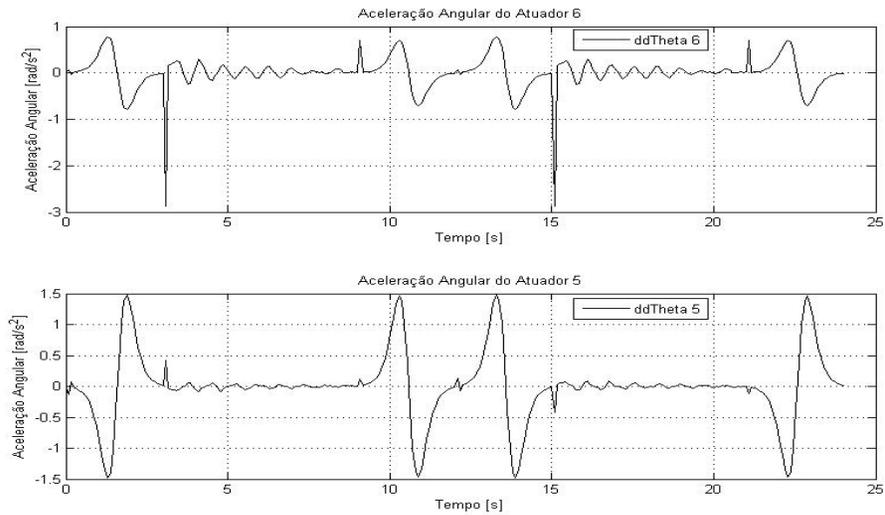


Figura 5.12: Aceleração angular das juntas do tronco.

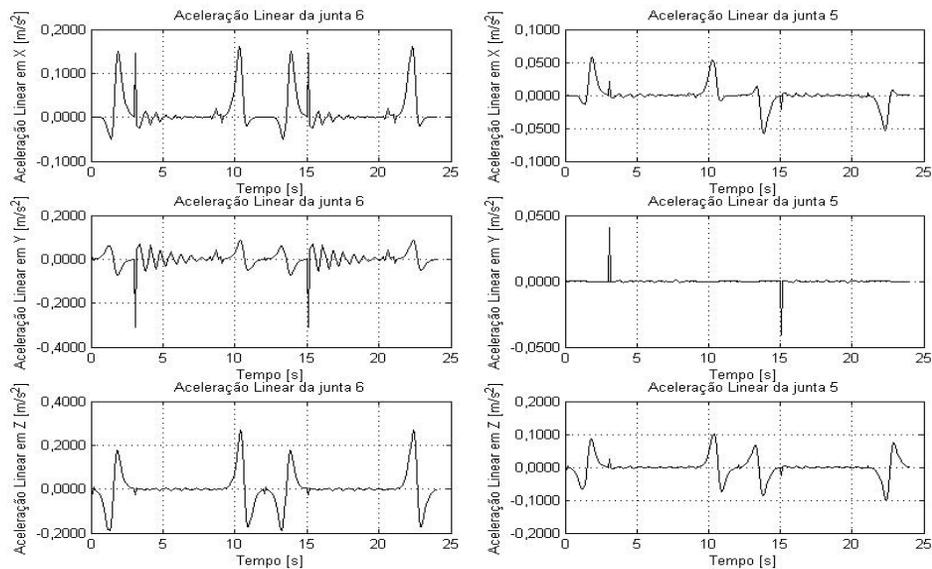


Figura 5.13: Aceleração linear das juntas 5 e 6.

Após definir a posição angular das juntas do tronco e suas acelerações obtém-se as relações entre o CG e o ZMP ilustradas na figura 5.14 e 5.15.

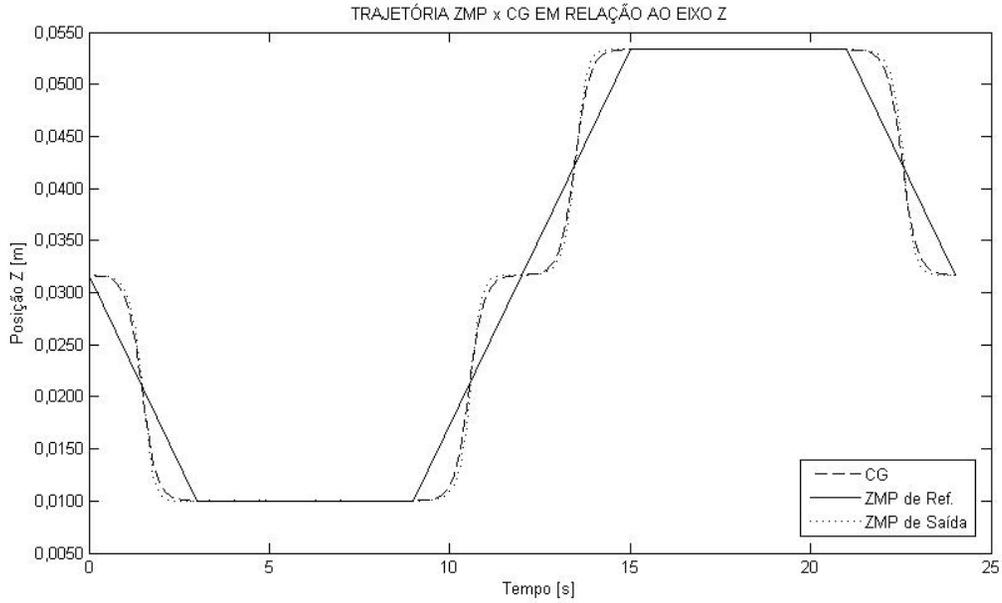


Figura 5.14: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Z.

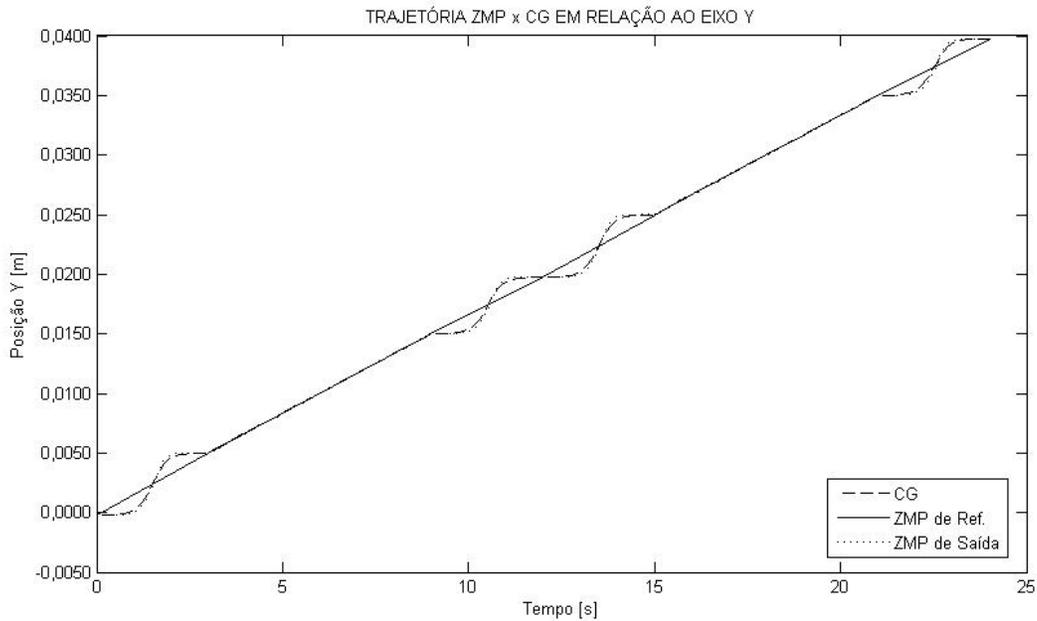


Figura 5.15: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Y.

Observa-se que as trajetórias do ZMP e CG do robô bípede para um passo com duração de seis segundos são muito próximas, sugerindo que as acelerações das juntas não estão influenciando consideravelmente a trajetória do CG do robô a esta velocidade.

### 5.1.2.2 Trajetória Elíptica

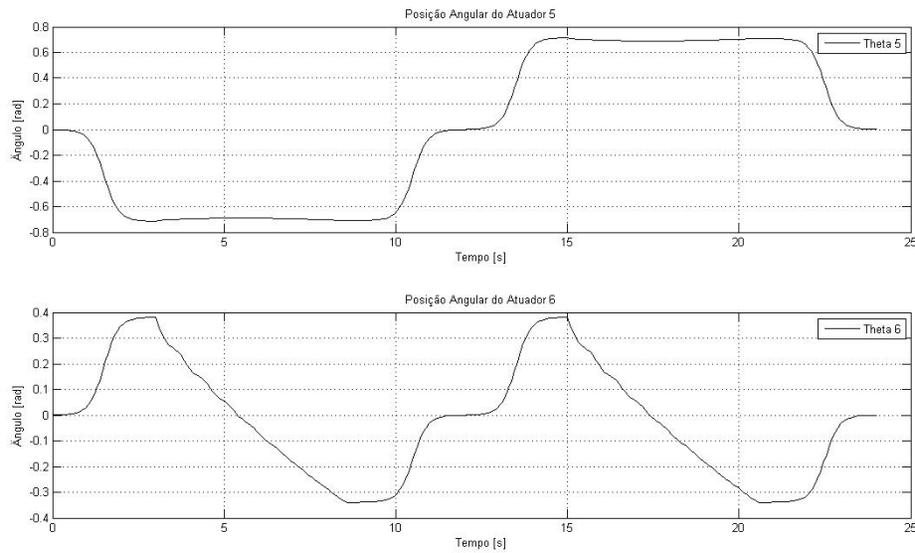


Figura 5.16: Posição angular das juntas do tronco.

Assim como no caso das simulações realizadas para a trajetória parabólica, as posições angulares das juntas 5 e 6 também são inicialmente acentuadas,  $-0,714\text{rad}$  e  $0,381\text{rad}$  respectivamente. Nota-se também que há uma elevada desaceleração na junta 6 após o movimento inicial do tronco, conforme a figura 5.17 e 5.18.

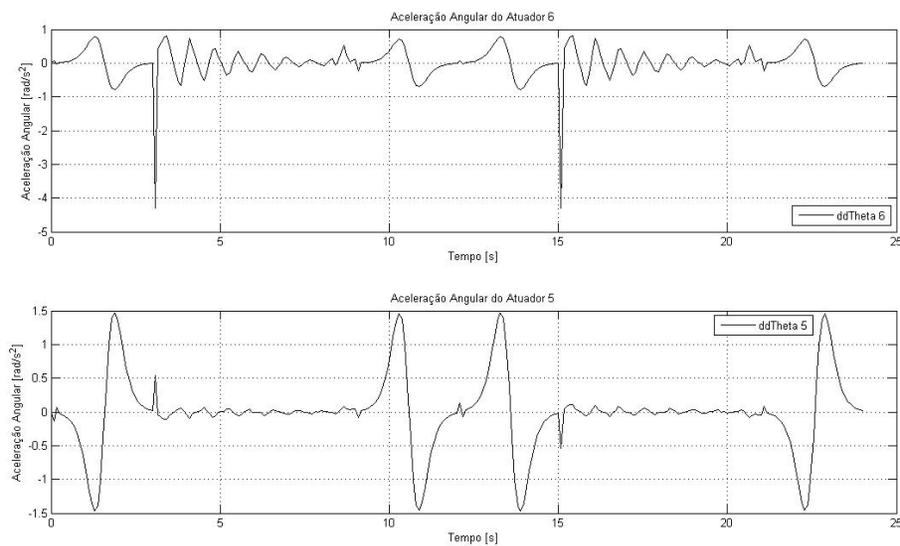


Figura 5.17: Aceleração angular das juntas do tronco.

