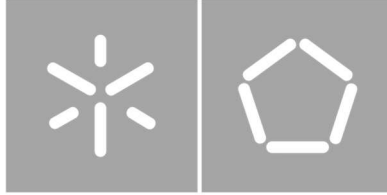




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ricardo Daniel Oliveira Vieira Remelgado

**Conceção e construção de um protótipo
robótico hexápode com módulos bípedes**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ricardo Daniel Oliveira Vieira Remelgado

**Conceção e construção de um protótipo
robótico hexápode com módulos bípedes**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor João Paulo Flores Fernandes

Professor Doutor Pedro Filipe Lima Marques

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Gostava de agradecer, em primeiro lugar, aos meus orientadores, Doutor João Paulo Flores e Doutor Pedro Filipe Marques, e aos investigadores de doutoramento Joana Coelho e Tiago Ribeiro pelo apoio constante e incondicional, pelos conselhos e indicações preciosas, sem eles este trabalho não seria possível. Agradecer ainda ao Laboratório de Automação e Robótica na pessoa do Professor Fernando Ribeiro e Professor Gil Lopes por terem providenciado o espaço e as condições para o desenvolvimento deste projeto e por várias vezes contribuírem também com conselhos e observações.

Um grande obrigado à minha família, principalmente ao meu pai, à minha mãe e ao meu irmão por me terem apoiado em todos os passos deste caminho e suportado o meu humor quando o projeto não avançava como eu queria ou os dias corriam mal.

Um grande obrigado a todos os meus companheiros do LAR: Diogo Cordeiro, Marco Luís, Mafalda Conde, Fernando Gonçalves, António Ribeiro, Eduardo Fernandes, José Martins, Carolina Lopes, Rui Lima, Diogo Silva, etc. Agradecer o companheirismo e a boa disposição dos tempos passados no LAR e por muitas vezes pararem o que estavam a fazer para ajudar ou apenas dar uma opinião.

Por fim agradecer aos meus amigos do CAUM, do Sina-grupo de fados, da Universidade e do Secundário por terem sido tão importantes com a sua amizade e companheirismo e por partilharmos momentos tão bons que ajudaram a superar os dias menos bons.

Finalmente, a todos os restantes, que direta ou indiretamente, demonstraram interesse no meu projeto e contribuíram para que mantivesse a motivação necessária para o continuar, obrigado.

«Estes anos são viagem»

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I declare that I acted with integrity in the elaboration of the present academic work and confirm that I didn't resort to the practice of plagiarism nor any other form of undue use or falsification of information or results on any of the steps conducting to its elaboration.

Furthermore, I declare that I know and respected the Ethic Code of Conduct of the University of Minho.

Universidade do Minho, 31 de janeiro de 2023

RESUMO

Os robôs móveis são um mercado em expansão e de elevado interesse graças à possibilidade de aplicação em várias áreas como reconhecimento de terreno, missões de busca e resgate, agricultura, etc. A mobilidade destes robôs assenta no uso de rodas, lagartas, pernas, ou uma combinação destas tipologias. Os robôs bio inspirados (com pernas) têm uma base de inspiração biológica, que pode ser o Homem, outros mamíferos ou insetos. Esta tipologia de robôs é muito interessante devido à sua elevada flexibilidade que permite substituir o homem em tarefas perigosas. Os robôs bio inspirados, são geralmente do tipo bípede, quadrúpede ou hexápode, contudo, alterações na cadeia cinemática típica destas tipologias permitem expandir as capacidades e campos de aplicação destes robôs. Os robôs hexápodes apresentam maior flexibilidade, contudo, são mais complexos. O presente trabalho apresenta uma proposta inovadora para robôs hexápodes através da simplificação do modelo cinemático tradicional e a introdução do conceito de modularidade em robôs bio inspirados. Para alcançar este objetivo as pernas do robô são dispostas aos pares formando estruturas independentes que são as unidades básicas da locomoção, os módulos bípedes. Os módulos bípedes permitem reduzir o número de graus de liberdade do robô e tornar o controlo idêntico e repetível em todos os módulos, o que contribui para a simplificação do mesmo.

O desenvolvimento deste projeto consiste na evolução do conceito inicial através do modelo antropométrico, estudo estático, estudo cinemático, construção das trajetórias do robô e desenvolvimento do controlo, que permitem obter um modelo final bem definido. A segunda fase do projeto consiste na construção do protótipo com base no modelo final e considerações práticas, para depois poder proceder à realização dos testes de avaliação de desempenho.

No desenvolvimento deste trabalho é possível perceber como a introdução dos módulos bípedes permite simplificar o controlo do robô hexápode e tornar simples o processo de integração para outras configurações modulares. Os testes práticos permitiram validar este conceito inovador e ainda avaliar a influência do atrito e altura trocantérica na performance.

Palavras-Chave

Robô Hexápode; Módulos Bípedes; Modularidade

ABSTRACT

Mobile robots are a growing market of high interest thanks to the possibility of application in several areas such as, terrain recognition, search and rescue missions, agriculture, etc. The mobility of these robots relies on the use of wheels, tracks, legs, or a combination of these types. Bio inspired legged robots come from biological inspiration, this inspiration can come from humans, other mammals, or insects. These types of robots are very interesting thanks to its high flexibility that allows to replace humans in dangerous situations. Bio inspired robots are usually biped, quadruped, or hexapod, however, changes in the typical kinematic configuration can expand their capabilities and application fields. Hexapod robots are the most flexible robots; however, they are the most complex to. This work presents a novel proposal for hexapod robots through the simplification of the traditional kinematic model and the introduction of modularity into bio inspired robots. To achieve this goal the legs are disposed in pairs that form independent structures, these are the basic unities of locomotion, the biped modules. The biped modules allow to decrease the number of degrees of freedom of the robot and make the control identical and repeatable in all the modules, therefore simplifying the system.

The development of this project is based on the evolution of the initial concept through the anthropometric model, static study, kinematic study, robot trajectories construction and development of the control, that allow to get a well-defined final model. The second phase is the construction of the prototype based on this final model and practical considerations, to then be able to execute the performance evaluation tests.

In the development of this work is possible to understand how the introduction of the biped modules allows to simplify the control of the hexapod robot and make the process of integration of more modules simple. The practical tests allowed to validate this novel concept and evaluate the performance of friction and trochanteric height.

Keywords

HEXAPOD ROBOT; BIPED MODULES; MODULARITY

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iv
Abstract	5
Índice	6
Índice de Figuras.....	10
Índice de Tabelas.....	15
Lista de Símbolos.....	16
1. Introdução.....	18
1.1. Enquadramento	18
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Estrutura da Dissertação	19
2. Revisão de Literatura	21
2.1. Robôs Móveis para Terrenos Acidentados.....	21
2.1.1. Robôs com Rodas	22
2.1.2. Robôs com Lagartas	22
2.1.3. Robôs Bio inspirados	23
2.1.4. Comparação entre Robôs.....	25
2.2. Movimento Bípede	26
2.2.1. Robôs Bípedes	27
2.2.2. Características do Movimento Bípede.....	29
2.2.3. Princípio do Ponto de Momento Zero (PMZ).....	31
2.2.4. Marcha Dinâmica Passiva	33
2.3. Movimento Hexápode	36

2.3.1.	Robôs Hexápodes	37
2.3.2.	Tipos de Marchas	40
2.3.3.	Conceitos Associados a Robôs Hexápodes	42
2.3.4.	O PMZ nos Robôs Hexápodes	45
2.3.5.	Planeamento do Movimento Hexápode	46
2.4.	Crítérios de Avaliação do Desempenho dos Robôs.....	47
2.4.1.	Crítérios de Estabilidade	47
2.4.2.	Crítérios Energéticos	50
2.5.	Pernas Robóticas	51
2.5.1.	Proporções Antropométricas	51
2.5.2.	Tipos de mecanismo.....	53
2.5.3.	Atuadores	56
3.	Projeto Concetual do Robô	61
3.1.	Conceito e Motivação.....	61
3.2.	Desenho Conceptual.....	62
3.3.	Proporções do Robô	63
3.4.	Análise Estática da Perna.....	64
3.5.	Sumário e Conclusões.....	66
4.	Estudo Cinemático	68
4.1.	Descrição da Cadeia Cinemática.....	68
4.2.	Cinemática Direta	70
4.3.	Cinemática Inversa	73
4.4.	Espaço de Trabalho.....	75
4.5.	Sumário e Conclusões.....	77
5.	Definição e Controlo da Trajetória.....	78
5.1.	Caraterísticas da Marcha	78

5.2.	Trajectoria da Perna com uma Curva de <i>Bezier</i>	79
5.2.1.	Fase de Balanço	79
5.2.2.	Fase de Apoio	82
5.2.3.	Passo zero.....	84
5.3.	Trajectoria ao Nível do Módulo Bípede	86
5.4.	Marcha de Viragem	88
5.5.	Controlo.....	91
5.5.1.	Circuito Eletrónico.....	91
5.5.2.	Algoritmo.....	92
5.5.3.	Funções	95
5.6.	Sumário e Conclusões.....	97
6.	Construção e Teste do Protótipo	99
6.1.	Modelo Final.....	99
6.2.	Componentes	100
6.3.	Atuadores	102
6.3.1.	Requisitos	102
6.3.2.	Especificações.....	103
6.3.3.	Validação estática.....	103
6.4.	Considerações de design e montagem.....	105
6.4.1.	Acoplagem.....	105
6.4.2.	Perna	106
6.4.3.	Pélvis.....	107
6.4.4.	Base	108
6.5.	Metodologia de Teste.....	108
6.5.1.	Trajectoria e Medição da Velocidade Linear	109
6.5.2.	Medição da Velocidade Angular	109

6.5.3.	Medição da Intensidade da Corrente.....	110
6.6.	Avaliação do Desempenho	110
6.6.1.	Marcha Simples em Plano Regular.....	111
6.6.2.	Estudo sobre a Influência da Aderência nos Pés.....	114
6.6.3.	Estudo sobre a Influência da Altura Trocantérica.....	118
6.6.4.	Estudo sobre a Influência da Irregularidade do Terreno	126
6.6.5.	Precisão da Marcha de Viragem.....	132
6.7.	Sumário e Conclusões.....	133
7.	Conclusões	135
7.1.	Objetivos Alcançados.....	135
7.2.	Limitações.....	137
7.3.	Trabalho Futuro	137
	Bibliografia	139
	Apêndice A: Esquema de Circuito Eletrónico.....	144
	Apêndice B: Algoritmos Gerados	145
	Apêndice C: Controlo do Período da Passada através do Código.....	146
	Apêndice D: Desenhos técnicos dos componentes do ROHMOBI.....	147
	Apêndice E: Propriedades Inerciais dos Membros das Pernas	153
	Apêndice F: Algoritmo de Visão para Realização dos Testes Práticos.....	155
	Anexo I: Tabela ASCII.....	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Categorias de robôs móveis terrestres	21
Figura 2.2- <i>Bot'n Roll One</i> [2], <i>NASA Curiosity</i> [3]	22
Figura 2.3- <i>AMBOT GRP TRAX</i> [4], <i>TECDRON SP-e3</i> [5].....	23
Figura 2.4- <i>Honda ASIMO</i> [12], <i>Boston Dynamics Spot</i> [13], <i>LAURON V</i> [14].....	24
Figura 2.5- Relação entre velocidade, rendimento energético, mobilidade e complexidade de controlo para as 3 categorias de robôs móveis	26
Figura 2.6- Robô <i>ATLAS</i> da <i>Boston Dynamics</i> [16]	27
Figura 2.7- Robô <i>Cassie</i> da <i>Agility Robotics</i> [17]	28
Figura 2.8- Robô <i>Digit</i> da <i>Agility Robotics</i> [18]	28
Figura 2.9- Robô <i>NABiRoS</i> desenvolvido pelo <i>RoMeLa</i> [20]	29
Figura 2.10- As duas fases características do movimento bípede relativamente à cinemática	29
Figura 2.11- Primitivas do movimento bípede [22]	30
Figura 2.12- Ponto de Momento Zero.....	31
Figura 2.13- Significado do Ponto de Momento Zero Fictício.....	32
Figura 2.14- Disposição típica dos sensores nos pés de robôs bípedes [21]	33
Figura 2.15- Brinquedo caminhante passivo [23]	33
Figura 2.16- Evolução da roda em caminhante passivo dinâmico [15]	34
Figura 2.17- Bio inspiração por trás do design da perna do <i>LAURON V</i> [9].....	37
Figura 2.18- Robô hexápode <i>LAURON V</i> [14].....	38
Figura 2.19- Robô hexápode <i>RHEX</i> [27]	39
Figura 2.20- Robô Hexápode <i>WEAVER</i> [28]	39
Figura 2.21- Robô hexápode <i>ATHENA</i> [30]	40
Figura 2.22- Tipos de marcha robôs hexápodes: a) marcha trípede, b) marcha quadrúpede, c) marcha metacronal	41
Figura 2.23- Polígono de suporte (azul) e polígono de suporte reduzido (vermelho) de um robô hexápode.....	42
Figura 2.24- Espaço de trabalho de uma perna (esquerda), espaço de trabalho de todas as pernas do robô hexápode, margem estática, margem cinemática, avanço máximo do CM, passada máxima (direita) [24].....	43
Figura 2.25- PMZ de marcha de estabilidade [25]	46

Figura 2.26- Altura trocantérica e altura do meio da patela do joelho	52
Figura 2.27- Limites angulares das juntas da perna envolvidas na passada.....	52
Figura 2.28- Mecanismo cinemático em: a) série; b) paralelo; c) híbrido	54
Figura 2.29- Evolução da disposição dos atuadores numa perna robótica de modo a reduzir a inércia e aumentar a proteção dos atuadores: a) disposição em série simples; b) acoplamento corporal da junta AAQ; c) configuração pantógrafo	55
Figura 2.30- Disposição dos atuadores na perna do robô Mini Cheetah [38]	55
Figura 2.31- Configurações pernas complacentes: a) telescópica- prismática; b) dois segmentos; c) três segmentos; d) quatro segmentos [34]	56
Figura 2.32- Motor DC com escovas [40]	57
Figura 2.33- Motores DC sem escovas [40].....	58
Figura 2.34- - Motor AC [40]	58
Figura 2.35- Esquema de um motor de passo [45]	59
Figura 2.36- Esquema de um servomotor [39]	60
Figura 3.1- Desenho conceptual do ROHMOBI: a) Módulo Bípede, b) Vista superior do robô	63
Figura 3.2- Dimensões da perna do robô.....	64
Figura 3.3- Diagrama de corpo livre da coxa para análise estática.....	65
Figura 3.4- Diagrama de corpo livre da perna para análise estática.....	66
Figura 4.1- Desenho cinemático do módulo bípede.....	69
Figura 4.2- Desenho cinemático da perna individual.....	69
Figura 4.3- Referenciais transformados nas juntas do mecanismo.....	71
Figura 4.4- Perspetiva do mecanismo de uma perna única segundo o plano $xOyO$	73
Figura 4.5- Perspetiva do mecanismo de uma perna única segundo o plano $x1Oz1$	74
Figura 4.6- Limites angulares das juntas de 1 perna do módulo bípede	76
Figura 4.7- Posições limite das juntas: a) ϕ_1 ; b) θ_2 ; c) θ_3	76
Figura 4.8- Espaço de trabalho de uma perna do módulo bípede.....	77
Figura 5.1- Nomenclatura das pernas do ROHMOBI e diagrama da marcha trípede; espaços pretos representam perna em fase de suporte, espaços brancos representam perna em fase de balanço	78
Figura 5.2- Pontos de controlo da fase de balanço.....	80

Figura 5.3- Curva de <i>Bezier</i> da trajetória da fase de balanço através dos pontos de controlo selecionados.....	81
Figura 5.4- Evolução temporal dos ângulos das juntas na fase de balanço.....	82
Figura 5.5- Pontos de controlo da fase de apoio	83
Figura 5.6- Curva de <i>Bezier</i> da trajetória da fase de suporte através dos pontos de controlo selecionados.....	84
Figura 5.7- Evolução temporal dos ângulos das juntas na fase de apoio	84
Figura 5.8- Pontos de controlo do passo zero da: a) fase de balanço; b) fase de suporte.....	85
Figura 5.9- Curva de <i>Bezier</i> do passo zero: a) fase de balanço; b) fase de suporte.....	86
Figura 5.10- Simulação das pernas do módulo bípede	86
Figura 5.11- Curva de <i>Bezier</i> da trajetória da fase de apoio através dos pontos de controlo selecionados.....	87
Figura 5.12- Deslocamento temporal angular para cada um dos atuadores em cada uma das fases.....	87
Figura 5.13- Movimento geral do módulo bípede segundo um referencial arbitrário e exterior ao módulo	88
Figura 5.14- Trajetória de rotação da perna em fase de balanço.....	89
Figura 5.15- Marcha de viragem à direita	90
Figura 5.16- Marcha de viragem à esquerda	90
Figura 5.17- Circuito eletrónico do ROHMOBI	92
Figura 5.18- Fluxograma do controlo de locomoção do ROHMOBI.....	93
Figura 5.19- Teclas do teclado QWERTY que permitem comandar o ROHMOBI	94
Figura 6.1- Evolução do desenho do ROHMOBI desde a) até c).....	99
Figura 6.2- Modelo final do ROHMOBI.....	100
Figura 6.3- Micro servo motor MG90S [49]	103
Figura 6.4- Fotos do protótipo físico do ROHMOBI	105
Figura 6.5- Sistema de acoplagem do servo a um dos membros do ROHMOBI.....	106
Figura 6.6- Design da perna do ROHMOBI	107
Figura 6.7- Pélvis do ROHMOBI com servomotor de controlo de orientação.....	107
Figura 6.8- Ligação dos componentes constituintes da base do ROHMOBI.....	108
Figura 6.9- Sensor <i>Waveshare 10 DOF IMU Sensor (B)</i> montado no ROHMOBI	109

Figura 6.10- Velocidade angular segundo os eixos cartesianos espaciais de acordo com a montagem do sensor IMU.....	110
Figura 6.11- ROHMOBI na pista de teste	111
Figura 6.12- Trajetória do ROHMOBI no teste em plano regular	112
Figura 6.13- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste em plano regular	113
Figura 6.14- Velocidade média do ROHMOBI em plano regular	113
Figura 6.15- Velocidade angular segundo o eixo x e y do teste de referência	114
Figura 6.16- Trajetória do ROHMOBI no teste de plano regular com baixa aderência	115
Figura 6.17- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste em plano regular com baixa aderência.....	116
Figura 6.18- Velocidade média do ROHMOBI no teste em plano regular com baixa aderência	116
Figura 6.19- Velocidade angular do ROHMOBI no teste em plano regular com baixa aderência: a) segundo o eixo x; b) segundo o eixo y	117
Figura 6.20- Alturas trocânticas testadas	118
Figura 6.21- Pontos de controlo para altura trocântica de 60 mm na fase de balanço e suporte	118
Figura 6.22- Curva de <i>Bezier</i> para altura trocântica de 60 mm: a) fase de balanço; b) fase de suporte	119
Figura 6.23- Trajetória do ROHMOBI no teste com altura trocântica de 60 mm.....	120
Figura 6.24- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste com altura trocântica de 60 mm	120
Figura 6.25- Velocidade média do ROHMOBI no teste com altura trocântica de 60 mm .	121
Figura 6.26- Velocidade angular do ROHMOBI no teste em plano regular com altura trocântica de 60 mm: a) segundo o eixo x; b) segundo o eixo y	122
Figura 6.27- Pontos de controlo para altura trocântica de 90 mm na fase de balanço e suporte	123
Figura 6.28- Curva de <i>Bezier</i> para altura trocântica de 90 mm: a) fase de balanço; b) fase de suporte	123
Figura 6.29- Trajetória do ROHMOBI no teste com altura trocântica de 90 mm.....	124
Figura 6.30- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste com altura trocântica de 90 mm	124

Figura 6.31- Velocidade média do ROHMOBI no teste com altura trocantérica de 90 mm .	125
Figura 6.32- Velocidade angular do ROHMOBI no teste em plano regular com altura trocantérica de 90 mm: a) segundo o eixo x; b) segundo o eixo y	126
Figura 6.33- ROHMOBI a percorrer a pista de teste de terreno irregular	127
Figura 6.34- Pista de teste utilizada para recriar terreno irregular	127
Figura 6.35- Trajetória do ROHMOBI em pista de teste de terreno irregular: a) 1ª secção; b) 2ª secção	128
Figura 6.36- Velocidade instantânea do ROHMOBI em pista de teste de terreno irregular: a)1ª secção; b) 2ª secção	129
Figura 6.37- Velocidade média do ROHMOBI na pista de teste de terreno irregular: a) 1ª secção; b) 2ª secção	130
Figura 6.38- Velocidade angular do ROHMOBI na pista de teste de terreno irregular: a) eixo x; b) eixo y	131
Figura 6.39- Ângulo efetivo da marcha de viragem 60° à direita	132
Figura 6.40- Ângulo efetivo da marcha de viragem 60° à esquerda.....	133

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Comparação da marcha estática com a marcha dinâmica	25
Tabela 2.2- Comparação entre categorias de robôs	26
Tabela 2.3- Efeito da variação dos parâmetros num mecanismo bípede [15]	36
Tabela 2.4- Amplitudes angulares para os movimentos de flexão e extensão das juntas da perna humana [37].....	53
Tabela 2.5- Comparação entre os diferentes tipos de atuadores elétricos [39], [45].....	60
Tabela 4.1- Parâmetros de <i>Denavit-Hartenberg</i> Modificados.....	71
Tabela 6.1- Componentes constituintes do ROHMOBI.....	100
Tabela 6.2- Ponderação pontuada entre diferentes tipos de atuadores	102
Tabela 6.3- Especificações do micro servo motor MG90S [50]	103
Tabela 6.4- Momento resistivo nas juntas de uma perna do robô para diferentes posições estáticas.....	104
Tabela 6.5- Performance do ROHMOBI nas diferentes condições de teste	134

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

AA	<i>Maximum Advance Amount</i> (Avanço Máximo)
AAQ	Junta de Abdução/ Adução do Quadril
AC	<i>Alternate Current</i> (Corrente Alternada)
CM	Centro de Gravidade
CP	Centro de Pressão
CT	Custo de Transporte
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Direta)
FEJ	Junta de Flexão/ Extensão do Joelho
FEQ	Junta de Flexão/ Extensão do Quadril
FRI	<i>Foot Rotation Indicator</i> (Indicador de Rotação do Pé)
FSW	<i>Feasible Solution Wrench</i> (Chave de Solução Viável)
GDL	Grau de Liberdade
KM _i	<i>Reduced Kinematic Margin</i> (Margem Cinemática Reduzida)
MSL	<i>Maximum Step Length</i> (Avanço Máximo da Passada)
PMZ	Ponto de Momento Zero
PMZF	Ponto de Momento Zero Fictício
PWM	<i>Pulse With Modulation</i> (Sinal de Pulso)
ROHMOBI	Robô Hexápode com Módulos Bípedes
SM	<i>Static Margin</i> (Margem Estática)
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidade de Medida Inercial)

Nomenclatura

a	Aceleração [mm/s ²]
c_F	Vetor do estado de suporte
f_i	Estado de falha
F_r	Número de <i>Froude</i>
F_x, F_y, F_z	Força em torno do eixo x , y e z respetivamente [N]
g	Aceleração gravítica [9.81 m/s ²]

l	Comprimento [mm]
m	Massa [g]
M_x, M_y, M_z	Momento em torno do eixo x , y e z respetivamente [N.mm]
p	Vetor espaço cartesiano
P	Potência [W]
${}^{i-1}_I\vec{p}$	Vetor posição
q	Vetor espaços das juntas
r	Raio [mm]
${}^{i-1}_I R$	Matriz rotação
s_i	Estado de suporte
t_F	Vetor do estado de falha
${}^{i-1}_I T$	Matriz transformação
v	Velocidade [mm/s]
(x, y, z)	Sistema de coordenadas cartesianas [mm]
α_{PMZ}	Coefficiente de PMZ
$\alpha_2, \beta_2, \beta_3$	Ângulos auxiliares ao estudo cinemático [°]
α, β, γ	<i>Roll, Pitch, Yaw</i> (Atitude, Inclinação, Orientação) [°]
σ	Desvio padrão
ϕ	Vetor do estado do hexápode
$(\phi_1, \theta_2, \theta_3)$	Ângulos das juntas [°]
ψ	Vetor da sequência de solução
ω	Velocidade angular [°/s]
$(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$	Velocidade angular segundo os eixos coordenados do IMU [°/s]

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação relata de forma pormenorizada todos os passos envolvidos na conceção e construção de um protótipo robótico hexápode inovador, através do uso de módulos bípedes. Partindo da ideia e conceito inicial, passando pela realização de vários estudos e análises que conduziram a um design final e culminaram na construção de um protótipo físico validado através de testes práticos.

1.1. ENQUADRAMENTO

Os robôs e sistemas robóticos foram durante muitos anos uma área de ficção científica, contudo, hoje em dia são uma realidade bem assente que veio para ficar. Os últimos anos têm assistido a grandes avanços na tecnologia robótica e a um crescimento no uso de robôs, atualmente é possível encontrar robôs em todas as grandes indústrias devido à sua capacidade de realizarem trabalhos repetitivos com um elevado grau de precisão e fiabilidade, ou pelo facto de poderem substituir o Homem em trabalhos exigentes e/ ou perigosos. Contudo, os avanços da tecnologia robótica não se prendem apenas à robótica industrial e existem cada vez mais opções de robôs domésticos capazes de auxiliar os humanos nas tarefas da casa.

A robótica móvel é uma área que não está tão avançada como a robótica industrial ou a robótica doméstica e isto deve-se principalmente à complexidade destes sistemas robóticos e volume de mercado inferior. Contudo, a área da robótica móvel é um mercado em crescimento como resultado do aprimorar da tecnologia e a possibilidade de aplicação em vários campos como missões de reconhecimento de terreno, missões de resgate e salvamento, segurança, desminagem, agricultura, etc. Apesar de em termos económicos ainda não ter um interesse tão elevado como outras áreas da robótica, em termos académicos a área da robótica móvel é extremamente interessante pois exige a interseção de competências multidisciplinares na vanguarda da tecnologia e permite a introdução de conceitos totalmente inovadores. Os robôs móveis com maior capacidade de flexibilidade para locomoção em terrenos altamente irregulares são os robôs com pernas. Esta tipologia de robôs baseia-se em estruturas biológicas e por isso são também chamados de robôs bio inspirados. A inspiração biológica provém de humanos, animais e até insetos e permite que

estes tipos de robôs sejam capazes de executar tarefas vedadas apenas a estruturas biológicas e excelentes a mover-se em superfícies acidentadas. Estes robôs são classificados como bípedes, quadrúpedes ou hexápodes, conforme o modelo biológico que lhes serve de inspiração, contudo, um modelo puramente bio inspirado também possui as suas limitações, pelo que um robô bio inspirado sem um modelo biológico de correspondência direta pode permitir expandir os horizontes do que é possível aos robôs móveis.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento e construção de um protótipo robótico hexápode com um conceito cinemático inovador que não é diretamente inspirado por um modelo biológico, com o intuito de alcançar a simplificação do controlo e locomoção de robôs hexápodes e ainda explorar e desenvolver o conceito da modularidade em robôs bio inspirados.

Para alcançar este objetivo principal o projeto pode ser dividido em três objetivos menores. O primeiro objetivo corresponde ao desenvolvimento do novo conceito cinemático para robôs hexápodes com foco na redução do número de graus de liberdade, simplificação do controlo e introdução do conceito de modularidade, nesta fase o conceito é aprimorado através do desenho conceptual, análise estática e descrição cinemática do robô. O segundo objetivo consiste no desenvolvimento e construção do protótipo físico, para alcançar este objetivo são aplicados os conhecimentos derivados da análise estática e descrição cinemática, de modo a obter um design final com validade e proceder ao processo de construção do protótipo. O último objetivo traduz-se na implementação do controlo e avaliação da performance do robô, este objetivo implica a instalação dos elementos de controlo e a aplicação do algoritmo de controlo, assim como, a construção do código para avaliação da performance do robô e estudo da influência das variáveis.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado está dividida em sete capítulos ordenados conforme a sequência de passos que levaram ao desenvolvimento e conclusão do projeto através da construção progressiva de conhecimento. Deste modo:

- No Capítulo 1 é feita uma breve introdução ao tema, recorrendo a um enquadramento temático e estabelecendo os principais objetivos para o projeto;
- O Capítulo 2 consiste numa extensa revisão de literatura que versa sobre os robôs móveis e mais concretamente sobre o movimento bípede e hexápode, através da exposição de alguns modelos robóticos existentes e a explicação de conceitos próprios a estas tipologias;
- No Capítulo 3 é apresentado e desenvolvido o conceito do ROHMOBI (Robô Hexápode com Módulos Bípedes) através do desenho conceptual, seleção das dimensões das pernas robóticas e análise estática;
- O Capítulo 4 discretiza cinematicamente o desenho conceptual de modo a permitir o estudo cinemático através da cinemática direta e cinemática inversa e termina com a geração do espaço de trabalho de uma perna do robô;
- No Capítulo 5 é gerada a trajetória dos módulos bípedes com base no estudo cinemático e espaço de trabalho do capítulo anterior e desenvolvido o algoritmo de controlo do ROHMOBI;
- O Capítulo 6 é o último capítulo prático em que é apresentado o protótipo final, assim como algumas considerações de design para a construção do mesmo, ainda neste capítulo é avaliada a performance do robô através dos dados recolhidos nos testes realizados;
- O Capítulo 7 é o capítulo final no qual se procede à avaliação do modo como os objetivos foram alcançados, as principais limitações ao desenvolvimento do projeto e algumas sugestões para trabalho futuro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura sobre robôs móveis e todos os conceitos a eles associados é um passo essencial para alcançar o objetivo do presente trabalho de desenvolver um novo conceito de robô hexápode com um mecanismo cinemático distinto. Com este intuito é necessária uma análise completa e compreensiva à cerca dos robôs móveis, em particular daqueles em que a tipologia de locomoção é bio inspirada, nos quais se destacam, pela natureza do movimento previsto para o protótipo, os robôs bípedes e hexápodes.

2.1. ROBÔS MÓVEIS PARA TERRENOS ACIDENTADOS

Os robôs móveis para terrenos acidentados são uma gama de robôs com capacidade de movimento autónomo e com características que permitem ultrapassar obstáculos num terreno imprevisível e /ou perigoso. Graças a estas características os robôs com locomoção adaptada a terrenos acidentados têm um espectro de aplicação muito abrangente que incluem: segurança, vigilância, reconhecimento em situações perigosas, desminagem e agricultura [1]. Os robôs móveis podem ser classificados em relação ao tipo de locomoção onde existem três grandes categorias: com rodas, com lagartas, com pernas ou bio inspirados (Figura 2.1).

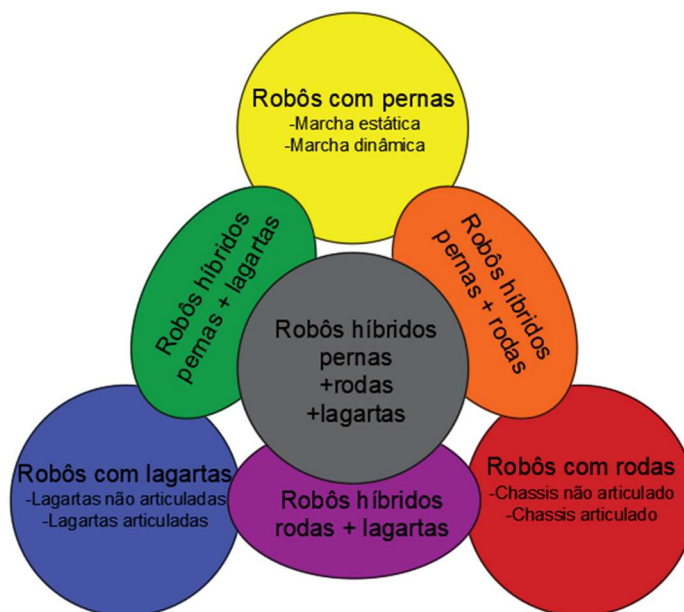


Figura 2.1- Categorias de robôs móveis terrestres

Existem ainda robôs com locomoção híbrida, estes resultam da junção de dois ou mais tipos de locomoção com o intuito de conciliar as vantagens dos diferentes modelos. Deste

modo e de acordo com a Figura 2.1 existem quatro tipos de robôs híbridos: robô híbrido pernas-lagartas, robô híbrido pernas-roda, robô híbrido rodas-lagarta, robô híbrido pernas-rodas-lagartas.

2.1.1. ROBÔS COM RODAS

Os robôs com rodas são robôs relativamente simples de controlar e com poucos graus de liberdade (GDL's), conseguem atingir velocidades elevadas com baixo consumo de energia.

Estes robôs podem ser classificados em relação ao chassis: articulado ou não articulado, mas também em relação ao número de rodas, três rodas são o número mínimo de rodas necessárias para manter equilíbrio estático, no entanto, existem também robôs com duas rodas apenas, mas exigem um sistema de controlo muito mais complexo de modo a manter o mesmo em equilíbrio o que desfaz uma das grandes vantagens dos robôs com rodas [1].

À esquerda da Figura 2.2 é apresentado o robô *Bot'n Roll One A* um robô com três rodas e um chassis não articulado, à direita da mesma figura o robô *Curiosity* da NASA com seis rodas e chassis articulado.



Figura 2.2- *Bot'n Roll One* [2], *NASA Curiosity* [3]

O aumento do número de rodas piora a performance energética, pelo simples facto do número de pontos de contacto com o chão ser superior, no entanto, existe uma melhoria na capacidade do robô se deslocar em terrenos acidentados. Por este motivo, a escolha do número de rodas deve ser adaptada ao tipo de utilização do robô.

2.1.2. ROBÔS COM LAGARTAS

Em relação aos robôs com rodas, os robôs com lagartas possuem maior tração e por este motivo estão mais adaptados a moverem-se em terrenos acidentados e/ ou arenosos. No entanto, esta capacidade de locomoção acrescida tem um custo, esta categoria de robôs é

geralmente mais lenta e com menor rendimento energético e mecânico, quando em comparação aos robôs com rodas [1].

Como referido em [1] esta categoria de robôs pode ser classificada em relação ao número e disposição de lagartas. O robô com lagartas *AMBOT GRP TRAX*, à esquerda na Figura 2.3, é um exemplo de um robô com lagartas não articulado. O robô à direita da mesma imagem, *TECDRON SP-e³*, é um exemplo de um robô com lagartas articulado, esta configuração permite uma mobilidade muito superior em comparação ao não articulado, mas exige um controlo mais complexo.



Figura 2.3- *AMBOT GRP TRAX* [4], *TECDRON SP-e3* [5]

2.1.3. ROBÔS BIO INSPIRADOS

Os robôs bio inspirados são mecanismos desenvolvidos com base no movimento dos animais. Este facto é evidente quando os robôs bio inspirados são classificados com base no número de pernas que possuem:

- **2 pernas:** robôs bípodes, inspirados em humanos e por esse motivo muito utilizados em robôs humanoides [6];
- **4 pernas:** robôs quadrúpedes, inspirados nos mamíferos terrestres tais como o cão [7] ou chita [8];
- **6 pernas:** robôs hexápodes, inspirados nos insetos tais como a aranha [9] ou a barata [10].

Existem ainda robôs trípodes (com três pernas), no entanto, estes não são bio inspirados pois não existe nenhum mecanismo biológico que se mova apenas com três pernas [11].

Os robôs bio inspirados em comparação com as duas categorias anteriormente apresentadas são mais lentos, consomem mais energia, possuem maior número de atuadores e têm uma complexidade de sistema e de controlo mais elevada. No entanto, são extremamente atrativos pela elevada mobilidade que possuem e que pela sua natureza bio inspirada permitem o acesso a muitas tarefas vedadas apenas a animais. Por este motivo, esta

categoria de robôs é das mais promissoras e das que tem assistido às inovações mais significativas nos últimos anos (Figura 2.4).



Figura 2.4- Honda ASIMO [12], Boston Dynamics Spot [13], LAURON V [14]

A característica mais importante dos robôs bio inspirados é o tipo de marcha, a qual pode pertencer a um de dois grupos, marcha estática ou marcha dinâmica.

Marcha estática: é um tipo de marcha que é planeada de modo que a projeção vertical do centro de gravidade do robô esteja sempre dentro do polígono de suporte. O polígono de suporte é formado pela interseção dos pontos de contacto dos pés com o chão. Por este motivo a marcha estática é uma marcha inerentemente equilibrada em qualquer instante, semelhante a um inseto lento [1].

Marcha dinâmica: a marcha dinâmica é um tipo de marcha em que o robot não está sempre equilibrado, semelhante à passada rápida, corrida, trote ou galope dos mamíferos terrestres. Este fator aliado ao facto de que este tipo de marcha exige que cada perna do robô tenha vários graus de liberdade, atuadores e sensores de força nos pés, tornam o controlo mais complexo. O controlo de uma marcha dinâmica é normalmente feito recorrendo ao princípio do ponto de momento zero ou à marcha passiva. No entanto, a grande vantagem da marcha dinâmica é o facto de permitir atingir velocidades superiores e melhor rendimento energético quando em comparação com a marcha estática.

De acordo com a informação em [1] e [15] é possível construir a Tabela 2.1 que permite sintetizar as características da marcha estática e da marcha dinâmica e comparar uma à outra.

Tabela 2.1- Comparação da marcha estática com a marcha dinâmica

2.1.4.COMPARAÇÃO ENTRE ROBÔS

Marcha estática	Marcha dinâmica
Requer no mínimo quatro pernas, comumente usado com seis pernas	Comum em mecanismos bípedes, usado também em quadrúpedes
Equilíbrio estático durante o movimento	Desequilíbrio do robô durante o movimento
O robô pode parar em qualquer posição e permanecer equilibrado	Requer um movimento próprio de modo a alcançar uma posição de descanso
Restrições de velocidade de modo a minimizar os esforços inerciais associados às acelerações cíclicas	Permite um movimento potencialmente mais rápido
Design de marcha estática apenas pode ser baseado no modelo cinemático	Design de marcha dinâmica apenas pode ser baseado no modelo dinâmico
Diferentes velocidades do robô para os mesmos movimentos das pernas executados a diferentes velocidades	As trajetórias das pernas têm de ser modificadas em função da velocidade do robô
Controlo menos complexo	Controlo complexo
A estabilidade da marcha garante que esta é muito mais resistente ao distúrbio de forças externas	Os distúrbios das forças externas são complexos de compensar e exigem um replaneamento do movimento
Movimento semelhante aos insetos no caso dos robôs hexápodes	Movimento semelhante ao humano no caso de bípedes e ao animal no caso dos quadrúpedes

VS

Esta secção tem o intuito de sintetizar a informação apresentada no presente capítulo 2.1 de modo que as conclusões que impulsionam o resto do desenvolvimento do projeto fiquem bem definidas.

Nesta comparação apenas serão consideradas as três grandes categorias de robôs para locomoção em terrenos acidentados, isto é, robôs com rodas, robôs com lagartas e robôs com pernas. Os robôs híbridos são desconsiderados pois, as suas características são uma combinação das vantagens e desvantagens dos três grandes grupos de robôs. Assim através da Tabela 2.2 e de acordo com [1] é possível uma análise comparativa entre tipos de robôs.

Tabela 2.2- Comparação entre categorias de robôs

Robôs com rodas	Robôs com lagartas	Robôs bio inspirados
Velocidade elevada	Velocidade moderada	Velocidade baixa
Baixo consumo de energia	Médio consumo de energia	Elevado consumo de energia
Controlo simples, baixo número de GDL's	Controlo simples, baixo número de GDL's	Controlo complexo, elevado número de atuadores e GDL's
Movimento limitado a terrenos pouco acidentados	Movimento em terrenos algo acidentados e arenosos	Ampla mobilidade, adequados para qualquer tipo de terreno

A Tabela 2.2 evidencia uma relação de proporcionalidade inversa entre a velocidade e rendimento energético em relação à complexidade do controlo e a mobilidade, esta relação é expressa na Figura 2.5.

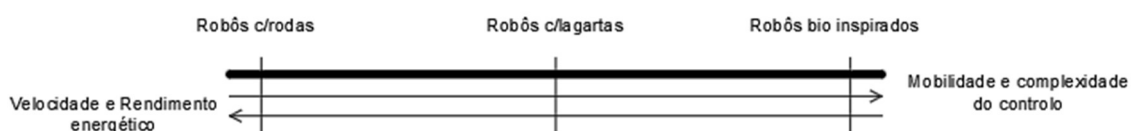


Figura 2.5- Relação entre velocidade, rendimento energético, mobilidade e complexidade de controlo para as 3 categorias de robôs móveis

Para cada problema que exija o uso ou construção de um robô móvel é necessário avaliar qual a importância de cada um destes quatro parâmetros para fazer uma escolha adequada sobre qual o tipo de robô a utilizar.

2.2. MOVIMENTO BÍPEDE

O movimento bípede, como já mencionado, tem uma forte inspiração humana e por esse motivo é muito utilizado em robôs humanoides. Esta semelhança ao Homem torna este

tipo de robôs indicado para desempenharem tarefas no ambiente humano. O movimento bípede é, devido à oscilação segundo o plano transversal, um movimento naturalmente desequilibrado e por esse motivo constitui um tipo de marcha dinâmica. Este tipo de marchas requer estratégias de controlo próprias que irão ser desenvolvidas no presente capítulo, tais como, o ponto de momento zero [PMZ] ou a marcha passiva.

2.2.1. ROBÔS BÍPEDES

O setor dos robôs dotados de movimento bípede tem assistido a uma grande evolução nos recentes anos. Neste capítulo serão apresentados alguns dos exemplos mais promissores de robôs bípedes desenvolvidos nos últimos anos, com intuito de conhecer o estado atual deste setor de mercado dos robôs bio inspirados.

ATLAS

O *ATLAS* é um robô humanoide desenvolvido pela *Boston Dynamics* em 2016 (Figura 2.6). Este é atualmente o robô humanoide mais avançado no mercado, é capaz de usar as capacidades do corpo todo para se mover rapidamente e de forma dinamicamente equilibrada. O *ATLAS* consegue levantar e carregar caixas, saltar, correr e até fazer mortais. [16]



Figura 2.6- Robô ATLAS da *Boston Dynamics* [16]

CASSIE

O *Cassie* é um robô bípede desenvolvido pela *Agility Robotics* e a *Oregon State University* em 2016 (Figura 2.7). Este robô consegue caminhar e andar de modo semelhante aos humanos ou animais. É capaz de lidar com terrenos diversos e complexos tornando-o perfeito para tarefas de exploração e resgate ou entrega de encomendas. [17]



Figura 2.7- Robô *Cassie* da *Agility Robotics* [17]

DIGIT

O *Digit* é um robô humanoide desenvolvido pela *Agility Robotics* (Figura 2.8) no ano 2019 e é um sucessor do robô bípede *Cassie*. Possui um torso com vários sensores que permitem a navegação em ambientes complexos para executar tarefas de exploração, assim como membros que permitem o transporte e entrega de encomendas. [18]



Figura 2.8- Robô *Digit* da *Agility Robotics* [18]

NABiRoS

O *NABiRoS* (*Non Antropomorphic Bipedal Robot*) é um robô bípede bio inspirado desenvolvido pelo *RoMeLa* (*Robotics and Mechanisms Laboratory*) da *UCLA* (*University of California, Los Angeles*) em 2016. Neste robô as pernas são alinhadas segundo o plano sagital, gerando um novo tipo de locomoção bípede em que não existe oscilação no plano frontal o que permite, aliado aos pés complacentes, um movimento muito mais estável e um controle simplificado. Cada perna apenas tem dois graus de liberdade ativos e um grau de liberdade

passivo (associado aos pés), o que resulta numa grande simplificação em relação aos mecanismos bípodes tradicionais, por este motivo, o *NABiRoS* (Figura 2.9) é uma alternativa muito interessante ao movimento bípode tradicional. [19]



Figura 2.9- Robô *NABiRoS* desenvolvido pelo *RoMeLa* [20]

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO BÍPEDE

Do ponto de vista cinemático a caminhada característica do movimento bípode possui duas fases distintas (Figura 2.10) que ocorrem em sequência [21]:

- **Fase de suporte duplo, estaticamente estável:** o mecanismo é suportado pelos dois pés simultaneamente, formando uma cadeia cinemática fechada com o chão;
- **Fase de suporte único, estaticamente instável:** o mecanismo é suportado por apenas um pé, formando uma cadeia cinemática aberta.