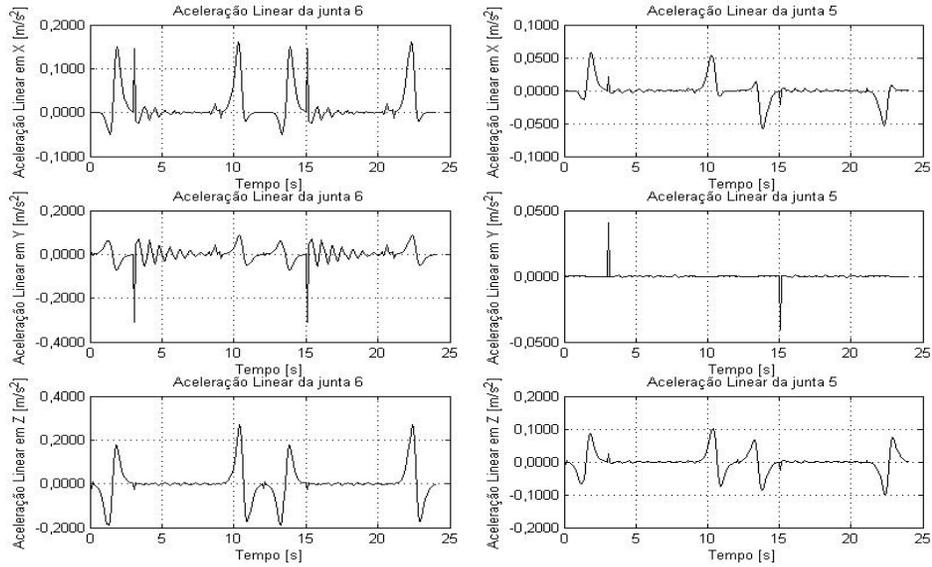


Figura 5.18: Aceleração linear das juntas 5 e 6.

Após definir a posição angular das juntas do tronco e suas acelerações, obtém-se as relações entre o CG e o ZMP ilustradas na figura 5.19 e 5.20.

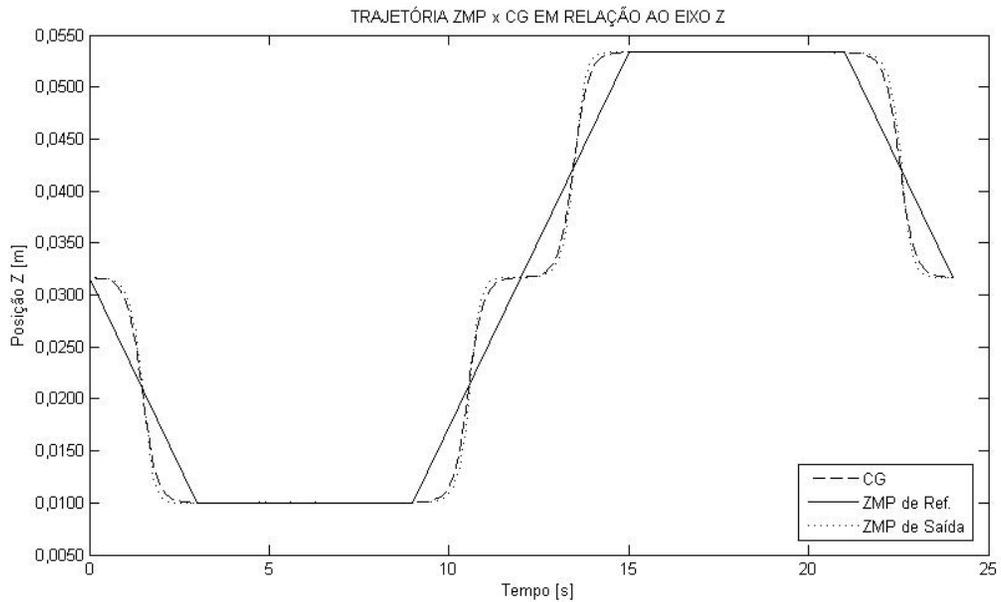


Figura 5.19: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Z.

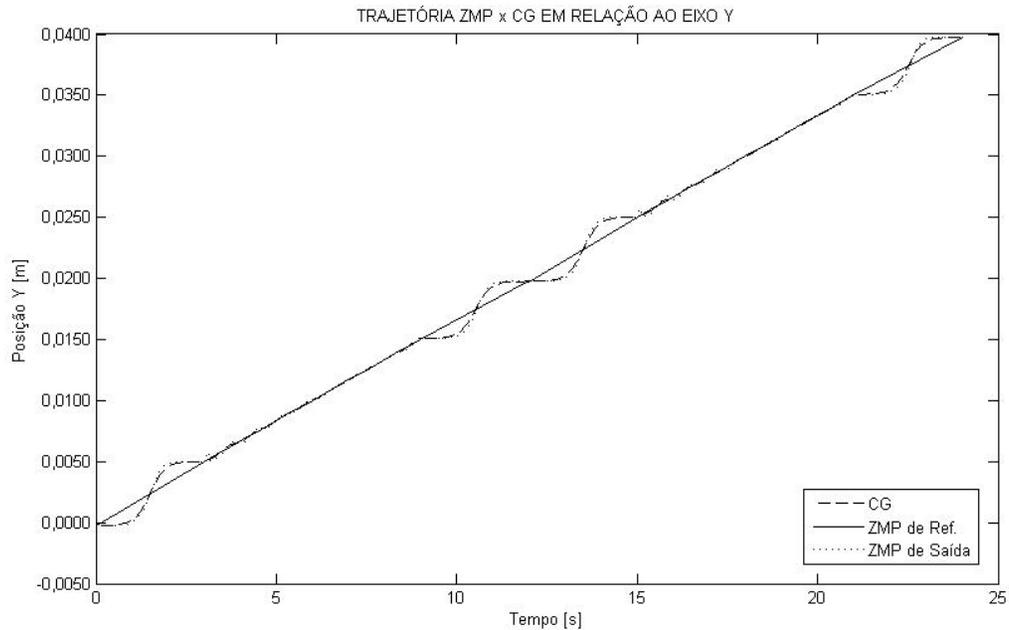


Figura 5.20: Trajetória do ZMP e CG em relação ao eixo Y.

O comportamento das trajetórias do ZMP e CG do robô para o modo elíptico são idênticos ao observado no modo parabólico.

### 5.1.3 Torque das Juntas

Os torques das juntas foram obtidos aplicando a formulação Lagrange-Euler e adotando os mesmos parâmetros aplicados na cinemática. Contudo, como trata-se de uma simulação de comportamento dinâmico, também foram incluídos as massas dos corpos rígidos e seus momentos de inércia.

### 5.1.3.1 Trajetória Parabólica

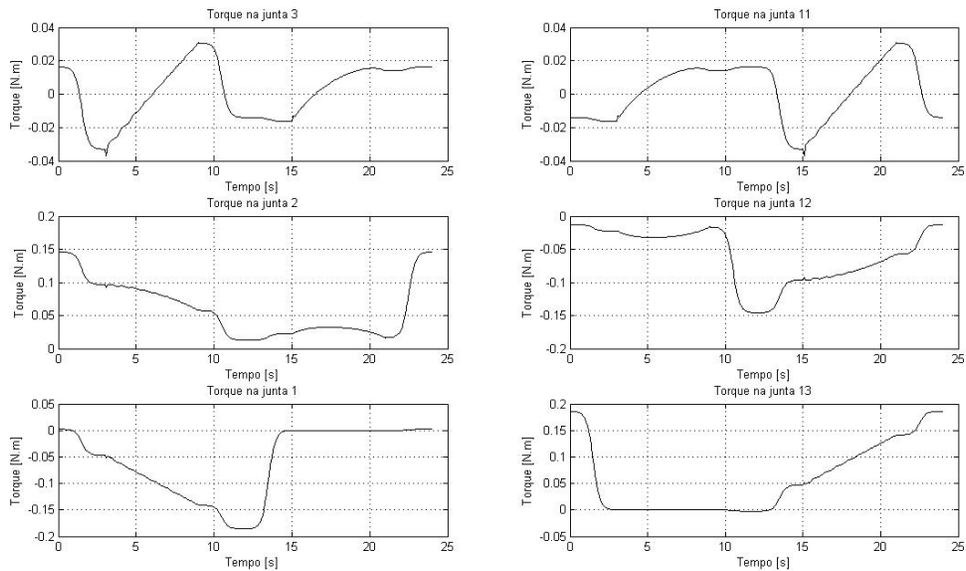


Figura 5.21: Torque nas juntas do membro inferior para trajetória parabólica.

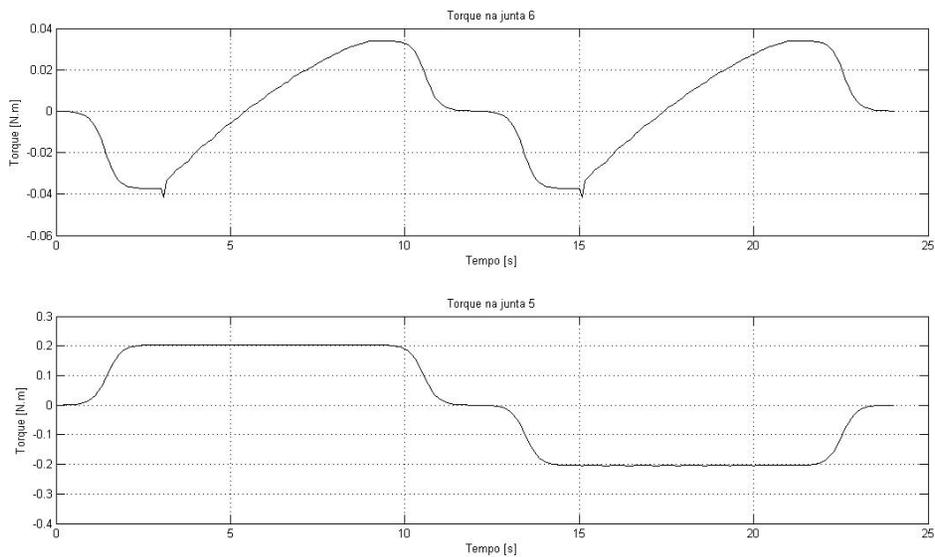


Figura 5.22: Torque nas juntas do tronco para trajetória parabólica.

Analisando as figuras acima, nota-se que os maiores torques estão localizados na primeira junta do tronco, no joelho e no tornozelo do pé de apoio, dada as características físicas estruturais do robô e do movimento em estudo. Caso a largura do passo fosse aumentada e a

trajetória do ZMP, em relação ao eixo Y, partisse de um ponto mais próximo do pé de apoio, seria observado um acréscimo no torque do joelho o qual poderia alcançar valores superiores ao visto no tornozelo. Isso seria explicado considerando o fato de que a distância do CG dos segmentos do robô em relação a posição do joelho estaria aumentando.

### 5.1.3.2 Trajetória Elíptica

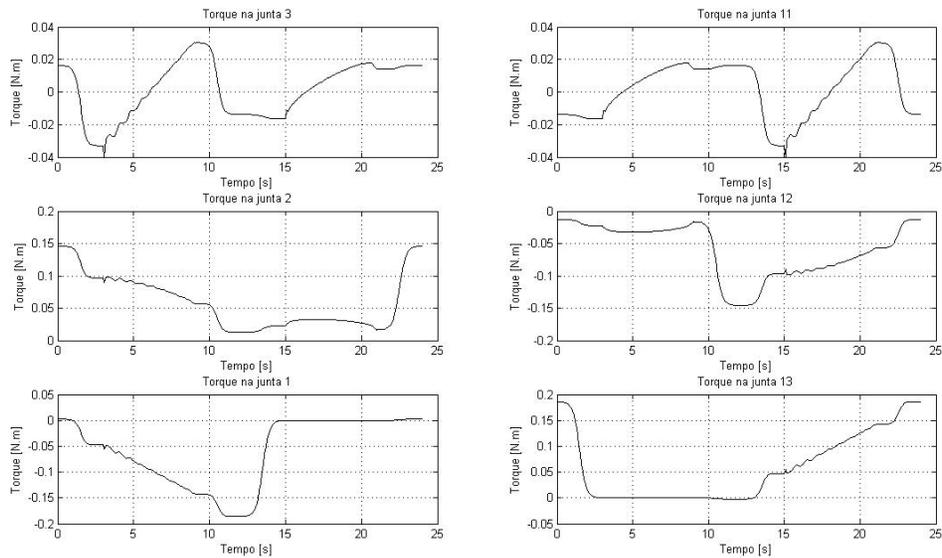


Figura 5.23: Torque nas juntas do membro inferior para trajetória elíptica.