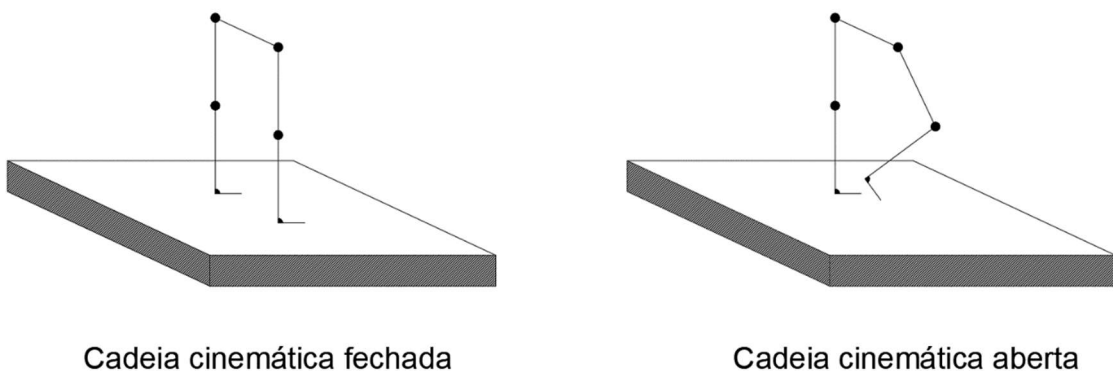


Figura 2.10- As duas fases características do movimento bípode relativamente à cinemática

O mecanismo de locomoção muda de estrutura, entre cadeia cinemática fechada e cadeia cinemática aberta, ao longo de um ciclo único de caminhada.

Os sistemas de locomoção bípedes possuem características básicas comuns, as quais permitem definir e conceber mecanismos com movimento bípede [21]:

- Possibilidade de rotação do sistema em torno de uma das arestas dos pés como resultado de perturbações fortes;
- Repetibilidade da marcha (simetria), na marcha regular apenas;
- Intercâmbio regular entre a fase de suporte único e suporte duplo.

Uma estratégia alternativa à avaliação cinemática do movimento bípede é dividir o movimento bípede, complexo, em porções que constituem um movimento simples. Estas porções são chamadas de primitivas do movimento (Figura 2.11) [22].

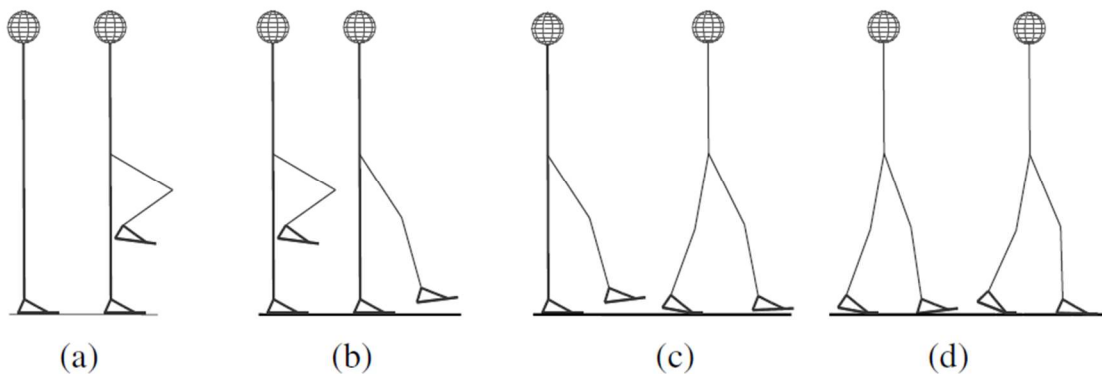


Figura 2.11- Primitivas do movimento bípede [22]

Primitivas do movimento:

- a) Flexão da perna;
- b) Extensão da perna;
- c) Deslocação do tronco adiante;
- d) Contacto da superfície do pé.

Caraterísticas das primitivas:

- As primitivas definem um movimento simples em que mais do que uma junta pode estar envolvida;
- As primitivas do movimento estão parametrizadas de modo que a forma do movimento possa ser alterada aquando da sua execução;
- A realização de uma primitiva não depende na postura atual, mas apenas se o robô está ou não numa postura em que seja possível realizar a primitiva;
- Os parâmetros das primitivas têm que ser modificados online;

- Diferentes primitivas podem ser juntas em sequência
- Uma e a mesma primitiva podem ser incluídas na realização de diferentes movimentos;
- Várias primitivas podem ser realizadas em paralelo, mas com diferentes juntas envolvidas.

2.2.3. PRINCÍPIO DO PONTO DE MOMENTO ZERO (PMZ)

Para perceber a importância do PMZ no movimento bípode é necessário compreender o conceito do PMZ. O PMZ é o Ponto de Momento Zero, um ponto no chão na área de contacto do pé do robô em que o momento das forças inerciais e forças gravitacionais não tem componente ao longo dos eixos horizontais Figura 2.12.

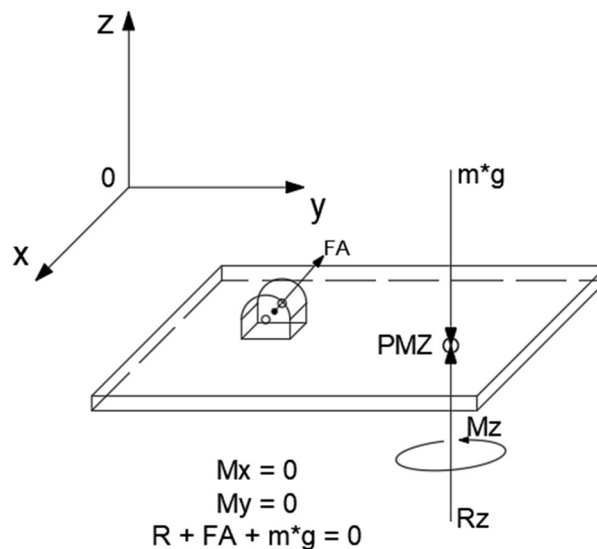


Figura 2.12- Ponto de Momento Zero

A área de contacto do pé no robô no movimento bípode é o equivalente ao conceito de polígono de suporte na marcha estática. Deste modo, a condição necessária e suficiente para que o movimento seja dinamicamente equilibrado é que o movimento possua um PMZ. Na prática isto quer dizer que o PMZ tem de estar dentro do polígono de suporte, no entanto, por definição o PMZ está sempre no interior do polígono de suporte e quando está fora é denominado de PMZF (Ponto de Momento Zero Fictício). É possível então afirmar que de igual modo a condição necessária e suficiente para que o movimento seja dinamicamente equilibrado é que não existe um PMZF (Figura 2.13).

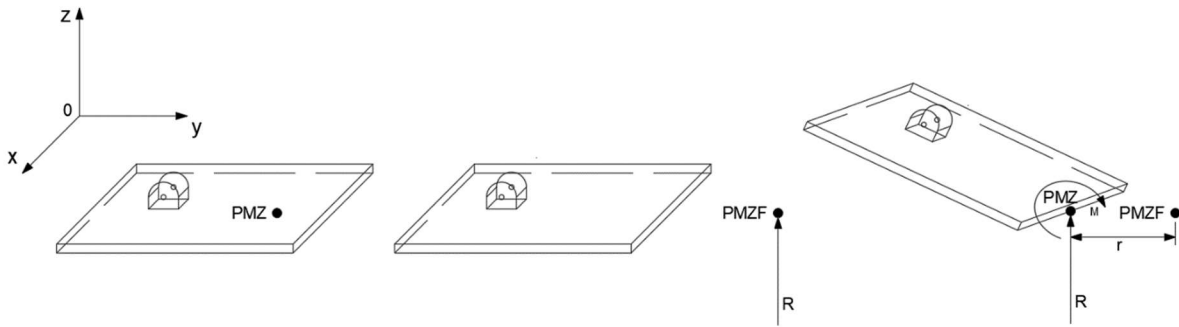


Figura 2.13- Significado do Ponto de Momento Zero Fictício

Na prática, a existência de PMZF significa que a força de reação está na verdade aplicada na aresta do polígono de suporte e que o mecanismo de rotação em torno da aresta do polígono de suporte é iniciado pelo momento desequilibrado (M). A intensidade deste momento depende da distância (r) entre a aresta do polígono de suporte e a posição computada do PMZF.

O CP (centro de pressão) é um conceito muito próximo do PMZ, no entanto distinto. O PMZ coincide sempre com o CP, contudo o CP nem sempre coincide com o PMZ. O CP coincide com o PMZ quando o mecanismo está dinamicamente equilibrado. O PMZF nunca coincide com o CP. A pressão entre o chão e o pé pode sempre ser substituída por uma força que atua no CP, se esta força equilibrar todas as forças que atuam no sistema durante o seu movimento este ponto pode ser chamado de PMZ, deste modo quando a marcha é dinamicamente equilibrada o CP e o PMZ coincidem e quando a marcha é dinamicamente desequilibrada o CP e o PMZ não coincidem.

O PMZ é indispensável para o controlo do movimento bípede por permitir estabelecer um feedback prático com base nas forças dinâmicas de reação com o chão. O PMZ pode ser utilizado em dois casos distintos:

- Síntese da tarefa de marcha: determinar as dinâmicas apropriadas do mecanismo acima do pé de modo a garantir a posição desejada do PMZ;
- Controlo de marcha: determinar a posição do PMZ para um determinado movimento de mecanismo.

A principal questão no controlo é como determinar a posição do PMZ. Em aplicações práticas o PMZ é calculado através de sensores de força colocados no pé do robô (Figura 2.14), no entanto, todos os sensores de força têm de estar em contacto com o chão caso contrário o mecanismo gira em torno da aresta do pé e cai. Num modelo dinâmico é necessário

computar a posição do PMZ e depois verificar se a posição calculada está dentro do polígono de suporte ou não [21].

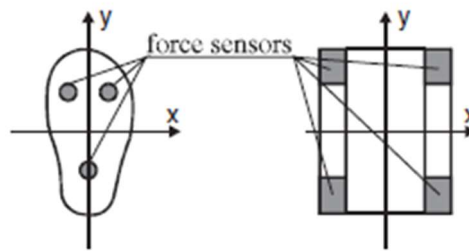


Figura 2.14- Disposição típica dos sensores nos pés de robôs bípedes [21]

2.2.4. MARCHA DINÂMICA PASSIVA

A marcha dinâmica passiva é uma estratégia de controlo do movimento bípede concorrente do PMZ, no entanto, baseia-se numa abordagem completamente diferente.

A caminhada passiva ocorre quando apenas a gravidade e a inércia são usadas para gerar um padrão de locomoção. Um caminhante passivo é um mecanismo bípede capaz de gerar uma caminhada estável, semelhante à caminhada humana, quando num plano inclinado. O caminhante passivo é um mecanismo de elevada simplicidade e muito utilizado em brinquedos de crianças como o da Figura 2.15.



Figura 2.15- Brinquedo caminhante passivo [23]

A caminhada passiva possui um elevado interesse graças à sua simplicidade mecânica, elevada eficiência e controlo simples da velocidade da direção. No entanto, a maior vantagem da caminhada passiva (no contexto deste projeto) é a oportunidade de analisar e compreender um mecanismo bípede simples e extrapolar este conhecimento para casos mais complexos.

Um caminhante passivo apenas consegue manter uma marcha cíclica pois a energia dissipada no movimento é compensada pela componente útil da força gravítica. No entanto, num plano horizontal, ou com uma inclinação positiva, a força gravítica perde a sua componente útil, logo para que um caminhante passivo seja capaz de se deslocar num terreno deste tipo é necessário adicionar potência ao mecanismo. Adicionar potência ao mecanismo implica adicionar um gerador de força motriz, como por exemplo um servo motor, para fazer mover as pernas e compensar a energia perdida. O caminhante passivo é um excelente ponto de partida para a criação de um mecanismo bípede, pois adicionar potência a um caminhante passivo exige poucas modificações.

Um caminhante passivo pode ser obtido pela evolução de uma roda que rola ao longo de um plano inclinado como é possível observar na Figura 2.16 a).

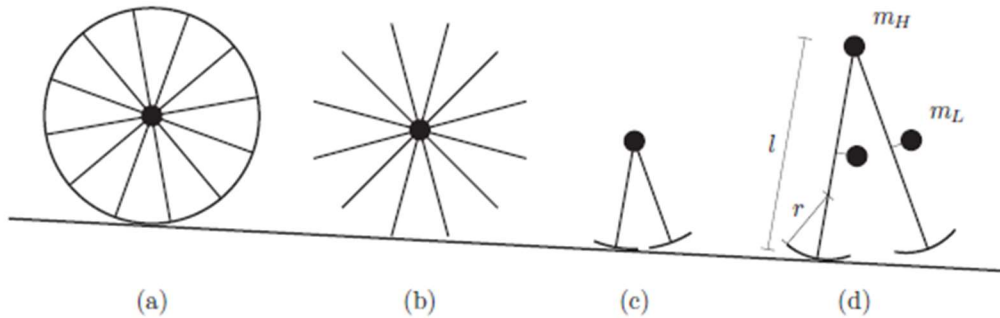


Figura 2.16- Evolução da roda em caminhante passivo dinâmico [15]

Roda sem aro (b): este mecanismo de locomoção resulta da remoção do aro de uma roda deixando apenas os raios. O resultado é um mecanismo com pernas dispostas radialmente à volta de um centro comum. No entanto, ao contrário de uma roda, este mecanismo não consegue rolar de forma estável numa superfície plana, como tal, à medida que a roda sem aro rola ao longo de uma superfície, cada colisão dos pés com o chão é um evento inelástico e impulsivo, o que significa que a roda conserva momento angular em relação ao ponto de impacto. A perda de velocidade é o resultado das colisões dos pés com o chão e como tal, numa superfície plana a roda sem aro irá desacelerar exponencialmente, no entanto, numa superfície inclinada a roda pode recuperar as suas perdas e deste modo estabelecer um ciclo de rolamento estável e atingir uma velocidade de equilíbrio. Contudo, a roda sem aro nem sempre rola à sua velocidade constante, mas após pequenas perturbações a velocidade irá convergir neste valor de velocidade estável. A decadência do efeito das perturbações é chamada de modo de velocidade e é análogo ao movimento bípede também.

Roda sintética (c): este mecanismo resulta da separação do aro de uma roda entre cada raio e da remoção de todos os raios exceto dois, no final ficam apenas duas pernas com dois pés semicirculares. Colocando as duas pernas lado a lado e uma junta rotacional na anca, que se localiza no centro da roda de base, obtém-se um mecanismo bípede que roda como uma roda e anda como um bípede. A roda sintética surge como uma evolução da roda sem aro e procura melhorar o baixo rendimento energético da roda sem aro provocado pelas colisões dos pés com o chão. Na roda sintética ambas as pernas são rígidas, a perna de apoio rola ao longo do chão a velocidade constante, enquanto a perna de balanço balança como um pêndulo livre. O ponto da junta rotacional da anca das pernas traslada paralelamente ao chão de forma constante.

Caminhante passivo com joelhos (d): Como referido anteriormente a roda sintética possui pernas rígidas, se o intuito for obter um mecanismo bípede capaz de realizar um movimento humanoide então será necessário articular as pernas. Articular as pernas consiste em colocar uma junta rotacional em cada perna à semelhança de um joelho. Os joelhos têm como função promover a folga entre o pé de balanço e o chão e surgem como alternativa a outras estratégias de promover folga em mecanismos de pernas rígidas, como o movimento bípede de balanço em que a extensão e contração ativa das pernas permite alterar a altura em relação ao chão. O movimento bípede de balanço é utilizado em mecanismos bípedes com pernas rígidas (muito utilizado em brinquedos caminhantes passivos Figura 2.15) e é uma estratégia que permite criar folga entre o pé de balanço e o chão pela deslocação do mecanismo no plano frontal, contudo este movimento é indesejável devido aos constrangimentos de afinação da frequência, o espaçamento lateral dos pés, movimento não humano e propensão para ser naturalmente instável de lado para lado. Ao contrário deste, o mecanismo do caminhante passivo com joelhos constitui um modelo 2D visto que o movimento pode ser descrito recorrendo apenas a um plano, em que os joelhos promovem a folga necessária para o movimento dos pés. Os joelhos são formados por uma junta rotacional que une os membros superior e inferior da perna e que possui travões mecânicos para impedir a hiperextensão e tornar o movimento mais humano. Neste mecanismo os ciclos passivos encontram-se numa gama de parâmetros mais limitada do que nos mecanismos com pernas rígidas. A escolha adequada destes parâmetros irá permitir que os momentos que surgem naturalmente garantam o boqueio dos joelhos nas fases apropriadas do ciclo. Para que o ciclo passivo seja possível é necessário garantir que o pé seja deslocado adiante em relação à perna,

maior parte da energia cinética é dissipada no bloqueio do joelho e por isso este mecanismo é menos eficiente que o mecanismo das pernas rígidas. Contudo, intervenção ativa na altura indicada pode ajudar a reduzir substancialmente a perda de energia pelo bloqueio dos joelhos [15]. Na Tabela 2.3 é possível analisar o efeito da variação dos diferentes parâmetros no comportamento de mecanismo.

Tabela 2.3- Efeito da variação dos parâmetros num mecanismo bípede [15]

Massa	Aumentas as forças envolvidas, mas não muda a passada
Comprimento da perna	Altera o período do passo e a velocidade
Gravidade	Altera o período do passo e a velocidade
Raio do pé	Aumenta a eficiência com o raio
Inércia da perna	Aumenta o período de pêndulo e retarda a cadência com a inércia
Altura do centro de massa (CM)	Aumenta o período de pêndulo e retarda a cadência com a altura do CM
Massa da anca	O aumento da massa na anca melhora a eficiência e a resistência aos distúrbios
Atrito na junta da anca	O aumento do atrito, ainda que mínimo, pode destruir o ciclo

2.3. MOVIMENTO HEXÁPODE

O movimento hexápode é, à semelhança do movimento bípede, um movimento bio inspirado, contudo, inspirado em insetos ao invés de humanos (Figura 2.17- Bio inspiração por trás do design da perna do *LAURON V* [9]Figura 2.17). Os robôs dotados de movimento hexápode possuem seis pernas, no entanto, a disposição e o número de graus de liberdade das pernas pode mudar conforme a fonte de inspiração ou o grau de complexidade do projeto. A título de exemplo o robô hexápode *RHEX* é inspirado numa barata e cada perna apenas possui um grau de liberdade, o robô *LAURON V* é inspirado no inseto bicho-pau e cada perna possui quatro graus de liberdade.

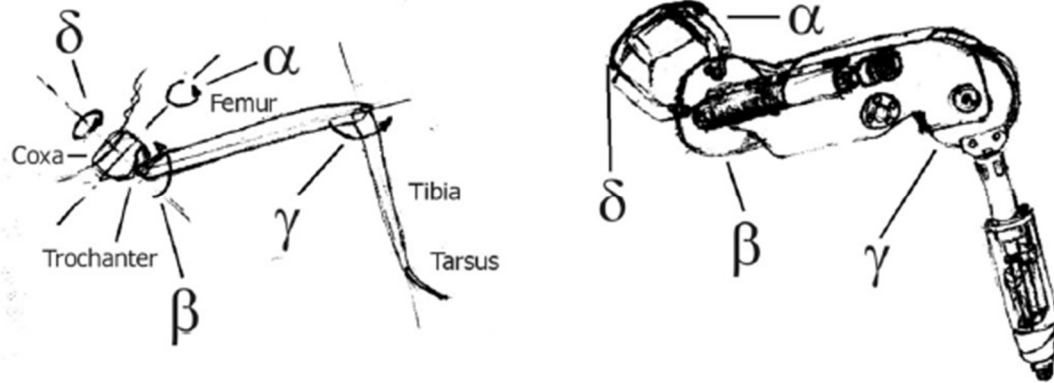


Figura 2.17- Bio inspiração por trás do design da perna do LAURON V [9]

Os robôs bio inspirados têm grande capacidade para atravessar terrenos complexos através da escolha cuidadosa de marchas e apoios de pé [24]. Os robôs bípedes conseguem uma locomoção rápida e semelhante à humana, mas têm dificuldades em manter o equilíbrio, por esse motivo, nem os robôs bípedes mais avançados são capazes de superar terrenos acidentados. Os robôs quadrúpedes constituem uma melhor opção, não só pelo facto de conseguirem um movimento relativamente rápido, mas também pelo facto de possuírem uma margem de estabilidade maior [25]. Os robôs hexápodes têm maior estabilidade e capacidade de carga superior aos robôs bípedes e quadrúpedes, contudo, planejar a marcha com maior número de pernas é uma tarefa mais complicada que torna o movimento não só mais lento, mas também mais complexo [24]. A estabilidade dos robôs hexápodes advém do número mínimo de três pontos de contacto em qualquer tipo de marcha, por este motivo o robô hexápode é estável em qualquer instante. O maior número de pernas permite a criação de mais soluções para superar acidentes no terreno e simultaneamente diminui o esforço por perna, o que resulta numa maior capacidade de carga efetiva. Por estes motivos, as aplicações dos robôs hexápodes focam-se geralmente na superação de terrenos acidentados em que é exigida elevada mobilidade.

2.3.1. ROBÔS HEXÁPODES

Os robôs hexápodes são uma área de elevado interesse na robótica de locomoção devido à sua elevada mobilidade e por esse motivo, nos últimos anos surgiram muitas iterações desta tipologia de robôs. Neste capítulo são apresentados alguns dos modelos de robôs hexápodes com maior interesse e relevância.

LAURON V

O *LAURON V* foi desenvolvido pelo *FZI Research Center for Information Technology* em 2013 [14]. Esta é a quinta iteração do robô hexápode *LAURON* que é inspirado no bicho pau, esta versão possui mais um grau de liberdade em cada perna que a versão anterior. Cada perna do *LAURON V* (Figura 2.18) tem quatro graus de liberdade, o que permite aumentar a flexibilidade e ajuste da atitude do robô [9]. Este é um dos robôs hexápodes mais evoluídos do mercado.



Figura 2.18- Robô hexápode *LAURON V* [14]

RHEX

O *RHEX* é um robô hexápode bio inspirado desenvolvido pela *University of Michigan* e *McGill University* em 2001 e comercializado pela *Boston Dynamics* [19] (Figura 2.19). Este robô hexápode é inspirado numa barata. Cada perna é flexível e possui apenas um atuador, o que torna o robô muito simples mecanicamente, robusto, fiável e de controlo simples. Este robô apenas possui marcha trípole e por esse motivo consegue deslocar-se com uma velocidade relativamente elevada em terrenos acidentados como areia, lama, neve, rochas e até trepar escadas. [26]



Figura 2.19- Robô hexápode RHEX [27]

WEAVER

- O WEAVER é um robô hexápode desenvolvido pela CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) Data 61 Business Unit: Robotics and Autonomous Systems Group em 2018, para realizar navegação autónoma em terrenos acidentados (Figura 2.20). O WEAVER utiliza visão estéreo e perceção do terreno baseado em sensorização proprioceptiva para controlo adaptativo. O robô WEAVER tem um design de pernas inovador visto que cada perna possui cinco graus de liberdade, ao contrário dos tradicionais três graus de liberdade presentes na maior parte dos robôs hexápodes. Este design inovador com cinco graus de liberdade por perna permite melhorar a locomoção do robô em planos com elevada inclinação[28].

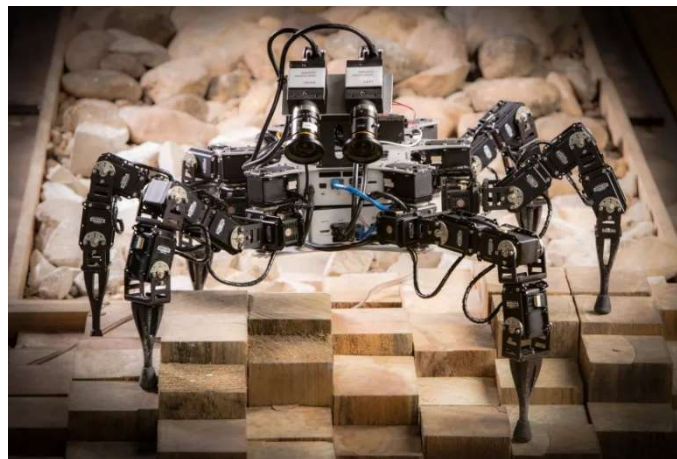


Figura 2.20- Robô Hexápode WEAVER [28]

ATHENA

O ATHENA (All terrain Hexapod for Environment Navigation Adaptability) é um robô hexápode bio inspirado em desenvolvimento pelo LAR (Laboratório de Automação e Robótica

da Universidade do Minho) (Figura 2.21). Este é um robô hexápode com três graus de liberdade em cada perna que resultam da simplificação dos apêndices dos insetos considerando apenas os seus maiores segmentos, ou seja, coxa, fêmur e tíbia. [29]



Figura 2.21- Robô hexápode ATHENA [30]

2.3.2. TIPOS DE MARCHAS

Os tipos de marcha são a característica manipulável mais importante dos robôs hexápodes pois permitem controlar o comportamento do robô e a sua aplicação. Deste modo, a escolha de marcha irá afetar a velocidade de avanço, a estabilidade e a flexibilidade. É possível encontrar três tipos de marcha nos robôs de acordo com o número de pernas em uso (ou polígono de suporte) (Figura 2.22):

- **Marcha trípede [3+3]:** três pernas permanecem em fase de apoio enquanto três pernas estão em fase de balanço, este é o tipo de marcha mais rápido, no entanto, com menor flexibilidade pelo que é mais adequada para movimento em terrenos pouco acidentados;
- **Marcha quadrúpede [4+2]:** quatro pernas permanecem em fase de apoio enquanto duas pernas estão fase de balanço, este tipo de marcha é mais lento do que a marcha trípede, contudo oferece mais flexibilidade e estabilidade;
- **Marcha metacrónal [5+1]:** cinco pernas em fase de apoio enquanto uma perna está em fase de balanço, é uma marcha extremamente lenta e como tal apenas é utilizada para superar terrenos extremamente acidentados [25].

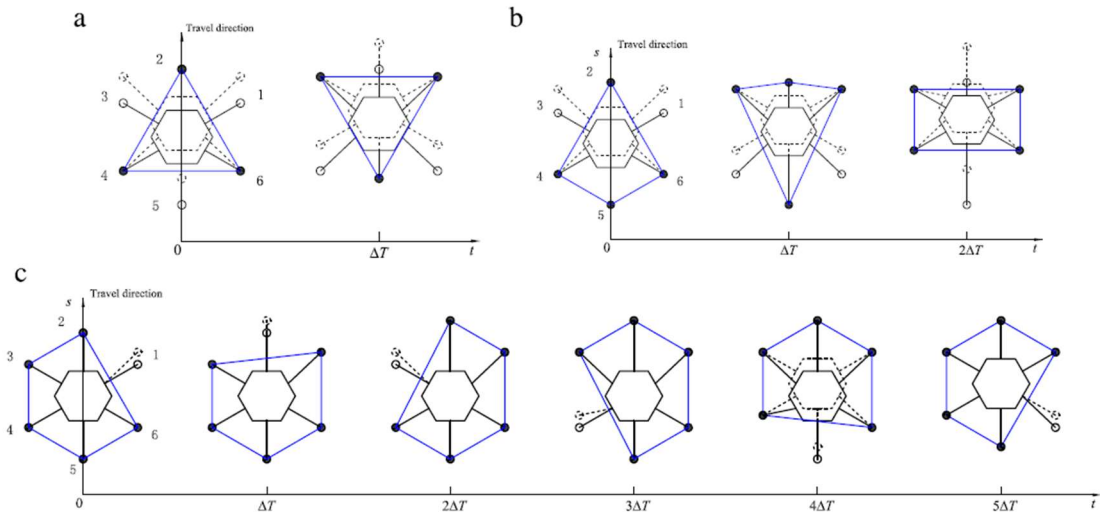


Figura 2.22- Tipos de marcha robôs hexápodes: a) marcha trípode, b) marcha quadrúpede, c) marcha metacronal

O fator de trabalho é uma medida que expressa o rácio entre o tempo que a perna está em fase de apoio em relação ao tempo total de ciclo de trabalho.

$$\beta = \frac{\Delta t \text{ fase de apoio}}{\Delta t \text{ ciclo total}} \quad (1)$$

O fator de trabalho pode servir como uma medida da velocidade da marcha, quanto menor o valor do fator de trabalho mais rápida será a marcha.

- Marcha trípode: $\beta = 1/2$
- Marcha quadrúpede: $\beta = 2/3$
- Marcha metacronal: $\beta = 5/6$

No entanto, este método nem sempre é o melhor critério para avaliar a velocidade da passada. Quando a mesma distância de movimento do corpo do robô é adotada para uma marcha trípode e quadrúpede as velocidades de movimento são idênticas[25].

A marcha pode ser avaliada quanto à sua estabilidade de forma simples através do número de pernas em fase de balanço num dado momento. Deste modo, é possível inferir que, para os três tipos de marcha periódica existentes, a marcha trípode é a mais instável e a marcha metacronal a mais estável.

Outro modo de avaliar a marcha é quanto à sua periodicidade. Deste modo, as marchas podem ser periódicas quando o mesmo padrão se repete ciclicamente, nestas se inclui a marcha trípode, quadrúpede e metacronal. A marcha aperiódica é uma marcha cujo padrão de ativação das pernas não se repete ciclicamente, um exemplo desta marcha é a marcha

livre. Na marcha livre a ordem das pernas muda de forma não fixa (irregular), mas flexível de acordo com a trajetória, propriedades do terreno e estado do movimento. Este tipo de marcha é mais flexível e adaptável do que as marchas periódicas e regulares pois pode ajustar-se às necessidades do terreno [24].

2.3.3. CONCEITOS ASSOCIADOS A ROBÔS HEXÁPODES

Entender os conceitos próprios dos robôs hexápodes é importante para melhor compreender a cinemática, a estrutura de controlo e o desempenho dos robôs. Os conceitos nesta secção abordados são retirados do artigo [24].

- **Polígono de suporte:** polígono convexo formado pela projeção dos pontos de contacto dos pés de suporte no plano horizontal (Figura 2.23). O polígono de suporte é utilizado como métrica da estabilidade, na medida em que o robô é estaticamente estável se a projeção vertical do CM estiver no interior do mesmo. A estabilidade diminui à medida que o CM se aproxima da margem do polígono de suporte.
- **Polígono de suporte reduzido:** assume o centroide como centro de modo a gerar um polígono de suporte reduzido (Figura 2.23). O polígono de suporte reduzido tem uma função semelhante à do coeficiente de segurança pois permite reduzir a estabilidade crítica no processo de planeamento do movimento do robô.

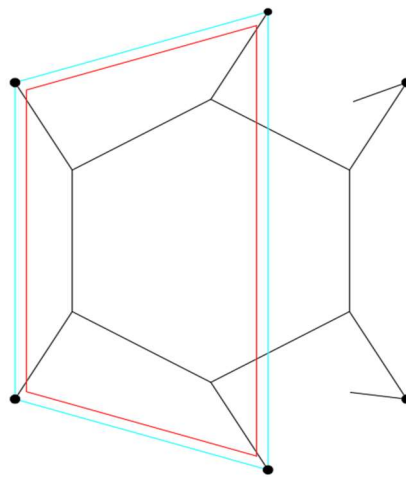


Figura 2.23- Polígono de suporte (azul) e polígono de suporte reduzido (vermelho) de um robô hexápode

- **Espaço de trabalho de uma perna:** o espaço de trabalho de uma perna é limitado pelo alcance das juntas e apresenta a forma de secção circular (Figura 2.24);

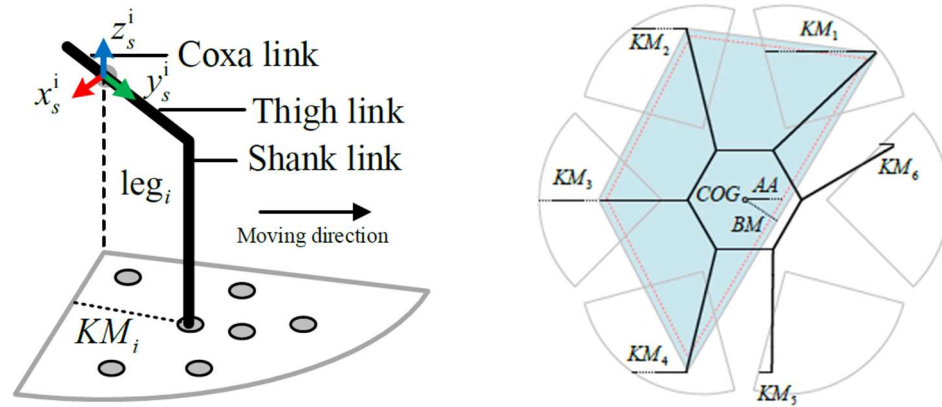


Figura 2.24- Espaço de trabalho de uma perna (esquerda), espaço de trabalho de todas as pernas do robô hexápode, margem estática, margem cinemática, avanço máximo do CM, passada máxima (direita) [24]

- **Estado de suporte:** vetor que indica o estado de suporte do robô hexápode no movimento para o passo seguinte;
 - Perna de suporte: $s_i=0$
 - Perna de balanço: $s_i=1$

$$c_F := [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6], ex := [1, 0, 1, 0, 1, 0] \quad (2)$$

- **Perna com falha:** é a denominação de uma perna que não possui um apoio viável num ambiente muito complicado ou que possui danos físicos;
- **Estado das pernas com falha:** é um vetor que representa o estado de falha das seis pernas do robô hexápode;
 - Perna normal: $f_i=0$
 - Perna com falha: $f_i=1$

$$t_F := [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6], ex := [0, 0, 0, 0, 1, 0] \quad (3)$$

- **Estado do hexápode:** o estado do robô hexápode é um vetor que representa a atitude da base, a posição alvo, o estado de suporte, o estado das pernas com falha e a posição alvo dos pés em referência ao sistema geral de coordenadas.

$$\phi := \langle {}^W_B R, {}^W_B r, c_F, t_F, {}^W_F r \rangle \quad (4)$$

- ${}^W_B R$: matriz rotação relativamente ao sistema de coordenadas geral $[W]$

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípedes

- ${}^W_B r$: posição alvo do CM do robô no próximo passo em relação ao sistema de coordenadas geral
- ${}^W_F r$: posição alvo do pé i no próximo passo em relação ao sistema de coordenadas geral
- **Margem estática [SM]:** também conhecida como margem absoluta de estabilidade estática, é a menor distância da projeção vertical do CM no plano horizontal às arestas do polígono de suporte (representado por BM na Figura 2.24);
- **Margem cinemática reduzida [KM_{*i*}]:** representa a distância que o pé i é capaz de mover na direção oposta à do movimento e atingir a fronteira do espaço de trabalho da perna i (Figura 2.24).
- **Quantidade de avanço máximo baseado no CM [AA]:** distância máxima que o robô hexápode é capaz de se mover sem que o CM exceda a área de suporte (Figura 2.24).
- **Comprimento máximo da passada [MSL]:** distância máxima que o hexápode se pode mover na direção do movimento, depende do estado do hexápode.

$$MSL = \min (KM_i, AA) \quad (5)$$

- **Lista de estados de suporte:** número máximo de estados de suporte permitidos para o robô. Qualquer estado de suporte possível para o robô hexápode é descrito na lista de estados de suporte. O número máximo possível de combinações para um robô hexápode em que as pernas apenas podem estar em duas fases é de sessenta quatro ($2^6=64$), no entanto nem todas as combinações são viáveis pois é necessário garantir que existem três pontos de contacto em qualquer instante. Aplicando a constrição dos três pontos de contacto obrigatórios o número possível de combinações é de quarenta e dois.
- **Sequência de solução:** sequência de k estados de suporte necessários para que o robô a partir da posição atual atinja a posição alvo.

$$\psi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k\} \quad (6)$$

2.3.4. O PMZ NOS ROBÔS HEXÁPODES

O papel do PMZ nos robôs hexápodes é distinto daquele que desempenha nos robôs bípedes. Nos robôs hexápodes não é necessário planear a trajetória do CM para manter a marcha estável visto que, todas as marchas têm uma margem de estabilidade estática grande. No entanto, nos robôs bípedes como a marcha é *quasi* dinâmica, resultado da pequena área de suporte do polígono de suporte, é necessário haver controlo da posição do CM.

O PMZ é muito utilizado como um critério de estabilidade, apesar de não ser um conceito perfeito pois não tem em conta a altura do CM continua a ser um critério de estabilidade muito eficaz.

O PMZ apenas existe no interior da projeção horizontal do polígono de suporte e por esse motivo encontrar a posição do PMZ consiste apenas em determinar duas coordenadas. O PMZ pode ser calculado de duas formas distintas:

- **Através das variáveis de estado do robô:** apenas prático em ambientes de simulação pois em casos reais é difícil obter estas variáveis de estado.

$$x_{PMZ} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_{i=1}^n z_i m_i (\ddot{x}_i + g_x)}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (7)$$

$$y_{PMZ} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_{i=1}^n z_i m_i (\ddot{y}_i + g_y)}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (8)$$

- (x_i, y_i, z_i) : coordenadas do centro de massa da perna i em relação ao sistema geral de coordenadas;
- (g_x, g_y, g_z) : vetor de aceleração gravítica em relação ao sistema geral de coordenadas;
- m_i : massa da perna i .
- **Através das medições nos sensores de força nos pés:** este é o método mais utilizado em casos práticos, pois permite o cálculo do PMZ através da informação obtida em tempo real pelas forças medidas nos sensores dos pés do robô e pode ser calculado de forma simples através das seguintes equações.

$$x_{PMZ} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{zi} x_i}{\sum_{i=1}^n F_{zi}} \quad (9)$$

$$y_{PMZ} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{zi} y_i}{\sum_{i=1}^n F_{zi}} \quad (10)$$

- (x_i, y_i, z_i) : coordenadas do ponto de contacto da perna com o chão

- F_{zi} : componente da força do eixo dos z's em relação ao sistema geral de coordenadas

O PMZ é igual ao CP quando este está dentro do polígono de suporte, de modo a usar o PMZ como indicador de estabilidade é necessário definir uma margem de estabilidade estática usando o PMZ. A distância do PMZ às margens do polígono de suporte pode definir uma margem de estabilidade de acordo com a seguinte equação (Figura 2.25).

$$\alpha_{PMZ} = \frac{\min(h_1, \dots, h_n)}{H}, \alpha \in [0, 1] \quad (11)$$

Onde H é a distância da origem (centro geométrico) às arestas do polígono de suporte, h_i é a distância do PMZ até à aresta do polígono de suporte. Se α for igual a 0 o robô está em situação instável [25].

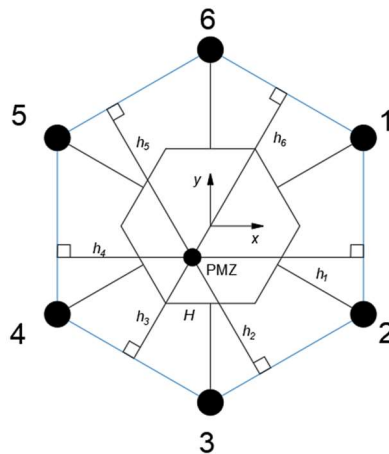


Figura 2.25- PMZ de marcha de estabilidade [25]

2.3.5. PLANEAMENTO DO MOVIMENTO HEXÁPODE

Ao contrário dos robôs bípedes, que se deslocam em marchas *quasi*-dinâmicas, devido ao reduzido tamanho do polígono de suporte, para os robôs hexápodes não é necessário planejar a trajetória do CM para manter uma marcha estável, pois todas as marchas têm uma margem de estabilidade estática grande. Esta característica dos robôs hexápodes torna o processo de planeamento de trajetória e cinemática inversa mais simples, pois é difícil computar a trajetória das juntas de acordo com a trajetória do CM, ao passo que é mais fácil computar o movimento das juntas de acordo com o movimento dos corpos [25].

O planeamento do movimento hexápode consiste em dois passos sequenciais, escolha do tipo de marcha e escolha dos apoios de pé apropriados. A escolha do tipo de marcha pode ser feita recorrendo a dois métodos:

- **Método *rule-based*:** quando os robôs se movem numa marcha periódica, assumindo que todos os apoios de pé são válidos, fazem-no através de uma marcha fixa (trípode, quadrúpede, metacronal). Contudo, quando o terreno é acidentado e sem apoio, torna-se necessário planejar uma sequência de marchas irregulares de acordo com a informação recolhida do terreno, ou seja, executar uma marcha livre;
- **Método CPG:** CPG (*Central Pattern Generator*- Gerador de padrão central) é um método bio inspirado que considera cada pé como um neurónio e executa a marcha atuando periodicamente o movimento de cada pé. O movimento das pernas é controlado (centralmente) por um oscilador eletrónico sem qualquer feedback, por este motivo, caso a sequência das pernas seja incorreta o modelo colapsa. Para combater este problema alguns académicos combinam o modelo CPG com um modelo de reflexo, que fornece sinais de reflexo de modo a regular o ritmo do movimento alterando os parâmetros do modelo CPG.

O método para escolha de apoio de pé é realizado recorrendo a um método *threshold* para selecionar os apoios de pé apropriados de acordo com as características do terreno: rugosidade do terreno, inclinação, proximidade da aresta, atrito e variância da altura. A decisão do apoio de pé é tomada através do uso de algoritmos específicos que são treinados em ambiente virtual recorrendo a vários métodos de inteligência artificial[24].

2.4. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ROBÔS

Neste capítulo são apresentados os principais critérios energéticos e de estabilidade utilizados para avaliar o desempenho de robôs bio inspirados, bem como uma breve descrição de cada um deles.

2.4.1. CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE

Os critérios de estabilidade são essenciais para a conceção, controlo e programação do movimento de robôs bio inspirados. Os robôs bio inspirados geram movimento através de marchas o que conduz a diferentes perfis estáticos a cada passada, por este motivo, para garantir o sucesso do movimento do robô é essencial manter a estabilidade do robô durante a marcha. Um robô em situação instável está em estado

de desequilíbrio, o que leva ao colapso da marcha e em suma ao insucesso do movimento do robô. Os critérios de estabilidade têm uma importância diferente em marchas dinâmicas e marchas estáticas; em marchas dinâmicas, como estas são naturalmente desequilibradas, o critério de estabilidade é muito importante para garantir que o robô consegue sempre uma situação estável a cada passo e por este motivo essencial na programação e planeamento da trajetória do CM; em marchas estáticas, como estas são naturalmente estáveis, o critério de estabilidade tem a função de prevenir que o robô não incorra inadvertidamente numa situação instável, quer por ausência de apoio de pé ou pelo elevado declive da superfície.

O PMZ é o critério de estabilidade mais utilizado (o qual já foi extensamente abordado em capítulos anteriores do presente Estado de Arte) quer pelo facto de ser um critério fácil de determinar, assim como um critério que possui muita bibliografia associada. No entanto, o PMZ apresenta algumas limitações: não considera a altura do CM [25]; considera que o robô se move sempre num plano horizontal com fricção suficiente [30]; não pode ser definido em terreno irregular [31]; por este motivo ao longo do tempo foram desenvolvidos critérios de estabilidade alternativos que pretendem de alguma forma superar estas ou outras limitações do PMZ.

- **FRI- *Foot Rotation Indicator***: este critério é principalmente utilizado para solucionar um problema dos robôs com movimento bípede, a rotação do pé na fase de apoio único, o critério da rotação do pé deve ser tratado de forma cuidadosa na marcha dinâmica, mas totalmente evitado na marcha estática. O ponto FRI é um ponto na superfície de contacto do pé com o chão em que a força resultante de reação teria de agir para manter o pé estacionário, de modo a garantir que não existe qualquer rotação do pé, o ponto FRI deve permanecer no interior do polígono convexo que delimita a área de suporte do pé. O FRI é um critério dinâmico, e ao contrário do PMZ o ponto FRI pode abandonar as fronteiras da área de suporte, a sua posição fora desta área indica a direção de rotação e a magnitude do momento rotacional atuante no pé. Deste modo o FRI pode ser importante para monitorização da estabilidade da postura de um robô bípede durante o ciclo de marcha, bem como pode também servir como indicador da severidade da instabilidade da marcha. [32]

- **FSW- Feasible Solution Wrench:** o FSW é uma proposta de critério de estabilidade que procura resolver uma limitação do PMZ, a impossibilidade de determinar o PMZ em terreno irregular. O parafuso de força é um vetor com seis elementos de dimensão formado por dois vetores com três elementos de dimensão cada, estes vetores podem ser forças, binários, velocidade linear ou velocidade angular. Uma *wrench* é um caso especial do parafuso de força em que os vetores são as forças e binários que resultam da aplicação das Leis de Newton a um corpo rígido, a força tem um ponto de aplicação e uma linha de ação e por esse motivo define uma linha no espaço com um passo nulo segundo as coordenadas de *Plücker*, enquanto o binário é momento puro que não está constringido a uma linha no espaço e por esse motivo define um parafuso de passo infinito, o rácio destas duas magnitudes define o passo do parafuso [33]. A *wrench* pode ser definida mesmo em múltiplos planos de contacto, o ponto mais próximo do seu eixo em relação ao ponto de observação permite avaliar as forças de corte no plano de contacto, o seu eixo passa pelo PMZ quando o vetor normal unitário do plano de contacto e o vetor unitário do cosseno da força são paralelos, ou se o passo do parafuso for zero, o momento da *wrench* tem uma norma Euclidiana mínima na representação equivalente do parafuso de força. Estas características da *wrench* permitem gerar um critério de estabilidade robusto que pode ser aplicado a situações em que o robô se move com vários planos de contacto [31].
- **Universal Stability Criterion:** este critério é uma evolução do FSW e pretende colmatar a incapacidade do PMZ em avaliar cenários que não sejam locomoção em planos horizontais que possuam fricção suficiente. Este critério de estabilidade verifica se a soma da *wrench* da gravidade e da inércia aplicadas no CM do robô estão dentro do cone poliédrico convexo da *wrench* de contacto entre os pés do robô e o chão, o robô é estável se esta condição se verificar. Este critério pode ser utilizado para determinar a estabilidade do robô, mesmo quando este caminha por um ambiente arbitrário e é equivalente a determinar se o PMZ é interno ao polígono de suporte quando o robô caminha numa superfície plana com fricção suficiente. O *Universal Stability Criterion* permite ainda determinar se o contacto do pé com a superfície é suficientemente

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípedes

estável quando a fricção desta superfície segue uma lei física. Por estas razões, este método constitui um critério que pode ser utilizado em casos mais universais. [30]

2.4.2. CRITÉRIOS ENERGÉTICOS

Os critérios energéticos são parâmetros importantes na robótica e que permitem avaliar e comparar diferentes tipos de robôs quanto à sua eficiência energética. Existem três grandes fatores que contribuem para as perdas energéticas em sistemas robóticos: perdas por calor nos atuadores, perdas na transmissão de movimento, perdas na interação com o meio ambiente. A eficiência energética é um dos parâmetros mais importantes a minimizar em sistemas robóticos e está intimamente ligado com o tipo de marcha, comprimento de passada e fator de trabalho. Para cada tipo de marcha existe uma velocidade ótima que conduz ao menor dispêndio de energia [34].

- **Custo de transporte [CT]:** é a métrica mais comum para avaliar a eficiência energética de animais e robôs bio inspirados. O custo de transporte exprime uma relação entre a potência, peso e velocidade. Atualmente o custo de transporte de robôs bio inspirados é superior ao custo de transporte dos animais que lhe servem de inspiração, o que significa que são menos eficientes. O CT humano é igual a 0.3.

$$CT = \frac{P}{m \cdot g \cdot v} \quad (12)$$

- **Número de Froude:** o número de *Froude* é um parâmetro adimensional que exprime a relação entre as forças inercias e forças gravíticas que atuam no sistema através da velocidade, aceleração gravítica e altura da junta do quadril. Para garantir a melhor eficiência energética possível os animais selecionam passadas de marcha com baixo número de *Froude* e passadas de corrida com elevado número de *Froude*.

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot L} \quad (13)$$

- **Frequência de ressonância:** A energia cinética e potencial são as grandezas úteis no movimento de corpos, as grandezas inúteis são a energia perdida por calor e vibrações. Sempre que existe transferência de uma forma de energia para outra existe um atraso que é designado de tempo de transferência característico, este

tempo é característico de cada sistema cinemático. Os animais geram movimento através da contração dos músculos, que transforma energia potencial em energia cinética, a uma determinada frequência. A frequência de ressonância é a frequência de contração muscular que permite atingir a maior deslocação com o menor dispêndio de energia. Os animais são capazes de adaptar a frequência de contração muscular para corresponder à frequência de ressonância para uma determinada velocidade [35].

2.5. PERNAS ROBÓTICAS

As pernas robóticas são o elemento de design com maior impacto na qualidade de locomoção e performance de um sistema robótico bio inspirado. Por este motivo, o desenvolvimento das pernas carece de um processo intensivo de aperfeiçoamento do design com base nos objetivos gerais estabelecidos para o protótipo robótico. Este capítulo explora vários tópicos que fazem parte do desenvolvimento de uma perna robótica, desde a sua inspiração biológica, passando por uma análise do tipo de mecanismo cinemáticos tipicamente utilizados e terminando no tipo de atuadores disponíveis para executar a atuação das pernas.

2.5.1. PROPORÇÕES ANTROPOMÉTRICAS

Os robôs bio inspirados aproveitam os exemplos existentes na natureza para de uma forma mais ou menos precisa mimicar as suas estruturas e gerar um sistema cinemático. O Homem enquanto animal bípede por excelência é a inspiração biológica do presente projeto visto que, a unidade básica de locomoção do ROHMOBI é o módulo bípede.

A recolha de medidas antropométricas foi realizada com base nos dados referentes ao percentil cinquenta dos homens analisados no artigo [36], em que foram consideradas duas medidas, a altura trocantérica e a altura do meio da patela do joelho, por serem medidas que permitem exprimir as distâncias entre as juntas do modelo cinemático da perna (Figura 2.26).

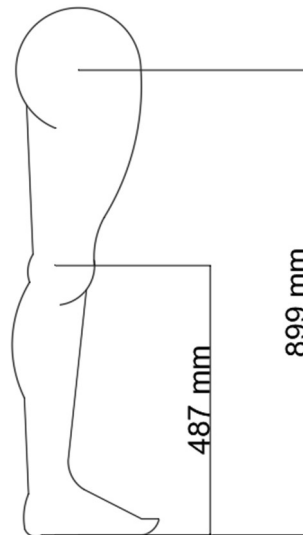


Figura 2.26- Altura trocântérica e altura do meio da patela do joelho

Com base nas alturas representadas na Figura 2.26, o membro superior corresponde a 45,83% do comprimento total da perna, enquanto o membro inferior, no qual se inclui também o pé, completa os 54,17% restantes.

A perna humana forma uma cadeia cinemática complexa com sete graus de liberdade e três juntas: junta do quadril, junta do joelho e junta do tornozelo. As juntas do quadril e tornozelo são juntas esféricas, enquanto a do joelho é uma junta rotacional. Na passada normal apenas são atuados os seguintes três graus de liberdade: flexão/extensão do quadril, flexão do joelho e flexão/ extensão do tornozelo (Figura 2.27).

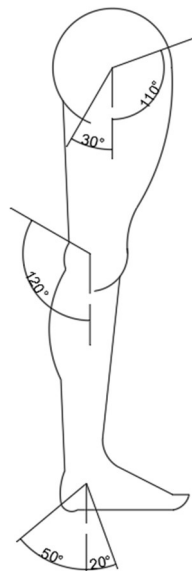


Figura 2.27- Limites angulares das juntas da perna envolvidas na passada

A Tabela 2.4 apresenta a amplitude angular máxima, tanto para flexão como extensão, das juntas da perna humana, assim como a amplitude angular utilizada para executar a passada humana. De notar que, a passada humana apenas usa parte da amplitude angular disponível nas juntas.

Tabela 2.4- Amplitudes angulares para os movimentos de flexão e extensão das juntas da perna humana [37]

	Amplitude	Amplitude na passada
Flexão do quadril	110°	32°
Extensão do quadril	30°	10°
Flexão do joelho	120°	63°
Flexão do tornozelo	20°	14°
Extensão do tornozelo	50°	20°

2.5.2. TIPOS DE MECANISMO

Segundo o artigo [34] a robustez e segurança são os principais fatores a ter em conta na locomoção em terrenos acidentados, superando outros fatores como agilidade ou autonomia. Estes fatores têm um papel muito preponderante no desenvolvimento e evolução de mecanismos cinemáticos de pernas.

Geralmente as pernas robóticas possuem três juntas que permitem gerar movimentos semelhantes aos de uma perna biológica. A forma como estes três graus de liberdade são atuados vai definir a configuração da perna.

As juntas presentes numa perna robótica genérica são:

- AAQ: junta de abdução/ adução do quadril
- FEQ: junta de flexão/ extensão do quadril
- FEJ: junta de flexão/ extensão do joelho

Existem ainda exemplos de pernas robóticas que possuem quatro graus de liberdade que permitem realizar a rotação da junta do quadril, deste modo, simulando todos os graus de liberdade da junta esférica do quadril. Pernas com cinco graus de liberdade são também uma realidade (subcapítulo 2.3.1), contudo, são uma raridade devido à elevada complexidade de controlo, este quinto grau de liberdade permite introduzir a junta de flexão/ extensão do tornozelo.

O tipo de mecanismo utilizado nas pernas robóticas tem grande influência nas propriedades básicas do sistema robótico, tais como, a mobilidade, o espaço de trabalho e as singularidades. O mecanismo cinemático de uma perna robótica pode ser do tipo em série, paralelo ou híbrido (Figura 2.28).

Mecanismos cinemáticos em série têm maior espaço de trabalho e destreza, enquanto mecanismos cinemáticos em paralelo têm maior rigidez e capacidade de carga. O mecanismo cinemático híbrido tem maior rigidez que um mecanismo em série e maior espaço de trabalho que um mecanismo em paralelo para o mesmo número de graus de liberdade.

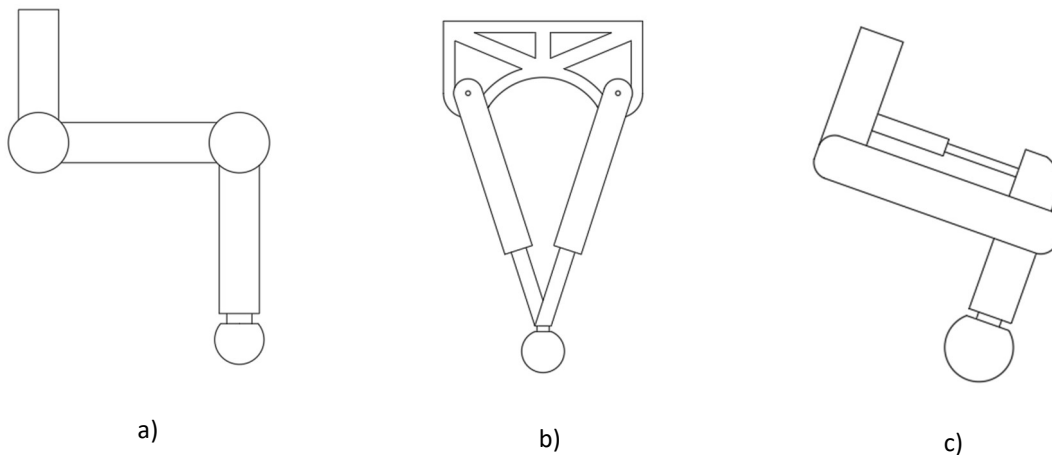


Figura 2.28- Mecanismo cinemático em: a) série; b) paralelo; c) híbrido

No design de pernas robóticas é importante adotar considerações de design que minimizem a inércia das pernas e que garantam a proteção dos atuadores e elementos de controlo. O design mais convencional para pernas robóticas coloca os atuadores acoplados diretamente a cada junta formando um mecanismo cinemático em série (Figura 2.29a). Este design para além de aumentar grandemente a inércia da perna, fator que reduz a eficiência energética e destreza do robô, coloca também os elementos de atuação e controlo expostos. Colocar o atuador da junta AAQ acoplado diretamente ao corpo do robô é uma forma de reduzir a inércia da perna e proteger este atuador dos elementos (Figura 2.29b). A utilização da configuração do tipo pantógrafo, aliada ao acoplamento corporal da junta AAQ, permite a maior redução da inércia da perna possível ao mesmo tempo que protege os atuadores dos elementos externos. A configuração do tipo pantógrafo é possível através da utilização de dois motores coaxiais em que um deles atua diretamente a junta FEQ enquanto o outro atua

indiretamente a junta FEJ, através de um elemento de transmissão como uma correia (Figura 2.29c).

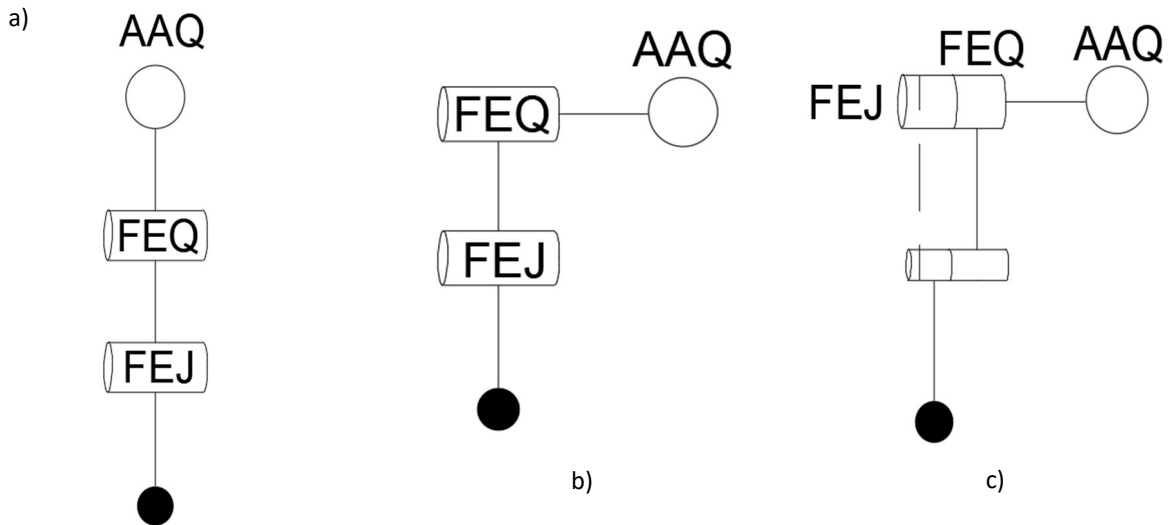


Figura 2.29- Evolução da disposição dos atuadores numa perna robótica de modo a reduzir a inércia e aumentar a proteção dos atuadores: a) disposição em série simples; b) acoplamento corporal da junta AAQ; c) configuração pantógrafo

A configuração do tipo pantógrafo produz um mecanismo cinemático em paralelo que permite concentrar todos os atuadores no corpo do robô, isto resulta na redução da inércia da perna e no aumento da proteção dos atuadores. O design das pernas do robô quadrúpede *Mini Cheetah* do MIT é um exemplo perfeito da aplicação destas considerações de design (Figura 2.30).

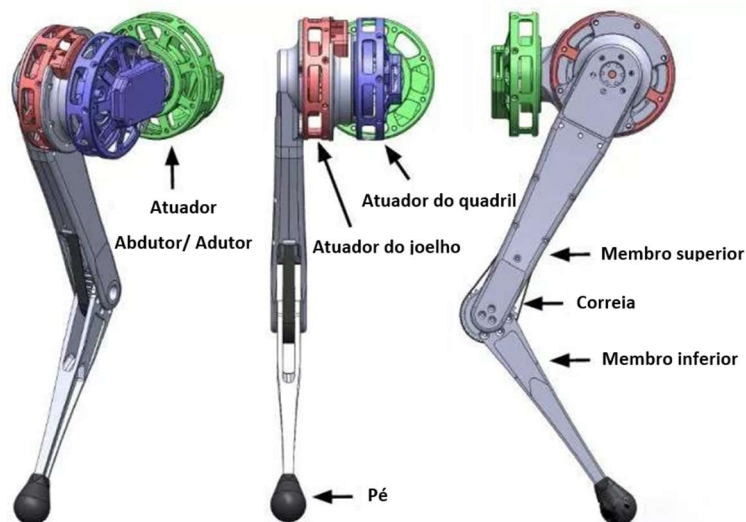


Figura 2.30- Disposição dos atuadores na perna do robô Mini Cheetah [38]

A aplicação de mecanismos complacentes em pernas robóticas tem sido uma das inovações mais recentes no tocante a pernas robóticas. A implementação de pernas

complacentes permite melhorar a eficiência energética, a corrida de longas distâncias, melhorar a resposta face a incertezas no meio externo e impulsos gerados pelo contacto com o chão. Existem quatro designs de pernas complacentes possíveis (Figura 2.31): a) configuração telescópica- prismática; b) configuração de dois segmentos, em que a flexão pode ser absorvida por um atuador ou elemento elástico; c) configuração de três segmentos, também denominado de pantógrafo de mola; d) configuração de quatro segmentos, semelhante à configuração do pantógrafo de mola com introdução de um grau de liberdade passivo na junta de flexão/ extensão do tornozelo.

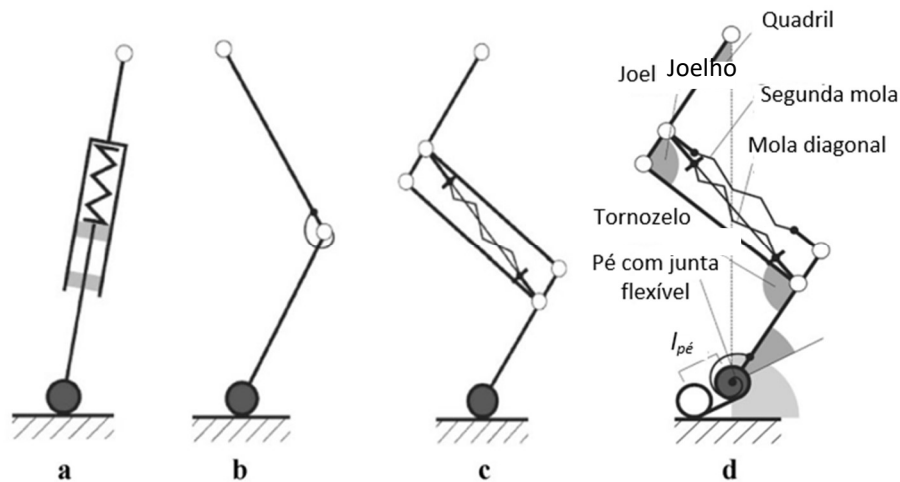


Figura 2.31- Configurações pernas complacentes: a) telescópica- prismática; b) dois segmentos; c) três segmentos; d) quatro segmentos [34]

2.5.3. ATUADORES

Os atuadores funcionam como músculos do robô e por esse motivo, são responsáveis pela locomoção. No que diz respeito a sistemas robóticos, existem dois grandes grupos de atuadores, hidráulicos e elétricos.

Os atuadores hidráulicos têm uma elevada robustez, capacidade de carga e precisão, contudo, são caros, com baixa eficiência energética e necessitam de sistemas robóticos maiores e mais pesados. Os atuadores *Hy-Mo* permitem combinar um atuador hidráulico com um servo motor para responder a alguns dos problemas associados aos atuadores elétricos, como é o caso da ineficiência resultante das fugas [34].

Os atuadores elétricos têm menos robustez e capacidade de carga que os atuadores hidráulicos. Contudo, o baixo preço, reduzido peso, compactidade, facilidade de controlo e implementação dos atuadores elétricos tornam este tipo de atuadores mais comuns em aplicações robóticas.

As cinco principais tipologias de atuadores elétricos incluem: motores de corrente contínua (DC) com escovas, motores de corrente contínua sem escovas, motores de corrente alternada (AC), motores de passo e servomotores.

O motor DC com escovas (Figura 2.32) é um tipo de atuador elétrico de corrente contínua que possui ímãs permanentes acoplados ao estator. O rotor é uma bobina percorrida por corrente contínua que gera um campo magnético rotativo através do comutador. O comutador é um componente acoplado ao veio do rotor que possui ligação à corrente através de escovas. Este tipo de motores é capaz de transmitir binário máximo a velocidades baixas, contudo, são motores geralmente mais volumosos com uma eficiência inferior devido ao calor gerado pelo contacto das escovas com o comutador[38].

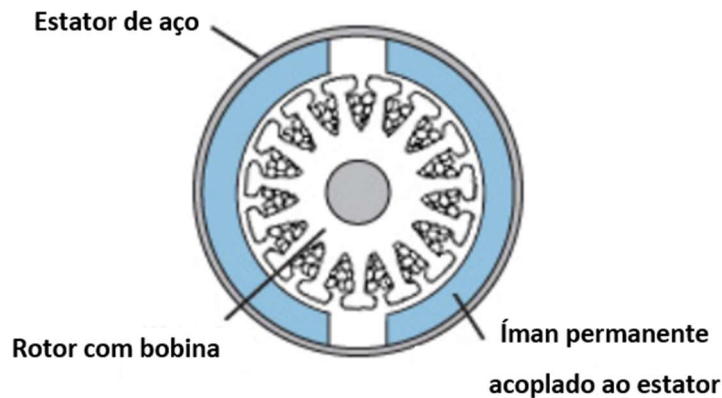


Figura 2.32- Motor DC com escovas [40]

O motor DC sem escovas (Figura 2.33) é um tipo de atuador elétrico de corrente contínua em que o rotor é um ímã permanente e o estator possui vários solenoides atravessados por corrente contínua. Um conversor, que funciona como um comutador eletrônico, altera o sentido da corrente de alimentação dos solenoides gerando um campo eletromagnético rotativo que produz o movimento do rotor [38].

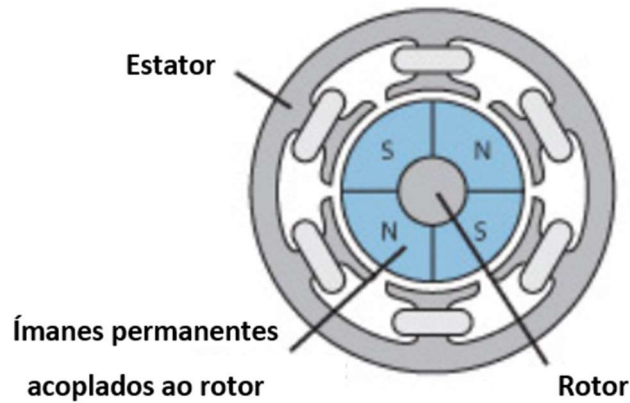


Figura 2.33- Motores DC sem escovas [40]

O motor AC (Figura 2.34) é um atuador elétrico que funciona com corrente elétrica alternada e que pode ser monofásico ou trifásico consoante a aplicação. A estrutura do motor AC é muito semelhante à de um motor DC sem escovas, de modo igual, o rotor é um ímã permanente e o estator possui um conjunto de solenoides em seu redor. O motor AC mais comum é o de indução em que o campo eletromagnético rotativo é gerado no estator pela alternância própria da corrente alternada, o rotor gira por efeito da indução [39], [40].

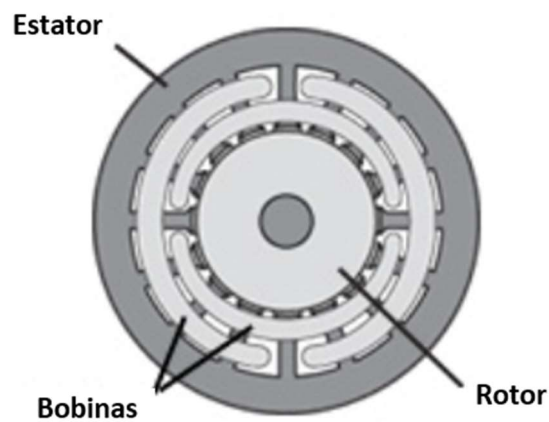


Figura 2.34- - Motor AC [40]

O motor de passo (Figura 2.35) é, no cerne do seu funcionamento, um motor DC sem escovas, contudo, apresenta características próprias que o tornam inerentemente diferente. O rotor de um motor de passo é ímã permanente ao qual é acoplado um invólucro dentado, o estator, por outro lado, é constituído por um conjunto de solenoides e igualmente um invólucro dentado. A rotação do motor de passo é controlada por um sinal de pulso (PWM- *Pulse With Modulation*) que ativa, ou desativa, a passagem de corrente pelos solenoides.

Quanto mais rápida for esta comutação mais rápido será o movimento do motor de passo, para que o motor de passo inverta o sentido de rotação basta inverter o sentido da corrente que passa pelos solenoides. O estator possui menos dentes que o rotor, pelo que estão sempre desfasados um em relação ao outro, por este motivo quando o campo eletromagnético é gerado pela passagem de corrente nos solenoides o rotor gira para se reajustar em relação ao campo magnético naquela que é a posição de menor relutância. Os motores de passo são atuadores com excelente precisão, alto binário a baixas velocidades e situações estáticas, relativamente baratos, robustos e fiáveis [41]–[43].

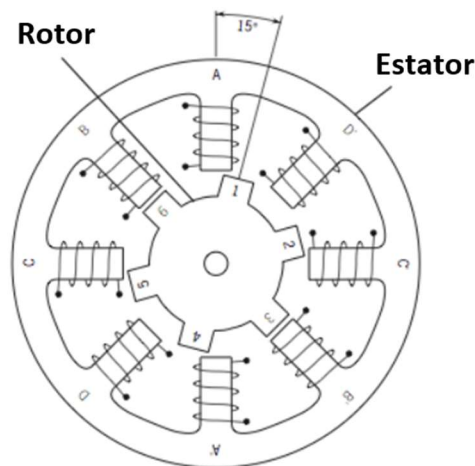


Figura 2.35- Esquema de um motor de passo [45]

O servomotor (Figura 2.36) é um tipo de atuador elétrico que utiliza um controlo de malha fechada, através de um PID, para controlar a velocidade e posição do veio do motor com um sinal de pulso (PWM). Os servomotores mais comuns em aplicações robóticas são os de corrente direta com uma amplitude angular de 180°. Qualquer motor elétrico pode ser incorporado num sistema servo. O sistema servo é constituído pelo motor, geralmente de corrente direta, sistema PID de controlo e sistema de engrenagens reductor. Os servomotores são atuadores elétricos baratos e disponíveis em massa, que permitem controlar a posição e a velocidade com relativa precisão [44].

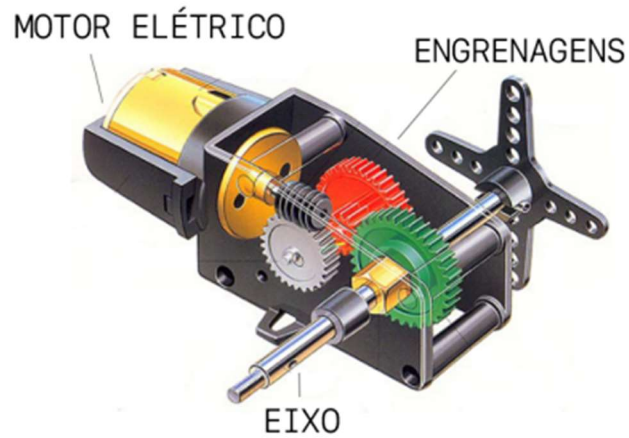


Figura 2.36- Esquema de um servomotor [39]

A Tabela 2.5 apresenta de forma sintetizada a performance de cada um dos atuadores elétricos para o mesmo conjunto de características.

Tabela 2.5- Comparação entre os diferentes tipos de atuadores elétricos [39], [45]

	DC c/escovas	DC s/ escovas	AC	Passo	Servo
Manutenção	Periódica	Nenhuma	Nenhuma	Periódica	Periódica
Vida útil	Curta	Longa	Longa	Longa	Curta
Eficiência	Moderada	Alta	Alta	Baixa	Moderada
Potência/Tamanho	Moderada	Alta	Baixa	Baixa	Moderada
Ruído elétrico	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Alto
Custo	Moderado	Alto	Baixo	Alto	Alto
Controlo	Simples	Complexo	Moderado	Complexo	Simples
Velocidade máxima	Baixa	Elevada	Elevada	Baixa	Baixa
Binário	Alto	Baixo	Baixo	Alto	Alto
Precisão	Moderada	Baixa	Baixa	Alta	Moderada

3. PROJETO CONCRETUAL DO ROBÔ

Serve o presente capítulo para explorar e desenvolver o conceito do ROHMOBI, conceito que se apresenta como uma proposta inovadora no mundo dos robôs hexápodes, partindo da motivação e definição, passando pelo desenho concretual e dimensionamento e terminando na análise estática do modelo.

3.1. CONCEITO E MOTIVAÇÃO

Os robôs bio inspirados são a tipologia de robôs móveis com maior mobilidade e versatilidade, sendo capazes de realizar muitas tarefas que estão vedadas apenas aos animais (subcapítulo 2.1.3). Por este motivo, esta é uma área de estudo de elevado interesse e que tem assistido a alguns dos avanços mais interessantes na área da robótica móvel nos últimos anos.

O propósito deste trabalho é apresentar um novo conceito de cinemática para robôs hexápodes. Conceitos inovadores, ainda que puramente académicos, permitem muitas vezes gerar soluções diferentes para problemas já existentes ou responder a limitações de futuros problemas, contudo, o principal objetivo é a analisar um problema de um ponto de vista diferente e retirar deste processo um novo conjunto de conhecimentos e aprendizagem.

Os robôs hexápodes são, na categoria dos robôs bio inspirados, aqueles que apresentam maior capacidade de locomoção em terrenos acidentados, isto advém da sua marcha inerentemente estável e do facto de terem mais opções para planeamento de trajetórias. Por este motivo, esta categoria de robôs terrestres móveis tem um elevado interesse a nível académico, assim como um grande potencial económico para aplicações em missões de reconhecimento e segurança, resgate e salvamento, vigilância, desminagem, etc.

No entanto, apesar dos robôs hexápodes serem a categoria que apresenta a maior capacidade de mobilidade são robôs inerentemente mais lentos, com um rendimento energético inferior e com muito maior complexidade de controlo.

Na tipologia de robôs hexápodes em que as pernas estão dispostas radialmente o controlo é especialmente exigente, para além de somarem dezoito GDL's (caso mais comum), todas as pernas estão numa zona espacialmente distinta das restantes, o que em termos de

controlo de marcha baseado na leitura do terreno exige um planeamento de passada para cada uma das pernas.

Para garantir a estabilidade estática de uma estrutura é necessário um mínimo de três pontos de contacto, contudo três pontos de contacto formam uma estrutura estática e não um mecanismo dinâmico. Ainda que existam alguns robôs com apenas três pernas, como referido no subcapítulo 2.1.3, estes apresentam marchas pouco eficientes e com baixa mobilidade. Uma solução para produzir um mecanismo dinâmico que mantenha sempre três pontos de contacto é substituir estes três pontos de contacto por outros três novos, este é o princípio da marcha trípede dos robôs hexápodes. Contudo, para evitar a necessidade de planear a passada para cada uma das pernas (como acontece nos hexápodes com a configuração de aranha), estas poderiam estar lado a lado, em pares de dois, numa disposição triangular, desta forma apenas seria necessário planear a passada para cada par de perna. Para cada par, a perna em fase de balanço vai substituir a perna em fase de suporte segundo a mesma direção de movimento, o que permite uma redução na complexidade de controlo do robô. Estes pares de duas pernas são chamados módulos de locomoção bípede e são a unidade básica de locomoção do ROHMOBI, por esse motivo são totalmente modulares e poderão ser ajustados a qualquer outro tipo de configuração, como por exemplo, se para efeitos de transporte de carga for necessário adicionar mais um módulo. Esta nova configuração cinemática do robô hexápode permite ainda reduzir o número de GDL's, visto que a orientação do robô é controlada ao nível do módulo bípede o número total de GDL's decresce para quinze.

3.2. DESENHO CONCEPTUAL

O desenho conceptual tem como objetivo transmitir uma ideia e explicar um conceito, como não é um desenho técnico, o desenho conceptual é desprovido de grandezas físicas e representa modelos sem validação científica. A Figura 3.1 apresenta o desenho conceptual de um módulo bípede e o desenho conceptual do ROHMOBI.

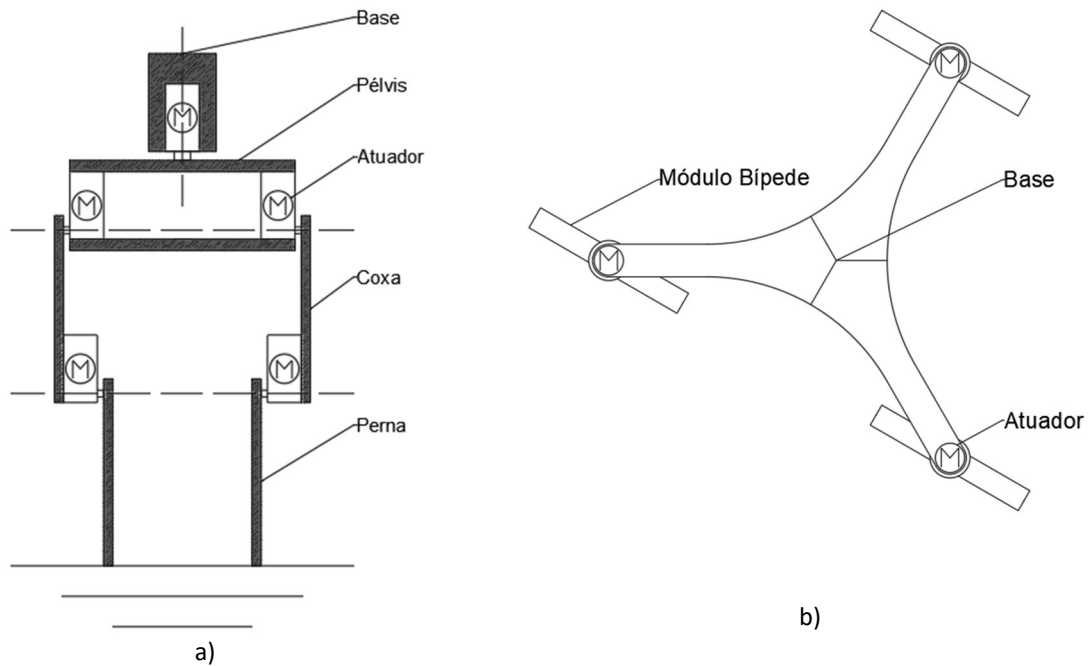


Figura 3.1- Desenho conceptual do ROHMOBI: a) Módulo Bípede, b) Vista superior do robô

O ROHMOBI é formado por três módulos bípedes unidos por uma base. Os módulos bípedes mimizam o modelo bípede humano, por esse motivo são constituídos por duas coxas, duas pernas e uma pélvis. Cada módulo possui ainda quatro atuadores rotativos, um por cada junta, à semelhança do modelo anatómico simplificado. A base tem como principal função unir os módulos bípedes e permitir que estes trabalhem enquanto unidade, o design da base deriva de uma geometria triangular em que cada módulo bípede é colocado num dos vértices da mesma. Para permitir o controlo da direção do ROHMOBI, cada vértice da base possui um atuador rotativo responsável por controlar a orientação do módulo bípede aí acoplado.

3.3. PROPORÇÕES DO ROBÔ

Como mencionado anteriormente, os módulos bípedes são baseados no modelo bípede humano, por este motivo, os módulos bípedes devem respeitar as proporções antropométricas (subcapítulo 2.5.1).

Segundo as proporções antropométricas a distribuição do comprimento total da perna respeita as seguintes percentagens:

- Coxa = 45,83%
- Perna + Pé = 54,17%

Estas proporções permitem obter o comprimento relativo da coxa e da perna, contudo, o comportamento absoluto da perna deverá ter em conta as dimensões dos atuadores utilizados para ativar as juntas. Com base na informação do subcapítulo 6.3.2, em que os atuadores são seleccionados, e respeitando as proporções antropométricas é possível determinar dimensões absolutas para os membros constituintes da perna do robô (Figura 3.2).

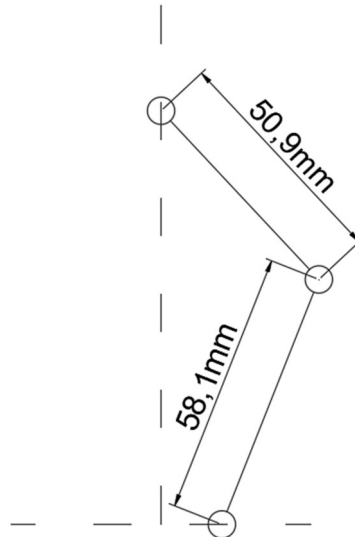


Figura 3.2- Dimensões da perna do robô

As restantes dimensões do ROHMOBI, dimensão da pélvis e dimensão da base, não têm por referência nenhum parâmetro antropométrico, mas pretendem sim responder a necessidades funcionais do robô, tais como garantir o devido toleranciamento entre pernas, entre módulos e acomodar os componentes eletrónicos de controlo.

3.4. ANÁLISE ESTÁTICA DA PERNA

O objetivo deste subcapítulo é, através da análise estática, obter equações que permitam calcular o binário exigido a cada um dos atuadores da perna. A análise estática segue o Princípio *d'Alembert* para sistemas estáticos, o qual enuncia que o somatório de todas as forças e momentos atuantes é igual a zero para um sistema estático [46]. A análise estática pode ser simplificada à análise de apenas uma perna enquanto um sistema de multicorpos independente (Figura 3.3, Figura 3.4), em que h_i , r_i e v_i são as forças de reação nas juntas segundo o eixo x , y e z ; l_i é o comprimento do membro; CG_i a posição do centro de massa; F_{gi} é a força gravítica do membro em estudo e F_N é a força normal de contacto. Devido à natureza

estática deste estudo, apenas se considera a força normal de contacto como a única força resultante da interação de contacto, as outras forças tangenciais são desprezadas para o efeito.

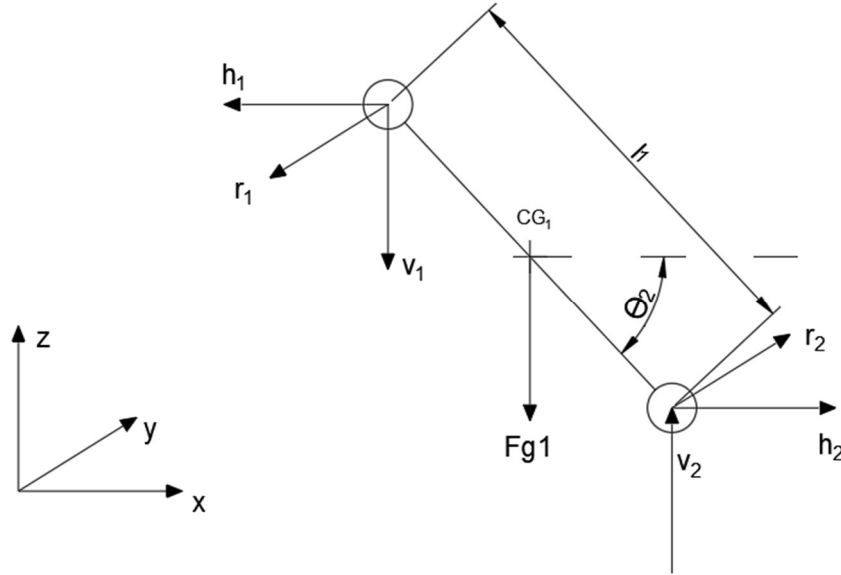


Figura 3.3- Diagrama de corpo livre da coxa para análise estática

Aplicando o princípio *d'Alembert* ao diagrama de corpo livre da coxa (Figura 3.3) é possível obter as seguintes equações:

$$F_1 = \begin{cases} \sum F_{x1} = 0 \leftrightarrow h_2 - h_1 = 0 \\ \sum F_{y1} = 0 \leftrightarrow r_2 - r_1 = 0 \\ \sum F_{z1} = 0 \leftrightarrow v_2 - v_1 - F_{g1} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$M1 = \begin{cases} \sum M_{x1} = 0 \leftrightarrow M_{x1} = (l_1 \cdot h_2 - \overline{CG_1} \cdot F_{g1}) \cdot \sin \theta_2 \\ \sum M_{y1} = 0 \leftrightarrow M_{y1} = r_2 \cdot l_1 \\ \sum M_{z1} = 0 \leftrightarrow M_{z1} = (l_1 \cdot v_2 - \overline{CG_1} \cdot F_{g1}) \cdot \cos \theta_2 \end{cases} \quad (15)$$

A equação do momento segundo o eixo dos z's da equação (15) permite calcular o binário exigido ao atuador da junta do quadril para diferentes posições. Visto que, o atuador representa uma junta do tipo rotativo (1 GDL), os binários resultantes da atuação de outras forças axiais serão absorvidos pela estrutura.

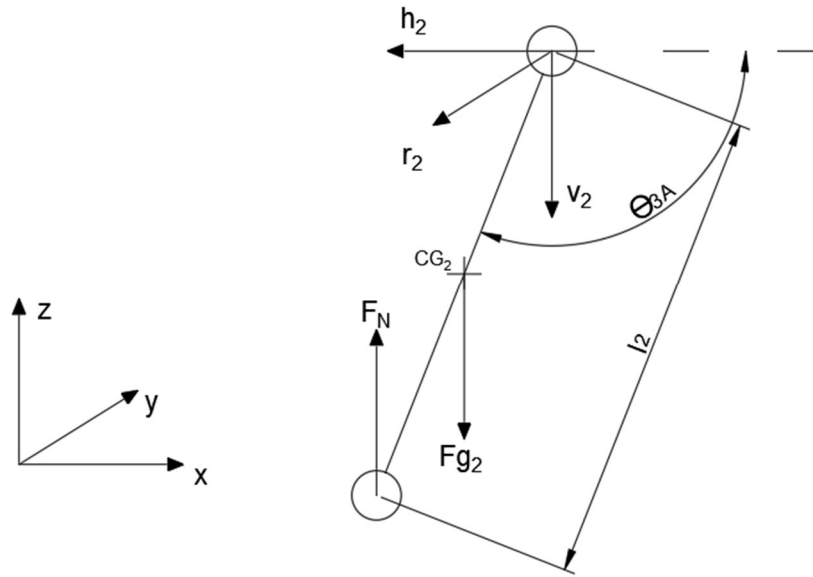


Figura 3.4- Diagrama de corpo livre da perna para análise estática

Aplicando o princípio de *d'Alembert* ao diagrama de corpo livre da coxa (Figura 3.4) é possível obter as seguintes equações:

$$F2 = \begin{cases} \sum F_{x2} = 0 \leftrightarrow -h_2 = 0 \\ \sum F_{y2} = 0 \leftrightarrow -r_2 = 0 \\ \sum F_{z2} = 0 \leftrightarrow v_2 + F_{g2} - F_N = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$M2 = \begin{cases} \sum M_{x2} = (F_N \cdot l_2 - \overline{CG_2} \cdot F_{g2}) \cdot \sin \theta_{3A} \\ \sum M_{y2} = 0 \\ \sum M_{z2} = (F_N \cdot l_2 - \overline{CG_2} \cdot F_{g2}) \cdot \cos \theta_{3A} \end{cases} \quad (17)$$

$$\theta_{3A} = \theta_2 + \theta_3 \quad (18)$$

A equação do momento segundo o eixo dos z's da equação (17) permite calcular o binário exigido ao atuador da junta do joelho para diferentes posições. Novamente, os binários produzidos por outras forças axiais serão absorvidos pela estrutura. Não existe qualquer momento em y pois não existe nenhuma força segundo este eixo que possua braço que permita gerar binário.

3.5. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

O capítulo 3 permitiu explicar o conceito do ROHMOBI de forma mais detalhada através da motivação, análise sobre a importância dos robôs hexápodes e principais problemas e a

elaboração de um conceito que pudesse oferecer soluções inovadoras para estes problemas. O desenho conceptual é apresentado como um auxiliar gráfico que permite perceber melhor o mecanismo do ROHMOBI e a interação entre as diferentes estruturas. O desenho conceptual é precedido pela definição das proporções e dimensões através da análise das métricas antropométricas e as dimensões dos atuadores selecionados. Com este estudo é possível definir qual deverá ser o comprimento dos membros das pernas do robô, as dimensões dos restantes componentes serão definidas conforme as necessidades funcionais. O estudo estático finaliza o capítulo e permite perceber quais serão as forças atuantes nos membros das pernas, através deste estudo é possível obter as equações para o cálculo dos binários estáticos em cada junta que serão essenciais para a validação da seleção dos atuadores.

4. ESTUDO CINEMÁTICO

A cinemática é um ramo da física essencial na mecânica clássica que se ocupa da descrição do movimento geométrico de um corpo, ou de um conjunto de corpos, sem a consideração pelas forças envolvidas, isto é, as causas ou efeitos do movimento. O objetivo da cinemática é fornecer uma descrição espacial dos corpos, ou sistemas de partículas de materiais, a velocidade de movimento das partículas e a aceleração das mesmas. Quando as forças causadoras são desconsideradas, descrições do movimento são possíveis apenas para partículas com movimento constrangido, ou seja, que se movem em caminhos determinados. Em movimentos sem constrangimentos, isto é movimento livre, as forças determinam a forma do caminho que o corpo irá percorrer [47].

Por estes motivos a cinemática constitui uma importante ferramenta para aplicações robóticas, na medida em que permite definir e qualificar o movimento em relação à posição, velocidade e aceleração dos vários componentes.

4.1. DESCRIÇÃO DA CADEIA CINEMÁTICA

O desenho cinemático é um importante auxiliar da análise cinemática e consiste na discretização do mecanismo numa forma simplificada, a qual retêm todas as propriedades cinemáticas do mecanismo original, enquanto facilita a compreensão e estudo do mesmo. O módulo bípede, que é a unidade básica de locomoção e, portanto, o ponto de partida deste estudo, pode ser descrito cinematicamente de acordo com a imagem da Figura 4.1.

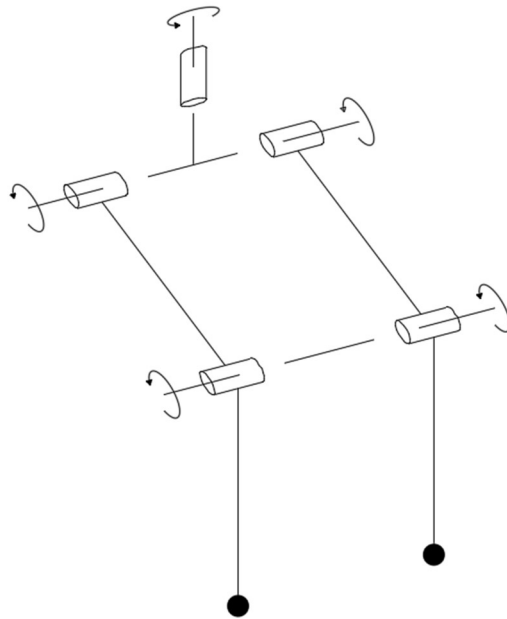


Figura 4.1- Desenho cinemático do módulo bípede

No entanto, o interesse é conhecer a posição individual de cada perna para depois poder combinar esta informação de modo a obter informação acerca do posicionamento de todas as pernas do robô. Por este motivo, o foco primaz do estudo cinemático é ao nível da perna individual e não do módulo bípede. O desenho cinemático da perna individual do robô é representado na Figura 4.2.