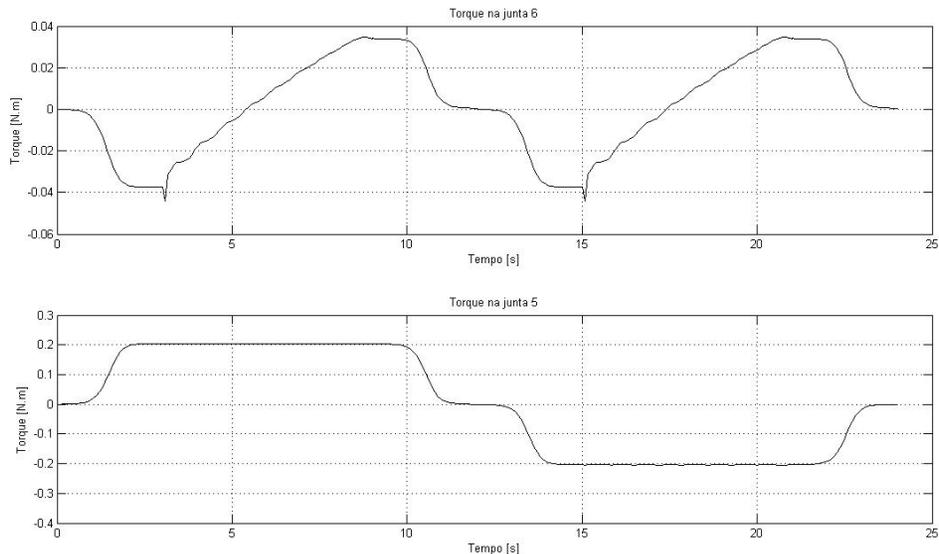


Figura 5.24: Torque nas juntas do tronco para trajetória elíptica.

Assim como no caso da trajetória parabólica, os torques mais elevados estão concentrados na primeira junta do tronco, no joelho e no tornozelo do pé de apoio.

## 5.2 Resultados Experimentais

Este tópico descreve os materiais e os resultados alcançados nos experimentos realizados na estrutura bípede proposta. Os experimentos realizados possibilitaram testar o *hardware* desenvolvido, validar a modelagem proposta para o robô bípede, validar o planejamento do movimento das juntas do membro inferior e superior, além de comprovar a realização de uma marcha dinamicamente estável no plano sagital aplicando o critério de ZMP.

Os materiais utilizados nos experimentos foram um microcomputador com processador Intel Core Duo de 1,66GHz, 3GB de memória RAM, osciloscópio analógico Minipa MO – 1225 de 20MHz, multímetro, uma placa de controle dos servomotores e aquisição dos sinais enviados pelo acelerômetro.

### 5.2.1 Materiais

#### 5.2.1.1 Hardware

Neste trabalho foi elaborado um circuito para o controle dos servomotores e aquisição de dados e um segundo circuito para acionamento dos servomotores, sendo o primeiro circuito alimentado com 9V e o segundo com 5V fornecido diretamente por uma fonte chaveada de computador.

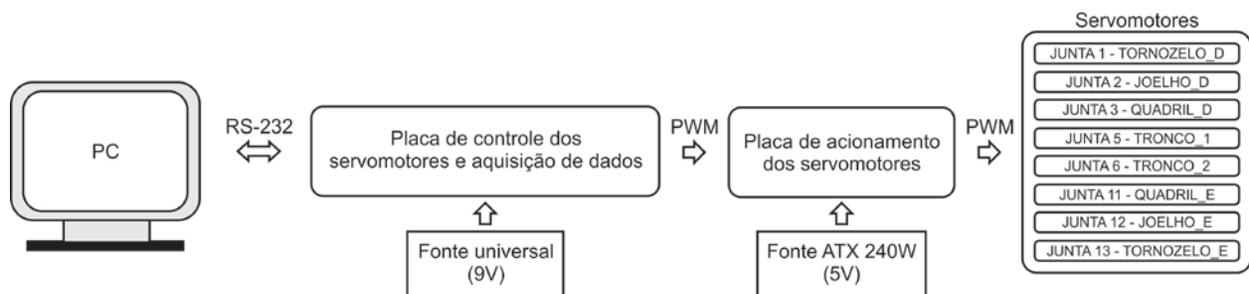


Figura 5.25: Diagrama de blocos.

O microcontrolador utilizado no controle dos atuadores e aquisição de dados é o modelo LPC2138 da NXP, o qual se enquadra perfeitamente ao propósito do trabalho. Este microcontrolador possui um núcleo ARM7TDMI [8], capaz de efetuar operações em 32bits a 60MHz, possuindo ainda 32Kbytes de memória SRAM, 512 Kbytes de memória FLASH, seis canais de PWM, oito conversores A/D de 10bits. Existem também outros periféricos, tais como

UART's, barramentos I2C e SPI e TIMERS de 32bits. Maiores informações podem ser encontradas em [62].

Dentre os periféricos disponíveis no microcontrolador LPC2138 da NXP, foram utilizados para o controle dos servomotores três comparadores de cada um dos dois TIMERS existentes e mais dois canais de PWM. O módulo UART0 foi utilizado na comunicação com o PC e três dos canais analógicos foram dedicados para captura dos sinais fornecidos pelo acelerômetro MMA7260 de três eixos da Freescale, cujos sinais de saída foram bastante ruidosos e necessitaram passar por um filtro passa baixas com frequência de corte ( $f_c$ ) igual a 1,591KHz, objetivando filtrar os ruídos de alta frequência gerados pelo chaveamento interno das saídas analógicas do acelerômetro e da fonte de alimentação, antes de entrar no canal analógico do microcontrolador, cuja conversão gera um erro de discretização na ordem de 0,003223V, uma vez que o conversor é capaz de representar o sinal em apenas 1024 níveis de tensão decorrente da resolução de 10bits. Na figura 5.26 tem-se o esquemático do circuito desenvolvido para controle dos servomotores e aquisição de dados. Já na figura 5.27 tem-se uma foto de como ficou o circuito em questão após a sua implementação física.

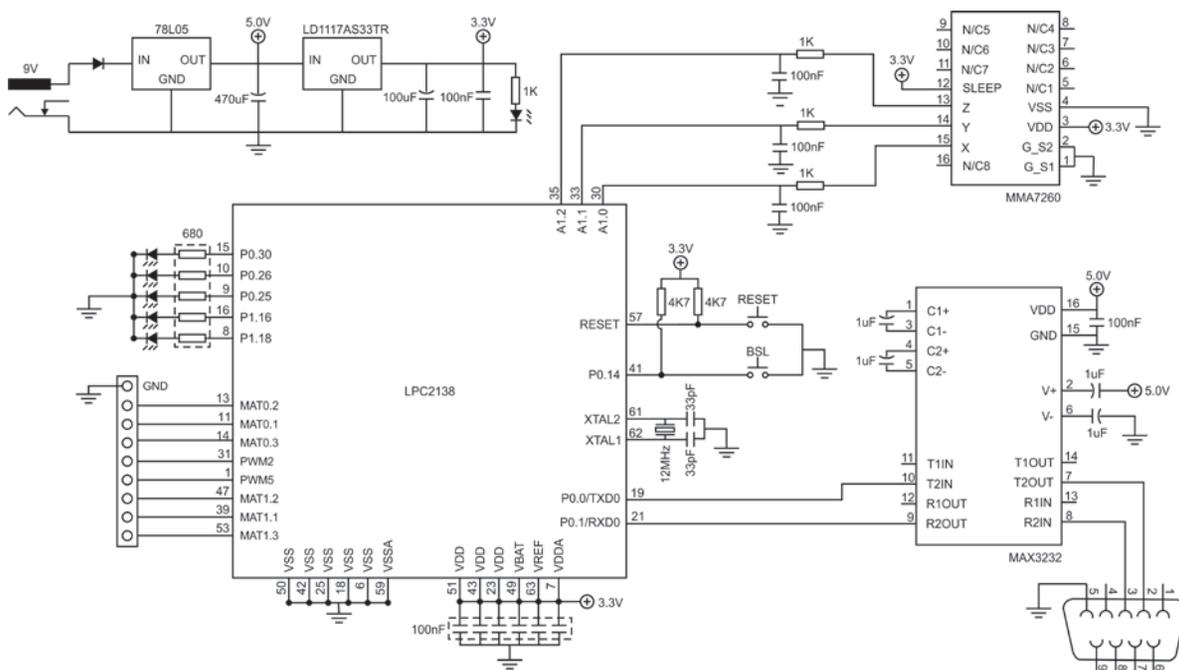


Figura 5.26: Circuito de controle dos servomotores e aquisição de dados.

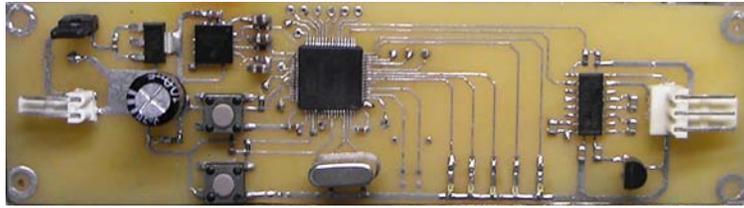


Figura 5.27: Placa de controle dos servomotores e aquisição de dados.

O circuito de acionamento dos servomotores possui um buffer 74LS541 de oito canais desenvolvido pela Motorola [73], o qual recebe o sinal PWM com amplitude de 3,3V enviado pelo microcontrolador e o reproduz em sua saída com uma amplitude de 5V, que por sua vez é recebida pelo canal de controle dos oito servomotores localizados nos diversos segmentos do robô. Todos os parâmetros das juntas foram previamente calculados pelo MATLAB e gravados na memória do microcontrolador, cabendo a ele a tarefa de gerar o sinal PWM para o controle das juntas e, através da interface de comunicação RS-232, repassar a inclinação da pelve para o PC sempre que for solicitada pelo LabVIEW. A figura 5.28 ilustra o esquemático do circuito em questão e, na figura 5.29, tem-se sua implementação física.

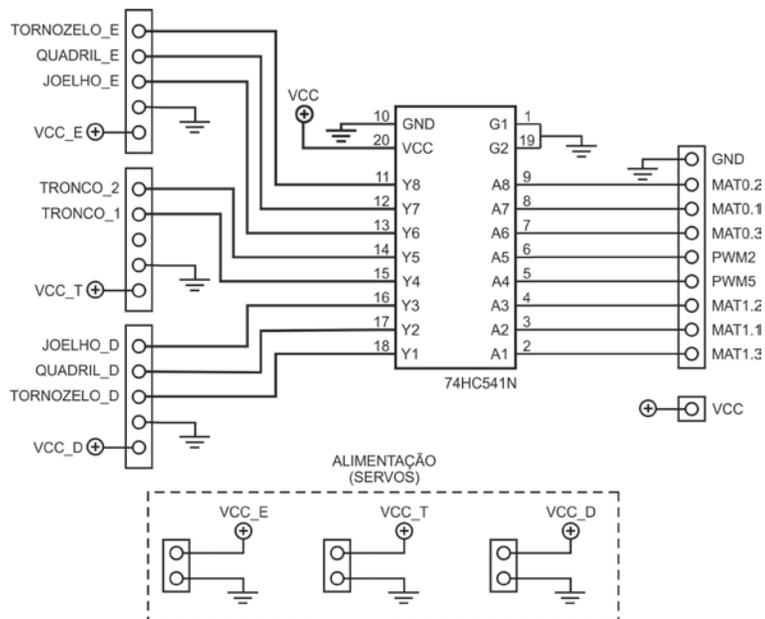


Figura 5.28: Circuito de acionamento dos servomotores.

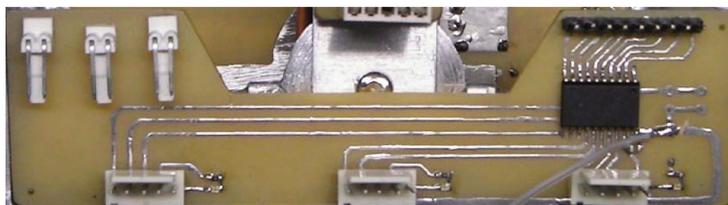


Figura 5.29: Placa de acionamento dos servomotores.

### 5.2.1.2 Atuador

Neste trabalho, todas as movimentações rotacionais das juntas são realizadas por servomotores TowerPro MG995, conforme a figura a seguir.



Figura 5.30: Servomotor TowerPro MG995.

Trata-se de um servomotor de baixo custo, alto torque e composto por engrenagens de metal. Suas características podem ser vistas na tabela 5.1

Tabela 5.1: Características do servomotor TowerPro MG995.

<b>Modelo</b>	<b>Dimensão CxLxA [m]</b>	<b>Massa [g]</b>	<b>Velocidade [seg/60°]</b>	<b>Torque [N.m]</b>	<b>Amplitude do sinal de controle [V]</b>
MG995	0,040x0,020x0,0365	48	4,8V – 0,17 6,0V – 0,13	4,8V – 1,275 6,0V – 1,471	5V

A escolha deste modelo de servomotor se deve ao fato dele possuir todo um conjunto de componentes em apenas um produto tais como jogo de engrenagens de metal para aumento de torque e um controlador PID interno, resultando em uma redução dos custos e enquadramento no orçamento a ele destinado.

A posição angular deste servomotor é controlada por um sinal PWM com amplitude de 5V e período equivalente a 20ms, sendo o seu posicionamento angular proporcional a largura do pulso do sinal PWM.

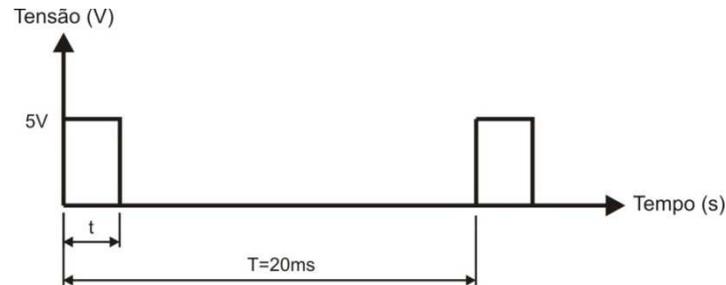


Figura 5.31: Sinal PWM para o controle do servomotor.

Conforme alguns experimentos realizados em laboratório, verificaram-se as seguintes relações entre o sinal PWM e a posição angular do motor, conforme a figura 5.32.

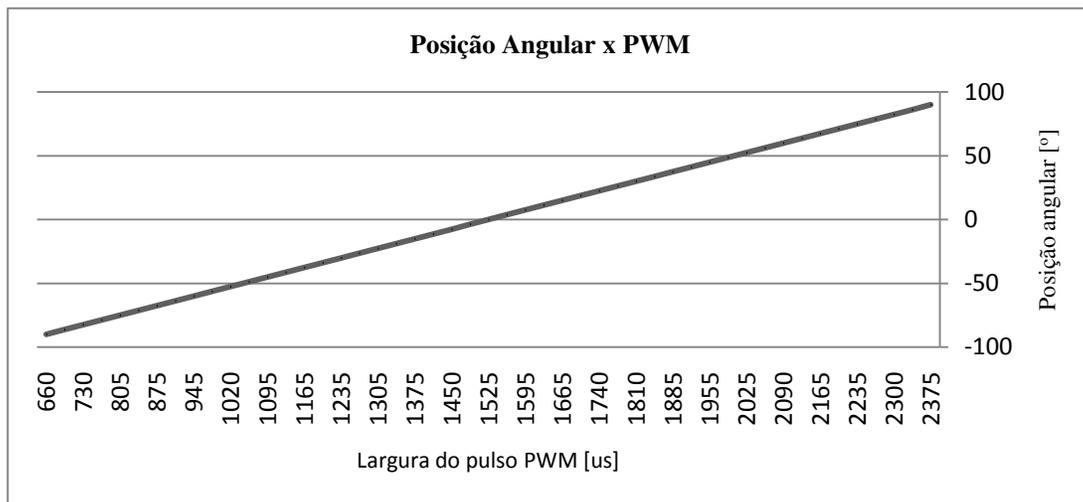


Figura 5.32: Relação entre a posição angular e o sinal PWM.

Nota-se, na figura 5.32, que a posição angular do servomotor é praticamente linear com a largura de pulso do sinal PWM para a faixa de 660us a 2375us. Conforme os dados obtidos no experimento, a variação média da largura de pulso para cada  $3,75^\circ$  é aproximadamente 35,71us, portanto, temos a seguinte relação:  $9,52us/^\circ$ .

### 5.2.1.3 Sensor

O sensor utilizado no monitoramento da inclinação da pelve durante a reprodução da marcha bípede é o acelerômetro MMA7260 com saída analógica, comercializado pela Freescale. Trata-se de um acelerômetro de três eixos alimentado com 3,3V, cuja sensibilidade pode ser ajustada para 200mV/g, 300mV/g, 600mV/g ou 800mV/g conforme a tabela 5.2.

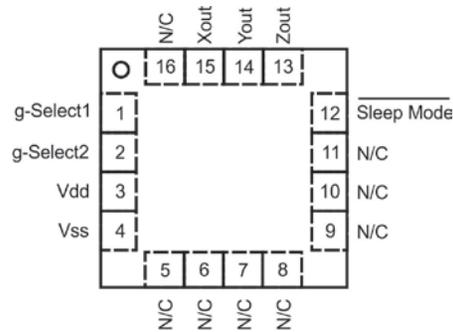


Figura 5.33: Pinagem do MMA7260Q. [29]

Tabela 5.2: Descrição dos pinos do MMA7260.

Pino	Nome	Descrição
1 2	g-Select1 g-Select2	Define a Sensibilidade do sensor. 0 0 – 800mV/g. 0 1 – 600mV/g. 1 0 – 300mV/g. 1 1 – 200mV/g.
3	VDD	Alimentação (+2.2V a 3.6V).
4	VSS	Terra.
5 - 11	N/C	Não conectado.
12	Sleep Mode	0 – Habilita o modo Sleep. 1 – Desabilita o modo Sleep.
13	Zout	Saída de sinal do eixo Z.
14	Yout	Saída de sinal do eixo Y.
15	Xout	Saída de sinal do eixo X.
16	N/C	Não conectado.

Neste trabalho o acelerômetro é utilizado para medir o ângulo de inclinação da pelve. Logo, a componente da gravidade será a aceleração medida (figura 5.35) e, portanto, é realizada uma medição da aceleração estática.

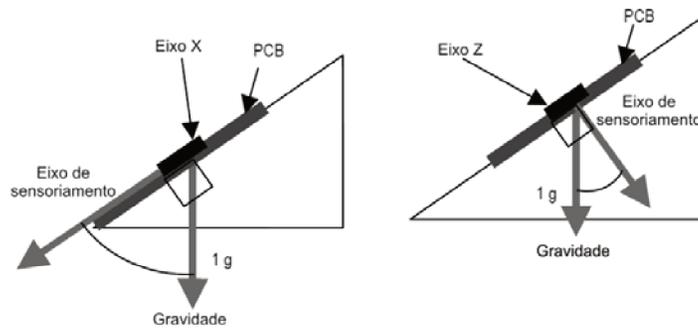


Figura 5.34: Componente da gravidade de um acelerômetro inclinado. Figura adaptada de [28]

O gráfico apresentado na figura 5.35 corresponde à saída analógica do acelerômetro MMA7260.

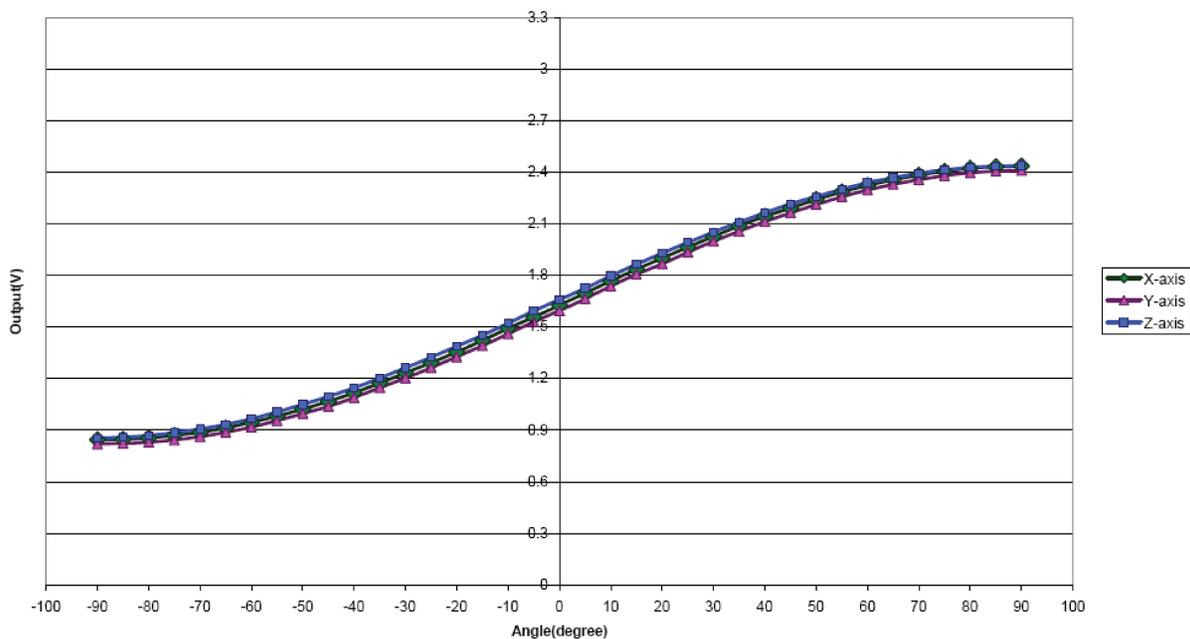


Figura 5.35: Saída analógica do acelerômetro MMA7260. [28]

Nota-se no gráfico acima, que a faixa linear deste acelerômetro está compreendida entre  $-45^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ . O Apêndice A faz uma breve introdução sobre o conceito de funcionamento de um acelerômetro e os procedimentos de como se obter o ângulo de inclinação do dispositivo para uma faixa de  $360^{\circ}$ .

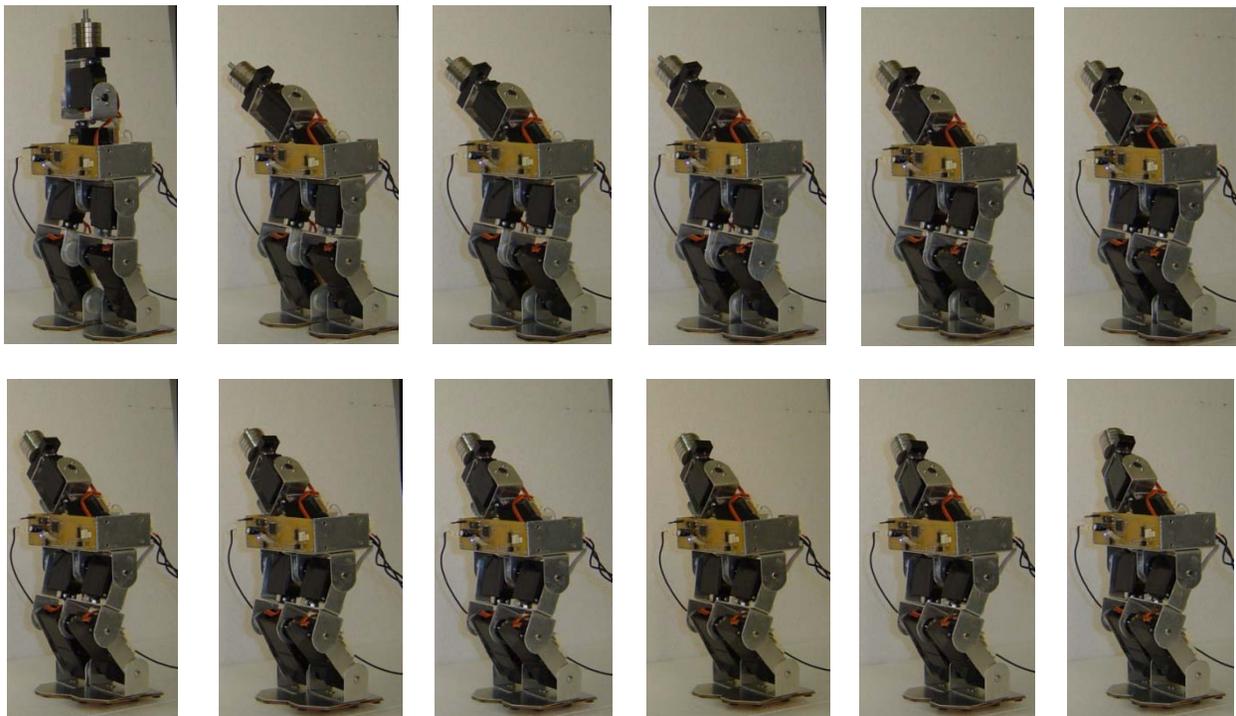
## 5.2.2 Métodos Experimentais

A seguir tem-se os resultados dos experimentos realizados em laboratório, os quais possibilitaram validar a modelagem da estrutura bípede, reproduzir a trajetória das juntas obtidas nas simulações, constatar a importância da atuação do tronco para o equilíbrio do sistema e checar o conceito de ZMP.

### 5.2.2.1 Sequência de Posições Estáticas

O objetivo do primeiro experimento foi verificar a estabilidade da estrutura bípede para uma trajetória ZMP definida pelas equações 4.36 e 4.37, cujo cálculo foi obtido pelas equações 4.38 e 4.39, as quais correspondem ao CG do rb.

A seqüência de quadros apresentada na figura 5.36 ilustra 18 posições estáticas do rb, as quais correspondem a reprodução de um único passo de 0,04m e permitiu verificar a estabilidade da estrutura em toda trajetória ZMP.