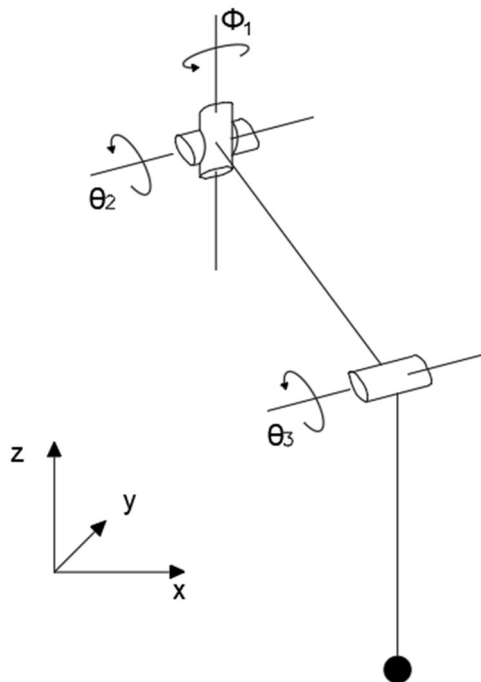


Figura 4.2- Desenho cinemático da perna individual

Através da Figura 4.2 é possível perceber que cada perna possui três GDL's, θ_2 e θ_3 rodam no mesmo plano, enquanto ϕ_1 gira num plano diferente. ϕ_1 é o ângulo comum a ambas as pernas do módulo bípede, o que significa que cada módulo bípede tem cinco GDL's (Figura 4.1). Contudo, para o estudo cinemático ϕ_1 é considerado como o terceiro grau de liberdade da perna, apesar de ser um GDL partilhado por ambas as pernas do módulo bípede.

4.2. CINEMÁTICA DIRETA

A cinemática direta procura determinar a posição do *end-effector*, que neste caso é o pé do robô, através da informação do ângulo das juntas. Matematicamente o problema da cinemática direta pode ser formulado da seguinte forma:

$$p = f(q) : \begin{cases} \text{Espaço cartesiano: } p = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \\ \text{Espaço das juntas: } q = (\phi_1, \theta_2, \theta_3) \end{cases} \quad (19)$$

O espaço cartesiano tem sempre a mesma dimensão independentemente do problema, os primeiros três elementos representam as coordenadas espaciais da posição do *end-effector*, os três últimos elementos do vetor expressam a orientação do *end-effector* segundo o sistema *roll-pitch-yaw*. O espaço das juntas tem tantos elementos quanto o número de graus de liberdade do mecanismo em análise. A posição e orientação do *end-effector* do robô podem ser definidas em relação ao ângulo das juntas.

O primeiro passo para o cálculo da cinemática direta é definir quais as transformações que os referenciais devem sofrer ao longo das juntas do robô, tendo em conta que o referencial zero é o sistema de coordenadas geral do mundo, o qual é fixo segundo a orientação da base do robô. Para obter um referencial a partir do anterior é importante seguir um conjunto de transformações de forma ordenada mediante a equação (20).

$${}^{i-1}_i T = R_x(\alpha_{i-1}) \cdot D_x(a_{i-1}) \cdot R_z(\theta_i) \cdot D_z(d_i) \quad (20)$$

Aplicando esta sequência de transformação de referenciais é possível obter a seguinte representação (Figura 4.3).

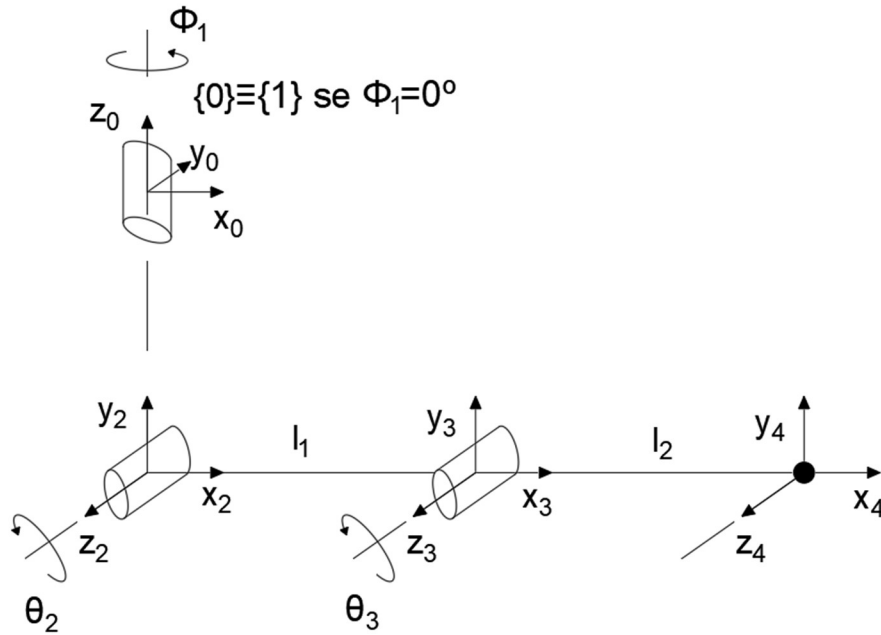


Figura 4.3- Referenciais transformados nas juntas do mecanismo

Para facilitar a atribuição da orientação dos eixos o mecanismo deve ser representado na sua forma mais simplificada. A partir da imagem na Figura 4.3 é possível determinar os parâmetros de *Denavit-Hartenberg* Modificados (Tabela 4.1).

Tabela 4.1- Parâmetros de *Denavit-Hartenberg* Modificados

Transformação	Rotação em x	Translação em x	Rotação em z	Translação em z
${}^{i-1}T_i$	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
0T_1	0°	0	ϕ_1	0
1T_2	90°	0	θ_2	0
2T_3	0°	l_1	θ_3	0
3T_4	0°	l_2	0	0

A matriz transformação de *Denavit-Hartenberg* (segundo a notação modificada) é o resultado da multiplicação da matriz rotação segundo o eixo x, matriz translação segundo o eixo x, matriz rotação segundo o eixo z e matriz translação segundo o eixo z, de acordo com a equação (20). O resultado é a matriz transformação da equação (21).

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} \cdot d_i \\ \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cdot \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} \cdot d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Aplicando os parâmetros de *Denavit-Hartenberg* à matriz transformação é possível obter as seguintes quatro matrizes parciais de transformação.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\phi_1 & -s\phi_1 & 0 & 0 \\ s\phi_1 & c\phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & l_1 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Para obter a matriz que permite transformar o referencial do sistema de coordenadas geral do mundo no referencial do *end-effector* é necessário multiplicar as matrizes transformação entre referenciais de acordo com o apresentado na seguinte equação.

$${}^0_4T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \quad (26)$$

O resultado da multiplicação destas matrizes é a matriz transformação geral do sistema que apresenta a forma da seguinte equação.

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} c\phi_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -c\phi_1 s(\theta_2 + \theta_3) & s\phi_1 & p_x \\ s\phi_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -s\phi_1 s(\theta_2 + \theta_3) & -c\phi_1 & p_y \\ s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & 0 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

A matriz da transformação geral fornece informação relativa à posição e orientação do *end-effector*, a posição é dada pelo vetor de dimensão três da última coluna e a orientação é dada pela matriz três por três representada na seguinte equação.

$${}^0_4\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi_1(l_2 c(\theta_2 + \theta_3) + l_1 c\theta_2) \\ s\phi_1(l_2 c(\theta_2 + \theta_3) + l_1 c\theta_2) \\ l_2 s(\theta_2 + \theta_3) + l_1 s\theta_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$${}^0_4R = {}^0_4T[1:3,1:3] = \begin{bmatrix} c\phi_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -c\phi_1 s(\theta_2 + \theta_3) & s\phi_1 \\ s\phi_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -s\phi_1 s(\theta_2 + \theta_3) & -c\phi_1 \\ s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

A equação da posição tem grande relevância neste estudo da cinemática direta pois permite determinar a posição do *end-effector* no espaço cartesiano através da informação do ângulo das juntas.

4.3. CINEMÁTICA INVERSA

A cinemática inversa pretende resolver o problema inverso da cinemática direta, isto é, a partir da posição final do *end-effector* calcular o ângulo de cada uma das juntas. Matematicamente o problema da cinemática inversa pode ser descrito segundo a seguinte equação(30).

$$q = f^{-1}(p) : \begin{cases} \text{Espaço cartesiano: } p = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \\ \text{Espaço das juntas: } q = (\phi_1, \theta_2, \theta_3) \end{cases} \quad (30)$$

A cinemática inversa é geralmente um problema mais complicado de resolver do que a cinemática direta, principalmente para mecanismos com sete ou mais graus de liberdade devido ao problema da redundância. No entanto, a cinemática inversa possui uma importância prática elevada, na medida em que a informação gerada pela resolução do problema quando enviada aos atuadores permite obter a posição final do *end-effector*.

No mecanismo em estudo neste trabalho o problema da cinemática inversa pode ser resolvido de forma geométrica, que é uma técnica de fácil compreensão e mais simplista do que uma resolução algébrica tradicional. Com este intuito, e tendo em conta que os graus de liberdade não são todos planares, a análise deve ser dividida em dois planos.

O primeiro plano para análise é o plano x_0Oy_0 , este plano está em concordância com o referencial de coordenadas geral e confere uma perspetiva de vista de topo do mecanismo (Figura 4.4).

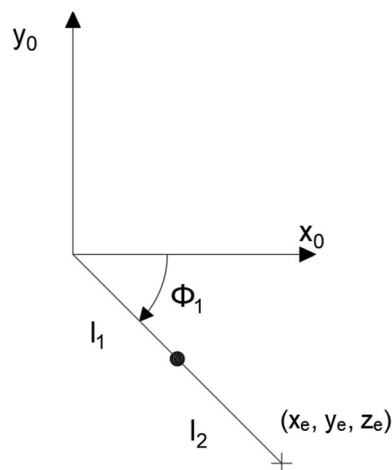


Figura 4.4- Perspetiva do mecanismo de uma perna única segundo o plano x_0Oy_0

Segundo este plano, ambos os segmentos das pernas são colineares em qualquer instante o que torna bastante simples através de uma função trigonométrica calcular o ângulo ϕ_1 .

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{y_e}{x_e}\right) \quad (31)$$

O segundo plano para análise é o plano x_1Oz_1 , o qual confere uma perspectiva de vista de frente (Figura 4.5). No entanto, este plano não está em concordância com o referencial de coordenadas geral, mas sim segundo um referencial que resulta da rotação deste segundo o eixo z_0 com uma magnitude de ϕ_1 .

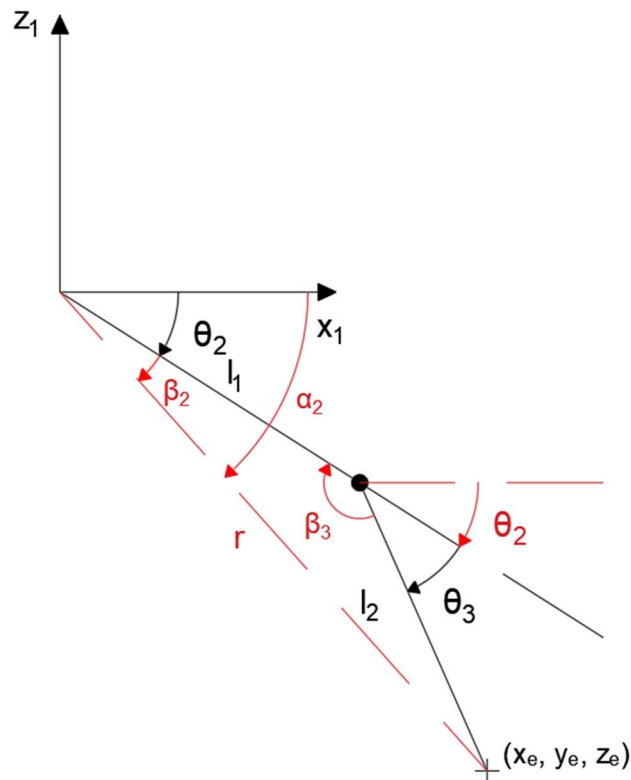


Figura 4.5- Perspetiva do mecanismo de uma perna única segundo o plano x_1Oz_1

É possível com base na posição do *end-effector* calcular os parâmetros r e α_2 , os quais irão ser importantes auxiliares de cálculo.

$$r = \sqrt{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2} \quad (32)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x_e \cos \phi_1}{r}\right) \quad (33)$$

θ_2 pode ser calculado através da seguinte equação.

$$\theta_2 = \alpha_2 - \beta_2 \quad (34)$$

α_2 já é conhecido e β_2 pode ser conhecido através da lei dos cossenos segundo a seguinte equação.

$$l_2^2 = l_1^2 + r^2 - 2 \cdot l_1 \cdot r \cdot \cos(\beta_2) \leftrightarrow \beta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + r^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot r} \right) \quad (35)$$

Deste modo é possível reescrever a equação (34) do seguinte modo.

$$\theta_2 = \alpha_2 - \beta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{x_e}{\cos \phi_1}}{r} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + r^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot r} \right) \quad (36)$$

θ_3 pode ser calculado através da seguinte equação.

$$\theta_3 = \pi - \beta_3 \quad (37)$$

À semelhança do que foi feito para determinar β_2 , β_3 pode também ser calculado recorrendo à lei dos cossenos.

$$r = l_1^2 + l_2^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\beta_3) \leftrightarrow \beta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2} \right) \quad (38)$$

Substituindo então na equação (37) é possível calcular θ_3 através dos dados conhecidos.

$$\theta_3 = \pi - \beta_3 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2} \right) \quad (39)$$

Deste modo, é possível resolver o problema da cinemática inversa para o mecanismo em estudo.

4.4. ESPAÇO DE TRABALHO

O espaço de trabalho é área que compreende todos os pontos que o *end-effector* do manipulador consegue alcançar sem exceder os limites das juntas. O manipulador em estudo é uma das pernas do módulo bípede e o espaço de trabalho obtido será o espaço de trabalho de uma única perna.

O primeiro passo para poder calcular o espaço de trabalho consiste em estabelecer os limites angulares para as juntas. Estes limites são estipulados com base na função e devem ser inferiores ou iguais à amplitude angular dos atuadores das juntas, caso contrário, existirão pontos teóricos no espaço de trabalho que nunca poderão ser alcançados na prática. No caso da perna do módulo bípede o limite funcional das juntas será tal que garanta um movimento antropomórfico, enquanto tira proveito da amplitude angular (180°) dos atuadores (subcapítulo 6.3.2). A Figura 4.6 apresenta os limites angulares determinados representados nas respetivas juntas.

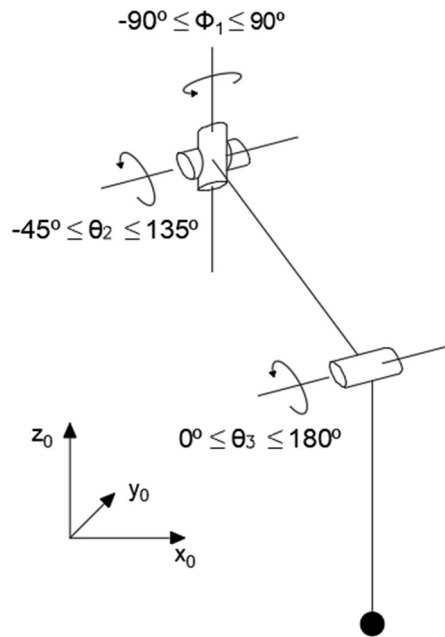


Figura 4.6- Limites angulares das juntas de 1 perna do módulo bípode

Na Figura 4.7 são representadas as configurações da perna para as posições limite das juntas.

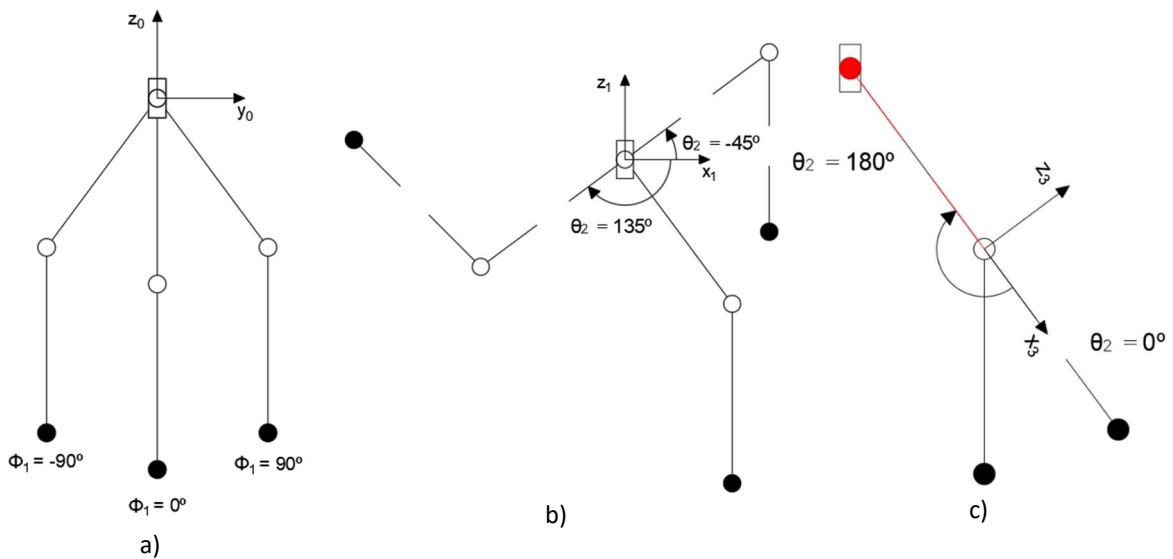


Figura 4.7- Posições limite das juntas: a) ϕ_1 ; b) θ_2 ; c) θ_3

O espaço de trabalho pode ser representado graficamente recorrendo à cinemática direta e a um código simples em que os ângulos das juntas são iterados desde o limite angular mínimo até ao limite angular máximo. Para cada iteração é obtido um conjunto de três valores de ângulos das juntas, a partir das equações da posição da cinemática direta é possível então

calcular a posição do *end-effector* e representar esse ponto espacialmente. O resultado é a nuvem de pontos apresentada na Figura 4.8 que representa o espaço de trabalho de uma perna.

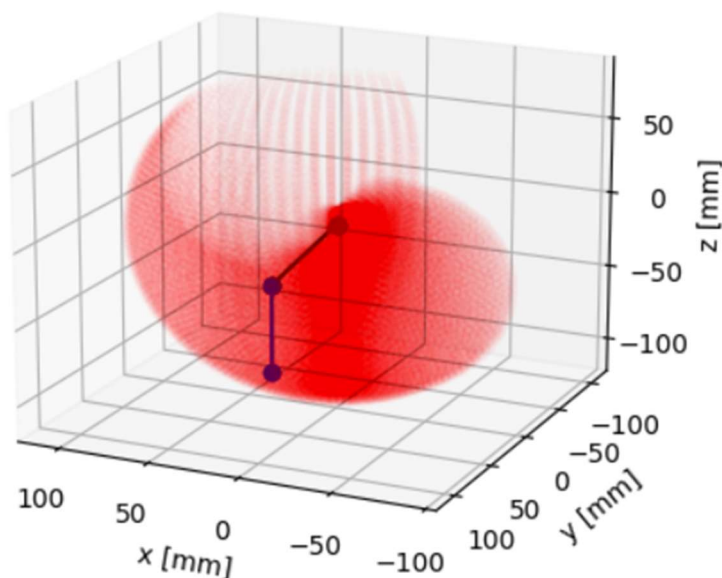


Figura 4.8- Espaço de trabalho de uma perna do módulo bípede

4.5. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Neste capítulo o módulo bípede, e por extensão a perna do robô, foram discretizadas segundo um modelo cinemático simplificado que permitiu o estudo cinemático. O estudo cinemático consistiu no cálculo da cinemática direta e cinemática inversa. A cinemática direta permitiu, através da posição angular das juntas, obter a posição espacial do *end-effector*, enquanto a cinemática inversa permitiu realizar o processo inverso e obter a posição angular das juntas com base na posição espacial do *end-effector*. A cinemática inversa tem um valor prático muito elevado pois permite obter a posição final pretendida através da determinação da posição angular das juntas que pode ser convertida em instruções de comando para os atuadores. O estudo cinemático termina com a definição dos limites angulares de cada junta, estes limites são definidos com base nas medidas antropométricas e a amplitude angular máxima permitida pelos atuadores, em conjunto com a cinemática direta é possível representar uma nuvem de pontos que exprime o espaço de trabalho de uma perna singular do robô.

5. DEFINIÇÃO E CONTROLO DA TRAJETÓRIA

Este capítulo tem por principal objetivo explicar os métodos usados para definir a trajetória do ROHMOBI e posteriormente executar o controlo do mesmo. O primeiro passo consiste em definir a trajetória para uma perna que será composta por uma fase de suporte e uma fase de balanço, para alcançar o movimento ao nível do módulo bípode as duas pernas deverão estar desfasadas, para gerar o movimento do robô esta metodologia deverá ser replicada em todos os módulos bípodes do mesmo.

5.1. CARATERÍSTICAS DA MARCHA

Como já explorado no subcapítulo 2.3.2, os robôs hexápodes podem executar três tipos de marchas que dependem do número mínimo de pernas de apoio em qualquer instante. Devido às unidades básicas de locomoção, os módulos bípodes, o ROHMOBI apenas é capaz de executar a marcha trípole (Figura 5.1). Isto advém do facto que durante a marcha, em cada módulo, uma perna deverá estar em fase de apoio e outra em fase de balanço, o que irá garantir que todos os módulos avançam simultaneamente. A marcha trípole permite um movimento mais rápido e eficiente ao mesmo tempo que exige menor complexidade de controlo, no entanto, também reduz a flexibilidade do robô, o que resulta numa baixa capacidade de superar terrenos muito acidentados,

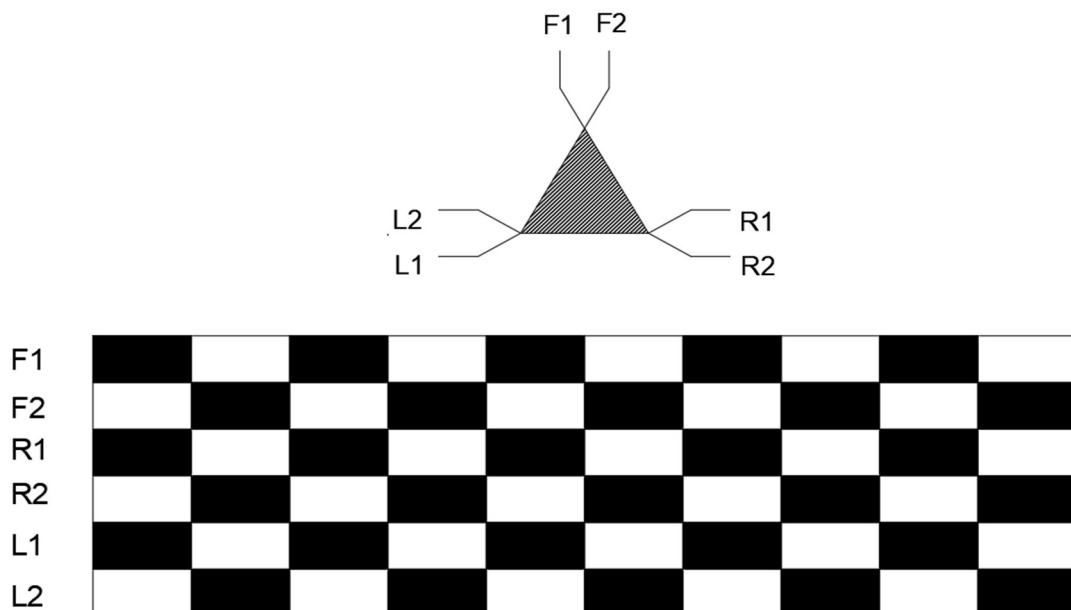


Figura 5.1- Nomenclatura das pernas do ROHMOBI e diagrama da marcha trípole; espaços pretos representam perna em fase de suporte, espaços brancos representam perna em fase de balanço

Tendo por base a informação da Figura 5.1 o estado de suporte do robô apenas pode assumir uma de duas formas em qualquer instante da marcha (equação (40)).

$$\begin{cases} c_F = (1, 0, 1, 0, 1, 0) \\ c_F = (0, 1, 0, 1, 0, 1) \end{cases} \quad (40)$$

5.2. TRAJETÓRIA DA PERNA COM UMA CURVA DE *BEZIER*

A trajetória da perna foi definida a partir de curvas de *Bezier* que permitem gerar uma trajetória controlada e suave, o que resulta num movimento final da perna semelhante a um movimento biológico.

As curvas de *Bezier* são curvas polinomiais sobretudo utilizadas em computação gráfica pois permitem gerar formas complexas a partir de pontos de controlo e do polinómio de *Bernstein* (41).

$$B_i^n(t) = (n; i)t^i(1-t)^{n-i} \quad (41)$$

Para gerar uma curva de *Bezier* de grau n , o qual é definido pelo número de pontos de controlo, é necessário aplicar a equação (42), em que t é um parâmetro iterativo entre zero e um, que consoante a aplicação pode representar a evolução temporal da curva [48].

$$B(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t)b_i, 0 \leq t \leq 1 \quad (42)$$

A aplicação da equação (42) vai permitir gerar um conjunto de pontos que definem a posição espacial do *end-effector* da perna para um determinado fator iterativo t entre 0 e 1, o que no caso deste projeto resulta em definir temporalmente a trajetória do *end-effector* da perna.

Para descrever o movimento da perna na íntegra é necessário definir a trajetória da mesma tanto na fase de balanço, como na fase de apoio, visto que são fases complementares, mas com requisitos e pontos de controlo completamente distintos.

5.2.1. FASE DE BALANÇO

O primeiro passo para definir uma curva de *Bezier* para o pé em fase de balanço é determinar o número e a posição dos pontos de controlo. O número de pontos de controlo vai definir o grau do polinómio de *Bernstein* e na prática permitir mais controlo sobre a trajetória resultante. Os pontos de controlo selecionados devem ser pontos dentro do espaço de trabalho da perna que respeitem o propósito da fase de balanço, isto é, que o pé atinja uma posição posterior através de uma trajetória aérea.

O avanço posterior do pé é definido pelo tamanho da passada desejado. Tendo em conta as dimensões do ROHMOBI e o espaço de trabalho de uma perna, o tamanho arbitrado para a passada foi de 72 mm. A passada é, contudo, um processo conjunto da fase de balanço e da fase de apoio, o que implica que, para alcançar a passada desejada é necessário um avanço de 72 mm na fase de balanço de uma das pernas e simultaneamente um recuo relativo de 72 mm na fase de apoio da outra perna.

Para alcançar um maior controlo na trajetória da perna na fase de balanço foram definidos quatro pontos de controlo. Os pontos de controlo inicial e final são, por defeito, já conhecidos, visto que ambos estão posicionados no plano do chão a uma distância de 72 mm entre si. Os pontos intermédios foram seleccionados tendo em conta o espaço de trabalho da perna e definem de forma grosseira o movimento pretendido para a perna em fase de balanço.

Importante mencionar que o plano de chão é um plano xOy à distância de 75 mm, no sentido negativo do eixo dos z 's (segundo o sistema de coordenadas geral).

Segundo a Figura 5.2 os pontos de controlo da fase de balanço são:

$$(x_e, y_e, z_e) = \begin{cases} P1(-36; 0; -75) \\ P2(0; 0; -45) \\ P3(50,9; 0; -58,1) \\ P4(36; 0; -75) \end{cases}$$

O que implica através da cinemática inversa os seguintes ângulos das juntas:

$$(\phi_1, \theta_2, \theta_3) = \begin{cases} P1(0^\circ; 72,07^\circ; 80,71^\circ) \\ P2(0^\circ; 15,71^\circ; 131,79^\circ) \\ P3(0^\circ; 0^\circ; 90^\circ) \\ P4(0^\circ; 20,79^\circ; 80,71^\circ) \end{cases}$$

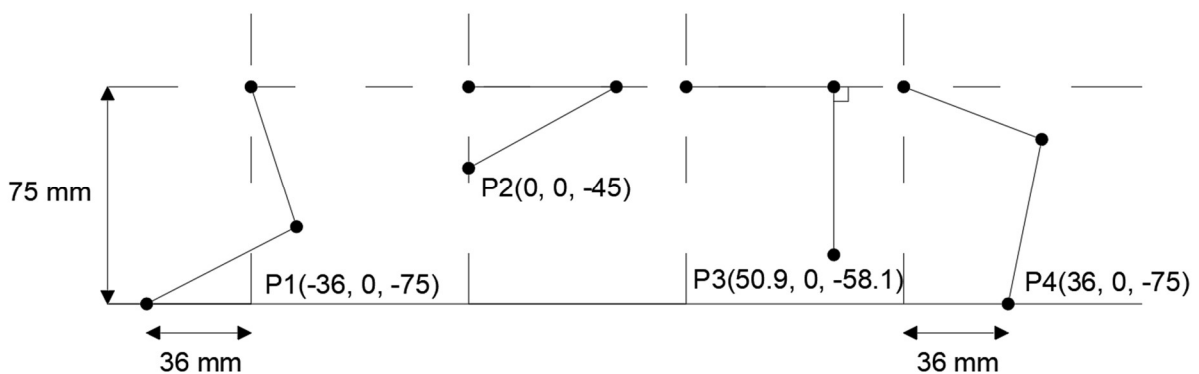


Figura 5.2- Pontos de controlo da fase de balanço

Estes pontos de controlo definem um polinómio de *Bernstein* de terceiro grau e a partir deles é possível construir o seguinte sistema de equações (43) que permite desenhar a curva de *Bezier* da trajetória do pé em fase de balanço.

$$\begin{cases} xe = (1-t)^3 P1[1] + 3(1-t)^2 t \times P2[1] + 3(1-t)t^2 \times P3[1] + t^3 \times P4[1] \\ ye = (1-t)^3 P1[2] + 3(1-t)^2 t \times P2[2] + 3(1-t)t^2 \times P3[2] + t^3 \times P4[2] \\ ze = (1-t)^3 P1[3] + 3(1-t)^2 t \times P2[3] + 3(1-t)t^2 \times P3[3] + t^3 \times P4[3] \end{cases} \quad (43)$$

A iteração da variável t entre zero e um e a aplicação do seu valor no sistema de equações (43) permite obter um conjunto de pontos que permitem descrever a trajetória desejada para o pé segundo uma curva de *Bezier*. Na Figura 5.3 é possível observar a trajetória gerada em comparação à trajetória definida pelos pontos de controlo selecionados. Como não se trata de uma marcha de viragem, o ângulo ϕ_1 permanece sempre constante e por isso a trajetória pode ser analisada no plano.

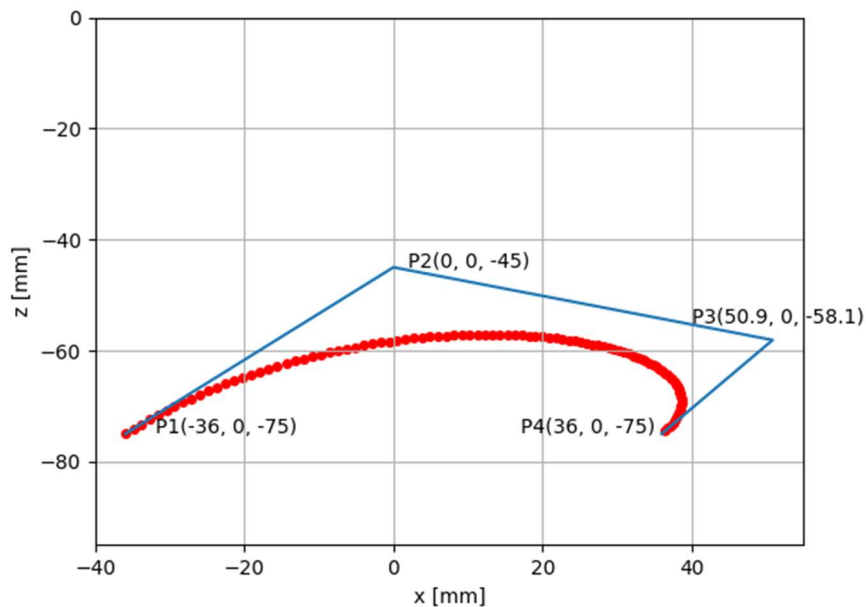


Figura 5.3- Curva de *Bezier* da trajetória da fase de balanço através dos pontos de controlo selecionados

O ângulo das juntas em relação ao tempo fornece informação sobre qual deverá ser o comportamento esperado por cada junta ao longo do tempo e ainda perceber a evolução da velocidade e aceleração angular. Através da cinemática inversa é possível calcular o ângulo das juntas em qualquer um dos pontos da trajetória do pé e relacionar este ângulo com o valor do elemento iterativo t de modo a obter a evolução temporal do ângulo das juntas (Figura 5.4).

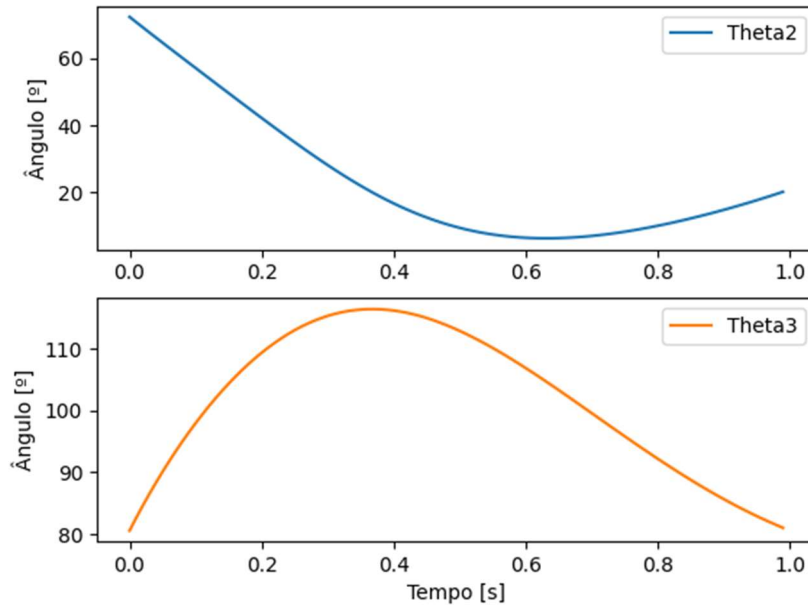


Figura 5.4- Evolução temporal dos ângulos das juntas na fase de balanço

5.2.2.FASE DE APOIO

Ao nível do módulo bípede a fase de apoio (também chamada fase de suporte) deve ocorrer em simultâneo com a fase de balanço, mas em pernas opostas. Na fase de apoio, o pé mantém sempre o contacto com o chão, para facilitar e garantir maior tolerância na perna oposta em fase de balanço. A fase de apoio provoca uma ligeira subida do módulo bípede enquanto este avança. Visto que, a origem do sistema de coordenadas geral se encontra na junta do quadril da coxa, este ponto é fixo do ponto de vista cinemático, pelo que, para definir a trajetória na fase de apoio é preciso considerar que a perna afunda no chão enquanto o pé se move para trás. Este é um movimento relativo visto que o pé não se pode mover pois está sempre em contacto com o chão e na prática resulta num movimento ascendente e posterior do módulo bípede.

Como na fase de apoio o pé permanece sempre em contacto com o chão, o movimento é muito mais controlado, pelo que, não existe necessidade de definir tantos pontos de controlo como na fase de balanço, por este motivo, apenas foram usados três pontos de controlo. A fase de apoio é uma fase conjugada com fase de balanço e por esse motivo o ponto inicial deve ser o ponto final da fase de balanço e o ponto final o ponto inicial da fase de balanço, deste modo, apenas é necessário arbitrar um ponto intermédio.

Segundo a Figura 5.5 os pontos de controlo da fase de apoio são:

$$\begin{cases} P1(36; 0; -75) \\ P2(0; 0; -80) \\ P3(-36; 0; -75) \end{cases}$$

O que implica através da cinemática inversa os seguintes ângulos das juntas:

$$(\phi_1, \theta_2, \theta_3) = \begin{cases} P1(0^\circ; 20,79^\circ; 80,71^\circ) \\ P2(0^\circ; 43,59^\circ; 85,80^\circ) \\ P3(0^\circ; 72,07^\circ; 80,71^\circ) \end{cases}$$

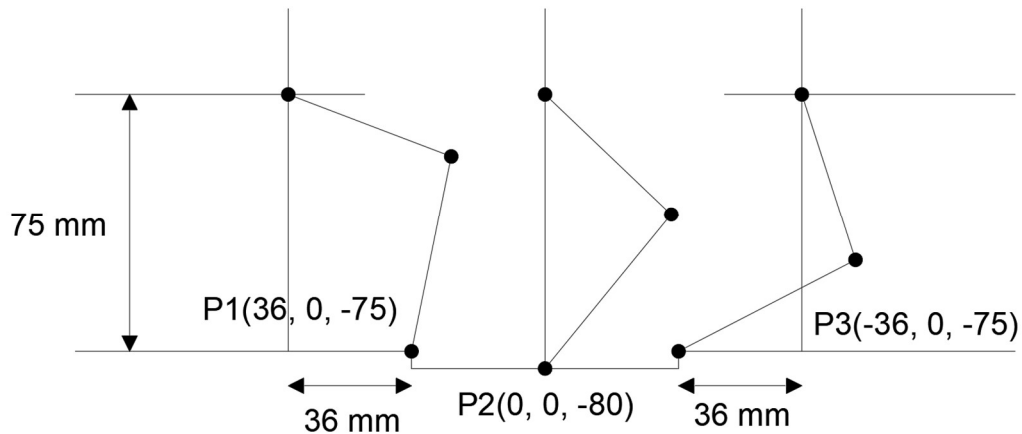


Figura 5.5- Pontos de controlo da fase de apoio

Estes pontos de controlo definem um polinómio de *Bernstein* de segundo grau e a partir deles é possível construir o seguinte sistema de equações (44) que permite desenhar a curva de *Bezier* da trajetória do pé em fase de apoio.

$$\begin{cases} xe = (1 - t)^2 P1[1] + 2(1 - t)t \times P2[1] + t^2 \times P3[1] \\ ye = (1 - t)^2 P1[2] + 2(1 - t)t \times P2[2] + t^2 \times P3[2] \\ ze = (1 - t)^2 P1[3] + 2(1 - t)t \times P2[3] + t^2 \times P3[3] \end{cases} \quad (44)$$

A iteração da variável t entre zero e um e a aplicação do seu valor no sistema de equações (44) permite obter um conjunto de pontos que permitem descrever a trajetória desejada para o pé segundo uma curva de *Bezier*. Na Figura 5.6 é possível observar a trajetória gerada em comparação à trajetória definida pelos pontos de controlo selecionados.

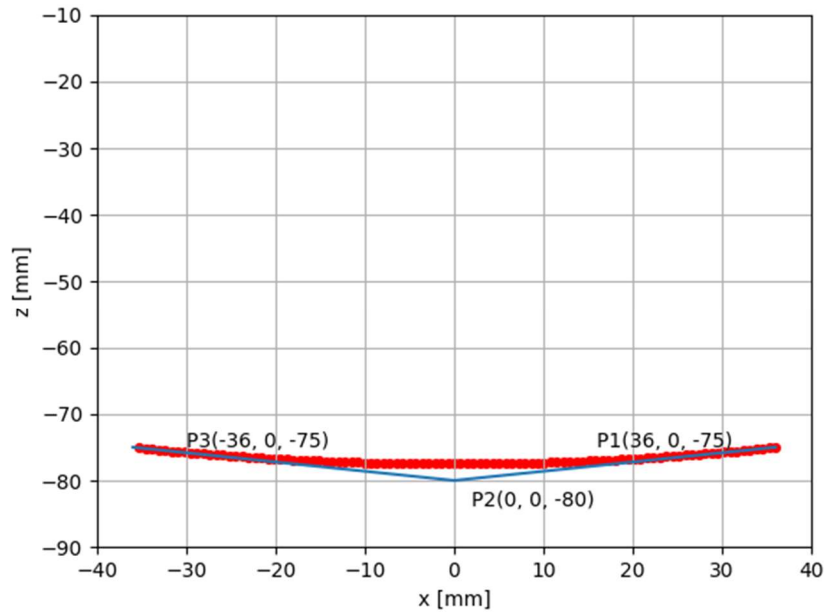


Figura 5.6- Curva de *Bezier* da trajetória da fase de suporte através dos pontos de controlo seleccionados

Novamente, através da cinemática inversa é possível relacionar os pontos desta curva (*i.e.* a posição do pé) com os ângulos das juntas correspondentes para cada instante de tempo, o que permite obter a variação temporal do ângulo das juntas (Figura 5.7).

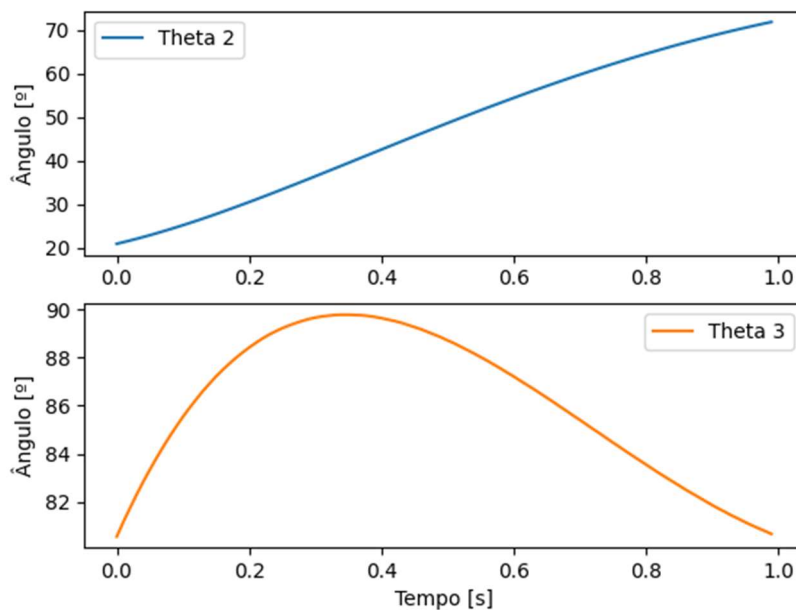


Figura 5.7- Evolução temporal dos ângulos das juntas na fase de apoio

5.2.3.PASSO ZERO

O propósito do passo zero é assegurar a transição natural e suave entre a posição inicial do robô e o início da marcha. O passo zero ocorre sempre no início da marcha e coloca uma das pernas na posição máxima de avanço posterior e outra na posição máxima de avanço

anterior. As posições finais do passo zero são, respetivamente, as posições iniciais da fase de suporte e fase de balanço. A Figura 5.8 apresenta os pontos de controlo da fase de balanço e fase de suporte do passo zero.

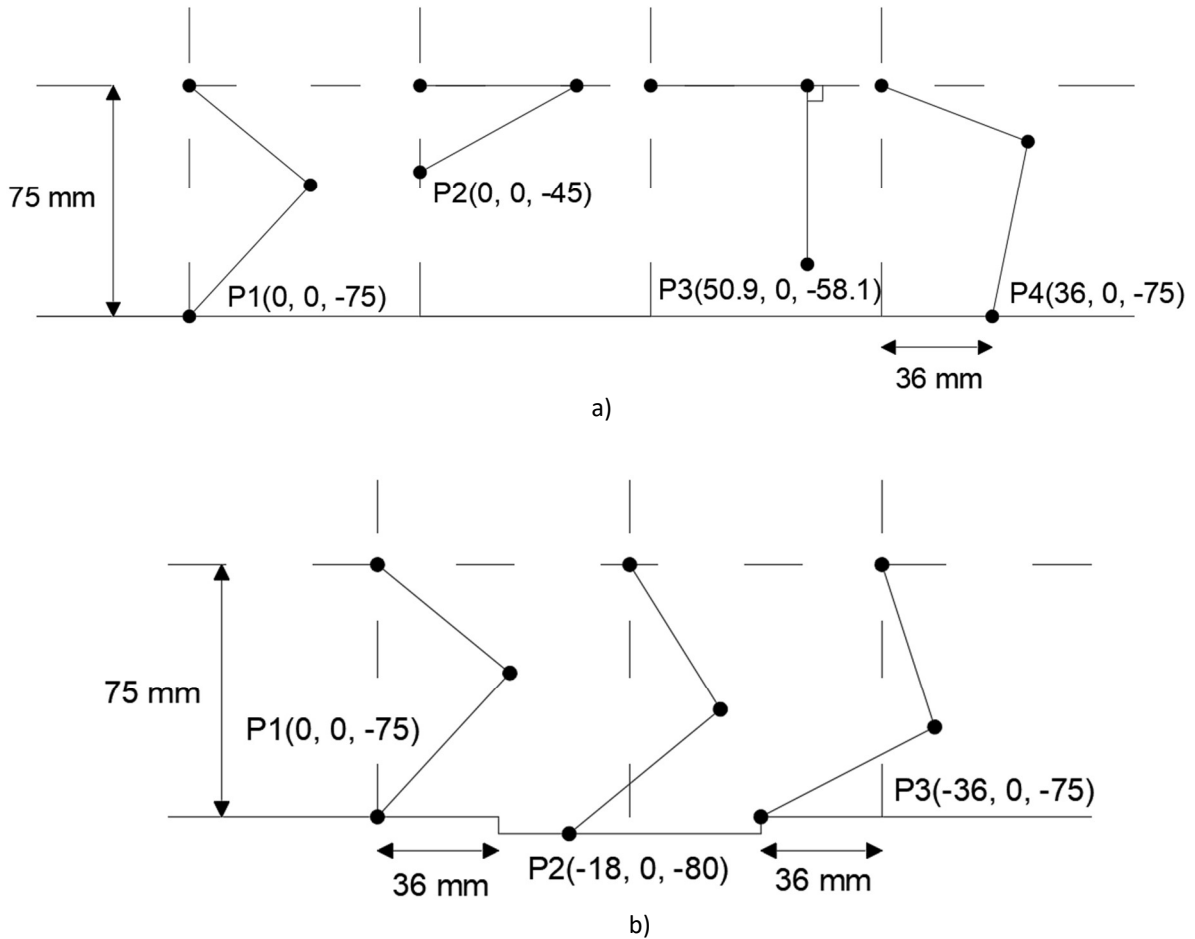


Figura 5.8- Pontos de controlo do passo zero da: a) fase de balanço; b) fase de suporte

A Figura 5.9 apresenta de igual modo as curvas de *Bezier* geradas com base nos pontos de controlo seleccionados.