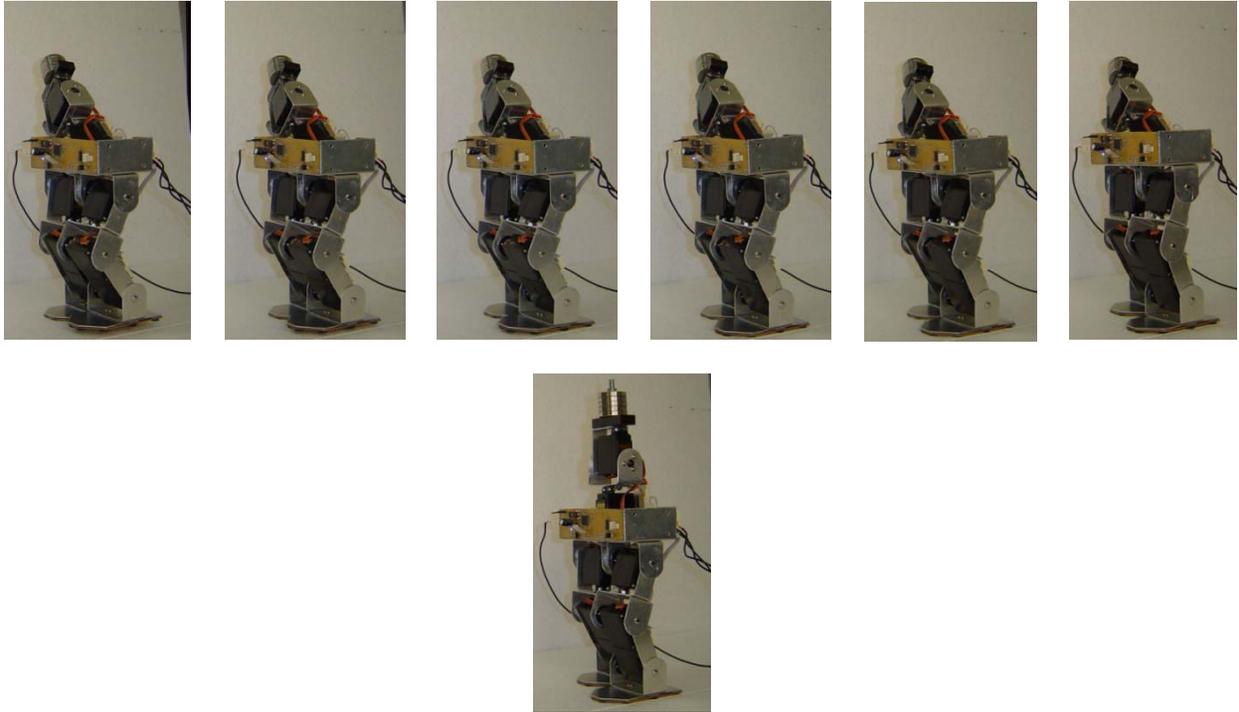


Figura 5.36: Sequência de passos para trajetória parabólica.

#### 5.2.2.2 Marcha no Plano Sagital para Frente com/sem Antiderrapante

Os resultados observados neste experimento permitiram constatar a importância de adicionar antiderrapante às solas dos pés para que a marcha siga em linha reta. As fotos apresentadas à esquerda da figura 5.37 ilustram a marcha no plano sagital sem antiderrapante após oito passos, enquanto que nas fotos à direita tem-se a marcha com antiderrapante adicionado nas solas dos pés.

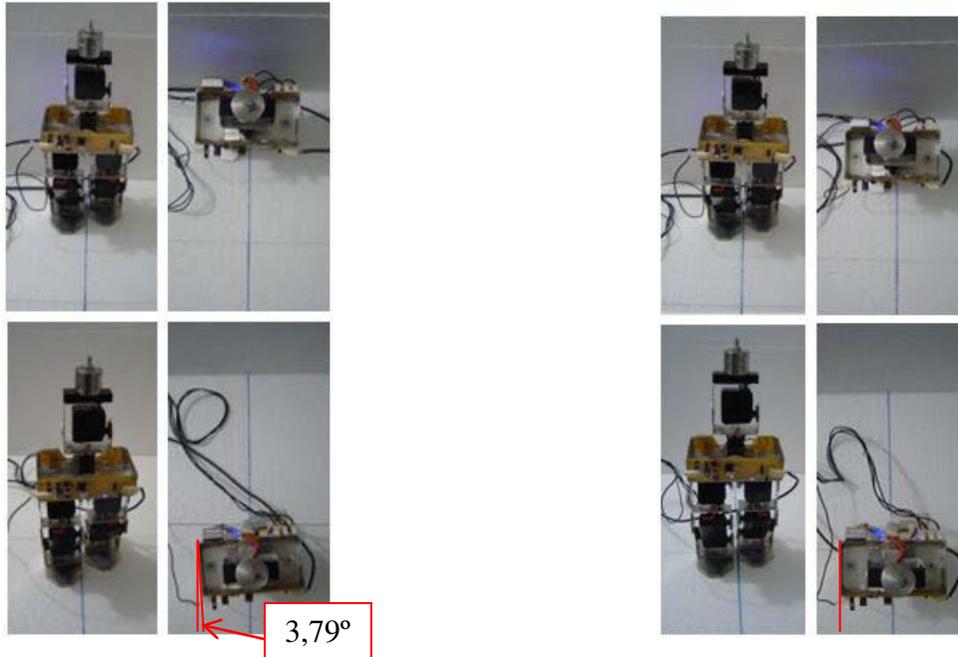


Figura 5.37: Reprodução da marcha sem antiderrapante (à esquerda) e com antiderrapante (à direita).

Nota-se a partir das fotos apresentadas na 5.37, que o robô bípede não conseguiu manter a direção do movimento quando o seu pé de apoio não possuía antiderrapante, gerando um desvio de  $3,79^\circ$  após a realização de 8 passos. Contudo, nos experimentos realizados com a adoção dos antiderrapantes, ele praticamente manteve a direção devido à força de atrito entre o pé de apoio e a superfície de contato.

### 5.2.2.3 Trajetória ZMP

Os experimentos a seguir consistem em analisar a influência da trajetória ZMP no comportamento do tronco. No primeiro experimento, o ZMP no eixo Z foi fixado em 0,0100m e o ZMP no eixo Y variou de 0,0050m a 0,0150m. No próximo experimento fixou-se o ZMP em 10mm tanto para o eixo Z e Y e no último experimento o valor do ZMP no eixo Z foi fixado em 10mm e em Y variou de 0 a 20mm, equivalente ao deslocamento do quadril no mesmo eixo.

Os resultados obtidos experimentalmente demonstraram que para o primeiro caso, a inclinação inicial e final da junta 6 é moderada ( $17,12^\circ$  e  $-25,11^\circ$ ) se comparada ao segundo caso ( $42,75^\circ$  e  $-49,16^\circ$ ), onde a posição do ZMP no eixo Z está fixado em 0,0100m, sendo esta trajetória a mais estável dentre as que foram analisadas. No último experimento, a trajetória do

ZMP que coincide com a trajetória linear do quadril resulta em um menor movimento na junta 6 ( $5,98^{\circ}$  e  $-4,31^{\circ}$ ) e, conseqüentemente, o problema da estabilidade dinâmica da estrutura bípede pode ser simplificado para um modelo de sete graus de liberdade, uma vez que o movimento da junta 6 passa a ser ignorado.

#### 5.2.2.4 Inclinação da Pelve

Este experimento objetiva analisar a inclinação da pelve do robô bípede durante a reprodução da marcha, cujo monitoramento foi realizado através de uma interface de comunicação serial RS-232 entre o microcontrolador LPC2138 e o ambiente de controle desenvolvido em LabVIEW, sendo a taxa de transferência configurada para 19200bps.

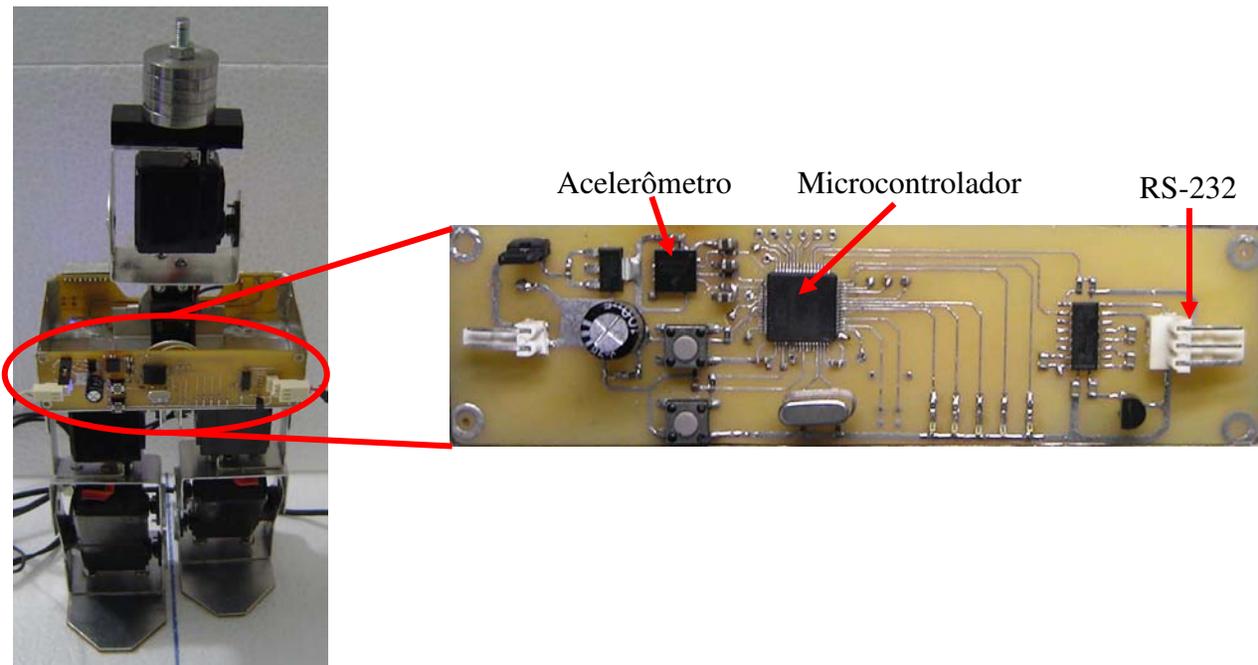


Figura 5.38: Localização da placa de controle dos servomotores e aquisição de dados.

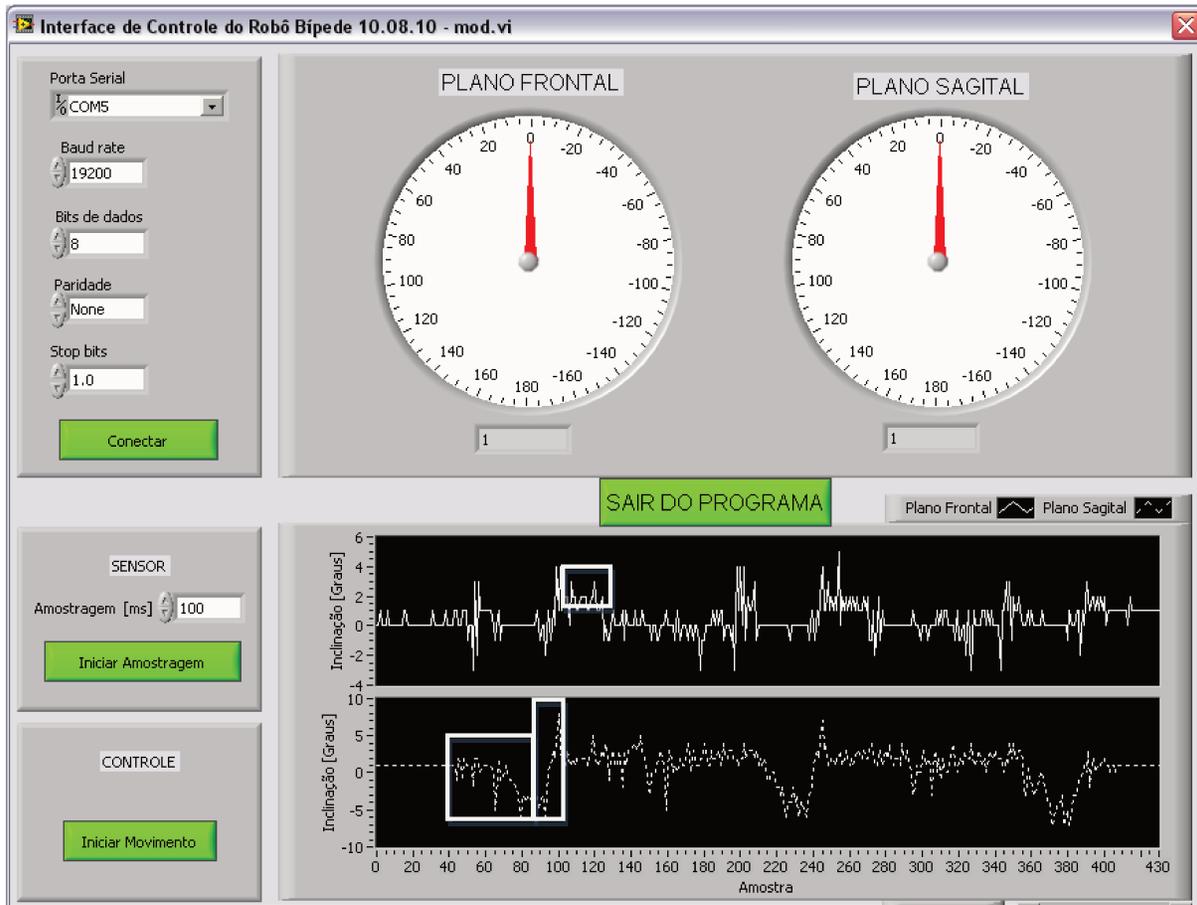


Figura 5.39: Interface de controle do robô bípede.