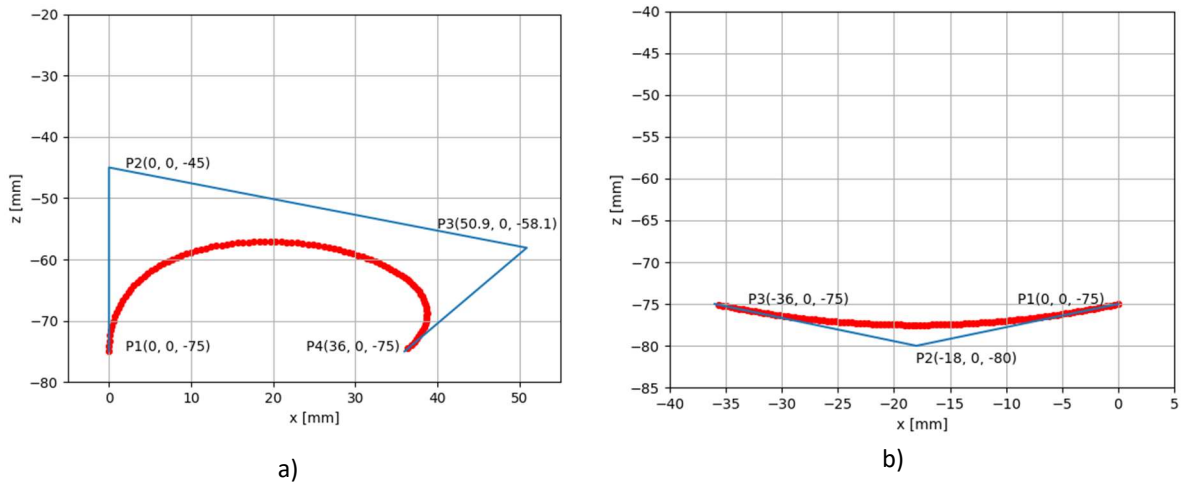


Figura 5.9- Curva de *Bezier* do passo zero: a) fase de balanço; b) fase de suporte

5.3. TRAJETÓRIA AO NÍVEL DO MÓDULO BÍPEDE

A trajetória ao nível do módulo bípode é o resultado da conjugação do movimento de ambas as pernas (Figura 5.10).

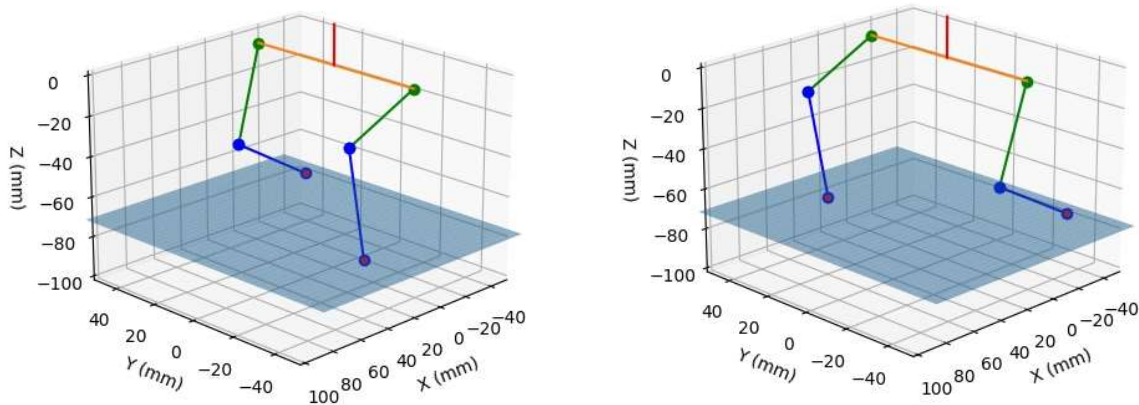


Figura 5.10- Simulação das pernas do módulo bípode

As pernas estão desfasadas uma da outra e em locais espacialmente distintos, graficamente isto é possível observar através da Figura 5.11.

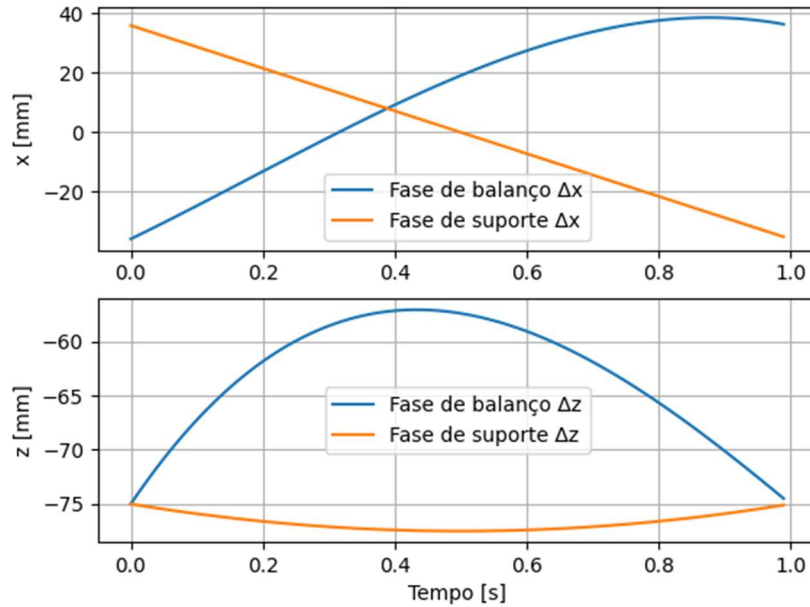


Figura 5.11- Curva de *Bezier* da trajetória da fase de apoio através dos pontos de controlo seleccionados

A Figura 5.11 permite perceber em cada instante qual deve ser a posição espacial do pé em fase de balanço e a posição relativa do pé em fase de suporte. A informação contida nestes gráficos pode ser convertida, através da cinemática inversa, no deslocamento angular temporal das juntas, o que permite saber com precisão qual deve ser a posição angular de cada atuador do módulo bípode num determinado instante (Figura 5.12) de modo a garantir uma marcha bem-sucedida.

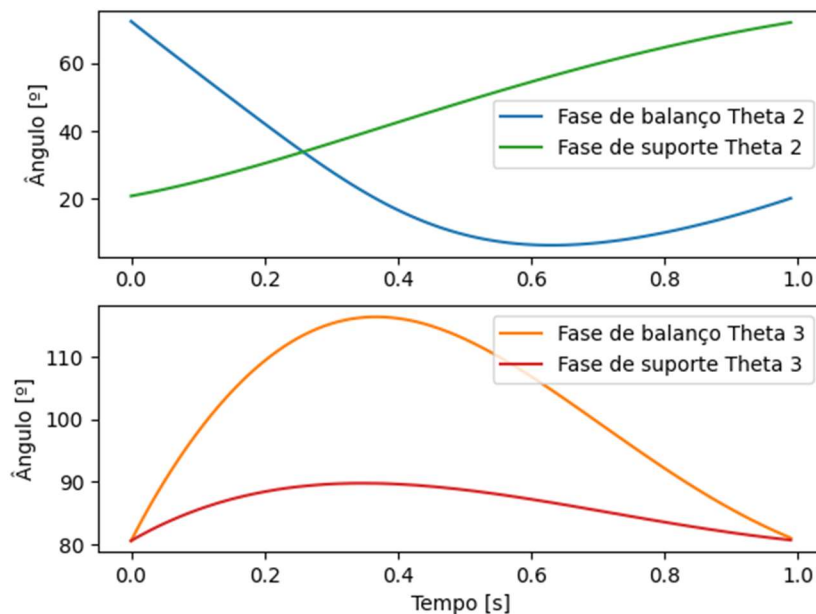


Figura 5.12- Deslocamento temporal angular para cada um dos atuadores em cada uma das fases

A trajetória do módulo bípode depende, como já abordado, da sincronização e do desfasamento das duas pernas. A Figura 5.13 apresenta a trajetória do módulo bípode segundo um referencial arbitrário e exterior ao módulo (e por isso diferente do referencial do sistema de coordenadas gerais).

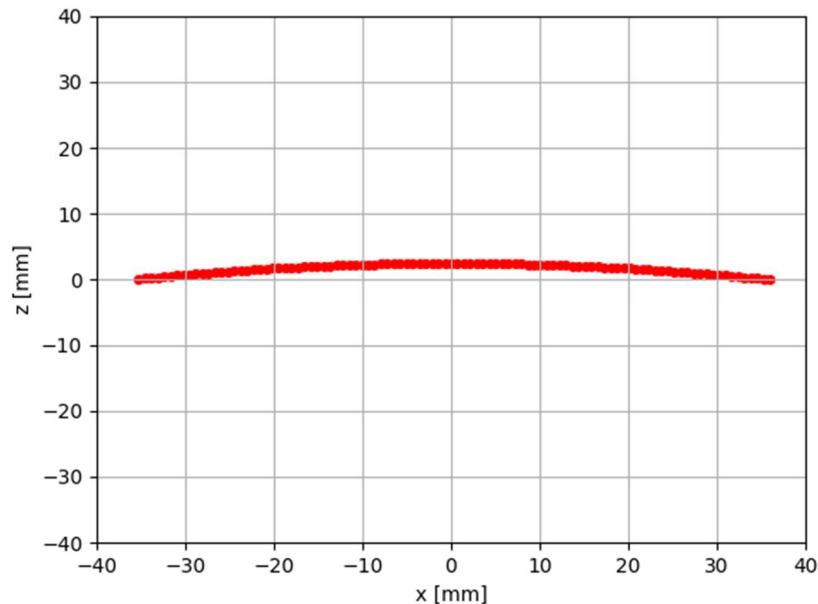


Figura 5.13- Movimento geral do módulo bípode segundo um referencial arbitrário e exterior ao módulo

Através da análise da Figura 5.13 é possível compreender que o movimento do módulo é um movimento parabólico, simétrico da fase de apoio, em que ao fim de uma passada o módulo translada 72 mm, tamanho da passada definido, e que atinge uma altura máxima de 2,50 mm em relação à posição inicial do módulo.

5.4. MARCHA DE VIRAGEM

A capacidade de alterar a direção é essencial na locomoção de um robô para que este possa navegar o espaço, desviar-se de objetos ou barreiras, encontrar novas soluções para executar uma trajetória e aumentar o número de cenários em que é viável a sua utilização. A marcha de viragem é o processo que permite ao robô mudar de orientação e por sua vez alterar a direção de locomoção. O ângulo da junta ϕ_1 controla a orientação dos módulos bípodes, alterando, de igual modo, a orientação de todos os módulos é possível mudar a direção de movimento do robô.

A marcha de viragem do ROHMOBI é distinta dos demais robôs hexápodes, pelo facto da orientação das pernas não ser independente, mas controlada pela orientação dos módulos

bípedes. Para que possa haver alteração da orientação dos módulos é então necessário que em cada módulo uma das pernas permaneça estática a servir de pivô à rotação, enquanto a outra perna executa uma fase de balanço, ambos os eventos devem ser coordenados com a variação do ângulo da junta ϕ_1 . O resultado da marcha de viragem é a trajetória da perna em fase de balanço da Figura 5.14.

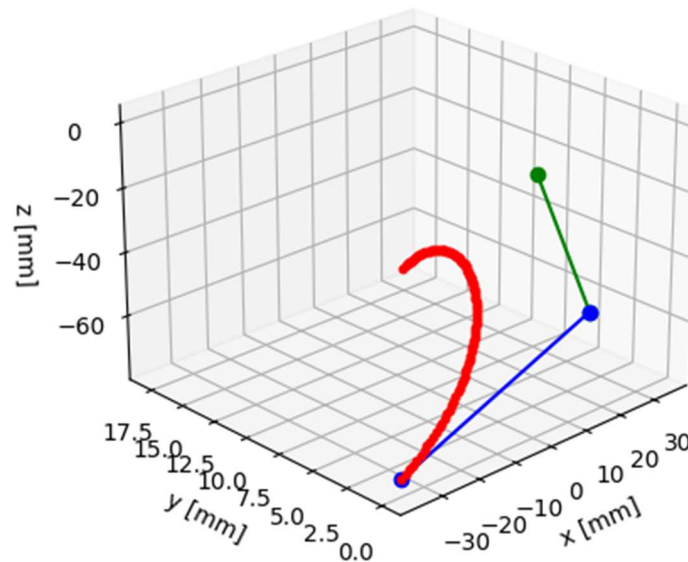


Figura 5.14- Trajetória de rotação da perna em fase de balanço

Se todos os módulos realizarem a mesma marcha de viragem simultaneamente, com três pernas em fase de balanço e três pernas em fase pivô, o resultado será todos os módulos com orientação igual, mas distinta da original, em que a nova linha de trajetória está desfasa da linha de trajetória original por $\Delta\phi_1$ (variação angular da junta ϕ_1).

Para que o robô vire para a direita os módulos deverão girar no sentido positivo dos atuadores, com as pernas da direita em posição pivô e as pernas da esquerda em fase de balanço, como na Figura 5.15.

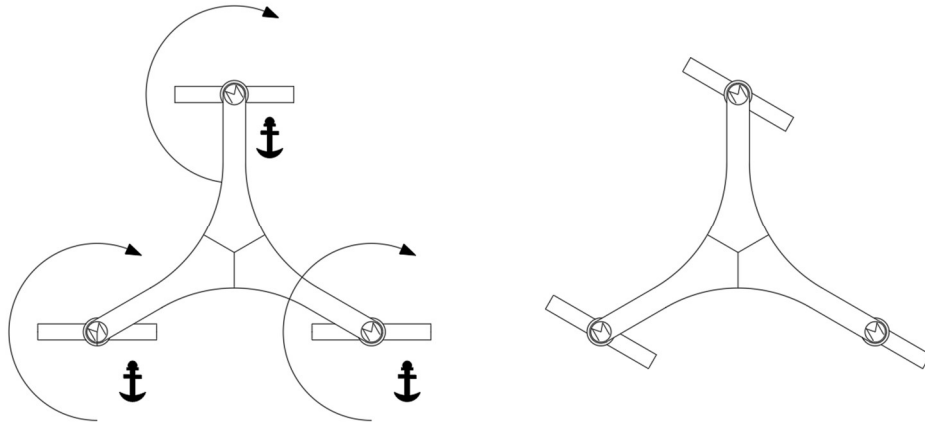


Figura 5.15- Marcha de viragem à direita

Para que o robô vire para a esquerda os módulos deverão girar no sentido negativo dos atuadores, com as pernas da esquerda em posição pivô e as pernas da direita em fase de balanço, como na Figura 5.16.

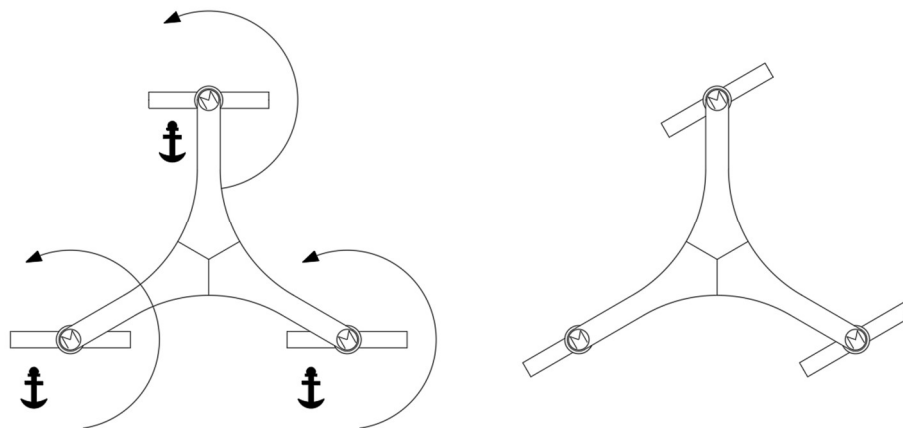


Figura 5.16- Marcha de viragem à esquerda

Em ambos os casos o raio de viragem é igual à distância entre a perna e o centro de rotação do módulo bípode. Existem outras estratégias de marcha de viragem que poderiam ser implementadas no ROHMOBI, contudo, esta estratégia para além de ser mais fácil de implementar, permite ainda alterar a orientação do robô em posição *quasi* estática e com um raio de curvatura muito reduzido.

5.5. CONTROLO

Serve o presente capítulo para explorar o controlo do *ROHMOBI*, partindo da idealização e construção do controlo e terminando na sua execução. O principal objetivo do controlo no presente projeto é colocar o protótipo físico do *ROHMOBI* a executar uma marcha simples em superfície plana, através de um controlo de malha aberta. O controlo é executado por um código em *C++* que é alimentado numa placa de processamento *Arduino UNO* (Apêndice B).

5.5.1. CIRCUITO ELETRÓNICO

O circuito eletrónico (Apêndice A) é responsável por controlar e alimentar eletricamente todos os componentes eletrónicos que constituem o robô. A Figura 5.17 representa o circuito eletrónico do *ROHMOBI*, o qual é constituído por uma placa *Arduino UNO*, uma placa *servo driver Adafruit PCA9685*, um sensor IMU *MPU9255* da *Waveshare*, um sensor para medição de corrente da *Adafruit ACS723* e quinze servomotores. A placa *Arduino UNO* funciona como o cérebro do robô e é por isso responsável pelo processamento do código de controlo, o que resulta na geração de um conjunto de instruções que são transmitidas aos servomotores para execução. A placa *Arduino Uno* está ligada a um computador portátil através de uma conexão USB, de modo a receber os comandos do teclado do computador que controlam os movimentos do *ROHMOBI*. A placa *Adafruit PCA9685* tem como função fornecer energia a todos os atuadores e estabelecer a comunicação entre a placa *Arduino Uno* e os quinze servomotores, através da transmissão dos sinais PWM que controlam os servos. O sensor IMU é utilizado para medir a velocidade angular do robô segundo os diferentes eixos, enquanto o sensor de corrente serve para medir em cada instante qual a corrente que o robô puxa. Devido à corrente máxima de funcionamento do sensor de corrente este não pode ser alimentado em série com os restantes componentes sistemas eletrónicos pelo que necessita de uma fonte de alimentação própria. Por este motivo o robô é alimentado por uma fonte de tensão através de dois canais distintos, o robô é alimentado a 5.5V enquanto o sensor de corrente é alimentado por outro canal a 5V.

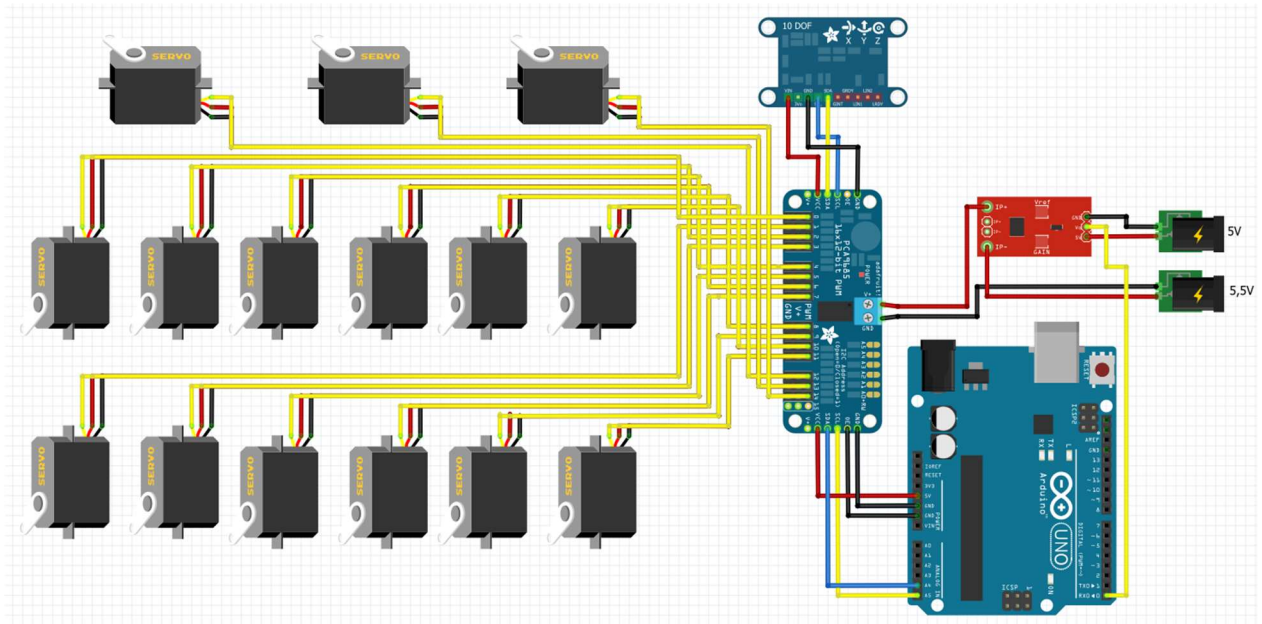


Figura 5.17- Circuito eletrônico do ROHMOBI

5.5.2.ALGORITMO

O fluxograma da Figura 5.18 é uma representação esquemática do funcionamento do algoritmo que permite controlar a locomoção do ROHMOBI.

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípodes

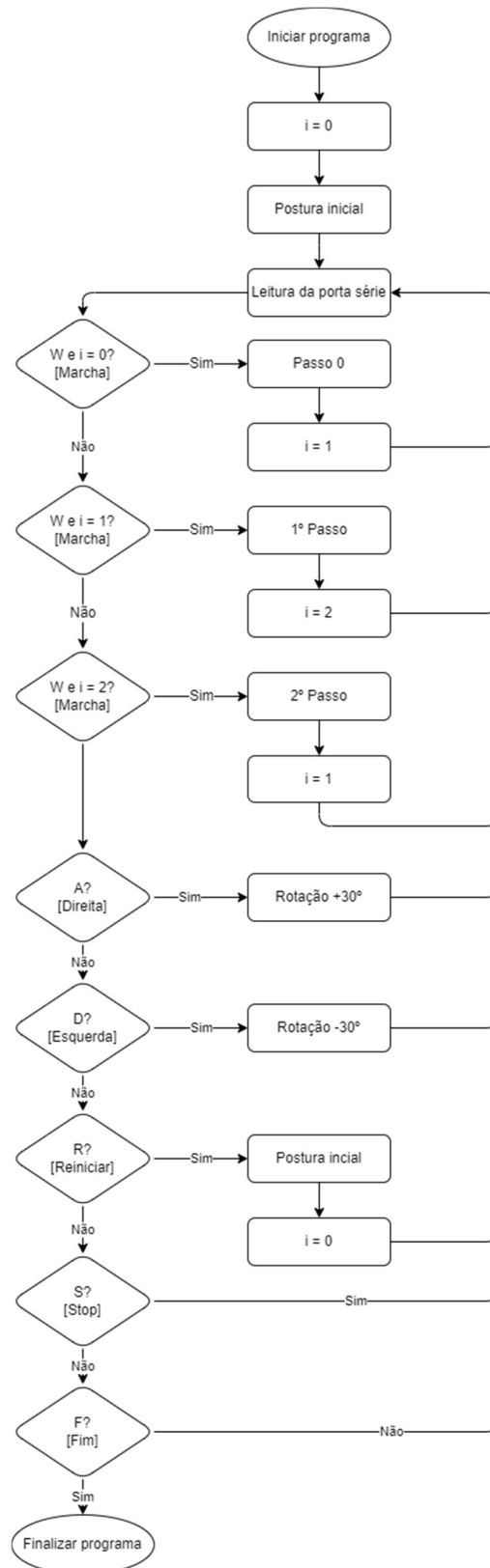


Figura 5.18- Fluxograma do controlo de locomoção do ROHMOBI

Através de análise do fluxograma é possível perceber que a evolução do algoritmo é dependente de um fator i e de comandos provenientes do teclado *QWERTY* do computador portátil que é ligado ao *Arduino Uno*.

O fator i é um fator iterativo que varia entre 0 e 2 e tem como função comandar qual a tipologia do passo:

- $i = 0$: passo zero;
- $i = 1$: perna 1 em fase de balanço e perna 2 em fase de suporte;
- $i = 2$: perna 1 em fase de suporte e perna 2 em fase de balanço;

Existem seis comandos possíveis que permitem controlar os movimentos do ROHMOBI provenientes do teclado *QWERTY* do computador portátil conectado ao *Arduino UNO* (Figura 5.19). A leitura da porta série permite receber estes comandos diretamente do teclado, os quais são codificados em decimal segundo a tabela ASCII (Anexo I).

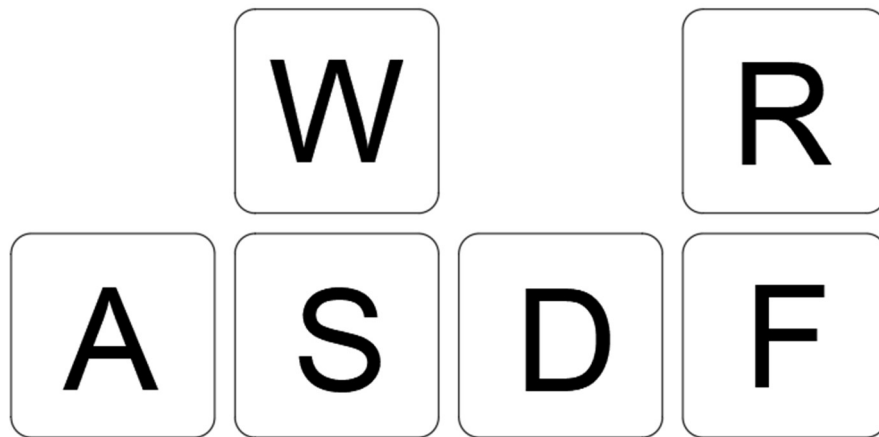


Figura 5.19- Teclas do teclado *QWERTY* que permitem comandar o ROHMOBI

- W- Comando avançar: permite iniciar a marcha do robô, dependendo da ocasião em que for acionado pode iniciar marcha desde o início, desde a última posição ou desde a posição do comando, isto é controlado por um fator iterativo i ;
- S- Comando parar: permite parar o robô em qualquer posição, se posteriormente for ativado o comando W o robô retoma a marcha a partir da posição em que ficou parado;
- D- Comando virar à direita: permite ao robô executar a marcha de viragem: este processo é executado em incrementos de $+30^\circ$, o comando W deverá ser ativado

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípedes

novamente para retomar a marcha após se obter a orientação dos módulos desejada;

- A- Comando virar à esquerda: permite ao robô executar a marcha de viragem: este processo é executado em incrementos de -30° , o comando W deverá ser ativado novamente para retomar a marcha após se obter a orientação dos módulos desejada;
- R- Comando reiniciar: este comando envia todos os módulos para a postura inicial e permite em qualquer ponto reiniciar o processo da marcha;
- F- Comando Finalizar: termina o programa, útil para situações de emergência.

5.5.3.FUNÇÕES

As funções são os blocos de construção do código e a execução de qualquer comando depende da interação entre várias funções. Neste subcapítulo são apresentadas as principais funções do código de controlo e o propósito de cada uma.

WRITESEVROS

Função que permite a interação com a placa *Adafruit PCA9685* e indica a posição para onde um determinado servo se deverá deslocar.

BEGINSEVROS

Função responsável por inicializar os servos e definir a sua frequência de trabalho, esta frequência de trabalho é característica do modelo de servomotor.

DEGSERVO

Os limites angulares definidos para as juntas no estudo cinemático (subcapítulo 4.4) estão desfasados do limite angular de 0° a 180° dos servos motores, pelo que estes ângulos deverão ser convertidos para a realidade dos servos motores.

- DegServo_p1: conversão angular para os ângulos da junta ϕ_1
- DegServo_t2: conversão angular para os ângulos da junta θ_2

CONVERTLEG2

As pernas no módulo bípede são simétricas segundo o centro de rotação, por este motivo o movimento de uma perna é o espelho da outra. Contudo, devido às limitações angulares do servo ($0^\circ - 180^\circ$) é necessário fazer conversão dos ângulos para a perna complementar do módulo bípede (designada como perna 2 no código).

CONVERT

Funções simples que permitem a conversão dos ângulos entre radianos e graus, especialmente útil pois as funções trigonométricas utilizam radianos, mas a posição dos servos é definida por graus.

- `Convert2rad`: converte ângulos de graus para radianos
- `Convert2deg`: converte ângulos de radianos para graus

TIMESTEP

Esta função permite com base no período da passada selecionado e com base na frequência de iteração do *void loop* calcular qual deve ser o *time step* a utilizar no processo iterativo que permite gerar a curva de *Bezier*. Na prática a função *TimeStep* permite realmente definir o período da passada (Apêndice C).

FORKIN

A função *ForKin* permite fazer o cálculo da cinemática direta e com base nos ângulos das juntas obter a posição do *end effector* da perna do robô.

FIRSTSWING E FIRSTSUPPORT

A fase do passo zero permite a transição suave entre a posição de *stance* e a locomoção normal do robô. Esta fase consiste em colocar uma das pernas na posição inicial da fase de suporte e outra na posição inicial da fase de balanço. O passo zero possui pontos de controlo da curva de *Bezier* próprios e distintos da locomoção normal do robô.

- `FirstSwing`: função responsável por transferir a perna da posição de *stance* para a posição inicial de suporte

- FirstSupport: função responsável por transferir a perna da posição de *stance* para a posição inicial de balanço

SWINGPHASE E SUPPORTPHASE

Estas funções são responsáveis pelo cálculo dos pontos da curva de *Bezier* da fase de suporte e balanço. Os ângulos das juntas são determinados com base nos pontos espaciais da curva e a cinemática inversa, estes ângulos são escritos (através da função *writeServos*) como a nova posição do servo, a cada iteração do ciclo.

- SwingPhase: cálculo dos pontos da trajetória e respetivos ângulos das juntas na fase de balanço
- SupportPhase: cálculo dos pontos da trajetória e respetivos ângulos das juntas na fase de suporte

STANCE PHASE

Esta função é responsável por manter a posição *stance* em todas as pernas. Esta função é particularmente útil para quando se pretende girar o robô, em que a perna pivô permanece na posição de *stance*, ou para quando se pretende reiniciar o movimento.

5.6. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

O capítulo 5 teve como propósito definir a trajetória do robô e planejar e implementar o controlo do mesmo. A marcha do ROHMOBI é do tipo trípede, uma marcha que permite maior velocidade, mas reduz a flexibilidade do robô. Na marcha trípede existem sempre três pernas em contacto com o chão que alternam entre si. Como o movimento geral das pernas é repetido em todos os módulos bípedes, o ponto de partida para a construção do controlo da trajetória foi a perna singular. A passada de uma perna é composta por duas fases, a fase de suporte e a fase de balanço, a trajetória da perna em cada uma das fases é definida através de curvas de *Bezier*, construídas através de pontos de controlo. O número de pontos de controlo foi selecionado conforme o grau de precisão exigido para cada fase, enquanto a posição destes pontos foi selecionada de modo a representar de forma grosseira o movimento pretendido para a perna em cada uma das fases, respeitando a altura do robô e o comprimento da passada. A fase de balanço possui quatro pontos de controlo e a fase de suporte três. Neste capítulo introduziu-se também o conceito do passo zero, este passo

permite um movimento mais natural do robô quando este inicia a marcha ou parte da posição inicial. A mudança de direção é essencial para um robô poder navegar o espaço, como este robô possui uma cinemática distinta foi preciso desenvolver uma marcha de viragem inovadora que permite mudar a orientação ao nível do módulo bípede e deste modo alterar a orientação do robô. O controlo vai permitir sincronizar e comandar todas estas funções distintas do ROHMOBI, para compreender o funcionamento e implementação do controlo é apresentado um fluxograma, assim como os comandos e funções que permitem a execução do algoritmo. O robô reage a comandos do utilizador para sincronizar as funções do algoritmo e comandar os atuadores de modo a obter o movimento desejado.

6. CONSTRUÇÃO E TESTE DO PROTÓTIPO

Neste capítulo serão apresentados os vários passos que conduziram à construção do protótipo do ROHMOBI. Partindo do desenvolvimento da ideia que resultou no desenho final do protótipo após várias iterações, passando pela descrição dos vários componentes constituintes e a validação dos atuadores seleccionados e terminando na montagem e testagem do protótipo físico do ROHMOBI.

6.1. MODELO FINAL

O principal propósito do presente trabalho é o de provar um conceito através da construção e teste de um protótipo físico, por esse motivo a validação estrutural nunca foi uma preocupação e o principal fio condutor para o desenvolvimento do desenho do protótipo foram as necessidades estruturais ao nível funcional. É importante destacar o processo iterativo que ocorreu no desenvolvimento do desenho final (Figura 6.1) como resultado da maior definição das necessidades funcionais do protótipo, da familiarização com os processos de fabrico disponíveis e o amadurecimento geral da ideia motriz por de trás do ROHMOBI.

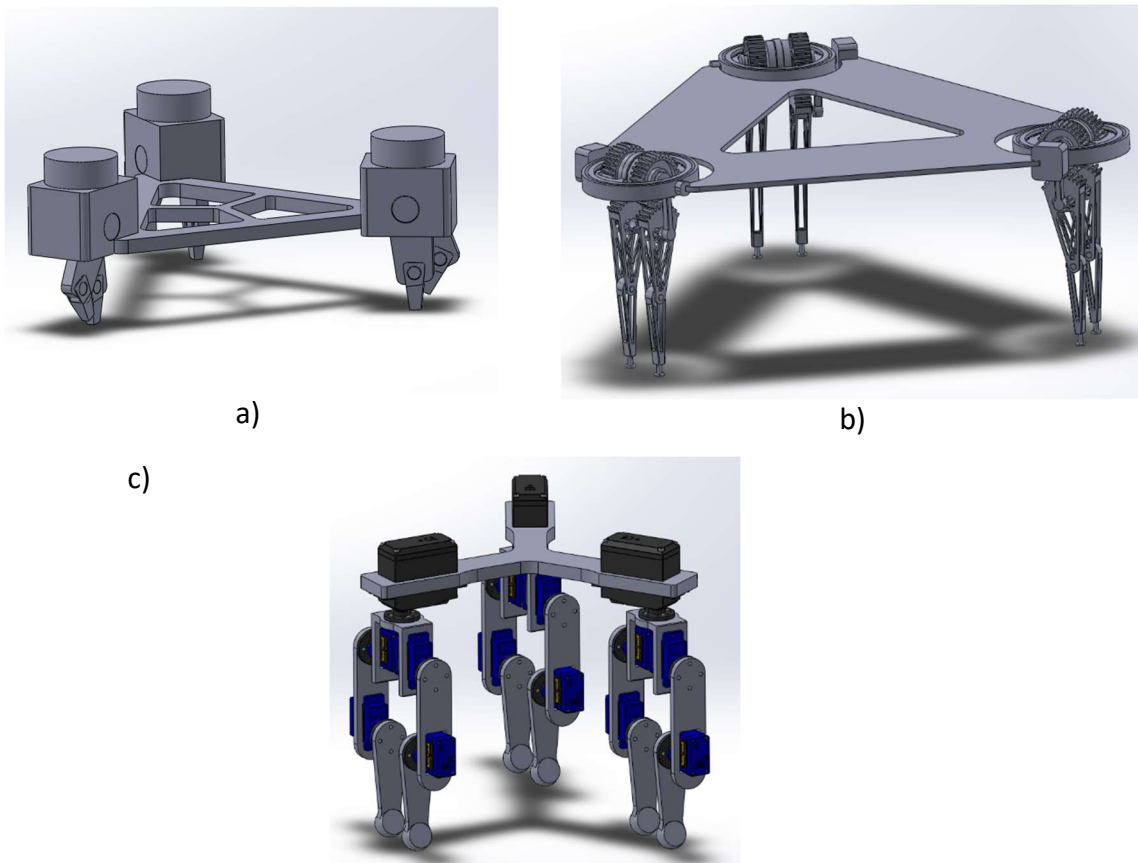


Figura 6.1- Evolução do desenho do ROHMOBI desde a) até c)

O desenho final do *ROHMOBI* adquire a configuração apresentada na Figura 6.2 que foi resultado do processo aditivo do conhecimento adquirido em cada uma das iterações do desenho do protótipo robótico.

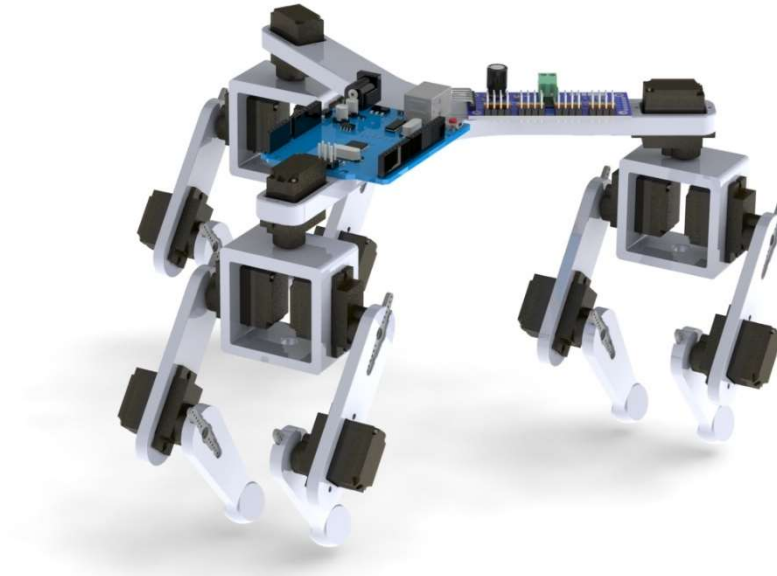
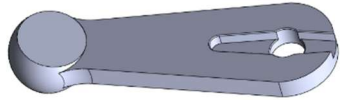



Figura 6.2- Modelo final do ROHMOBI

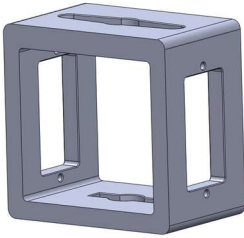

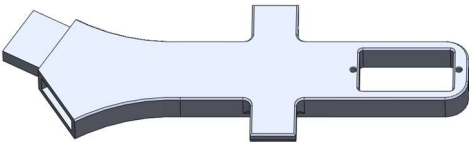
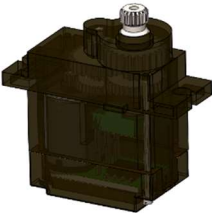
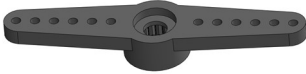



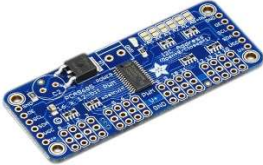
6.2. COMPONENTES



O ROHMOBI é composto por onze componentes distintos e noventa e cinco peças, totalizando o peso de 410.67 g. A Tabela 6.1 apresenta sucintamente os onze componentes constituintes e o peso unitário dos mesmos (Apêndice D).

Tabela 6.1- Componentes constituintes do ROHMOBI

Nome	Qtd	Peso unitário (g)	
Perna	6	7,31	
Coxa	6	7,12	

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípedes

Pélvis	3	10,47	
Base 1/3	2	11,54	
Base 1/3 frente	1	12,42	
Atuador MG90S	15	13,40	
Acoplador	15	0,40	
Parafuso de montagem	30	0,21	
Parafuso acoplador	15	0,22	
Arduino UNO	1	25,00	
Adafruit PCA9685	1	9,00	

<i>Waveshare</i>			
<i>10 DOF IMU</i>	1	3,00	
<i>Sensor (B)</i>			
<i>Adafruit</i>			
<i>ACS723</i>	1	3,58	

6.3. ATUADORES

Os atuadores são os músculos do robô e são os verdadeiros responsáveis pela geração de movimento. Na maior parte dos projetos mecânicos os atuadores são escolhidos para responder às necessidades mecânicas do projeto, contudo, como a maior condicionante deste projeto foi manter um custo final de projeto baixo, primeiro foram selecionados os atuadores e após atingir um desenho final, é que estes foram validados com base nas necessidades mecânicas.

6.3.1. REQUISITOS

Para proceder à seleção do atuador mais adequado ao projeto é necessário estabelecer os requisitos e a importância de cada um deles. Um método eficaz para simplificar este processo é utilizar uma tabela de pontuação de conceitos como a Tabela 6.2. Esta tabela exprime os requisitos necessários para os atuadores e o seu peso relativo. Os modelos de atuadores em comparação na tabela têm dimensões semelhantes para tornar a comparação mais lógica.

Tabela 6.2- Ponderação pontuada entre diferentes tipos de atuadores

		Atuadores			
Crítérios seleção	Peso	Micro servomotor SG90	Micro servomotor MG90S	Motor de passo NEMA 17	Motor DC M260
Preço	30%	4	3,5	1	5
Compacto	25%	5	5	3	4
Controlo	20%	5	5	4	1
Durável	15%	3	4	5	3
Preciso	10%	3	4	5	1

Total	100%	4,2	4,3	3,1	3,25
Ranking		2º	1º	4º	3º

Com base nas pontuações da Tabela 6.2 o atuador mais indicado a utilizar no protótipo do ROHMOBI é o micro servomotor MG90S (Figura 6.3.)



Figura 6.3- Micro servo motor MG90S [49]

6.3.2. ESPECIFICAÇÕES

O servo motor MG90S é um micro servomotor com engrenagens metálicas controlado por PWM e possui as características apresentadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3- Especificações do micro servo motor MG90S [50]

Peso	13,40 g	
Dimensões	22,5 x 12 x 35,5 mm	
Amplitude de movimento	180°	
Frequência de operação	50 Hz	
Tensão de operação	4,8 V	6V
Velocidade angular de operação	0,1s/60°	0,08s/60°
Binário resistivo	0,18 N.m	0,22 N.m

6.3.3. VALIDAÇÃO ESTÁTICA

Este subcapítulo procede ao cálculo dos binários nas juntas em diferentes situações estáticas com base nas equações obtidas no subcapítulo 3.4.

O estudo estático não permite descrever com precisão os esforços que atuam no robô, isto porque um robô é um mecanismo e não uma estrutura e por isso está sujeito tanto a

esforços estáticos, como dinâmicos. Contudo, se na análise estática for aplicado um fator de segurança é possível validar dinamicamente o mecanismo com um bom grau de certeza. Para alcançar este fator de segurança considerou-se que cada uma das pernas do robô teria de suportar um terço do peso total do robô, o que equivale a um coeficiente de segurança de 1,61.

As equações (45) resultam do estudo realizado no subcapítulo 3.4 e permitem calcular o binário resistivo exigido em cada junta para uma determinada posição estática.

$$\begin{cases} M_{z1} = (l_1 \cdot v_2 - \overline{CG}_1 \cdot F_{g1}) \cdot \cos \theta_2 \\ M_{z2} = (l_2 \cdot F_N - \overline{CG}_2 \cdot F_{g2}) \cdot \cos \theta_{3A} \end{cases} \quad (45)$$

A posição do centro de gravidade é medida desde a posição da junta do membro em questão de modo a obter o braço da força. A posição do centro gravidade pode ser obtida automaticamente recorrendo ao modelo no *SolidWorks*, o que permite determinar uma posição mais correta visto que, nenhum dos membros tem uma área de secção, ou distribuição de massa, constante ao longo do seu comprimento (Apêndice E).

$$\begin{cases} \overline{CG}_1 = 37,72 \text{ mm} \\ \overline{CG}_2 = 26,22 \text{ mm} \end{cases}$$

A força gravítica enunciada nas equações (45) diz respeito à força exercida pela massa de cada um dos membros, $F_{g1} = 0,21 \text{ N}$ e $F_{g2} = 0,08 \text{ N}$, enquanto a força de reação normal diz respeito à força exercida pela massa que cada perna suporta, o que pelas considerações do fator de segurança é um terço da massa total do ROHMOBI, $F_N = 1,34 \text{ N}$.

A Tabela 6.4 apresenta os valores de binário em cada uma das juntas para três posições estáticas distintas, posição anterior extrema, posição posterior extrema e posição de *stance*.

Tabela 6.4- Momento resistivo nas juntas de uma perna do robô para diferentes posições estáticas

Posição	ϕ_1	°				N. m	
		θ_2	θ_3	M_{y1}	M_{y2}		
Posição anterior extrema	0	72,07	80,71	$-5,58 \cdot 10^{-2}$	$-3,05 \cdot 10^{-2}$		
Posição posterior extrema	0	20,79	80,71	$-2,05 \cdot 10^{-2}$	$4,30 \cdot 10^{-2}$		
Posição <i>stance</i>	0	39,34	93,31	$-3,98 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-2}$		

Com base na Tabela 6.3, o momento resistivo máximo dos servomotores MG90S varia entre 0,18 N.m e 0,22 N.m, consoante a tensão de alimentação. Isto significa que mesmo com

um fator de segurança de 1,61 os máximos binários a que os servomotores são sujeitos estão a uma ordem de grandeza de distância do binário resistivo máximo que estes atuadores são capazes de suportar.

6.4. CONSIDERAÇÕES DE DESIGN E MONTAGEM

Serve o presente capítulo para justificar a motivação funcional por de trás de várias escolhas de design tomadas aquando do aprimoramento do desenho final do protótipo físico do ROHMOBI (Figura 6.4).

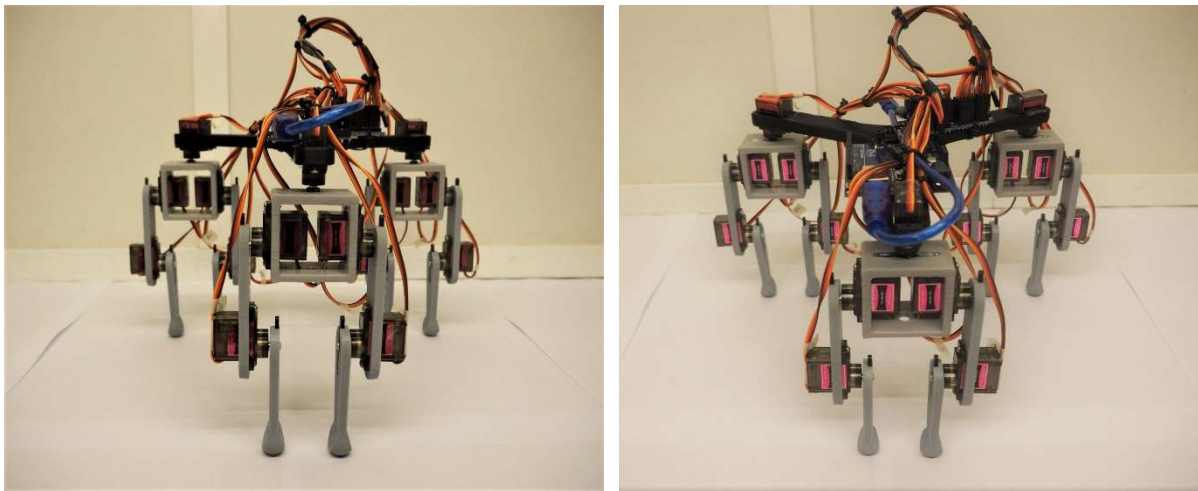


Figura 6.4- Fotos do protótipo físico do ROHMOBI

6.4.1. ACOPLAGEM

A transmissão de movimento do servomotor aos membros do robô foi desde o início do projeto um desafio, como resultado da necessidade de usar os acopladores incluídos com os servomotores. Foi necessário imaginar um design que tivesse a capacidade de aceitar este acoplador e garantir uma ligação estável e robusta, mas que ao mesmo tempo não impedisse a transmissão de movimento. A Figura 6.5 apresenta a solução encontrada que passou por colocar uma ranhura com a forma do acoplador no membro a ligar, deste modo a peça fica encarcerada entre o acoplador e o servomotor conferindo maior estabilidade à ligação. Para aumentar a qualidade da ligação, as pernas e coxas do ROHMOBI foram impressas utilizando o método de impressão 3D em resina, o que permitiu atingir um toleranciamento de 0,05 mm. Contudo, apesar do baixo toleranciamento utilizado, os sucessivos esforços transversais nos

testes práticos acabavam por provocar a desacoplamento parcial do acoplador e do membro, este facto resultava na diminuição de precisão da posição das pernas. Para solucionar este problema os acopladores foram fixados com cola de contacto a cada um dos membros, o que provou ser extremamente eficaz.

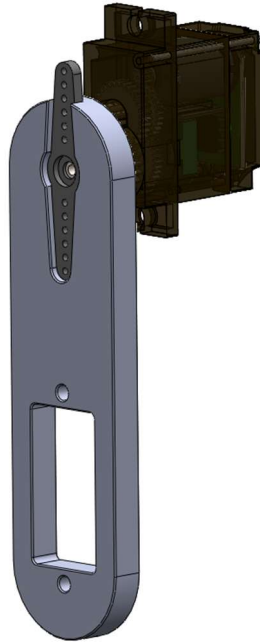


Figura 6.5- Sistema de acoplagem do servo a um dos membros do ROHMOBI

6.4.2. PERNA

O design da perna do robô exigiu considerações especiais visto que é a única parte do robô que estabelece contacto com o chão e por esse motivo, um elemento fulcral na qualidade do movimento gerado. O design da perna (Figura 6.6) elimina o grau de liberdade do tornozelo que tipicamente existe num modelo antropomórfico, esta escolha resulta da necessidade de simplificar o controlo do robô através da redução do número de graus de liberdade existentes. Para colmatar a ausência da junta do tornozelo o pé do robô tem um formato semiesférico, este design permite que na fase de suporte o pé role no chão (subcapítulo 2.2.4).

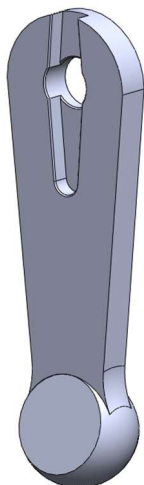


Figura 6.6- Design da perna do ROHMOBI

6.4.3. PÉLVIS

A pélvis é o elemento estrutural que forma o módulo bípede estabelecendo a ligação física entre as duas pernas. Para além de estabelecer a ligação entre as duas pernas a pélvis é também responsável pela orientação do módulo bípede, através do acoplamento de um servomotor no topo da sua estrutura (Figura 6.7). A pélvis possui algumas considerações de design, desde o uso da ranhura com o formato do acoplador no topo para permitir a ligação ao servomotor, assim como o furo em forma de fechadura na parte inferior que permite simultaneamente o acesso ao parafuso acoplador do servo e ainda facilitar a gestão da cablagem dos atuadores.

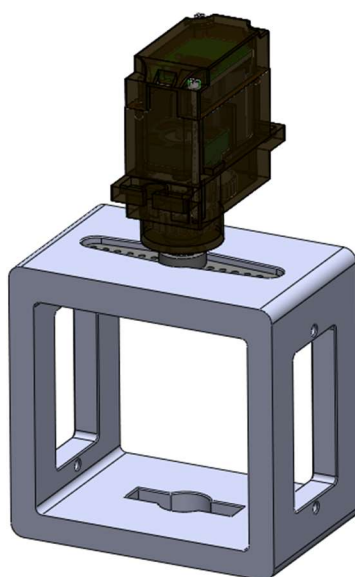


Figura 6.7- Pélvis do ROHMOBI com servomotor de controlo de orientação

6.4.4. BASE

A base do robô permite a ligação física entre os três módulos do robô e alberga os componentes eletrónicos. O design da base deriva de uma geometria triangular em que cada um dos vértices é um ponto pivot de conexão a um módulo bípede. Contudo, apesar do design simples, devido ao tamanho da base não foi possível imprimir a peça completa na impressora 3D disponível para o efeito. Para contornar este problema a base foi dividida em três componentes semelhantes, cada um destes componentes possui um encaixe em ranhura macho e fêmea (Figura 6.8) que permitiu a posterior montagem com excelentes resultados de estabilidade da ligação.

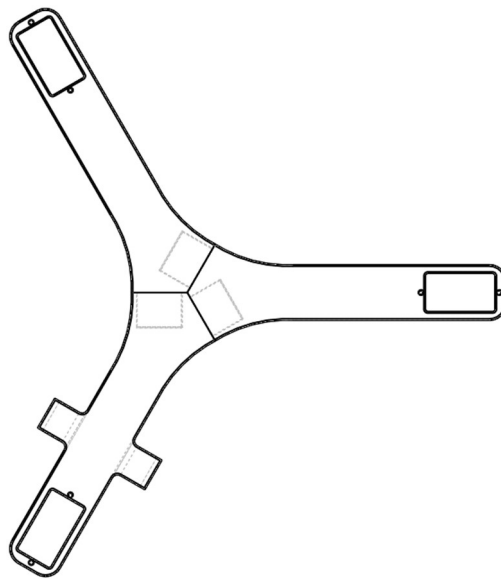


Figura 6.8- Ligação dos componentes constituintes da base do ROHMOBI

6.5. METODOLOGIA DE TESTE

Os testes práticos realizados tiveram como objetivo validar o conceito do protótipo e avaliar o desempenho do robô com base na: trajetória, velocidade instantânea, velocidade média, velocidade angular e variação da corrente de alimentação. Para que fosse possível comparar os resultados, todos os testes foram realizados com as seguintes condições de teste:

- Duração: 15 s
- Número de testes por condição: 5
- Tensão de alimentação: 5,5 V
- Fonte de tensão: *Matrix MPS-3005L-3*
- Altura da câmara: 1 m

- Câmara: *Orbbec Astra Pro*
- Sensor IMU: *Waveshare 10 DOF IMU Sensor (B)*
- Sensor de corrente: *Adafruit ACS723*

Os resultados para cada condição de teste resultam da média dos 5 testes realizados para essa condição, deste modo é possível reduzir a influência de qualquer erro aleatório que possa ocorrer durante os testes.

6.5.1. TRAJETÓRIA E MEDIÇÃO DA VELOCIDADE LINEAR

A trajetória e a velocidade linear do robô são obtidas através da análise das imagens captadas pela câmara colocada sobre a pista de testes, em posição fixa, a 1 metro de altura. A análise das imagens é realizada através de um algoritmo em *Python* que permite sincronizar o movimento do robô com a recolha de dados (Apêndice F).

A trajetória permite perceber o comportamento do robô ao longo do percurso através do desenho do deslocamento temporal do centro de massa. A variação da velocidade instantânea oferece informação sobre os impulsos do robô, enquanto, a velocidade média permite conhecer a velocidade linear efetiva do robô.

6.5.2. MEDIÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR

A velocidade angular é obtida através do giroscópio do sensor *Waveshare 10 DOF IMU Sensor (B)*. A velocidade angular é medida em torno de cada um dos eixos do espaço cartesiano e depende da forma como o sensor é montado no robô, neste caso, o sensor foi acoplado à base na parte inferior do robô (Figura 6.9).

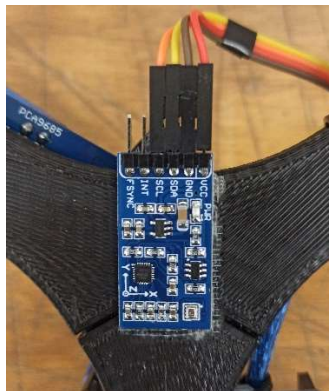


Figura 6.9- Sensor *Waveshare 10 DOF IMU Sensor (B)* montado no ROHMOBI

A velocidade angular permite avaliar a estabilidade do robô ao longo da marcha, quanto maior a intensidade dos picos de velocidade angular mais instável é o robô. Um robô

perfeitamente estável seria capaz de executar a marcha com velocidade angular zero em qualquer eixo para qualquer instante temporal. De acordo com a Figura 6.10 a velocidade angular em x permite estimar a variação temporal da atitude do robô, a velocidade angular em y a variação temporal da inclinação do robô e a velocidade angular em z a variação temporal da orientação do robô.

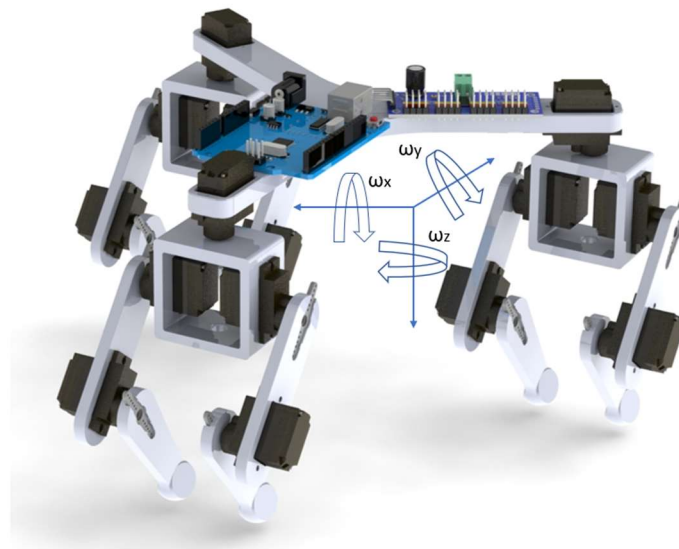


Figura 6.10- Velocidade angular segundo os eixos cartesianos espaciais de acordo com a montagem do sensor IMU

6.5.3. MEDIÇÃO DA INTENSIDADE DA CORRENTE

A potência elétrica consumida pelo robô difere com as condições de teste e é essencial para o cálculo do custo de transporte. O custo de transporte (subcapítulo 2.4.2) é um parâmetro adimensional que permite avaliar e comparar a eficiência do ROHMOBI em diferentes cenários.

A potência elétrica é o produto da tensão pela intensidade da corrente, como o robô é alimentado eletricamente a uma tensão constante e igual a 5,5 V a corrente varia ao longo da marcha. Para medir a corrente é utilizado o sensor de corrente *Adafruit ACS723*, a corrente utilizada para calcular a potência elétrica é a média de todos os valores registados para uma determinada condição de teste.

6.6. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

A metodologia de teste, expressa no subcapítulo 6.5, foi aplicada às seguintes condições de teste: marcha simples em plano regular, marcha simples em plano regular com baixo atrito,

marcha simples em plano regular com altura trocantérica de 60 mm, marcha simples em plano regular com altura trocantérica de 90 mm, marcha simples em plano irregular. Estes testes têm o intuito de analisar a influência do atrito, da altura trocantérica e da irregularidade do terreno na performance do robô. A marcha de viragem foi também alvo de análise, contudo, apenas se avaliou a precisão do ângulo de viragem do robô.

6.6.1. MARCHA SIMPLES EM PLANO REGULAR

A marcha simples em plano regular serve como teste referência para permitir a comparação entre as diferentes condições de testagem. Neste teste o ROHMOBI desloca-se em linha reta durante 15 segundos sobre uma superfície alcatifada e com pequenos excertos de *Latex* rugoso nas extremidades das pernas (Figura 6.11).

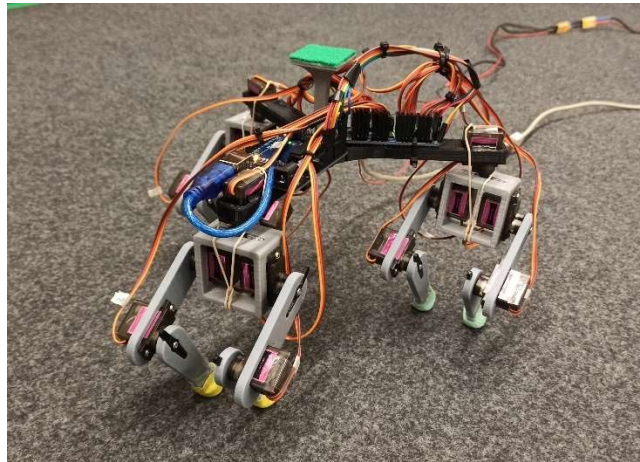


Figura 6.11- ROHMOBI na pista de teste

Através da Figura 6.12 é possível conhecer a trajetória do robô ao longo do teste, a trajetória representada equivale também à trajetória do centro de massa. A trajetória não é retilínea, em vez disso apresenta curvas periódicas em que aparentemente existe um movimento anterior do robô. Cada perna demora 2 segundos a passar por ambas as fases de apoio e balanço, isto implica que ao fim de cada segundo existe troca das pernas em fase de apoio, quando isto acontece ocorre uma perturbação na trajetória. Como o centro de massa do robô não está centrado, devido à colocação da placa *Arduino UNO* e da placa *Adafruit PCA9685* em diferentes braços da base, o lado esquerdo do robô é mais pesado que o direito. Quando as pernas da direita dos módulos transitam para a fase de suporte o robô descai ligeiramente, para o lado mais pesado, provocando a perturbação da trajetória notória na Figura 6.12 que ocorre com um período de 2 segundos. A perturbação não é tão notória

quando as pernas da esquerda dos módulos assumem a fase de suporte pois o momento gerado pelo centro de massa descentrado tem sentido oposto.

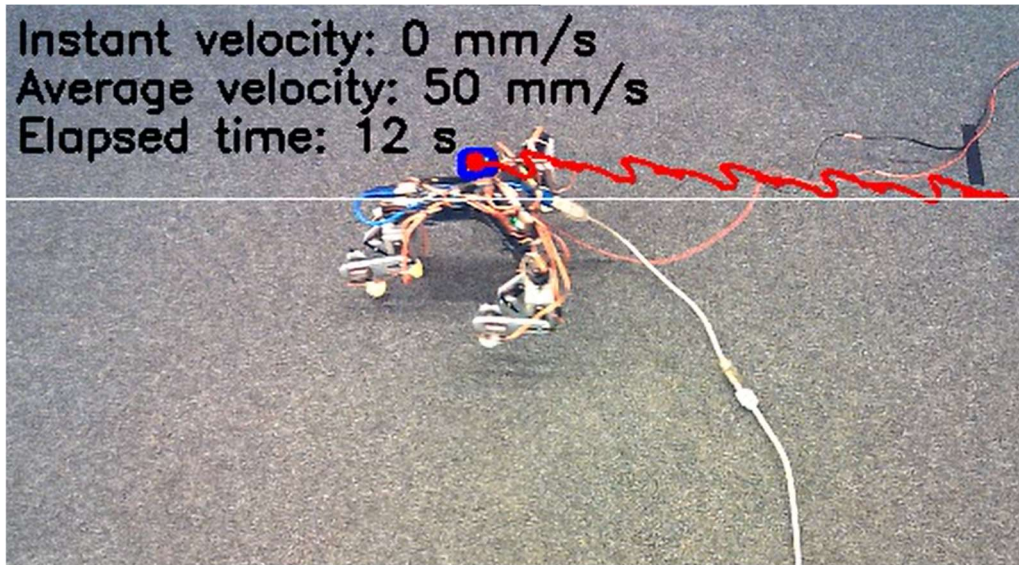


Figura 6.12- Trajetória do ROHMOBI no teste em plano regular

A velocidade instantânea permite, aliada à análise da trajetória, uma caracterização mais aprofundada do movimento do robô. A Figura 6.13 apresenta a variação da velocidade instantânea ao longo do tempo de teste. É notório pela análise desta figura a existência de picos de velocidade instantânea negativa com um período de 1 segundo, estes picos correspondem à mudança das pernas de suporte, sendo que os picos mais negativos correspondem ao início da fase de suporte das pernas da direita. Os picos negativos são sempre precedidos por picos de velocidade instantânea positiva, estes picos resultam da força que os novos pés de suporte fazem no contacto com o chão e que impulsionam o robô para a frente, os picos positivos correspondem, portanto, ao ponto de elevação máxima do robô.

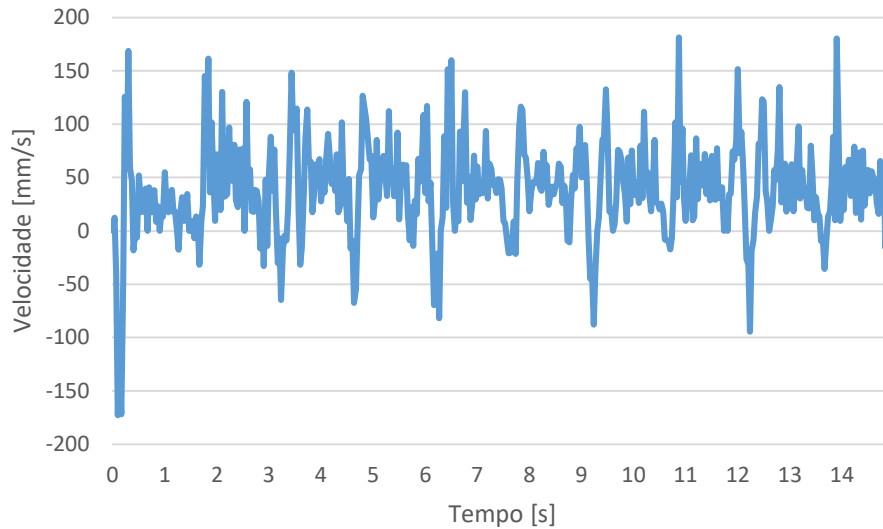


Figura 6.13- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste em plano regular

A velocidade instantânea permite descrever com precisão o comportamento do robô ao longo do percurso, contudo a velocidade média tem um valor prático bastante superior. A velocidade média, para um dado instante, é igual à razão entre o somatório de todas as velocidades instantâneas registados até esse instante e o tempo decorrido. Por este motivo, é possível verificar na Figura 6.14 que a velocidade média só começa a convergir ao fim de alguns segundos de teste. Com base nos dados recolhidos é possível afirmar que a velocidade do ROHMOBI, em marcha simples para plano regular, ronda os 40 mm/s.

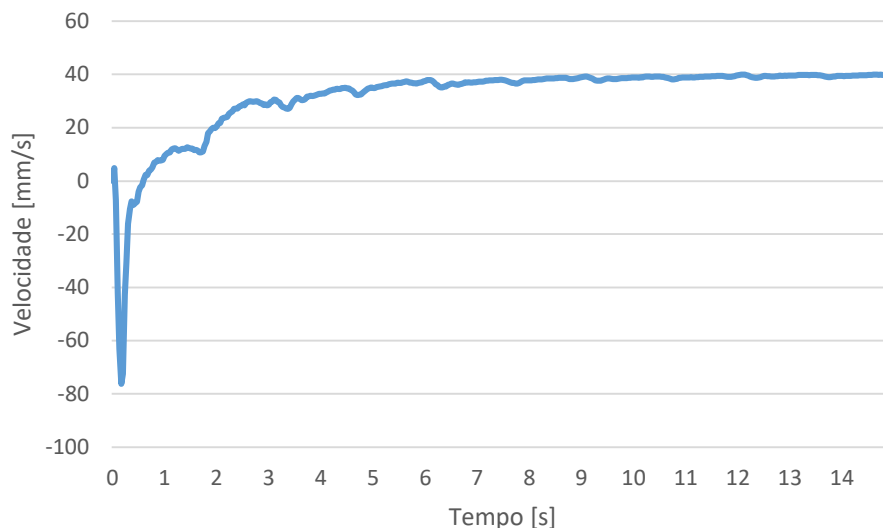


Figura 6.14- Velocidade média do ROHMOBI em plano regular

O valor da velocidade angular ao longo da marcha e a sua variação permitem perceber o quão estável é o robô. A Figura 6.15 apresenta a variação da velocidade angular ao longo do

teste segundo o eixo x e o eixo y , a velocidade angular segundo o eixo z não é considerada pois fornece informação sobre a orientação do robô, que não é tão útil para avaliar a estabilidade.

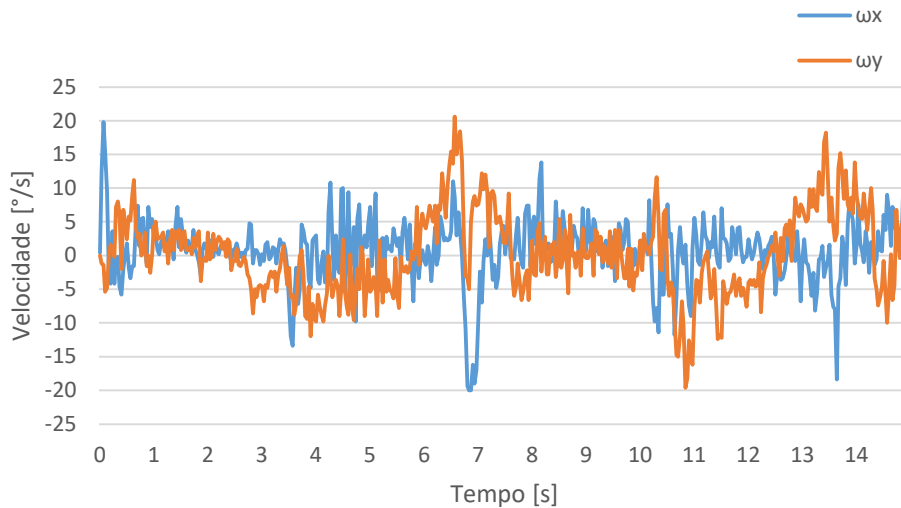


Figura 6.15- Velocidade angular segundo o eixo x e y do teste de referência

É possível perceber que robô é instável, pois a velocidade angular é diferente de zero e varia ao longo da marcha, o que implica a existência de aceleração angular. O desvio padrão das velocidades angulares permite quantificar a instabilidade do robô e comparar com as outras condições de teste.

$$\begin{cases} \sigma\omega_x = 4,77^\circ/s \\ \sigma\omega_y = 6,09^\circ/s \end{cases}$$

A corrente média medida ao longo dos testes de referência é igual a 58,93 mA o que significa que a potência elétrica consumida pelo ROHMOBI é de 0,32 W. O custo de transporte do ROHMOBI para estas condições pode ser calculado através da equação (12) e é igual a 2,02.

$$\begin{cases} I = 58,93 \text{ mA} \\ P = 0,32 \text{ W} \\ CT = 2,02 \end{cases}$$

6.6.2. ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA NOS PÉS

De modo a poder estudar a influência da aderência dos pés na performance do robô foram realizados vários testes em que o robô percorria o mesmo percurso, mas sem os excertos de *Latex* nas extremidades das pernas. O coeficiente de atrito na superfície de contacto alcatifa/ *Latex* é 0,90; enquanto na superfície de contacto alcatifa/resina foto

polimérica é 0,59; uma redução no coeficiente de atrito entre as superfícies em contacto de 34,44%.

Na Figura 6.16 é possível observar a trajetória resultante, em comparação ao teste de referência é notório a presença da mesma perturbação periódica resultante do centro de massa deslocado.

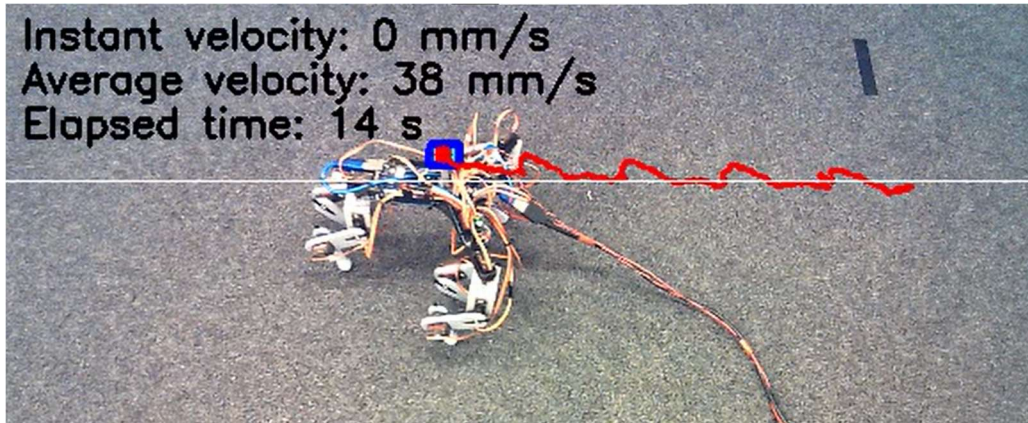


Figura 6.16- Trajetória do ROHMOBI no teste de plano regular com baixa aderência

A Figura 6.17 apresenta a variação da velocidade instantânea ao longo do tempo de teste em comparação com o teste de referência. Neste gráfico é notório a sincronização na ocorrência de eventos, os picos positivos e negativos ocorrem sempre na mesma altura. Este fenómeno é resultado do controlo cíclico de malha aberta do ROHMOBI, o que implica que em cada instante o robô está sempre na mesma fase da passada, ainda que as condições de teste sejam distintas. Contudo, a intensidade dos picos de velocidade instantânea é inferior à do teste de referência, isto poderá dever-se a um ligeiro fenómeno de escorregamento que resulte numa redução de eficácia de transmissão de força no contacto das pernas com o chão. Os picos negativos correspondem à mudança de fase, a mudança de fase ocorre quando as pernas estão nas suas posições máximas e, portanto, muito mais suscetíveis ao escorregamento visto que, a componente horizontal da força atuante é superior. Os picos positivos dizem respeito à posição intermédia da fase de suporte em que o robô está à altura máxima, esta é a altura em que os servos têm de aplicar mais força para impulsionarem o robô para a frente e por isso uma fase muito suscetível ao escorregamento.

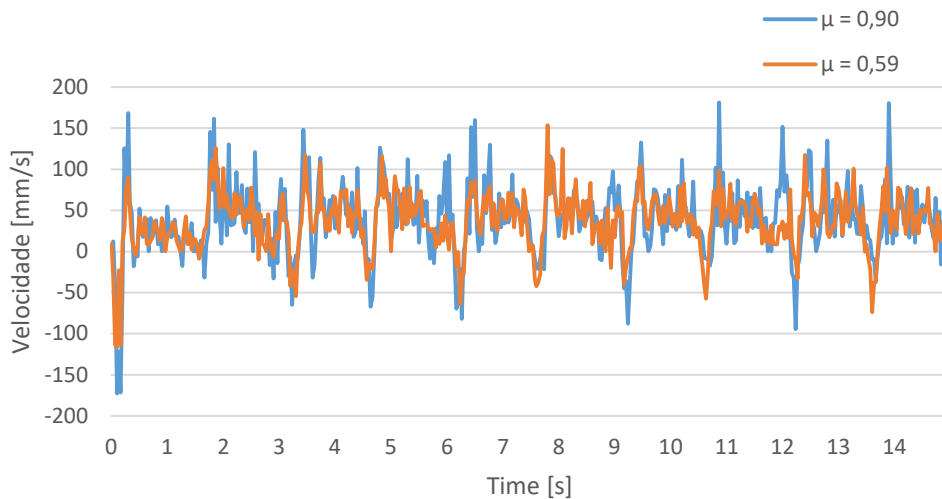


Figura 6.17- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste em plano regular com baixa aderência

Contudo, através da comparação entre os gráficos da velocidade média (Figura 6.18) é possível perceber que o impacto do fenómeno de escorregamento é muito reduzido, visto que, as curvas de variação da velocidade são muito semelhantes e a velocidade média do robô para as condições de atrito reduzido ronda os 38 mm/s.

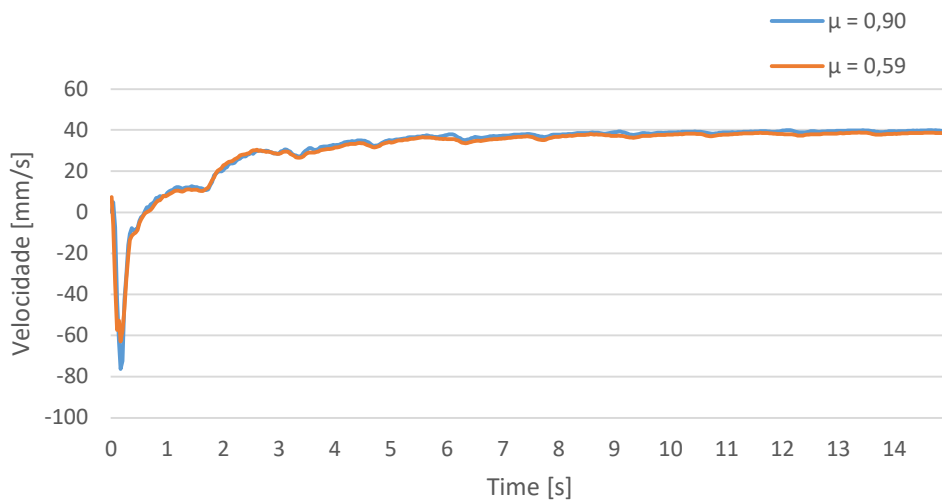


Figura 6.18- Velocidade média do ROHMOBI no teste em plano regular com baixa aderência

A variação das velocidades angulares segundo o eixo x e y são apresentadas na Figura 6.19 onde é possível verificar a mesma periodicidade de eventos, contudo os picos de velocidade angular para o teste com baixa aderência são ligeiramente superiores, o que poderá indicar maior instabilidade.

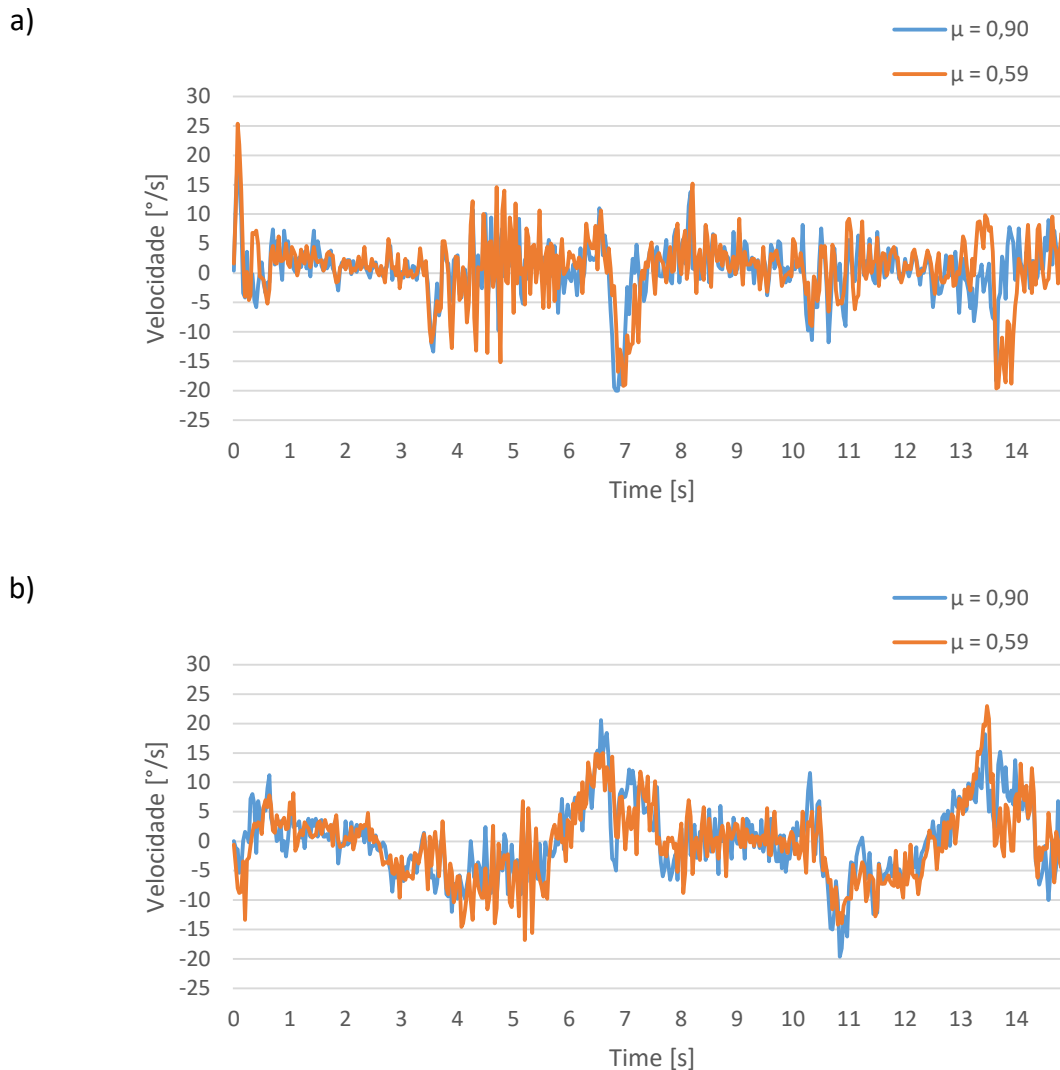


Figura 6.19- Velocidade angular do ROHMOBI no teste em plano regular com baixa aderência: a) segundo o eixo x; b) segundo o eixo y

Este facto é comprovado pelos valores padrão da velocidade angular segundo o eixo x e y, os quais são ligeiramente superiores ao teste de referência.

$$\begin{cases} \sigma\omega_x = 5,61^\circ/s \\ \sigma\omega_y = 6,29^\circ/s \end{cases}$$

A corrente média para as condições de teste de baixo atrito é igual a 61,24 mA, a potência elétrica consumida pelo ROHMOBI é de 0,34W, o que resulta num custo de transporte superior ao teste de referência e igual a 2,18.

$$\begin{cases} I = 61,24 \text{ mA} \\ P = 0,34 \text{ W} \\ CT = 2,18 \end{cases}$$

A redução do atrito no contacto dos pés com o chão torna a marcha mais lenta, mais instável e menos eficiente.

6.6.3. ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ALTURA TROCANTÉRICA

Para estudar o efeito da altura trocantérica foram testadas duas alturas distintas da altura de referência, uma altura de teste inferior igual a 60 mm e uma altura de teste superior igual a 90 mm (Figura 6.20). A altura trocantérica corresponde à distância ao chão da junta do quadril, no caso do ROHMOBI esta altura corresponde à altura da junta θ_2 . A variação da altura trocantérica corresponde a uma variação da altura do centro de massa que tem implicações diretas na estabilidade, por outro lado, a altura trocantérica tem influência na altura da passada que é um dos parâmetros mais importantes quando se pretende adaptar o robô à irregularidade da superfície em que transita.

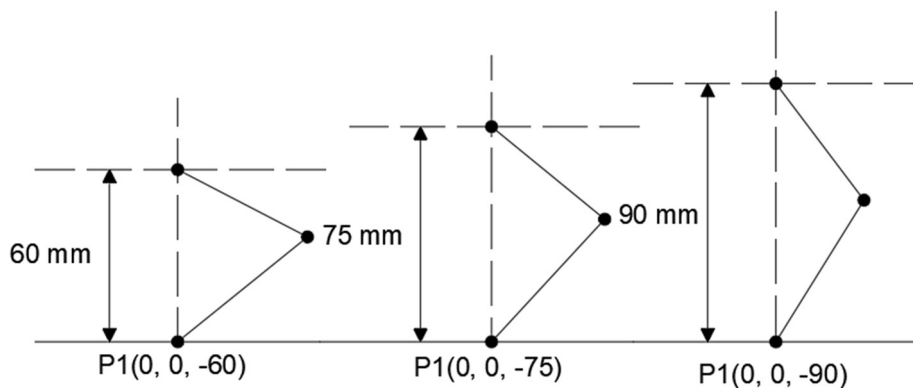


Figura 6.20- Alturas trocantéricas testadas

ALTURA 60 MM

A altura trocantérica de 60 mm é um valor inferior à altura de referência e que possui os pontos de controlo para as diferentes fases apresentados na Figura 6.21.

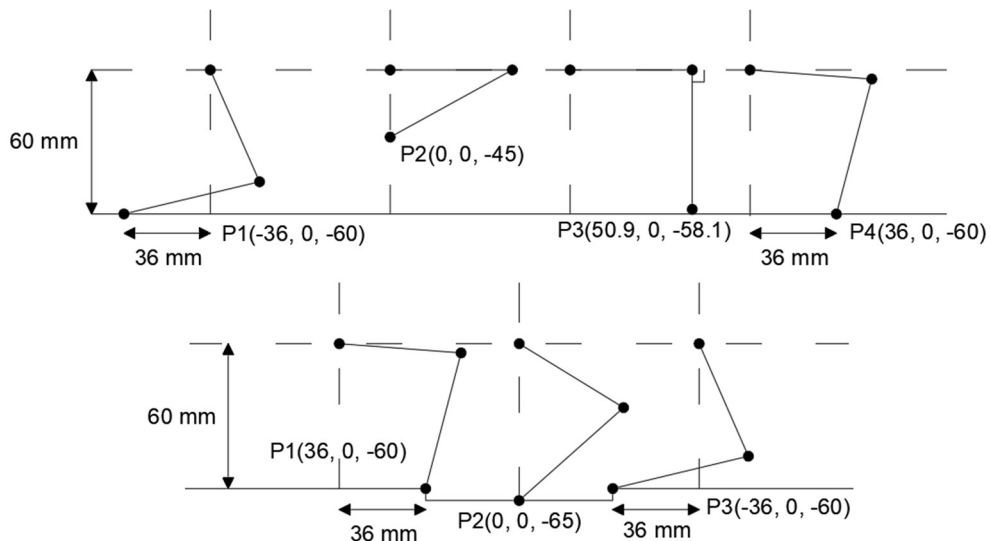


Figura 6.21- Pontos de controlo para altura trocantérica de 60 mm na fase de balanço e suporte

Estes pontos de controlo permitem gerar as Curvas de *Bezier* apresentadas na Figura 6.22.

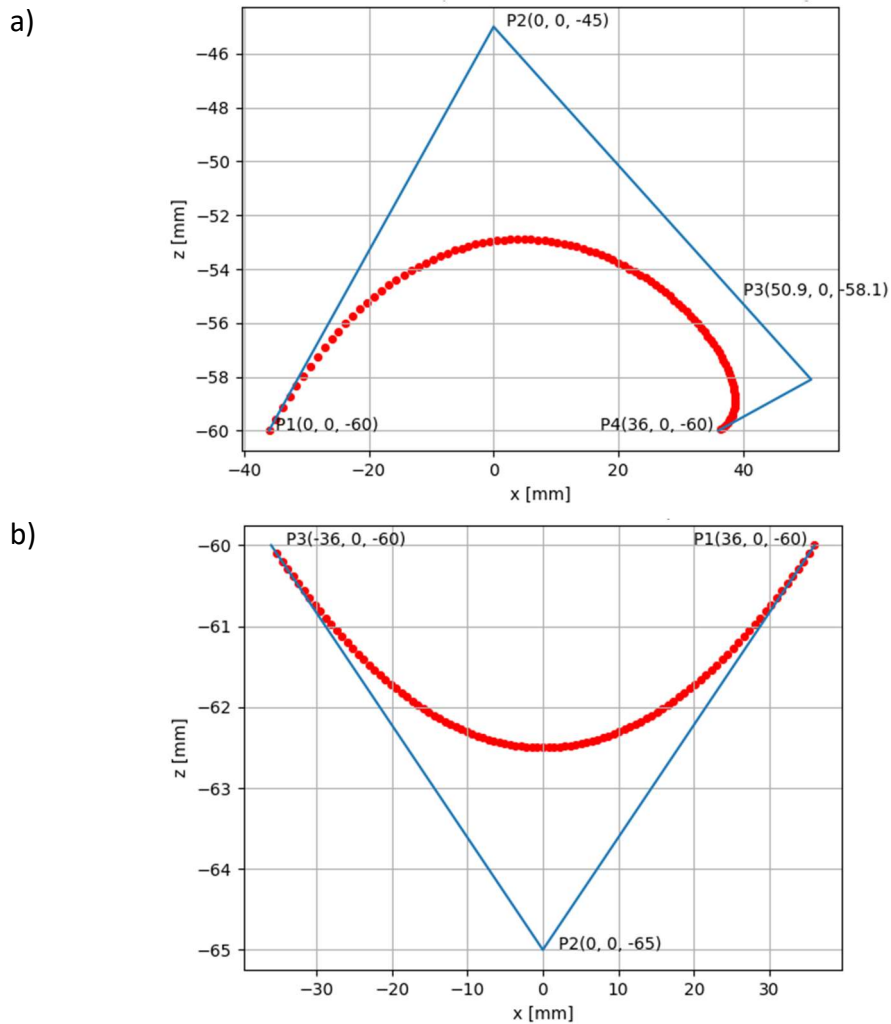


Figura 6.22- Curva de *Bezier* para altura trocantérica de 60 mm: a) fase de balanço; b) fase de suporte

É possível observar a trajetória do robô para a passada com altura trocantérica de 60 mm na Figura 6.23. Em comparação com a trajetória de referência é notório que o deslocamento é bastante inferior e o efeito da perturbação gerada pelo centro de massa descentrado é consideravelmente menor. Como, para esta altura, a perna ergue menos e o centro de massa do robô é mais baixo, o momento gerado pelo centro de massa deslocado acaba por ser inferior e por isso a perturbação resultante também é menor.