Os gráficos apresentados nas duas janelas do LabVIEW correspondem ao ângulo de inclinação da pelve no plano frontal (linha contínua) e sagital (linha pontilhada) durante a reprodução de 4 passos, adotando a trajetória parabólica para o pé de balanço.

Neste experimento foi possível perceber que as folgas verificadas nas juntas resultaram em uma variação de  $-5^{\circ}$  a  $7^{\circ}$  na inclinação da pelve no plano sagital, sendo a variação negativa observada quando o movimento da estrutura robótica é realizado com o pé direito apoiado à superfície e o pico de  $7^{\circ}$  correspondente ao momento em que o pé esquerdo toca a superfície e inicia-se um novo movimento. O segundo ponto importante é a observação de uma imperfeição na estrutura física que resultou em uma inclinação média da pelve de  $2^{\circ}$  no plano frontal.

# Capítulo 6

## Conclusões

Neste trabalho foi projetado e construído um robô bípede com tronco, composto por 8 GDL, capaz de reproduzir a marcha no plano sagital de forma dinâmica. Esta estrutura física possibilitou comprovar a modelagem cinemática e dinâmica proposta, uma vez que os movimentos simulados foram corretamente reproduzidos pelo robô bípede.

Durante os experimentos foi constatado a necessidade da aplicação de antiderrapante nas solas dos pés para que a direção do movimento fosse mantida, uma vez que a aceleração da perna de balanço gera uma força de rotação na estrutura em relação ao eixo normal à superfície de apoio.

A reprodução da marcha foi realizada através de um controle em malha aberta, visto que os movimentos rotacionais das juntas foram realizados por servomotores compostos por um conjunto de engrenagens e um controlador PID embarcado no próprio servomotor. Ainda que os servomotores tenham fornecido torque suficiente para a realização de todos os movimentos requeridos, não foi possível reduzir as folgas apresentadas em seus eixos e alterar os ganhos do controlador interno de modo a otimizar o sistema. Desta forma, para aumentar a robustez da estrutura física e a autonomia no controle do movimento, recomenda-se substituir os servomotores por motores DC associados a um conjunto de engrenagens com encoder óptico acoplado em cada junta, possibilitando assim, uma maior autonomia no controle da posição, velocidade e aceleração.

O controle da posição de todos os servomotores foi realizado por um microcontrolador ARM LPC2138 de 32bits capaz de fornecer 8 sinais de PWM simultaneamente, suficientes para o controle de todos os movimentos das juntas. O mesmo microcontrolador

também foi usado para calcular a inclinação da pelve fornecida por um acelerômetro MMA7260 de três eixos e transferir os dados para um programa em LabVIEW, o qual possibilitou constatar pequenas variações na inclinação da pelve ocasionadas por folgas verificadas nas juntas. Este programa também permitiu verificar a instabilidade gerada pela movimentação inicial do tronco durante a transição do pé de apoio e, por conta disso, foi inserido um movimento intermediário para ele, o qual reduziu consideravelmente as oscilações da estrutura causadas pelo deslocamento acentuado do tronco.

Por fim, se dois GDL forem adicionados na movimentação das pernas do robô bípede, este poderá realizar uma marcha dinamicamente estável sem a necessidade da atuação do tronco, resultando em movimentos mais rápidos e suaves conforme observado em alguns robôs bípedes atuais. Contudo, a adição de graus de liberdade aumenta consideravelmente a complexidade do problema e, conseqüentemente o esforço computacional, exigindo assim, o emprego de técnicas de controle mais sofisticadas, tais como a aplicação de redes neurais e lógica *fuzzy* no controle da estabilidade do rb em tempo real, onde uma série de padrões de movimento do pé pode ser previamente armazenada em um banco de dados, cujo pré-cálculo do ZMP garante a estabilidade da estrutura, cujo valor real pode ser obtido por sensores de força localizado nos pés. [16, 17]

## 6.1 Perspectivas para Trabalhos Futuros

Segue algumas propostas para trabalhos futuros, elaboradas a partir das conclusões obtidas nesta dissertação:

- Implementação de sensores de força ou pressão nas solas dos pés objetivando aprimorar a qualidade da marcha;
- Utilização de motores de corrente contínua associados a um jogo de engrenagens a fim de obter um maior controle e robustez nos movimentos;
- Aplicação de encoders ópticos em cada junta a fim de alcançar uma maior precisão nos movimentos;
- Captura da marcha humana em laboratório especializado e posterior reprodução em uma estrutura bípede aprimorada;
- Aplicação de redes neurais e lógica *fuzzy* no controle da estabilidade;

- Aplicação de FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) no controle das juntas e cálculo das equações dinâmicas de movimento, através de processamento paralelo e/ou implementação de inúmeros gerados de PWM em *hardware*.



# Referências Bibliográficas

- [1] ABBA, G., Aoustin Y., Canudas-de-Wit, C., Chevallereau, C., Grizzle, J. W., PLESTAN, F. e WESTERVELT, E.R., RABBIT: A Testbed for Advanced Control Theory, IEEE Control Systems Magazine, No. 10, pp. 57-79. 2003.
- [2] ABBA, G., GRIZZLE, J. W., PLESTAN, F. e WESTERVELT, E.R., Stable walking of a 7-DOF biped robot. In IEEE Transactions on Robotics and Automation, January. 2003.
- [3] AKACHI, K., HIRATA, M., HIRUKAWA, H., ISOZUMI, T., KAJITA, S., KANEHIRO, F., KANEKO, K. e KAWASAKI, T., Humanoid Robot HRP-2. IEEE International Conference on Robotics & Automation, Vol. 2, pp. 1083 - 1090. 2004.
- [4] ALI, M.A., LEE, C.S.G. e PARK, H.A., Convolution-Sum-Based Generation of Walking Patterns for Uneven Terrains, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 455 – 460. 2010.
- [5] American Honda Motor co., Inc., Technical Information. 2003.
- [6] American Honda Motor co., Inc., History of ASIMO.  
<http://asimo.honda.com/AsimoHistory.aspx>. Acesso em: 13 Fevereiro 2010.
- [7] American Honda Motor co., Inc., Educational Materials.  
<http://asimo.honda.com/education-materials>. 2010.
- [8] ARM Ltd., ARM7TDMI - Technical Reference Manual. Rev 3. 2001.
- [9] AYE, K.K. e THANT, A.A., Application of Cubic Spline Interpolation to Walking Patterns of Biped Robot. 2009.
- [10] BACHAR, Y., Developing Controllers for Biped Humanoid Locomotion. Master of Science School of Informatics, University of Edinburgh. 2004.

- [11] BEZZERA, C. A. D., Desenvolvimento de um Robô Bípede Para Locomoção em Ambiente Desestruturado, Tese de Doutorado, FEM - UNICAMP. 2002.
- [12] BOROVIAC, B. e VUKOBRATOVIĆ, M., Zero Moment Point – Thirty Five Years of Its Life. *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol 1, No 1, pp. 157–173. 2004.
- [13] BOROVIAC, B., ŠURDILOVIĆ, D. e VUKOBRATOVIĆ, M., Zero-Moment Point – Proper Interpretation and New Applications. In *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 237.244, Tokyo. Japan. 2001.
- [14] Boston Dynamics, PETMAN - BigDog gets a Big Brother. [http://www.bostondynamics.com/robot\\_petman.html](http://www.bostondynamics.com/robot_petman.html). Acesso em: 20 Abril 2011
- [15] CHANG, K.H., CHIOU, J.S., CHUANG, C.Y. e SHIEH, M.Y., ANFIS based controller design for biped robots, *Proceedings International Conference on Mechatronics*, Kumamoto, pp.1-6, 8-10 May. Japan. 2007.
- [16] COIMBRA, A. P., CRISÓSTOMO, M. e FERREIRA, J. P., Controlo de um Robô Bípede com base em sensores de força nos pés, 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering, Espanha. 2005.
- [17] COIMBRA, A. P., CRISÓSTOMO, M. e FERREIRA, J. P., Neuro-Fuzzy ZMP Control of a Biped Robot, *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, September 22-24, Lisbon. Portugal. 2006.
- [18] D’ALUISIO, F. e MENZEL, P., Robo sapiens: Evolution of a New Species. <http://robosapiens.mit.edu/electric3.htm>. Acesso em: 13 Fevereiro 2010.
- [19] DELAI, A. L., Aplicação de Controlador Evolutivo a Pêndulo Acionado. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 2008.
- [20] DOI, T., FUJITA, M., ISHIDA, T. e KUROKI, Y., Autonomous Behavior Control Architecture of Entertainment Humanoid Robot SDR-4X. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Vol. 1, pp. 960 - 967. 2003.
- [21] ENSIEG, Biped Robot Rabbit. <http://robot-rabbit.lag.ensieg.inpg.fr/English/index.php>. Acesso em: 2 Maio 2011.

- [22] FAZANARO, F. I. e MADRID, M. K., Análise de Séries Temporais obtidas pela Implementação de Sistemas Caóticos em Hardware Reconfigurável. In: XVII Congresso Brasileiro de Automática. 2008.
- [23] FAZANARO, F. I., Estudos e Implementações de Dinâmicas Caóticas utilizando Dispositivos Analógicos Reconfiguráveis. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 2007.
- [24] FAZANARO, F. I. e MADRID, M. K., Controle de um Conjunto de Antenas de Comunicação Presente em um Sistema composto por Um Barco Robô Autônomo e a Sua Central de Monitoramento. In: XIII Congresso Interno de Iniciação Científica. 2005.
- [25] FILHO, A.C.P., Biped Robots. InTech. Índia. 2011.
- [26] FOLGHERAITER, M., GINI, G. e SCARFOGLIERO, U., LARP, Biped Robotics Conceived as Human Modelling. In Proceedings of Biomimetic Neural Learning for Intelligent Robots. pp. 299-314. 2005.
- [27] FOREST, H. B., Desenvolvimento de um robô bípede autônomo. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. 2006.
- [28] Freescale Semiconductor, Inc., Measuring Tilt with Low-g Accelerometers. Application note AN3107. 2005.
- [29] Freescale Semiconductor, Inc., MMA7260Q. Product data sheet. Rev. 4. 2005.
- [30] Freescale Semiconductor, Inc., Implementing Auto-Zero Calibration Technique for Accelerometers. Application note AN3447. 2007.
- [31] Freescale Semiconductor, Inc., Tilt Sensing Using Linear Accelerometers. Application note AN3461. 2007.
- [32] FU, K.S., GONZALEZ, R.C. e LEE, C.S.G., Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. McGraw-Hill Book Company, Singapore. 1987.
- [33] FUJIWARA, K., HIRUKAWA, H., KAJITA, S., KANEHIRO, F., KANEKO, K., HARADA, K. e YOKOI, K., Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point. Proceedings International Conference on Robotics & Automation, 14-19

September, Taipei. Taiwan. 2003.