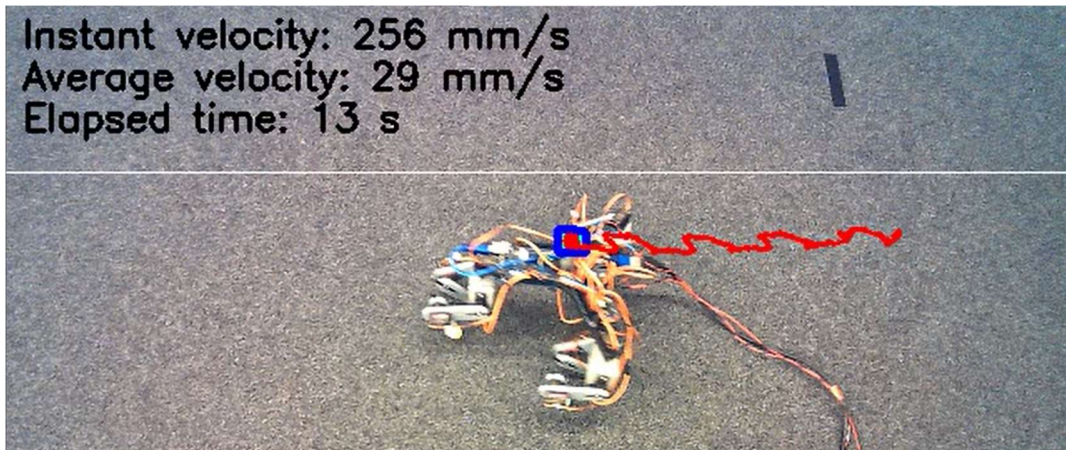


Figura 6.23- Trajetória do ROHMOBI no teste com altura trocantérica de 60 mm

Esta teoria pode ser validada pela análise da Figura 6.24 em que é possível comparar a velocidade instantânea com a do teste de referência. Uma vez mais a periodicidade de eventos mantém-se, contudo, a intensidade dos picos de velocidade é menor como resultado da maior estabilidade que o robô adquire nesta marcha e que permite reduzir a influência do centro de massa deslocado.

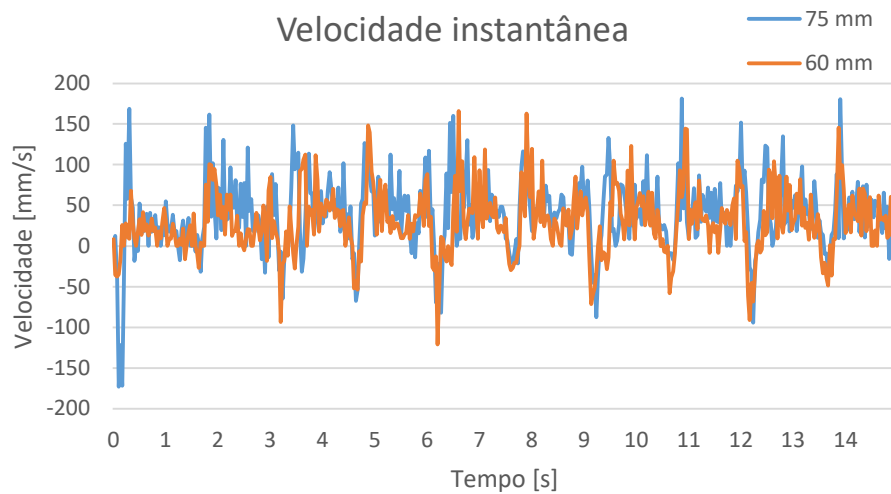


Figura 6.24- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste com altura trocantérica de 60 mm

Apesar desta altura permitir uma passada relativamente mais estável também torna o movimento mais lento. Este facto é evidenciado pelo gráfico da Figura 6.25 em que é possível analisar a velocidade média ao longo do teste e concluir que esta estabiliza por volta dos 31 mm/s, um valor consideravelmente inferior ao do teste de referência.

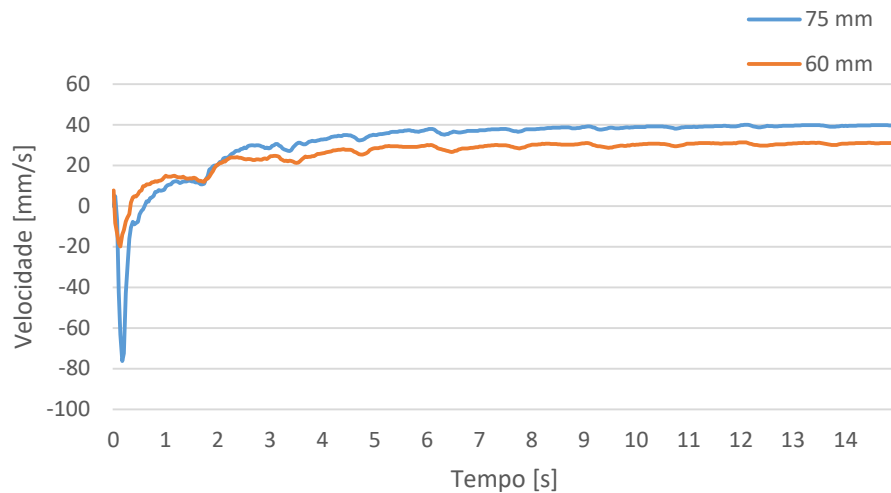


Figura 6.25- Velocidade média do ROHMOBI no teste com altura trocântica de 60 mm

A variação das velocidades angulares segundo o eixo x e y são apresentadas na Figura 6.26 onde é possível verificar a mesma periodicidade de eventos, contudo, os picos de velocidade angular para o teste com altura trocântica de 60 mm são ligeiramente inferiores o que poderá indicar maior estabilidade.

O valor do desvio padrão da velocidade angular segundo o eixo x e o eixo y é inferior ao teste de referência, o que comprova a hipótese deste tipo de marcha ser mais estável.

$$\begin{cases} \sigma\omega_x = 4,34^\circ/s \\ \sigma\omega_y = 5,01^\circ/s \end{cases}$$

A corrente média para a altura trocântica de 60 mm é igual a 63,03 mA, a potência elétrica consumida pelo ROHMOBI é de 0,35W o que resulta num custo de transporte superior ao teste de referência e igual a 2,76.

$$\begin{cases} I = 63,03 \text{ mA} \\ P = 0,35 \text{ W} \\ CT = 2,76 \end{cases}$$

A marcha para a altura trocântica de 60 mm é mais estável que a marcha do teste de referência, contudo, é uma marcha mais lenta e menos eficiente.

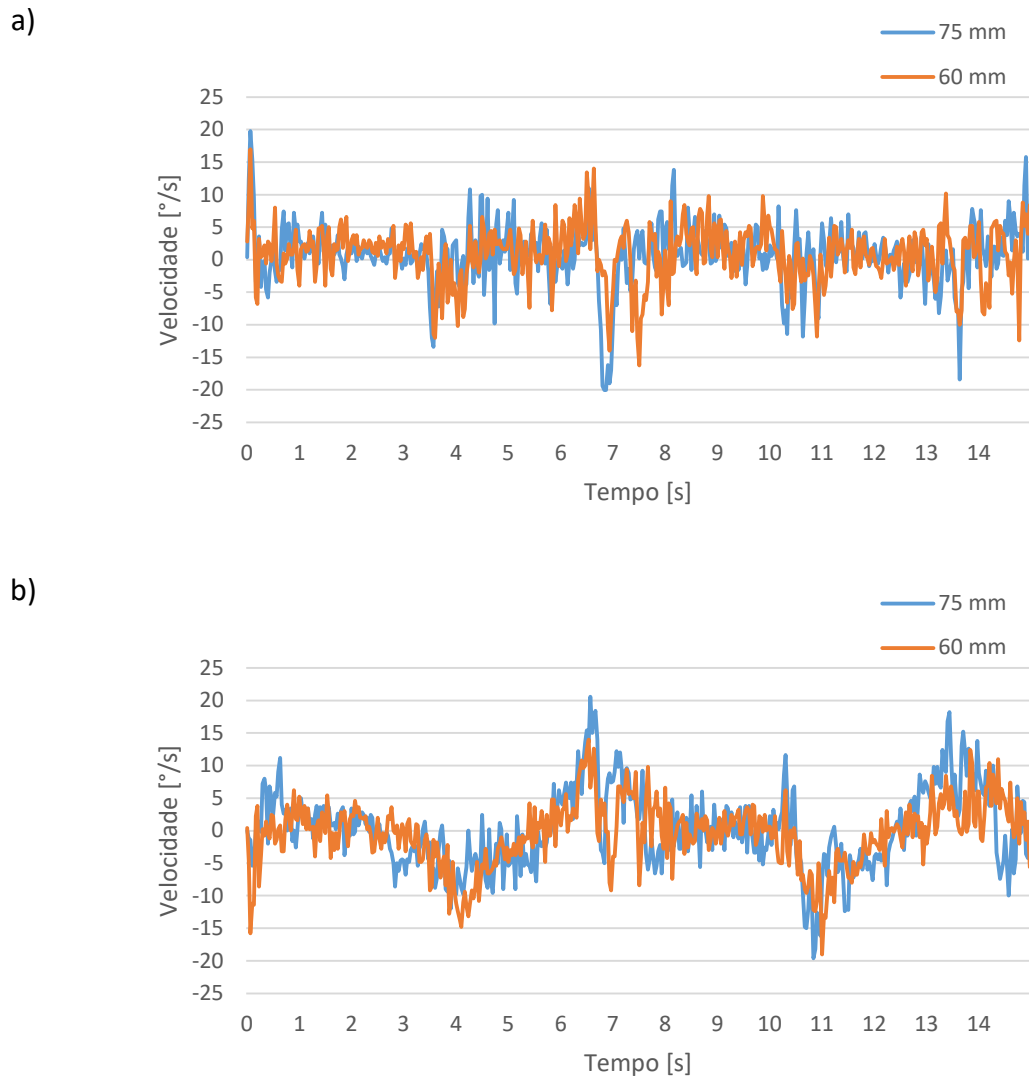


Figura 6.26- Velocidade angular do ROHMOBI no teste em plano regular com altura trocântica de 60 mm: a) segundo o eixo x; b) segundo o eixo y

ALTURA 90 MM

A altura trocântica de 90 mm é um valor superior à altura de referência e que possui os pontos de controlo para as diferentes fases apresentados na Figura 6.27.

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípodes

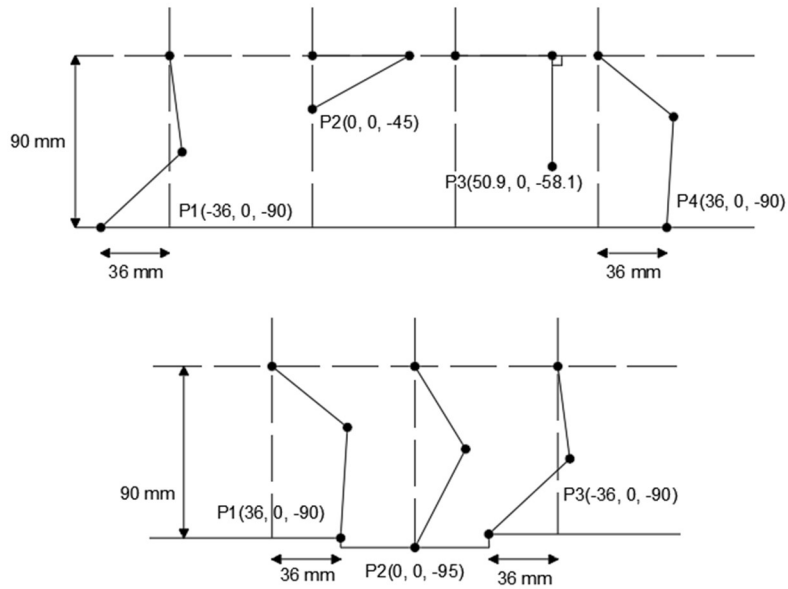
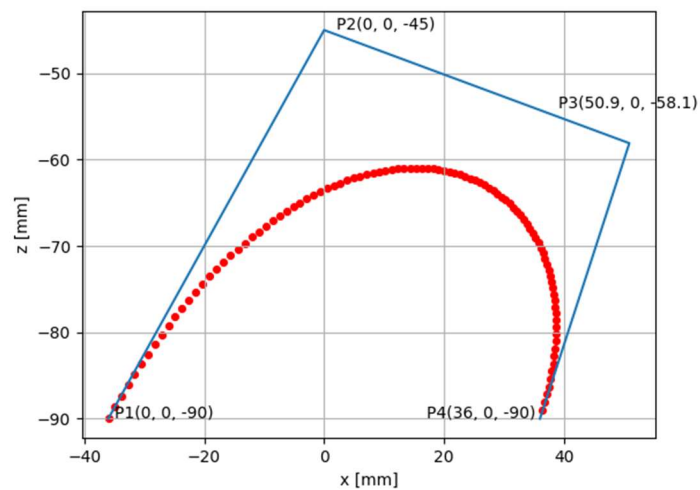


Figura 6.27- Pontos de controlo para altura trocantérica de 90 mm na fase de balanço e suporte

Estes pontos de controlo permitem gerar as curvas de *Bezier* da Figura 6.28.

a)



b)

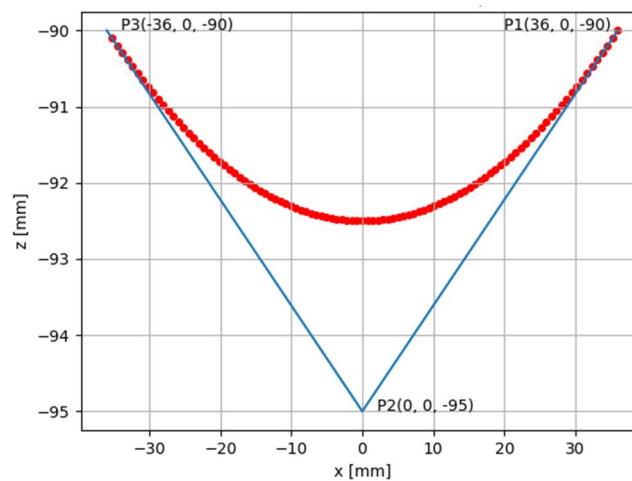


Figura 6.28- Curva de *Bezier* para altura trocantérica de 90 mm: a) fase de balanço; b) fase de suporte

É possível observar a trajetória do robô para a passada com altura trocantérica de 90 mm na Figura 6.29. Em comparação com a trajetória de referência é notório que o deslocamento é ligeiramente superior e o efeito da perturbação gerada pelo centro de massa descentrado é maior. Nesta tipologia de marcha, a perna é obrigada a erguer mais que o comum e o centro de massa é mais elevado, estes dois fatores contribuem para que o momento gerado pelo centro de massa deslocado seja superior, o que resulta numa perturbação maior.

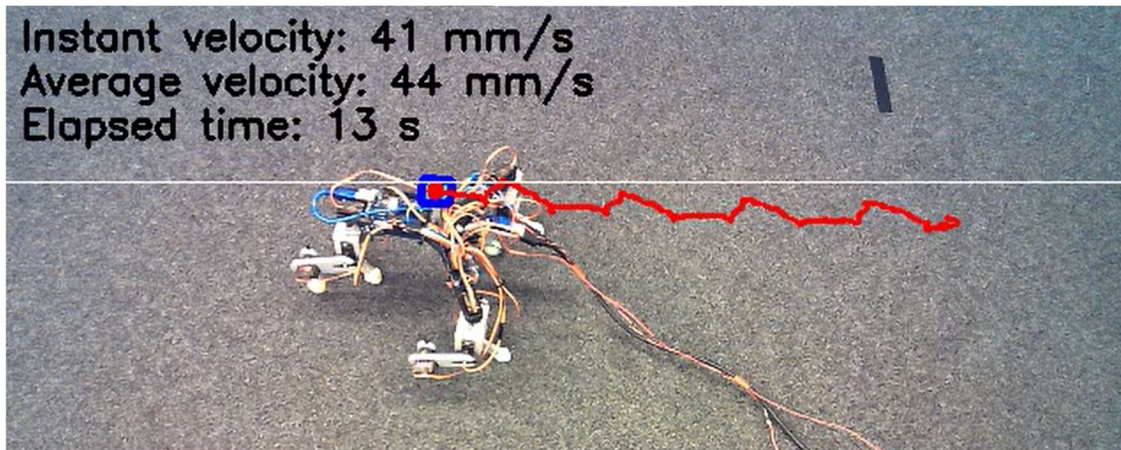


Figura 6.29- Trajetória do ROHMOBI no teste com altura trocantérica de 90 mm

É expectável que a maior perturbação na trajetória resulte em picos de velocidade superiores ao teste de referência. Contudo, através da análise da Figura 6.30 é possível perceber que os picos de velocidade instantânea superior nem sempre pertencem à altura trocantérica de 90 mm.

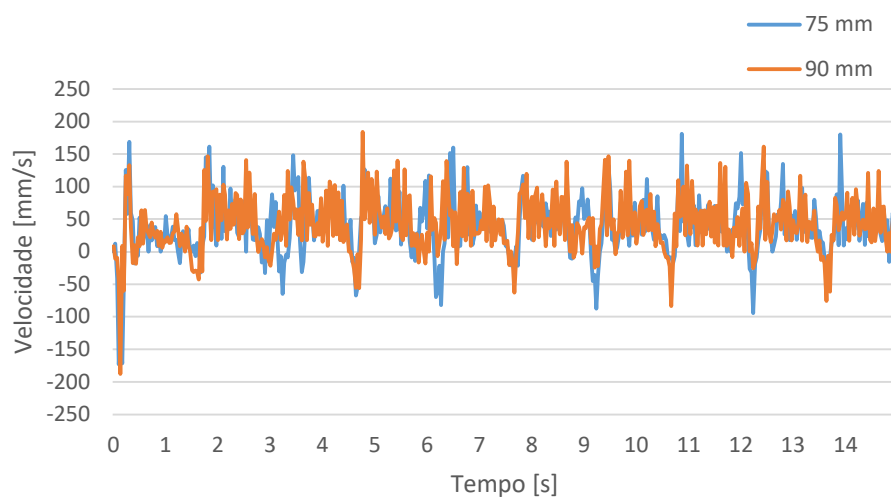


Figura 6.30- Velocidade instantânea do ROHMOBI no teste com altura trocantérica de 90 mm

A marcha para altura trocantérica de 90 mm é ligeiramente mais veloz que a marcha do teste de referência. A velocidade média para estas condições de teste estabiliza por volta dos 45 mm/s (Figura 6.31).

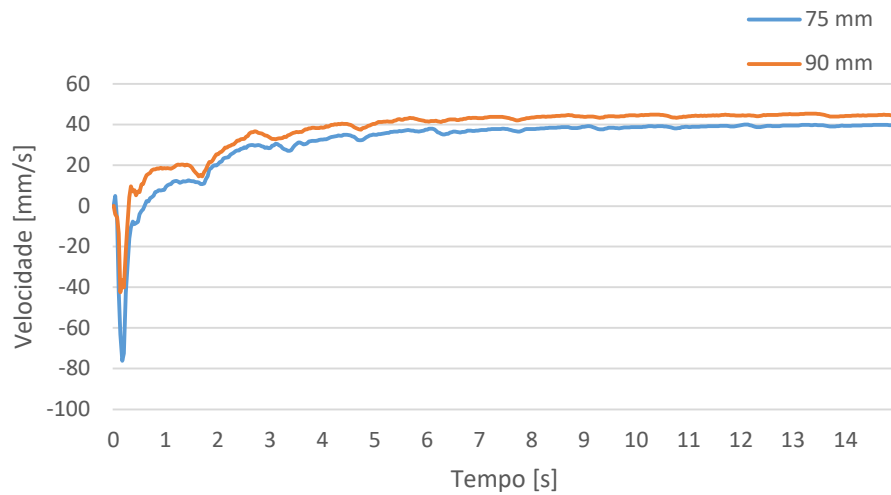


Figura 6.31- Velocidade média do ROHMOBI no teste com altura trocantérica de 90 mm

A velocidade angular segundo o eixo x e o eixo y permite avaliar a estabilidade da marcha do ROHMOBI para a altura trocantérica de 90 mm (Figura 6.32).

O valor do desvio padrão da velocidade angular segundo o eixo x e o eixo y é superior ao teste de referência, o que permite concluir que a marcha para estas condições de teste é mais instável que a do teste de referência.

$$\begin{cases} \sigma\omega_x = 5,55^\circ/s \\ \sigma\omega_y = 6,89^\circ/s \end{cases}$$

A corrente média para a altura trocantérica de 90 mm é igual a 63,03 mA, a potência elétrica consumida pelo ROHMOBI é de 0,32W o que resulta num custo de transporte inferior ao teste de referência e igual a 1,77.

$$\begin{cases} I = 63,03 \text{ mA} \\ P = 0,32 \text{ W} \\ CT = 1,77 \end{cases}$$

A marcha para a altura trocantérica de 90 mm é mais instável que a marcha do teste de referência, contudo, é uma marcha mais rápida e mais eficiente.

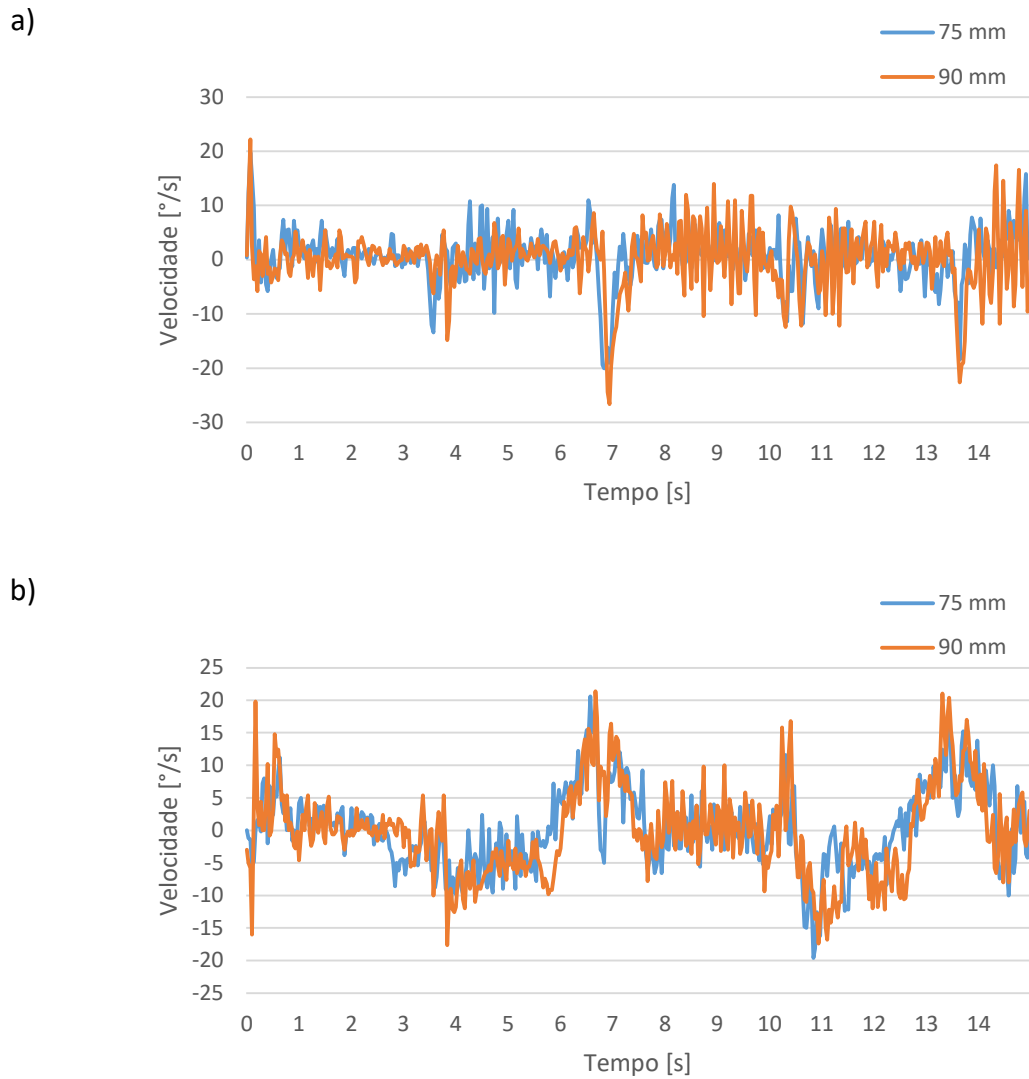


Figura 6.32- Velocidade angular do ROHMOBI no teste em plano regular com altura trocantérica de 90 mm: a) segundo o eixo x; b) segundo o eixo y

6.6.4. ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA IRREGULARIDADE DO TERRENO

Um dos objetivos para o ROHMOBI é que este seja capaz de se mover em terrenos irregulares, como apresentado na Figura 6.33.

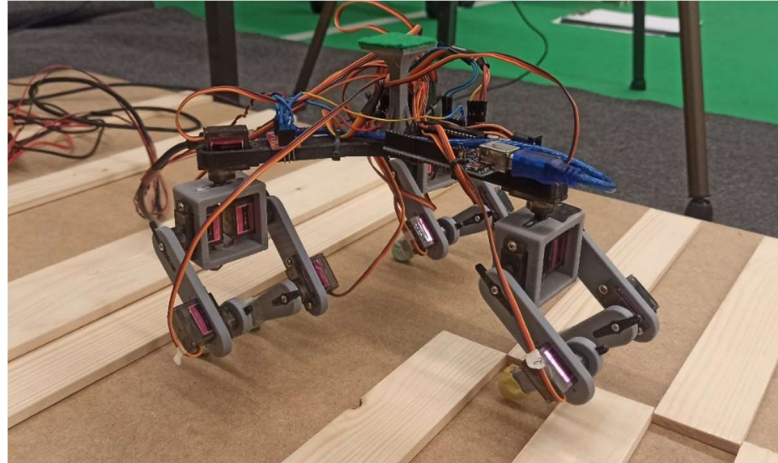


Figura 6.33- ROHMOBI a percorrer a pista de teste de terreno irregular

Para testar a performance do robô em terrenos irregulares foi construída a pista de testes representada na Figura 6.34.

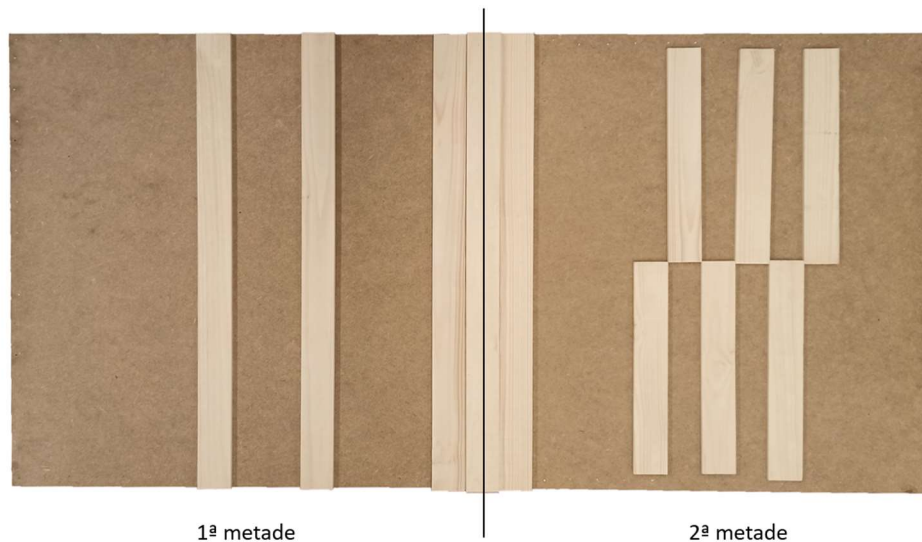


Figura 6.34- Pista de teste utilizada para recriar terreno irregular

A pista de teste foi dividida em duas secções de comprimento semelhante de modo a poder manter a duração dos testes em 15 segundos e tornar possível a comparação com o teste de referência.

A Figura 6.35 apresenta a trajetória do ROHMOBI no plano irregular, é notória a existência da mesma perturbação periódica resultante do centro de massa descentrado que se verificou em todas as condições de teste. Contudo, é também interessante verificar que em ambas as secções da pista de teste, existe uma ligeira curvatura do robô, esta curvatura é resultado da irregularidade do terreno que provoca a mudança de orientação do robô quando

as pernas atingem os obstáculos em instantes diferentes. Esta curvatura poderia ser facilmente corrigida recorrendo a um controlo de malha fechada.

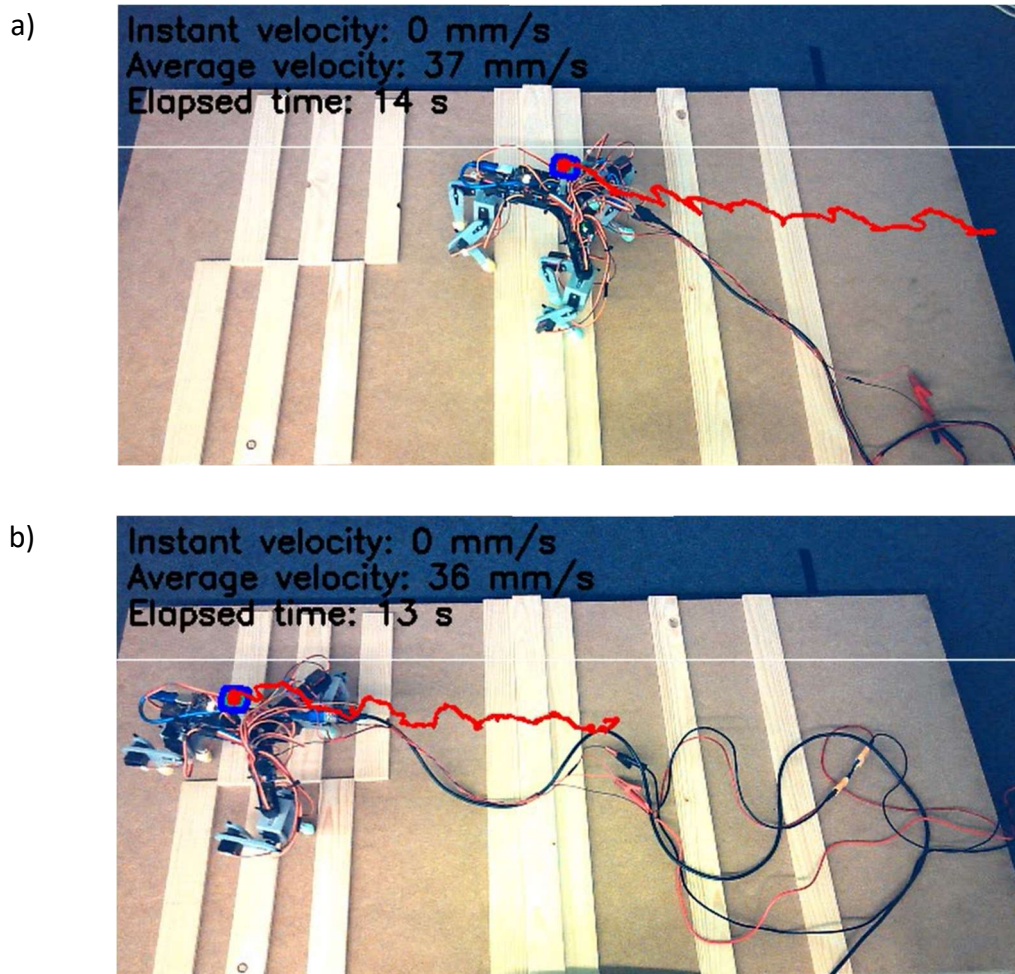


Figura 6.35- Trajetória do ROHMOBI em pista de teste de terreno irregular: a) 1ª secção; b) 2ª secção

A variação da velocidade instantânea ao longo dos testes em terreno irregular (Figura 6.36) é mais aperiódica e com picos de velocidade de intensidade superior, quando em comparação ao teste de referência, o que poderá indicar maior instabilidade das marchas em terreno irregular.

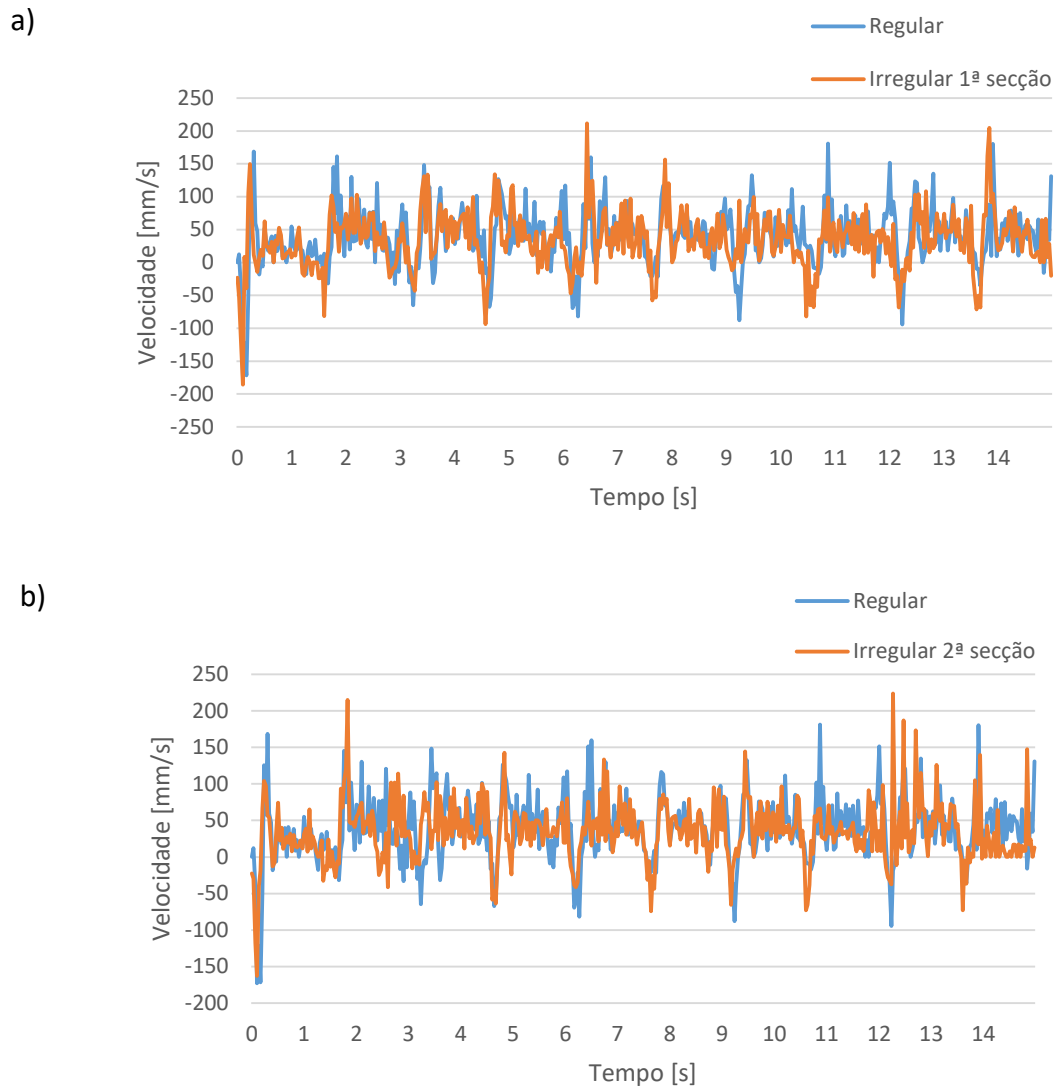


Figura 6.36- Velocidade instantânea do ROHMOBI em pista de teste de terreno irregular: a)1ª secção; b) 2ª secção

A velocidade linear média do robô em terreno irregular é inferior à velocidade média do teste de referência (Figura 6.37), sendo que, em ambas as secções da pista, a velocidade média ronda os 36 mm/s (marginalmente superior na primeira secção). Esta redução da velocidade linear média resulta da dificuldade que o robô tem para se deslocar em superfícies irregulares, o que provoca uma diminuição na eficiência da marcha.

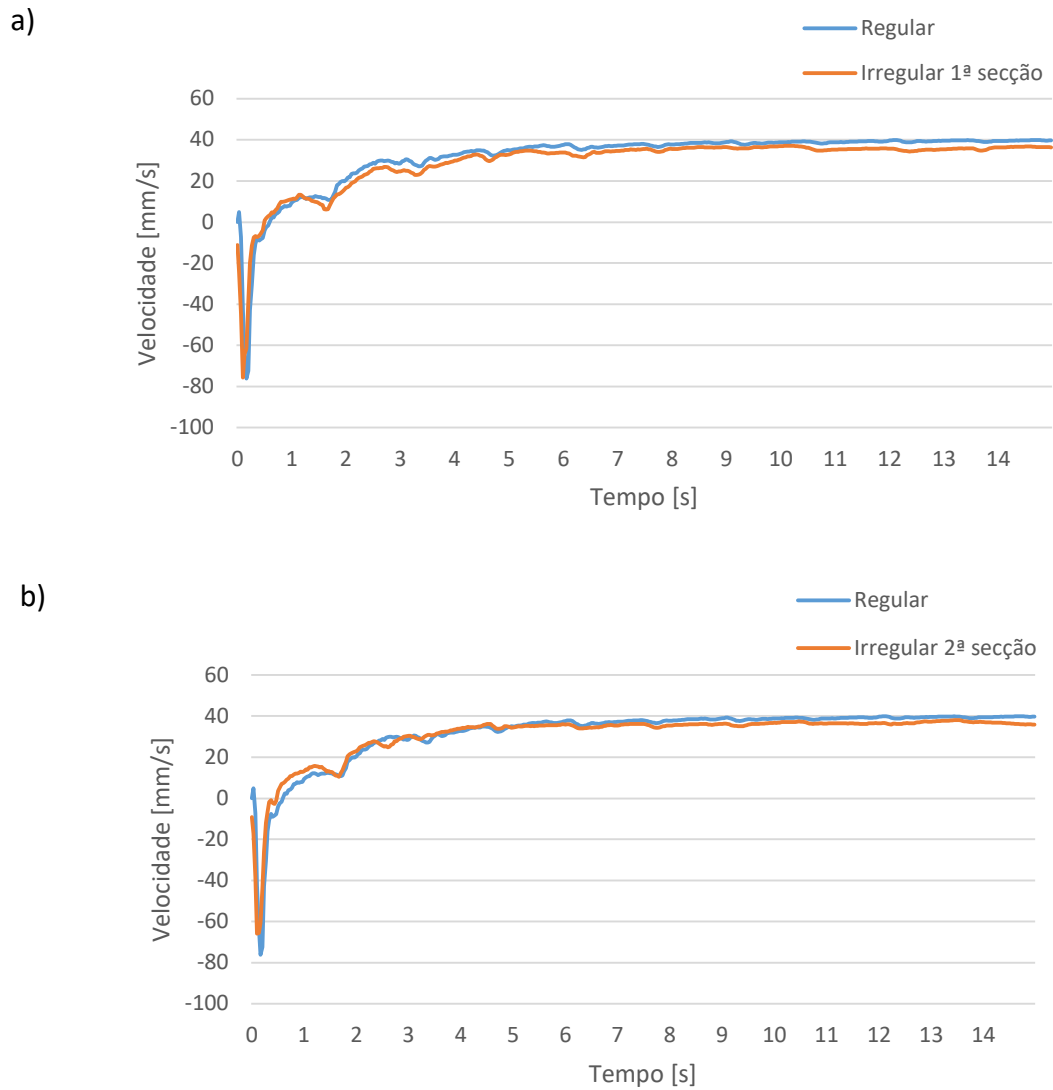


Figura 6.37- Velocidade média do ROHMOBI na pista de teste de terreno irregular: a) 1ª secção; b) 2ª secção

A Figura 6.38 permite analisar a variação da velocidade angular ao longo do tempo de teste para ambas as secções da pista em comparação ao teste de referência, é notório em ambos os casos que os picos de velocidade angular são mais intensos que os da velocidade angular do teste de referência.

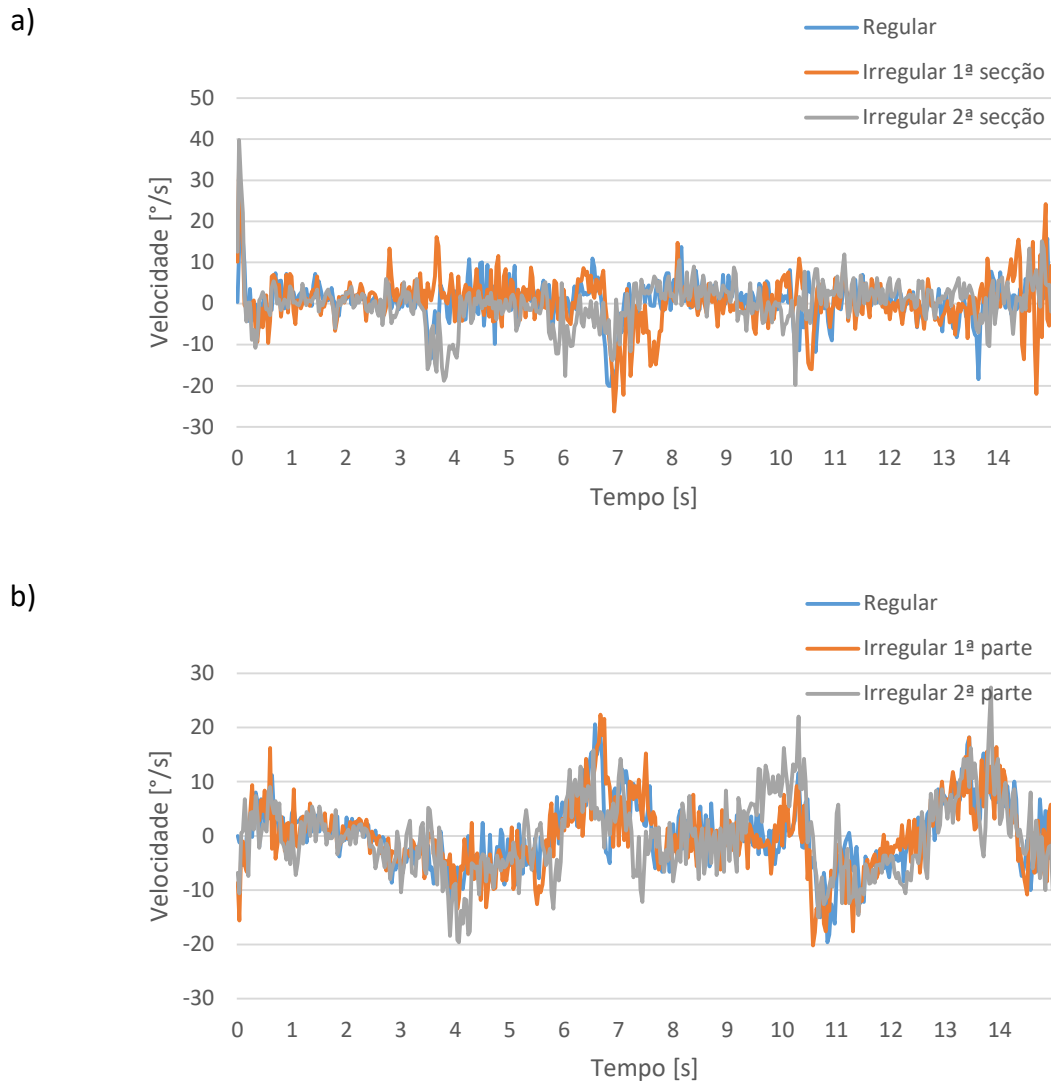


Figura 6.38- Velocidade angular do ROHMOBI na pista de teste de terreno irregular: a) eixo x; b) eixo y

O valor do desvio padrão da velocidade angular segundo o eixo x e o eixo y em ambas as secções é superior ao teste de referência, o que permite concluir que a marcha para estas condições de teste é mais instável que a do teste de referência. A 2ª secção gera maior instabilidade na inclinação do robô em relação à 1ª secção, como resultado da assimetria existente ao longo da largura da pista.

$$1^{\text{a}} \text{ secção: } \begin{cases} \sigma\omega_x = 6,03 \text{ }^\circ/\text{s} \\ \sigma\omega_y = 6,44 \text{ }^\circ/\text{s} \end{cases}, 2^{\text{a}} \text{ secção: } \begin{cases} \sigma\omega_x = 5,66 \text{ }^\circ/\text{s} \\ \sigma\omega_y = 7,04 \text{ }^\circ/\text{s} \end{cases}$$

Como resultado do esforço exigido aos atuadores do robô para superar os obstáculos do terreno, a corrente média em ambas as secções do percurso de teste é superior à corrente média no teste de referência e de igual modo, a potência elétrica. Por este motivo, e devido

à redução da velocidade linear média, a marcha do robô em terreno irregular é menos eficiente em comparação ao teste de referência.

$$1^{\text{a}} \text{ secção: } \begin{cases} I = 61,45 \text{ mA} \\ P = 0,34 \text{ W} \\ CT = 2,31 \end{cases}, 2^{\text{a}} \text{ secção: } \begin{cases} I = 62,18 \text{ mA} \\ P = 0,34 \text{ W} \\ CT = 2,37 \end{cases}$$

É possível concluir que a marcha em terreno irregular é mais instável, mais lenta e menos eficiente do que a marcha do teste de referência. É ainda possível perceber que a 2ª secção do percurso é a que provoca maior instabilidade e maior redução da eficiência.