- [34] GOLUBOVIC, D. e HU, H., Ga-based gait generation of sony quadruped robots. In Proceedings of the 3th IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA), Benalmadena. Spain. 2003.
- [35] GONÇALVES, J. B., Desenvolvimento de um Sistema de Controle Adaptativo e Integrado para Locomoção de um Robô com Tronco. Tese de Doutorado, FEM – UNICAMP. 2004.
- [36] GONÇALVES, J. B. e ZAMPIERI, D. E., An Integrated Control for a Biped Walking Robot, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXVIII, No. 4. 2006.
- [37] GUIDA, L. C., Projeto de Ambientes Educacionais voltados à Robótica. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. Em desenvolvimento (título provisório). 2011.
- [38] HACKEL, M., Humanoid Robots: Human-like Machines, pp. 642, Itech. 2007.
- [39] HAIKAWA, Y., HIRAI, K., HIROSE, M. e TAKENAKA, T., The Development of Honda Humanoid Robot. IEEE International Conference on Robotics & Automation, Vol. 2, pp. 1321 - 1326. 1998.
- [40] HEINEN, M. R. e OSÓRIO, F. S., Evolução do Caminhar de Robôs Móveis Simulados Utilizando Algoritmos Genéticos. Seminário de Computação, Santa Catarina. 2006.
- [41] HEINEN, M. R. e OSÓRIO, F. S., Robôs Bípedes: O Estado da Arte. Seminário de Informática (SEMINFO), Rio Grande do Sul. 2006.
- [42] HUANG, Q., YOKOI, K., KAJITA, S., KANEKO, K., ARAI, H., KOYACHI, N. e TANIE, K., Planning Walking Patterns for a Biped Robot. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No 30. 2001.
- [43] Idaho National Laboratory., Humanoid Robotics.  
<http://www.inl.gov/adaptiverobotics/humanoidrobotics/leggedlocomotion.shtml>. Acesso em: 13 Fevereiro 2010.
- [44] INABA, M., INOUE, H., KAGAMI, S., KANEHIRO, F., NISHIWAKI, K. e SUGIHARA, T., Design and Development of Research Platform for Perception- Action Integration in

- Humanoid Robot: H6. In Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1559-1564. 2000.
- [45] INABA, M., INOUE, H., KAGAMI, S., KUFFNER, J. e NISHIWAKI, K., Humanoid JSK-H7: Research platform for autonomous behavior and whole body motion. In Proceedings Int. Workshop Humanoid and human friendly Robotics (IARP), pp. 2–9, Japan. 2002.
- [46] Inaba, M., Inoue, H., Kagami, S., Kuniyoshi, Y., e Nishiwaki, K., Online Generation of Humanoid Walking Motion based on a Fast Generation Method of Motion Pattern that Follows Desired ZMP. Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'02), pp. 96–101. 2002.
- [47] Institute of Robotics and Mechatronics, DLR-Biped.  
[http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-6838/11291\\_read-25964](http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-6838/11291_read-25964). Acesso em: 1 Maio 2011
- [48] JURIČIĆ, D. e VUKOBRATOVIĆ, M., Contribution to The Synthesis of Biped Gait. IEEE Transactions Bio-Medical Engineering, Vol. 16, No 1. 1969.
- [49] KAWADA Industries, Inc., Humanoid Robot HRP-2 Promet.  
<http://global.kawada.jp/mechatronics/index.html>. Acesso em: 15 Fevereiro 2010.
- [50] KAWADA Industries, Inc., Humanoid Robot HRP-3 Promet MK-II.  
<http://global.kawada.jp/mechatronics/index.html>. Acesso em: 15 Fevereiro 2010.
- [51] KIM, J., OH, J. e PARK, I., Experimental Realization Of Dynamic Stair Climbing And Descending Of Biped Humanoid Robot, HUBO. International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 6, pp. 205 - 240. 2009.
- [52] KURT, O., Biped Robot Reference Generation With Natural ZMP Trajectories. Master of Science Graduate School of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University. 2006.
- [53] LIM, H., KATO, I., TAKANISHI, A. e TSUDA, M., Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagittally Uneven Surface. Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 323-330. 1990.
- [54] MADRID, M. K., Controle de Trajetórias Contínuas por Seccionamento em Sub-Trajetórias Usando Inteligência Artificial num Robô Multi-Tarefas. Tese de Doutorado, Faculdade de

- Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 1994.
- [55] MADRID, M. K., Robô Manipulador Mecânico TRRR para Posicionamento Espacial com Controle Digital Hierárquico. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 1998.
- [56] MIYADAIRA, A.N., Microcontroladores PIC18 - Aprenda e Programe em Linguagem C. Editora Érica. São Paulo. 2009.
- [57] MOUSSI, L. N., Aplicações de Sistemas Classificadores para Robótica Autônoma Móvel com Aprendizado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 2002.
- [58] NICHOLLS, E., Bipedal dynamic walking in robotics. Dissertation thesis, University of Western Australia, Department of electrical and Electronics Engineering. 1998.
- [59] NICOLATO, F., Arquitetura de Hardware para a Extração em Tempo Real de Características de Múltiplos Objetos em Imagem de Vídeo: Classificação de Cores e Localização de Centróides. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 2002.
- [60] NICOLATO, F., Desenvolvimento de Hardware para o Rastreamento de Trajetórias Contínuas de Robôs Industriais Baseado em Busca Heurística. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 2005.
- [61] NOGUEIRA, R. G., Técnicas Alternativas de Reconhecimento de Caos em Sistemas com Dinâmica Complexa. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP. 2001.
- [62] NXP Semiconductors, LPC2131/32/34/36/38. Product data sheet. Ver 4. 2007.
- [63] OHNISHI, K. e SUZUKI, T., Trajectory Planning of Biped Robot with Two Kinds of Inverted Pendulums. Department of System Design Engineering, Keio University. 2006.
- [64] PRATT, J.E. e TEDRAKE, R., Velocity-Based Stability Margins for Fast Bipedal Walking. In Proceedings of the First Ruperto Carola Symposium on Fast Motions in Biomechanics and Robotics: Optimization and Feedback Control, Vol 340, pp. 299 – 324. 2005.
- [65] SANTANA, R. E. S., Projeto de um Robô Bípede para a Reprodução da Marcha Humana. Tese de Mestrado, EPUSP. 2005.

- [66] SHIH, C.L., The Dynamics and Control of a Biped Walking Robot With Seven Degrees of Freedom. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 118, No 4, pp. 183 – 190. 1996.
- [67] SIAS, F. R. e ZHENG, Y. F., How Many Degrees-of-freedom Does a Biped Need. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and System*, pp. 297-302. 1990.
- [68] SICILIANO, B. e KHATIB, O., *Handbook of Robotics*. Springer, German. 2008.
- [69] Sony Corp. Info., History.  
<http://www.sony.net/SonyInfo/CorporateInfo/History/sonyhistory-j.html>. Acesso em: 14 Fevereiro 2010.
- [70] Sony Corp. Info., Sony Develops Small Biped Entertainment Robot.  
[http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press\\_Archive/200011/00-057E2/](http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press_Archive/200011/00-057E2/). Acesso em: 14 Fevereiro 2010.
- [71] Sony Corp. Info., World's First Running Humanoid Robot  
[http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press\\_Archive/200203/02-0319E/](http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press_Archive/200203/02-0319E/). Acesso em: 14 Fevereiro 2010.
- [72] SPONG, M.W. e VIDYASAGAR, M., “Robot Dynamics and Control”. Wiley. 1989.
- [73] Texas Instruments Inc., Octal Buffer and Line Driver With 3-State Outputs. Product data sheet. 1988.
- [74] University of Tokyo, Perception-Action Integrated Humanoid Robot : H6 & H7.  
<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/h6/>. Acesso em: 14 Fevereiro 2010.
- [75] VANDERBORGHT, B., Dynamic stabilisation of the biped Lucy powered by actuators with controllable stiffness. Ph.D. dissertation, Vrije Univ., Brussels. Belgium. 2007.
- [76] VAUGHAN, C.L., DAVIS, B.L. e O’CONNOR, J.C., *Dynamics of Human Gait*. 2° ed. Kiboho Publishers. South Africa. 1999.
- [77] Waseda University, Biped Walking Robot.  
[http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato\\_4.html](http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_4.html). Acesso em: 15 Fevereiro 2010.

[78] Wikipedia, HUBO, <http://en.wikipedia.org/wiki/HUBO>. Acesso em: 29 Abril 2011.

# Apêndice A

## Medição de Inclinação com Acelerômetro

Para o monitoramento da inclinação da pelve foi empregado o acelerômetro MMA7260 da Freescale [29], pois trata-se de um CI (Circuito Integrado) de baixo custo, fácil de encontrar, além de ser composto por três eixos, cujas associações possibilitam medir ângulos de  $360^{\circ}$ .

### A.1 Princípio de Funcionamento do Acelerômetro

A aceleração é a variação da velocidade de um corpo, podendo ser positiva (aceleração) ou negativa (desaceleração), cuja unidade de medida é “g”, onde 1g corresponde a  $9,8062\text{m/s}^2$ .

A aceleração sofrida por uma massa de prova pode ser facilmente medida se o peso desta massa for conhecido, aplicando a segunda Lei de Newton. (equação A.1)

$$F=m*a \quad (\text{A.1})$$

Onde:

F: força [N]

m: massa [Kg]

a: aceleração [ $\text{m/s}^2$ ]

O ângulo formado pela projeção da força de gravidade da Terra e o centro de massa do corpo de prova é proporcional a aceleração sofrida pelo corpo. (figura A.1)

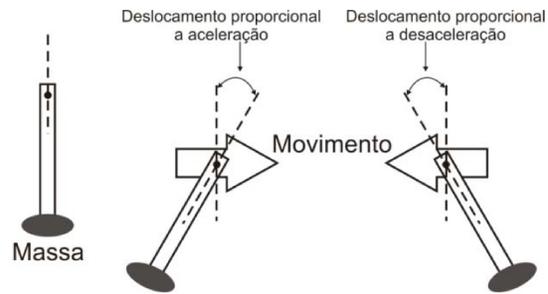


Figura A.1: Corpo de prova montado em uma estrutura de pêndulo.

Os acelerômetros se baseiam em efeito resistivo, capacitivo, piezo-elétrico ou fibra óptica. Eles são construídos com tecnologia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), o qual possibilita que sistemas mecânicos e eletrônicos sejam construídos em uma mesma pastilha de silício, resultando em um pequeno circuito integrado composto de um sistema mecânico e um sistema de condicionamento de sinal.

## A.2 Medição de Inclinação

O ângulo de inclinação pode ser medido de três formas distintas:

- Com apenas um eixo, onde a faixa linear se encontra entre  $-45^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ .
- Com a associação de dois eixos, onde a faixa linear passa para  $360^{\circ}$
- Com a associação de três eixos, o qual permite medir os ângulos em três dimensões (*roll*, *pich* e *yaw*).

### A.2.1 Medição de Inclinação com Apenas um Eixo

Suponha que um acelerômetro de dois eixos (XY) esteja situado perpendicularmente à gravidade, mas apenas o eixo X esteja sendo utilizado para medir a inclinação, conforme a figura A.2.

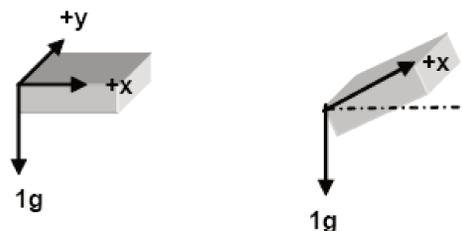


Figura A.2: Acelerômetro de dois eixos com um eixo inclinado. [31]

Se o eixo X for usado para medir o ângulo de inclinação do acelerômetro, então, a relação trigonométrica representada pela equação A.2 é usada.

$$V_{out} = V_{off} + S \cdot \sin(\theta) \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$V_{out}$  : Tensão de saída do eixo X. [V]

$V_{off}$  : Tensão de Offset. [V]

$S$  : Sensibilidade do acelerômetro. [V/g]

$\theta$  : Ângulo de inclinação. [ $^{\circ}$ ]

A aceleração de saída no eixo X devido à gravidade é representada pela seguinte equação A.3.

$$A_x = \frac{V_{outx} - V_{off}}{S} \quad (\text{A.3})$$

Logo, o ângulo de inclinação pode ser representado pela equação A.4.

$$\theta = \arcsin(A_x) \quad (\text{A.4})$$

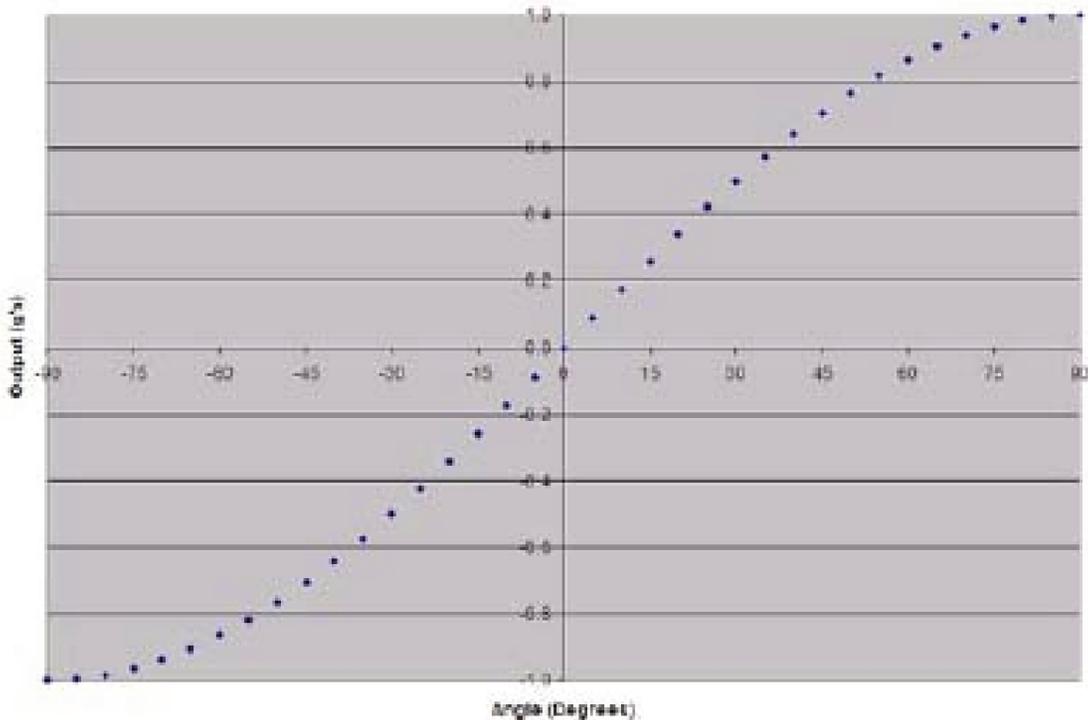


Figura A.3: Saída de apenas um eixo do acelerômetro. [28]

O sinal de saída de apenas um eixo do acelerômetro MMA7260 permite somente medir a inclinação de  $-45^{\circ}$  a  $45^{\circ}$  com precisão, e percebe-se no gráfico da figura A.3 que a sensibilidade diminui nas faixas de  $-90^{\circ}$  a  $-45^{\circ}$  e  $45^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ . Deste modo, a utilização de apenas um eixo para medir a inclinação é útil somente para medirmos ângulos entre  $-45^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ .

### A.2.2 Medição de Inclinação com a Associação de Dois Eixos

Conforme visto anteriormente, um acelerômetro de dois eixos situados paralelamente ao plano apresenta uma resposta linear entre a faixa de  $-45^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ , além de ser impossível verificar em qual quadrante se encontra. Contudo é possível aumentar a faixa linear associando as saídas de dois eixos, um localizado paralelamente à gravidade e o outro perpendicularmente, conforme a figura A.4.

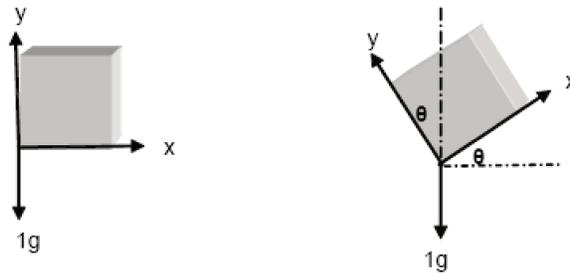


Figura A.4: Usando um acelerômetro de dois ou três eixos para medir a inclinação. [28]

O sinal de saída dos dois eixos está ilustrado na figura A.5.

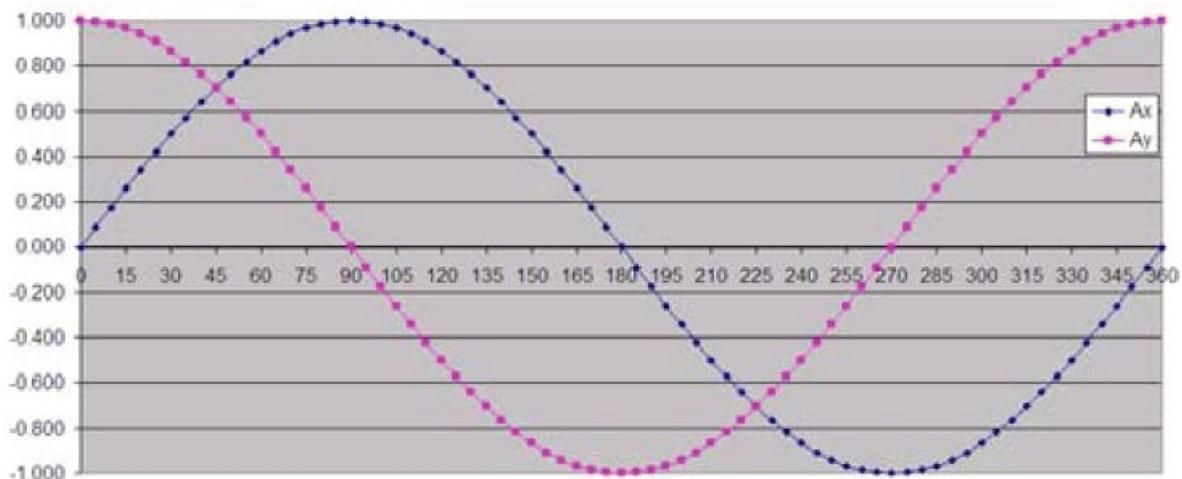


Figura A.5: Função seno da saída do eixo X e cosseno da saída do eixo Y. [28]

O gráfico acima mostra que o eixo X segue uma função seno enquanto que o eixo Y uma função cosseno. Nota-se que quando a sensibilidade do eixo X está na máxima o eixo Y está na mínima e vice-versa. Portanto, é possível manter a máxima sensibilidade para 360<sup>0</sup> se os eixos X e Y forem combinados, conforme a figura A.6.

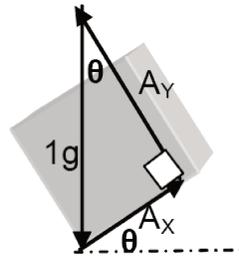


Figura A.6: Trigonometria básica. [28]

Analisando a relação trigonométrica apresentada na figura A.6, tem-se as equações A.5 e A.6.

$$A_x = \sin\theta \quad (\text{A.5})$$

$$A_y = \cos\theta \quad (\text{A.6})$$

Combinando as acelerações dos eixos X e Y resulta na equação A.7.

$$\tan\theta = \frac{A_x}{A_y} \quad (\text{A.7})$$

Se o eixo Y estiver 90<sup>0</sup> em relação ao eixo X e paralelo à gravidade, então estará sujeito a 1g enquanto o eixo X estará a 0g. Portanto, a combinação das acelerações resulta na equação A.8.

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} = 1g \quad (\text{A.8})$$

Se os dois eixos forem combinados e a equação A.7 for aplicada para obtenção do ângulo, conseqüentemente chega-se a uma constante de sensibilidade de 17,45mg<sup>0</sup> ao longo dos 360<sup>0</sup>, conforme pode ser verificado na figura A.7.

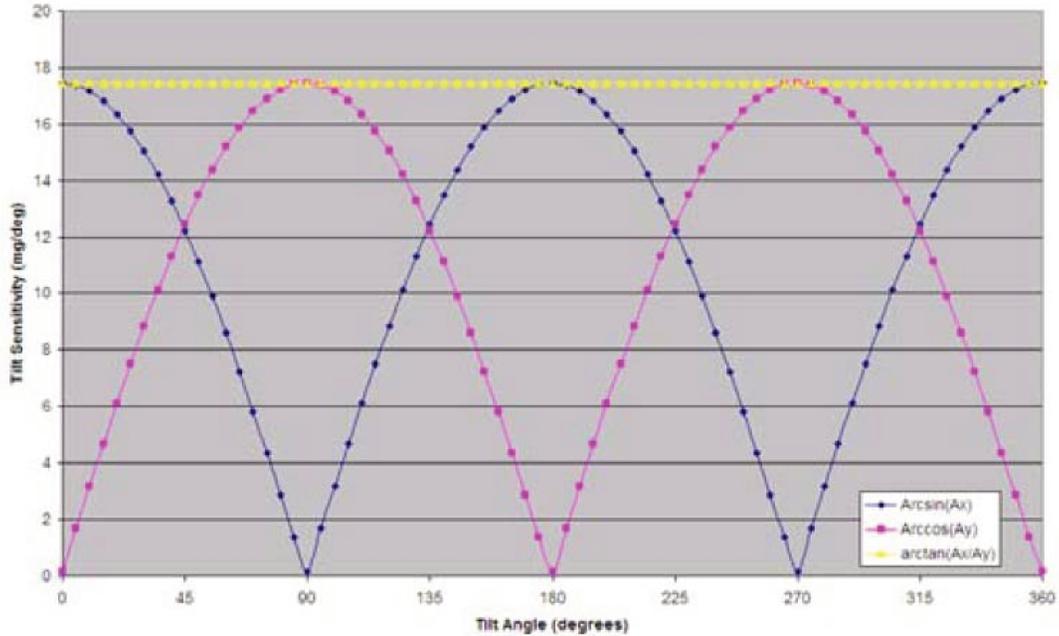


Figura A.7: Ângulo de inclinação x Sensibilidade de inclinação. [28]

A figura A.8 permite determinar a orientação do acelerômetro.

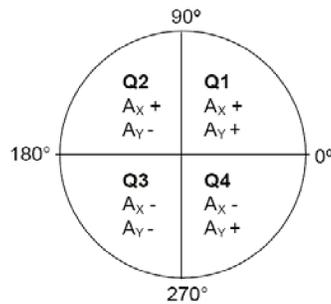


Figura A.8: Quadrantes de uma rotação de 3600. [28]

A determinação do quadrante depende diretamente dos sinais das acelerações dos eixos X e Y, pois através de suas combinações obtém-se a posição angular do acelerômetro. Portanto, tem-se as equações A.9, A.10, A.11 e A.12.

$$Q1: \theta = \arctan\left(\frac{A_x}{A_y}\right) \quad (\text{A.9})$$

$$Q2: \theta = \arctan\left(\frac{A_x}{A_y}\right) + 180 \quad (\text{A.10})$$

$$Q3: \theta = \arctan\left(\frac{Ax}{Ay}\right) + 180 \quad (\text{A.11})$$

$$Q4: \theta = \arctan\left(\frac{Ax}{Ay}\right) + 360 \quad (\text{A.12})$$

### A.2.3 Medição de Inclinação com a Associação de Três Eixos

Para obter ângulos em três dimensões *pitch*, *roll* e *yaw* é necessário utilizar as três saídas fornecidas pelo acelerômetro. Onde *pitch*( $\rho$ ) é definido pelo eixo X em relação ao terra, *roll*( $\Phi$ ) é definido pelo eixo Y em relação ao terra e *theta*( $\theta$ ) definido pelo eixo Z em relação a gravidade. (figura A.9)

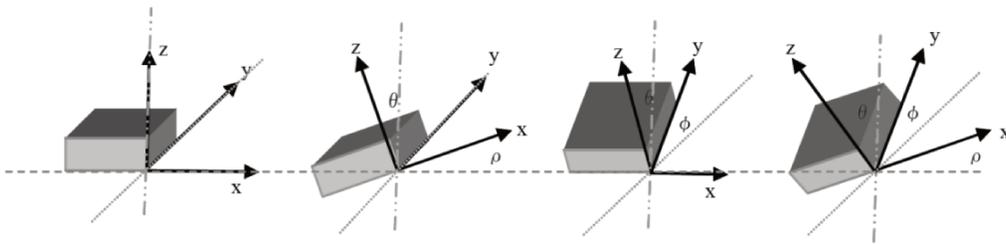


Figura A.9: Inclinação medida nos três eixos. [28]

A combinação dos três eixos resulta nas equações A.13, A.14 e A.15.

$$\rho = \arctan\left(\frac{Ax}{\sqrt{Ay^2 + Az^2}}\right) \quad (\text{A.13})$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{Ay}{\sqrt{Ax^2 + Az^2}}\right) \quad (\text{A.14})$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{Ax^2 + Ay^2}}{Az}\right) \quad (\text{A.15})$$

A combinação dos três eixos é representada pela equação A.16.

$$\sqrt{Ax^2 + Ay^2 + Az^2} = 1g \quad (\text{A.16})$$