6.6.5. PRECISÃO DA MARCHA DE VIRAGEM

O último teste realizado procurou estudar e avaliar a marcha de viragem. Dado que a marcha viragem apresentada no subcapítulo 5.4 é uma proposta completamente inovadora, é necessário avaliar a sua performance, a avaliação da performance consistiu na avaliação da exatidão do ângulo de viragem. O módulo bípode gira em incrementos (ou decrementos conforme a orientação) de 30°, para que a marcha do robô fosse evidente nas imagens captadas, os testes consistiram em marchas de viragem de 60° para cada um dos lados.

A marcha de viragem à direita (Figura 6.39) é extremamente precisa, sendo que o ângulo efetivamente medido é igual a 60°.

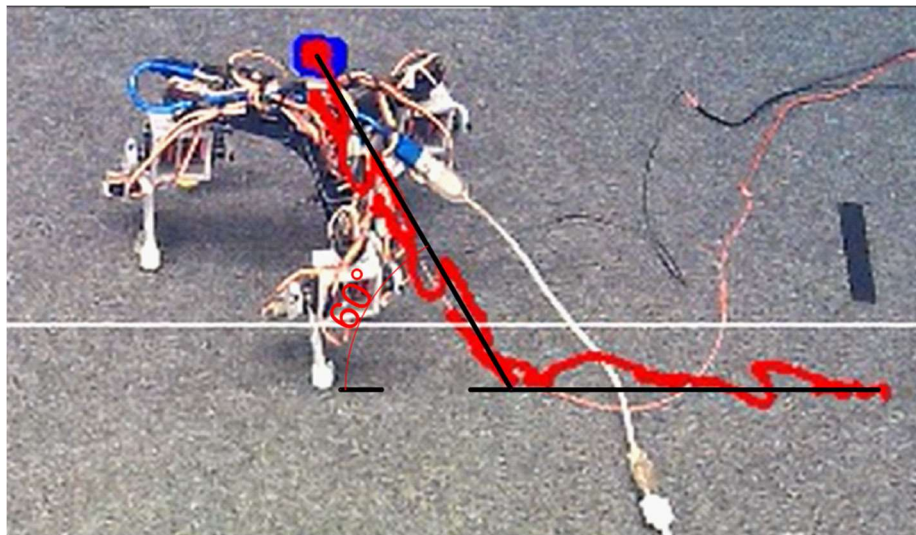


Figura 6.39- Ângulo efetivo da marcha de viragem 60° à direita

A marcha de viragem à esquerda (Figura 6.40) não é tão precisa, sendo que o ângulo efetivamente medido é de 58°, contudo, o mais provável é que esta diferença se deva ao

momento do teste em que o ângulo foi medido, ou porventura, a algum escorregamento que tenha havido na mudança de orientação dos módulos bípodes.

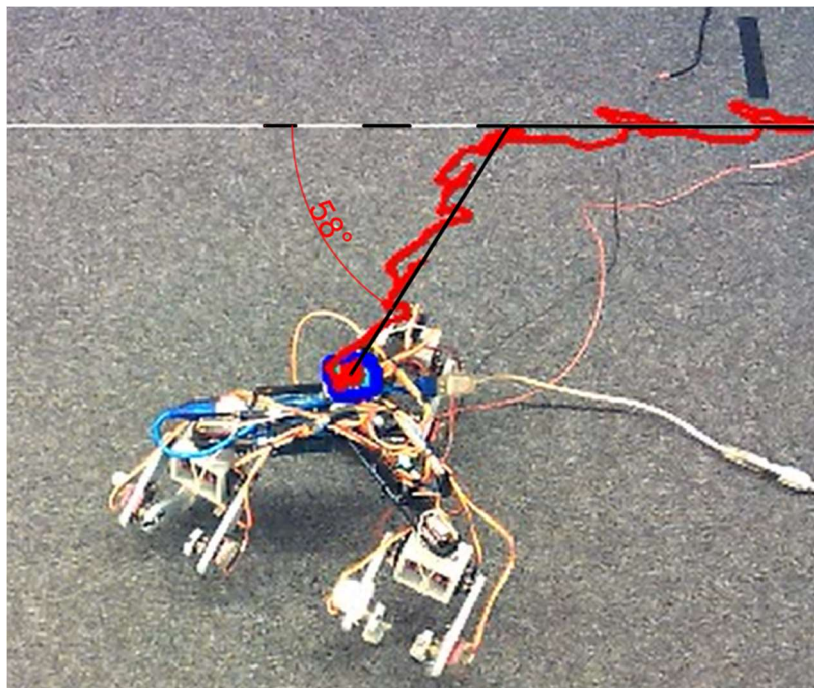


Figura 6.40- Ângulo efetivo da marcha de viragem 60° à esquerda

6.7. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

O capítulo 6 versa sobre a transição do estudo teórico para a componente prática, neste capítulo é apresentado o modelo final, os componentes constituintes deste modelo, a seleção de atuadores e ainda os resultados de testes práticos realizados, com o intuito de avaliar a performance do robô. O modelo final do ROHMOBI, apresentado neste capítulo, é uma evolução do desenho conceptual e de várias iterações de modulações posteriores, estes modelos permitem perceber a influência da integração das considerações práticas e funcionais no modelo. Neste capítulo o modelo é descrito através da quantidade e peso singular dos componentes constituintes. São selecionados como atuadores os servomotores MG90S devido ao preço reduzido e tamanho reduzido. Com base no peso dos componentes é possível proceder à validação estática dos atuadores selecionados, em que se conclui que os valores de binário máximo exigido diferem um valor de grandeza da capacidade máxima dos servos. Este binário estático foi calculado com um fator de segurança de 1,61 de modo a contabilizar com o aumento da intensidade dos esforços em situação dinâmica. São ainda apresentadas algumas considerações de design no modelo final, estas considerações resultaram de necessidades práticas e permitiram melhorar o funcionamento e uso do robô,

estas considerações dizem respeito à acoplagem de membros, formato dos pés do robô, construção da base, etc. Para validar o conceito do ROHMOBI foram realizados vários testes, os quais serviram para avaliar a influência da aderência nos pés, a variação da altura trocantérica e a irregularidade do terreno, através da comparação com um teste de referência. O teste de referência foi realizado em superfície plana regular com aderência e altura trocantérica de 75 mm. Os resultados dos testes foram obtidos através de um sensor IMU, um sensor de corrente e um algoritmo de visão construído para o efeito que mediu o tempo de teste, a variação da velocidade instantânea, a velocidade média e desenhou a trajetória do robô. A Tabela 6.5 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nos testes, é possível concluir que: a redução da aderência reduz a velocidade, reduz a estabilidade e a eficiência; a redução da altura trocantérica reduz a velocidade, aumenta a estabilidade e diminui a eficiência; o aumento da altura trocantérica aumenta a velocidade, reduz a estabilidade e aumenta a eficiência; a irregularidade do terreno diminui a velocidade, reduz a estabilidade e a eficiência.

Tabela 6.5- Performance do ROHMOBI nas diferentes condições de teste

	\bar{v}	$\sigma\omega_x$	$\sigma\omega_y$	P	CT
Referência	39,82 mm/s	4,77 °/s	6,09 °/s	0,32 W	2,02
Baixo atrito	38,34 mm/s	5,61 °/s	6,30 °/s	0,34 W	2,18
60 mm	31,15 mm/s	4,34 °/s	5,01 °/s	0,35 W	2,76
90 mm	44,64 mm/s	5,55 °/s	6,89 °/s	0,32 W	1,77
Irregular 1ª secção	36,35 mm/s	6,03 °/s	6,43 °/s	0,34 W	2,31
Irregular 2ª secção	35,86 mm/s	5,66 °/s	7,04 °/s	0,34 W	2,37

Como o conceito da marcha de viragem é inovador, foi também importante testar a precisão desta tipologia de marcha. A precisão foi medida através do ângulo real medido com base na trajetória do robô, os ângulos medidos foram quase idênticos ao esperado.

7. CONCLUSÕES

Este capítulo pretende apresentar e sumarizar as principais conclusões a retirar do projeto descrito ao longo desta dissertação. Começando pela análise dos objetivos alcançados ao longo do projeto, passando por uma reflexão sobre as maiores limitações e dificuldades experienciadas e terminando com a visão do que poderá ser o futuro do projeto ROHMOBI.

7.1. OBJETIVOS ALCANÇADOS

O principal objetivo estabelecido para este trabalho era o de criar e desenvolver um novo conceito de robô hexápode que pudesse trazer algo de novo a esta área de robôs bio inspirados. Com o amadurecimento do projeto os objetivos foram refinados passando a enquadrar-se em três grandes categorias: desenvolver um novo conceito cinemático para robôs hexápodes com foco na redução do número de graus de liberdade, simplificação do controlo e introdução do conceito de modularidade em robôs bio inspirados; desenvolver e construir o protótipo físico; implementar o controlo e avaliar a performance do robô com base em testes práticos.

O modelo cinemático desenvolvido para o ROHMOBI permitiu a eliminação de três graus de liberdade, em relação aos modelos hexápodes comuns, através da partilha de um grau de liberdade por cada duas pernas. A partilha de um grau de liberdade por cada duas pernas é o princípio do módulo bípede, na medida em que só é possível se as pernas estiverem agrupadas numa estrutura bípede. Devido à natureza bípede dos módulos, o desenvolvimento destes baseou-se no modelo antropomórfico para definir as relações métricas entre os membros e os limites angulares das juntas. Através deste estudo foi possível a discretização cinemática e estática das pernas do robô, o que permitiu compreender de forma mais aprofundada o comportamento físico das pernas. No final, com base no espaço de trabalho das pernas e as curvas de *Bezier* foi possível obter a trajetória e simular computacionalmente o movimento de um módulo bípede.

Na fase de desenvolvimento e construção do protótipo foram colocadas em prática as considerações retiradas do estudo estático e cinemático. As dimensões selecionadas para o tamanho dos membros foram a base da construção do modelo da perna e da coxa e por extensão do módulo bípede. No entanto, nesta fase de desenvolvimento do protótipo foi

necessário procurar designs que permitissem acomodar os atuadores, acoplar os atuadores aos membros, unir fisicamente todos os módulos bípedes e alojar os elementos de controlo necessários ao funcionamento do robô. O estudo estático foi também essencial nesta fase do projeto de modo a poder validar os atuadores selecionados. Todos estes passos culminaram na construção do protótipo físico.

O objetivo final do projeto consistiu em colocar o protótipo físico em movimento com o intuito de o testar. O estudo cinemático foi crucial para discretizar a trajetória pretendida em valores angulares que realmente pudessem ser utilizados para comandar os servos. Antes de poder testar o robô foi necessário construir o controlo do mesmo, este código de controlo é alimentado no *Arduino UNO* e tem como objetivo comandar de forma sincronizada e unida todas as pernas de modo que o robô, como um todo, execute o movimento pretendido. Esta parte do processo foi particularmente desafiante devido à necessidade de utilizar bibliotecas próprias, calibrar os servomotores, lidar com a imprecisão dos atuadores, entre outros motivos. Finalizado o controlo, foi necessário desenvolver outro código para poder testar e avaliar o ROHMOBI, este programa, desenvolvido em *Python*, tem como principais funções analisar as imagens capturadas durante os testes do robô e sincronizar a recolha de dados com o movimento do robô. Por fim, foi possível testar o robô em plano regular não acidentado, avaliar a influência do atrito nos pés, analisar o impacto da variação da altura trocantérica, estudar a influência da irregularidade do terreno e verificar a exatidão da marcha de viragem.

Em suma, no decorrer deste projeto foi possível desenvolver, construir e avaliar um protótipo físico de um conceito de robô hexápode inovador. O conceito inicial foi provado e o robô teve um desempenho bom e regular em todos os testes a que foi submetido. Os módulos bípedes, enquanto unidade básica de locomoção, funcionam e permitem simplificar o controlo do robô, no entanto, reduzem significativamente a capacidade de adaptação ao terreno visto que, apenas permitem um tipo de marcha periódica, a marcha trípole. Contudo, este projeto permitiu provar que os módulos bípedes são capazes de introduzir modularidade em robôs bio inspirados o que pode vir a aumentar em muito a sua versatilidade.

7.2. LIMITAÇÕES

As maiores limitações na construção do protótipo físico foram o preço e o tamanho, deste modo, procurou-se que o robô fosse compacto e barato.

Para alcançar este objetivo os atuadores selecionados foram de gama baixa e com pouca qualidade o que casou diversos problemas, tais como: dois servomotores não estão na mesma posição ainda que tenham sido comandados para o mesmo ângulo, este desfasamento pode ser tão grande como o dentado do veio do servomotor, a calibração manual permite mitigar este problema, contudo, cada posição implica um desfasamento diferente e a calibração manual acaba por não ser suficiente para todos os casos; ao fim de uns ciclos de uso alguns servomotores sofrem escorregamento e o ângulo para o qual são comandados passa a representar uma posição diferente; alguns servomotores experienciaram tremores sempre que colocados em situações com baixo binário resistivo, este fenómeno era por isso mais comum nos servomotores responsáveis por controlar a orientação dos módulos, os tremores eram imprevisíveis e agravaram-se com o tempo e com o uso; alguns servomotores deixaram de funcionar sem explicação aparente; o sistema de acoplagem dos servomotores através de um parafuso único provocava o desaperto dos mesmos ao fim de alguns ciclos como resultado do movimento do próprio robô, isto resultava numa diminuição da precisão de posicionamento das pernas. Estes problemas são facilmente mitigáveis se forem utilizados servomotores melhores, contudo, isto implica um aumento considerável no custo final do projeto.

O ROHMOBI foi também desenvolvido com o intuito de ser um protótipo pequeno e compacto de modo a facilitar a produção de componentes para o mesmo, contudo, este facto tornou a acomodação dos elementos de controlo um verdadeiro puzzle, o que resultou numa dificuldade acrescida sempre que era necessário fazer alterações ao circuito eletrónico, ou testar componentes. O facto de ser um protótipo tão leve e compacto aumentou a vulnerabilidade a perturbações, como é caso do centro de massa deslocado que teve um impacto evidente na trajetória do robô.

7.3. TRABALHO FUTURO

Este projeto permitiu validar o conceito do ROHMOBI e salientar o elevado interesse que uma solução destas poderá vir a ter no mundo dos robôs bio inspirados. Como trabalho

futuro são apresentadas em seguida algumas ideias que pretendem melhorar e evoluir o conceito do ROHMOBI.

O primeiro passo para melhorar o ROHMOBI seria construir uma nova versão com melhores servomotores e maiores dimensões. Obviamente, isto tornaria o projeto substancialmente mais caro, mas permitiria colmatar as limitações referidas no capítulo 7.2 e explorar com mais profundidade as limitações deste conceito. Nesta nova versão do ROHMOBI era importante também implementar sensores que fossem capazes de perceber e reconhecer o espaço em volta de modo a evoluir de controlo de malha aberta para malha fechada.

É importante também estudar novas tipologias de marchas de viragem, no presente trabalho apenas foi estudada uma tipologia, contudo, a implementação de novas metodologias pode vir a ter um grande impacto no aumento da flexibilidade do robô.

No futuro, os módulos bípedes devem ser testados para diferentes configurações, quer em número, quer em posicionamento e procurar perceber quais podem ser as vantagens, desvantagens e problemas práticos associados.

A iteração mais futurista do projeto ROHMOBI é, no entanto, a substituição da união física entre módulos bípedes por uma união virtual. Neste modelo, os módulos bípedes seriam verdadeiramente independentes uns dos outros, no entanto, colaborariam juntos para a execução de tarefas. Os módulos bípedes teriam de ser desenvolvidos como robôs bípedes, capazes de atingir equilíbrio em marcha dinâmica, contudo, isto iria permitir que os módulos fossem recrutados consoante as necessidades da tarefa a executar. Esta implementação de robótica colaborativa no conceito ROHMOBI iria permitir maior flexibilidade e versatilidade de aplicações.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Bruzzone and G. Quaglia, “Review article: Locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments,” *Mechanical Sciences*, vol. 3, no. 2. Copernicus GmbH, pp. 49–62, 2012. doi: 10.5194/ms-3-49-2012.
- [2] Bot’n Roll, “Bot’n Roll One.” <https://www.botnroll.com/pt/tutoriais/2289-bot-n-roll-one-a-.html> (accessed Oct. 26, 2022).
- [3] tecmundo, “NASA Curiosity .” <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/150892-nasa-revela-nome-rover-buscar-vida-solo-marte.htm> (accessed Oct. 26, 2022).
- [4] AMBOT, “AMBOT GRP TRAX.” <http://www.ambot.com/ip-tank.shtml> (accessed Oct. 26, 2022).
- [5] TECDRON, “TECDRON SP-e3.” <https://www.pinterest.pt/pin/648659152560735708/?mt=login> (accessed Oct. 26, 2022).
- [6] H. Hirukawa, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, and T. Isozumi, “The human-size humanoid robot that can walk, lie down and get up,” in *International Journal of Robotics Research*, Sep. 2005, vol. 24, no. 9, pp. 755–769. doi: 10.1177/0278364905057217.
- [7] R. Playter, M. Buehler, and M. Raibert, “BigDog,” in *Unmanned Systems Technology VIII*, May 2006, vol. 6230, p. 62302O. doi: 10.1117/12.684087.
- [8] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. di Carlo, P. M. Wensing, and S. Kim, “MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Dec. 2018, pp. 2245–2252. doi: 10.1109/IROS.2018.8593885.
- [9] A. Roennau, G. Heppner, M. Nowicki, and R. Dillmann, “LAURONV: A versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability,” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2014, pp. 82–87. doi: 10.1109/AIM.2014.6878051.
- [10] A. A. Yumaryanto, J. An, and S. Lee, “A cockroach-inspired hexapod robot actuated by LIPCA,” in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2006. doi: 10.1109/RAMECH.2006.252682.
- [11] D. Hong, J. Heaston, I. Morazzani, P. Ren, and G. Goldman, “STriDER: Self-Excited Tripedal Dynamic Experimental Robot,” 2007.

- [12] Researchgate, “Asimo Robot.” https://www.researchgate.net/publication/283107051_Design_of_Robots_Used_as_Education_Companion_and_Tutor/figures?lo=1 (accessed Oct. 26, 2022).
- [13] sphere drones, “Boston Dynamics Spot”, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: <https://spheredrones.com.au/products/boston-dynamics-spot-explorer-package>
- [14] IEEE, “LAURON V robot.” <https://robots.ieee.org/robots/lauron/> (accessed Jun. 08, 2022).
- [15] T. McGeer, “Passive Dynamic Walking,” *Int J Rob Res*, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, 1990, doi: 10.1177/027836499000900206.
- [16] IEEE, “ATLAS robot.” <https://robots.ieee.org/robots/atlas2016/> (accessed Jun. 08, 2022).
- [17] IEEE, “Cassie robot.” <https://robots.ieee.org/robots/cassie/> (accessed Jun. 08, 2022).
- [18] IEEE, “Digit robot.” <https://robots.ieee.org/robots/digit/> (accessed Jun. 08, 2022).
- [19] J. Yu, J. Hooks, S. Ghassemi, A. Pogue, and D. Hong, “Investigation of a non-anthropomorphic bipedal robot with stability, agility, and simplicity,” in *2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, URAI 2016*, Oct. 2016, pp. 11–15. doi: 10.1109/URAI.2016.7734010.
- [20] RoMeLa, “NABiRoS robot .” <http://www.romela.org/robots/#1539809920675-2401917d-99a0> (accessed Jun. 08, 2022).
- [21] M. VUKOBRATOVIĆ and B. BOROVIĆ, “ZERO-MOMENT POINT — THIRTY FIVE YEARS OF ITS LIFE,” *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 157–173, Mar. 2004, doi: 10.1142/S0219843604000083.
- [22] M. Raković, B. Borovac, M. Nikolić, and S. Savić, “Realization of biped walking in unstructured environment using motion primitives,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 6, pp. 1318–1332, Dec. 2014, doi: 10.1109/TRO.2014.2344431.
- [23] pinshape, “Walkabot - Gravity Powered Ramp Walking Robot.” <https://pinshape.com/items/781-3d-printed-walkabot-gravity-powered-ramp-walking-robot> (accessed Nov. 01, 2022).
- [24] L. Ding *et al.*, “Fault Tolerant Free Gait and Footstep Planning for Hexapod Robot Based on Monte-Carlo Tree,” Jun. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2006.07550>

- [25] H. Deng, G. Xin, G. Zhong, and M. Mistry, "Gait and trajectory rolling planning and control of hexapod robots for disaster rescue applications," *Rob Auton Syst*, vol. 95, pp. 13–24, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.robot.2017.05.007.
- [26] U. Saranlı, M. Buehler, D. E. Koditschek, "Rhex, : A Simple, and H. M. Hexapod, "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot Recommended Citation Recommended Citation RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," 2001.
- [27] IEEE, "RHEX robot." <https://robots.ieee.org/robots/rhex/?gallery=interactive1> (accessed Jun. 13, 2022).
- [28] M. Bjelonic, N. Kottege, T. Homberger, P. Borges, P. Beckerle, and M. Chli, "Weaver: Hexapod robot for autonomous navigation on unstructured terrain," *J Field Robot*, vol. 35, no. 7, pp. 1063–1079, Oct. 2018, doi: 10.1002/rob.21795.
- [29] J. Coelho *et al.*, "Study of the locomotion of a hexapod using CoppeliaSim and ROS," in *Proceedings - 2021 International Conference on Computers and Automation, CompAuto 2021*, 2021, pp. 109–116. doi: 10.1109/CompAuto54408.2021.00027.
- [30] H. Hirukawa *et al.*, "A universal stability criterion of the foot contact of legged robots - Adios ZMP," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, vol. 2006, pp. 1976–1983. doi: 10.1109/ROBOT.2006.1641995.
- [31] T. Saida, Y. Yokokohji, and T. Yoshikawa, "FSW (Feasible Solution of Wrench) for multi-legged robots," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003, vol. 3, pp. 3815–3820. doi: 10.1109/robot.2003.1242182.
- [32] A. Goswami, "Postural Stability of Biped Robots and the Foot-Rotation Indicator (FRI) Point."
- [33] F. Gonçalves, T. Ribeiro, A. F. Ribeiro, G. Lopes, and P. Flores, "A Recursive Algorithm for the Forward Kinematic Analysis of Robotic Systems Using Euler Angles," *Robotics*, vol. 11, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/robotics11010015.
- [34] J. He and F. Gao, "Mechanism, Actuation, Perception, and Control of Highly Dynamic Multilegged Robots: A Review," *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 33, no. 1. Springer, Dec. 01, 2020. doi: 10.1186/s10033-020-00485-9.
- [35] B. K. Ahlborn, R. W. Blake, and W. M. Megill, "Frequency tuning in animal locomotion," *Zoology*, vol. 109, no. 1, pp. 43–53, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.zool.2005.11.001.

- [36] C. C. Gordon *et al.*, “2012 ANTHROPOMETRIC SURVEY OF U.S. ARMY PERSONNEL: METHODS AND SUMMARY STATISTICS,” 2014.
- [37] D. Sanz-Merodio, M. Cestari, J. C. Arevalo, X. A. Carrillo, and E. Garcia, “Generation and control of adaptive gaits in lower-limb exoskeletons for motion assistance,” *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 5, pp. 329–338, Mar. 2014, doi: 10.1080/01691864.2013.867284.
- [38] L. A. Torres-Romero, L. Enrique González-Jiménez, and R. Ruiz-Cruz, “DC ELECTRIC MACHINES REVIEW AND MODELING FOR ELECTRIC VEHICLES PART I.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344058369>
- [39] M. E. Gomes, “Sistema Embarcado para Controle de Motores Brushless DC sensorless e sensorless para Veículos Portáteis de Transporte Individual.”
- [40] Orientalmotor, “Brushless DC Motor vs. AC Motor vs. Brushed Motor?” <https://www.orientalmotor.com/brushless-dc-motors-gear-motors/technology/AC-brushless-brushed-motors.html> (accessed Jan. 16, 2023).
- [41] Z. Ali and R. v. Kshirsagar, “Development of a CPLD based novel open loop stepper motor controller for high performance using VHDL,” in *INES 2010 - 14th International Conference on Intelligent Engineering Systems, Proceedings*, 2010, pp. 307–312. doi: 10.1109/INES.2010.5483826.
- [42] S. G. Papajoannou, “Stepping motors—A review,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 243–266, 1980, doi: 10.1016/0045-7906(80)90040-3.
- [43] J. Srivastava, “Stepper Motor Control Using CPLD-A Review.”
- [44] O. Wahyunggoro and N. B. Saad, “Development of fuzzy-logic-based self tuning PI controller for servomotor,” in *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2008*, 2008, pp. 1545–1550. doi: 10.1109/ICARCV.2008.4795754.
- [45] A. Mohtar, Z. Nedic, A. Mohtar, Z. Nedic, and J. Machotka, “A Compact and Affordable BLDC Motor Controller for a Microelectronics Remote Laboratory. A compact and affordable BLDC motor controller for a microelectronics remote laboratory,” 2008. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/221218039>
- [46] F. E. Udawadia and R. E. Kalaba, “On the foundations of analytical dynamics,” 2002.
- [47] “kinematics,” Apr. 21, 2022. <https://www.britannica.com/science/kinematics> (accessed May 17, 2022).

- [48] A. Chantakamo and N. Dejdumrong, “Conversion of rational Bézier curves into non-rational Bézier curves using progressive iterative approximation,” in *Proceedings - 10th International Conference Computer Graphics, Imaging, and Visualization, CGIV 2013*, 2013, pp. 38–41. doi: 10.1109/CGIV.2013.16.
- [49] PC componentes, “Servo MG90S Micro Servo Metal Compatível com Arduino.” <https://www.pccomponentes.pt/servo-mg90s-micro-servo-metal-compatible-con-arduino> (accessed Dec. 27, 2022).
- [50] ALLDATASHEET.COM, “MG90S Datasheet (PDF) - List of Unclassified Manufacturers.” <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132104/ETC2/MG90S.html> (accessed Dec. 27, 2022).

APÊNDICE A: ESQUEMA DE CIRCUITO ELETRÔNICO

O esquema do circuito eletrônico do ROHMOBI é apresentado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

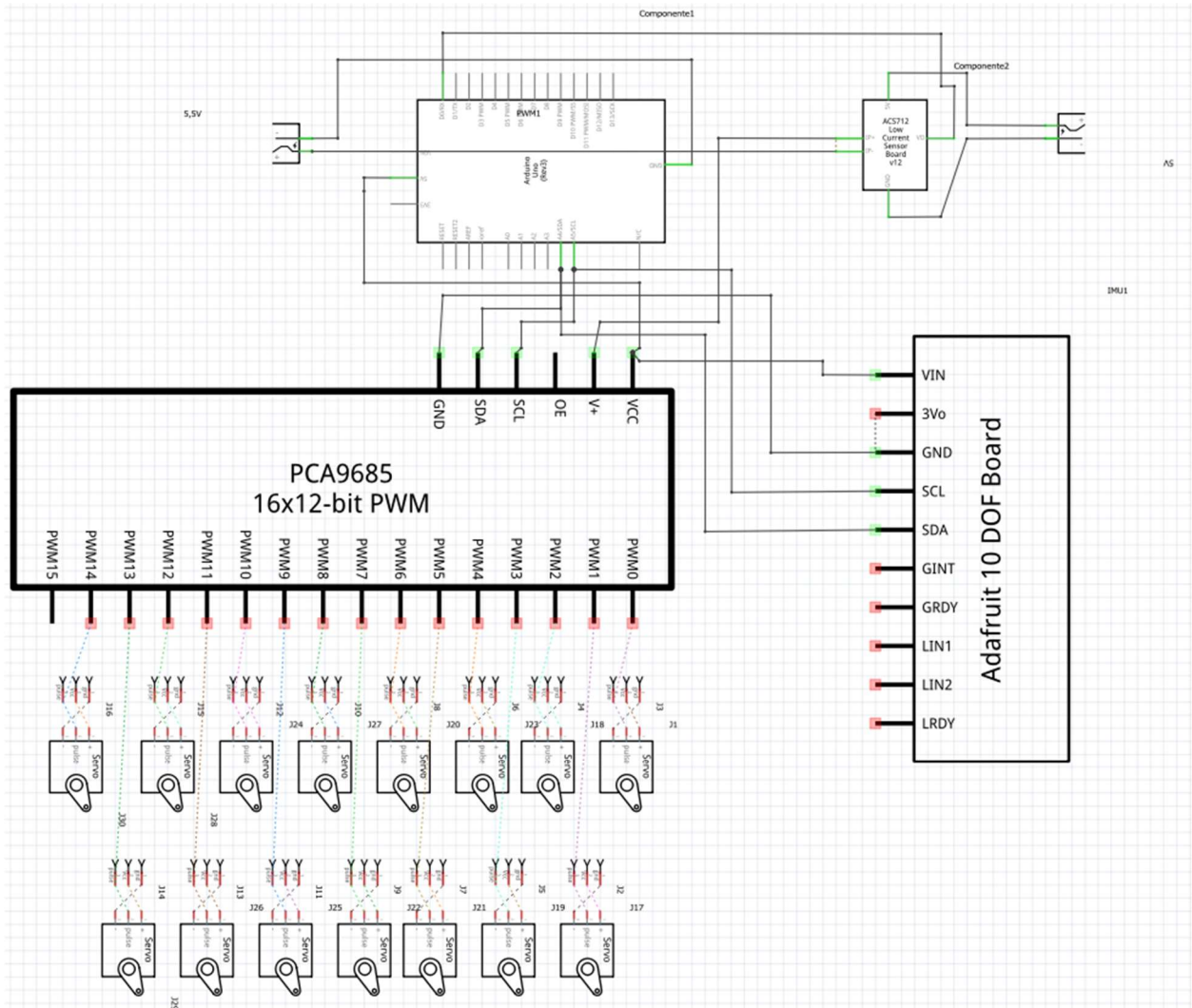


Figura A. 1- Esquema do circuito eletrônico do ROHMOBI

APÊNDICE B: ALGORITMOS GERADOS

Todos os algoritmos utilizados no desenvolvimento deste projeto podem ser consultados através do link no fundo desta página. A informação está guardada num repositório do *github*, dividida em 3 pastas de modo a facilitar a navegação pelos ficheiros.

A pasta *Code for images generation* contém os códigos em *Python* utilizados para produzir as imagens e simulações apresentadas neste documento.

A pasta *Robot Control* contém os algoritmos em *C++* que foram alimentados no *Arduino UNO* de modo a controlar o ROHMOBI.

- *Robot_motion_v4.2*: código principal utilizado para controlar e comandar o ROHMOBI;
- *Robot_motion_v4.2_60mm*: código semelhante ao código principal, em que apenas alteram os pontos de controlo de modo a permitir marcha com altura trocantérica de 60 mm;
- *Robot_motion_v4.2_90mm*: código semelhante ao código principal, em que apenas alteram os pontos de controlo de modo a permitir marcha com altura trocantérica de 90 mm.

A pasta *Tests* contém os algoritmos em *python* utilizados para realizar os testes práticos de avaliação de performance e estudo sobre a influência da variação de parâmetros:

- *Kinematics*: código essencial em todo o desenvolvimento do projeto, principalmente na fase de testes, permite calcular a cinemática direta e inversa do ROHMOBI de forma automática;
- *Find color*: código utilizado para encontrar os parâmetros HSV da cor do *tracker* em diferentes condições de luminosidade do espaço;
- *Rohmobi teste v3*: código principal utilizado nos testes, permite comandar o ROHMOBI, recolher imagens da câmara, sincronizar o movimento do robô com a recolha de dados, cronometrar o tempo de teste, medir a velocidade média, medir velocidade instantânea, delinear a trajetória do robô e guardar os dados recolhidos em ficheiros no próprio computador.

https://github.com/RicardoRemelgado/ROHMOBI_Mestrado

APÊNDICE C: CONTROLO DO PERÍODO DA PASSADA ATRAVÉS DO CÓDIGO

O código de controlo do ROHMOBI permite variar o período da passada, esta funcionalidade pode ser muito importante em aplicações práticas, pois com a alteração de apenas uma variável o robô pode alterar a sua velocidade e deste modo adaptar-se ao meio externo, por exemplo uma mudança na irregularidade do terreno.

As curvas de *Bezier* são calculadas a partir de um fator iterativo que varia entre 0 e 1. Para aumentar o tempo que demora a completar uma curva deve-se aumentar o número de pontos calculados, isto é, diminuir o fator da iteração.

Tendo em conta que o *void loop* principal do código corre a uma frequência de 100 Hz cada ciclo demora 0.01 s (Figura C. 1). Para que a trajetória segundo uma curva de *Bezier* tenha 1 segundo de duração a curva deverá ter 100 pontos calculados.

```
// The controller will be updated at a rate of 100Hz
#define UPDATE_FREQUENCY 100
#define UPDATE_TIME (1000 / UPDATE_FREQUENCY)
unsigned long updateTimer = 0;
```

Figura C. 1- Definição da frequência de ciclo

Como a frequência do *void loop* é constante o período do passo pode ser modulado através do número de pontos calculados por curva. O número de pontos calculados é inversamente proporcional ao valor do fator iterativo (*timestep*). A função da Figura C. 2 permite calcular o valor de *timestep* necessário tornar o período da passada equivalente ao valor selecionado. Por defeito, o valor do período da passada é 2 segundos.

```
float TimeStep(float T){
    float it, ts;
    it = T / 0.02;
    ts = pow(it, -1);
    return ts;
}
```

Figura C. 2- Função *TimeStep*

APÊNDICE D: DESENHOS TÉCNICOS DOS COMPONENTES DO ROHMOBI

De seguida são apresentados os desenhos técnicos dos componentes do robô que foram modelados para este projeto e produzidos recorrendo à impressão 3D.

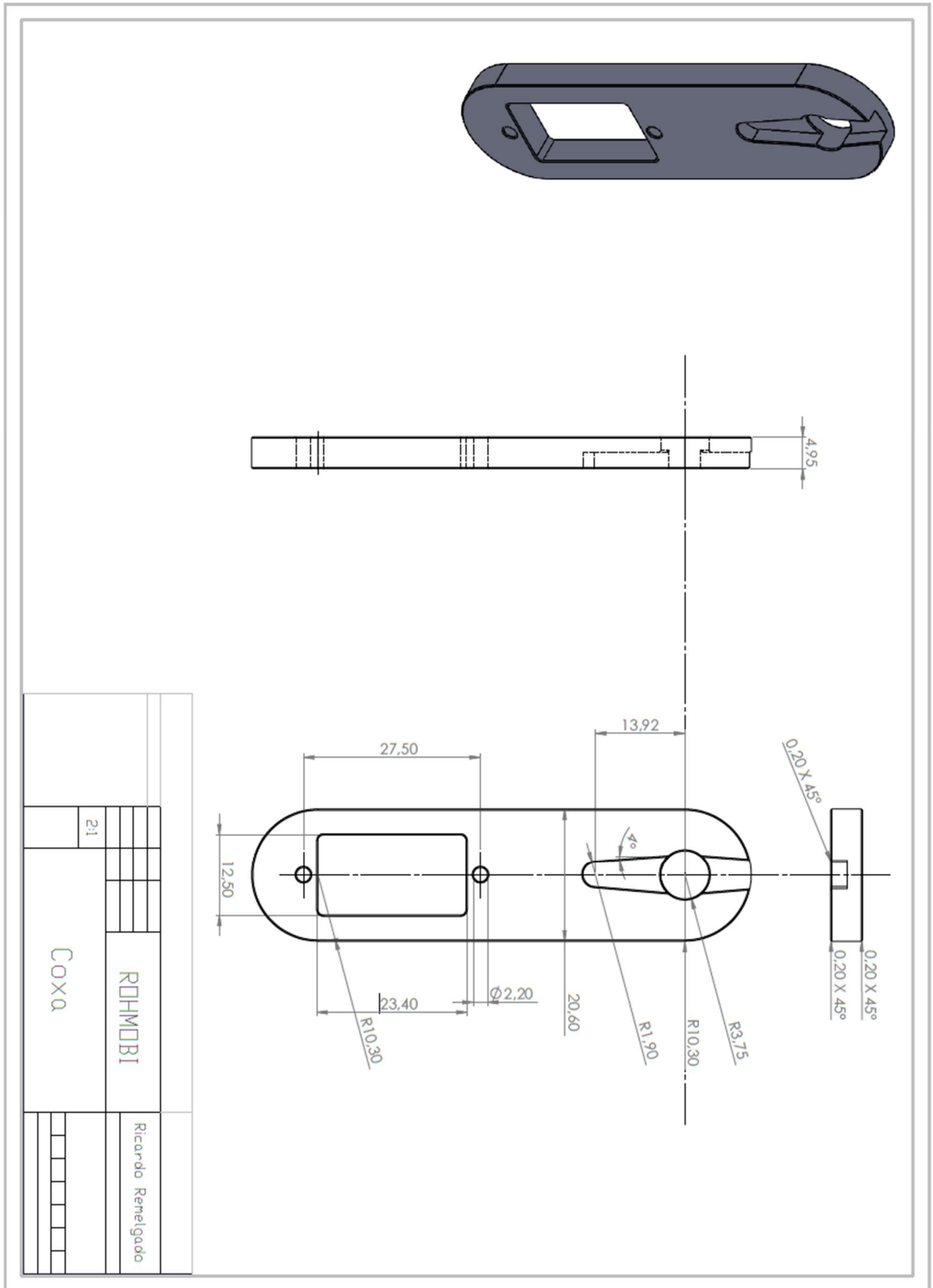


Figura D. 1- Desenho técnico da coxa do ROMOBOBI

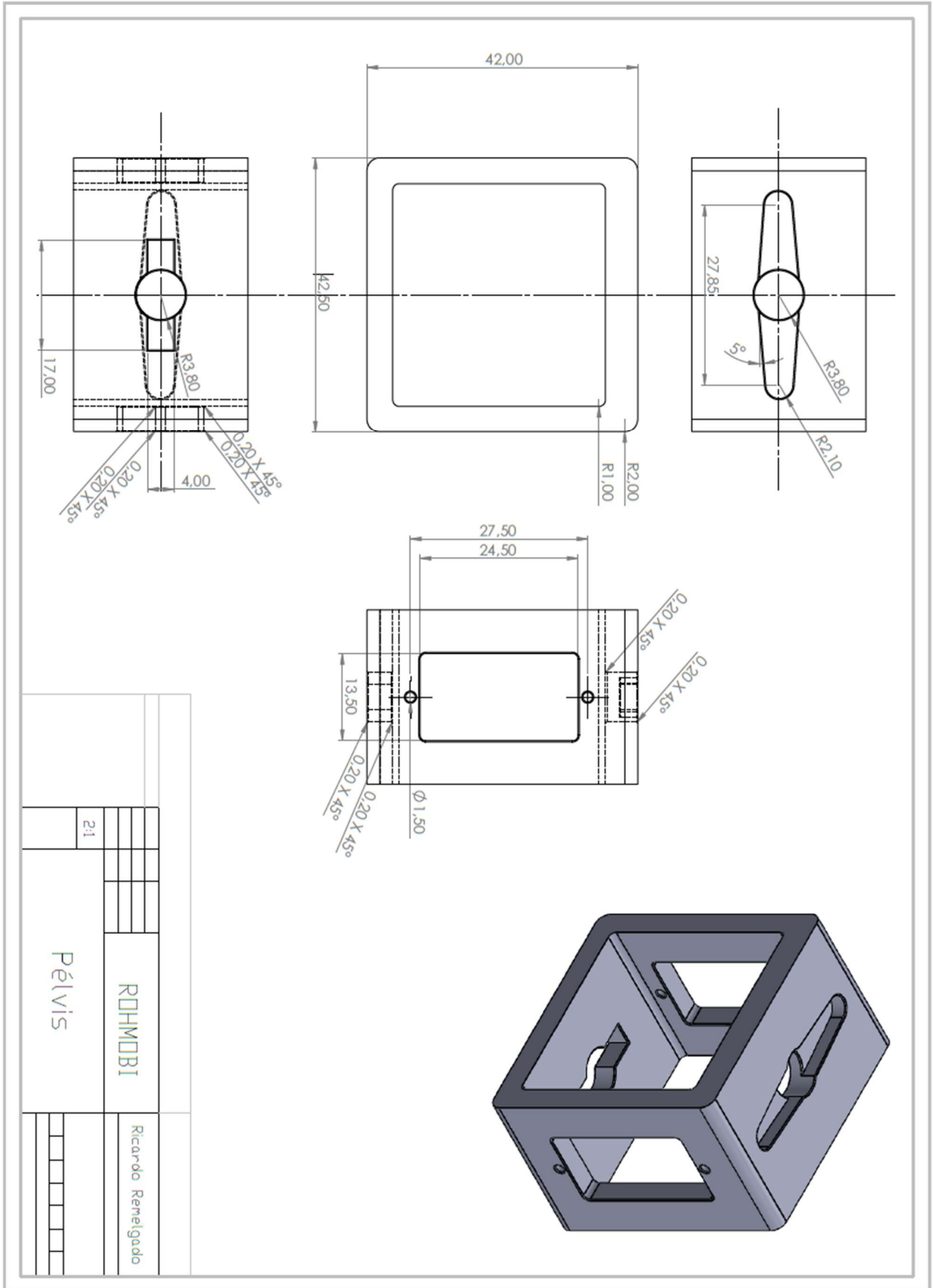


Figura D. 3- Desenho técnico da pélvis do ROHMOBI

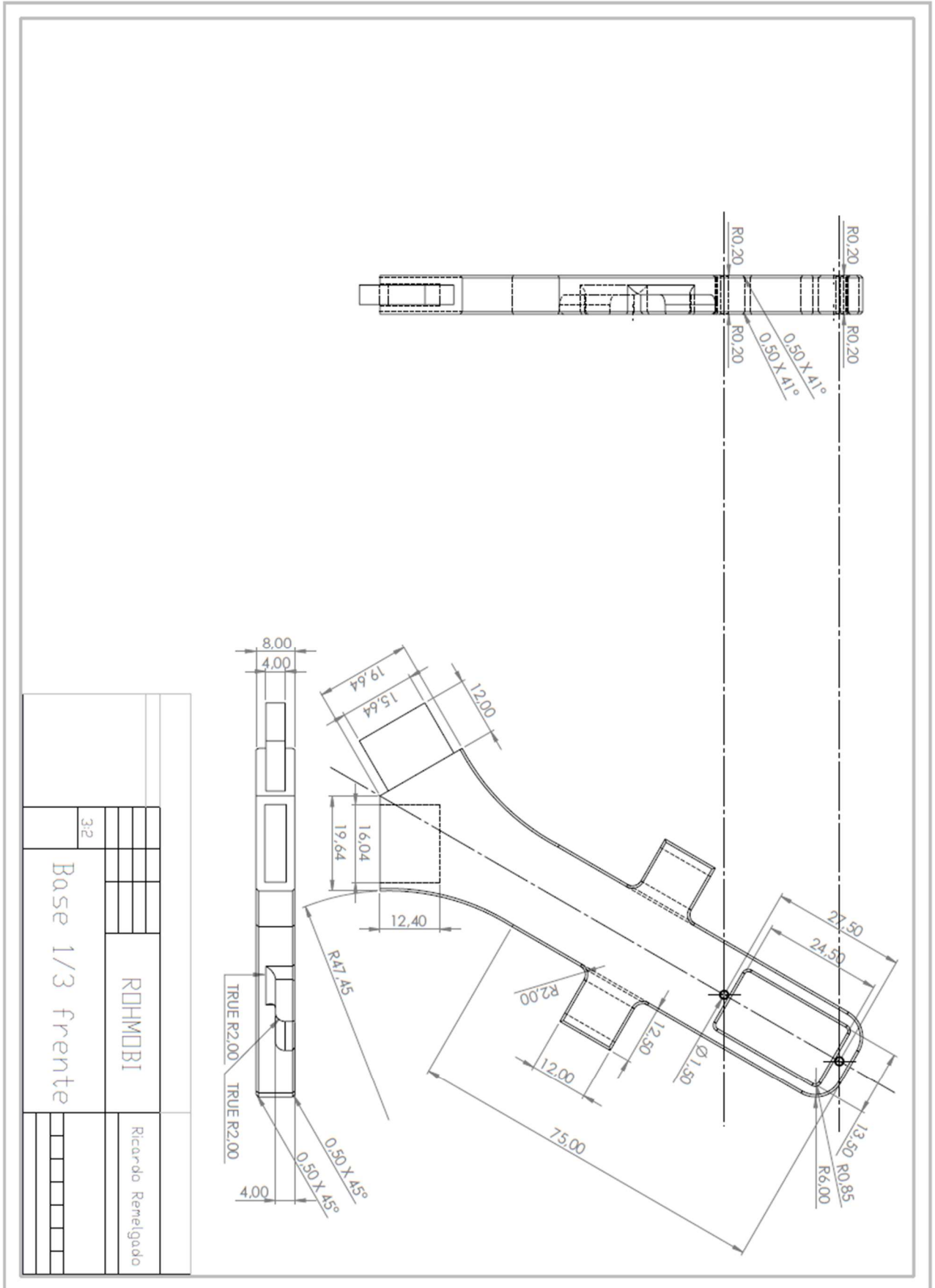


Figura D. 4- Desenho técnico do componente frontal da base

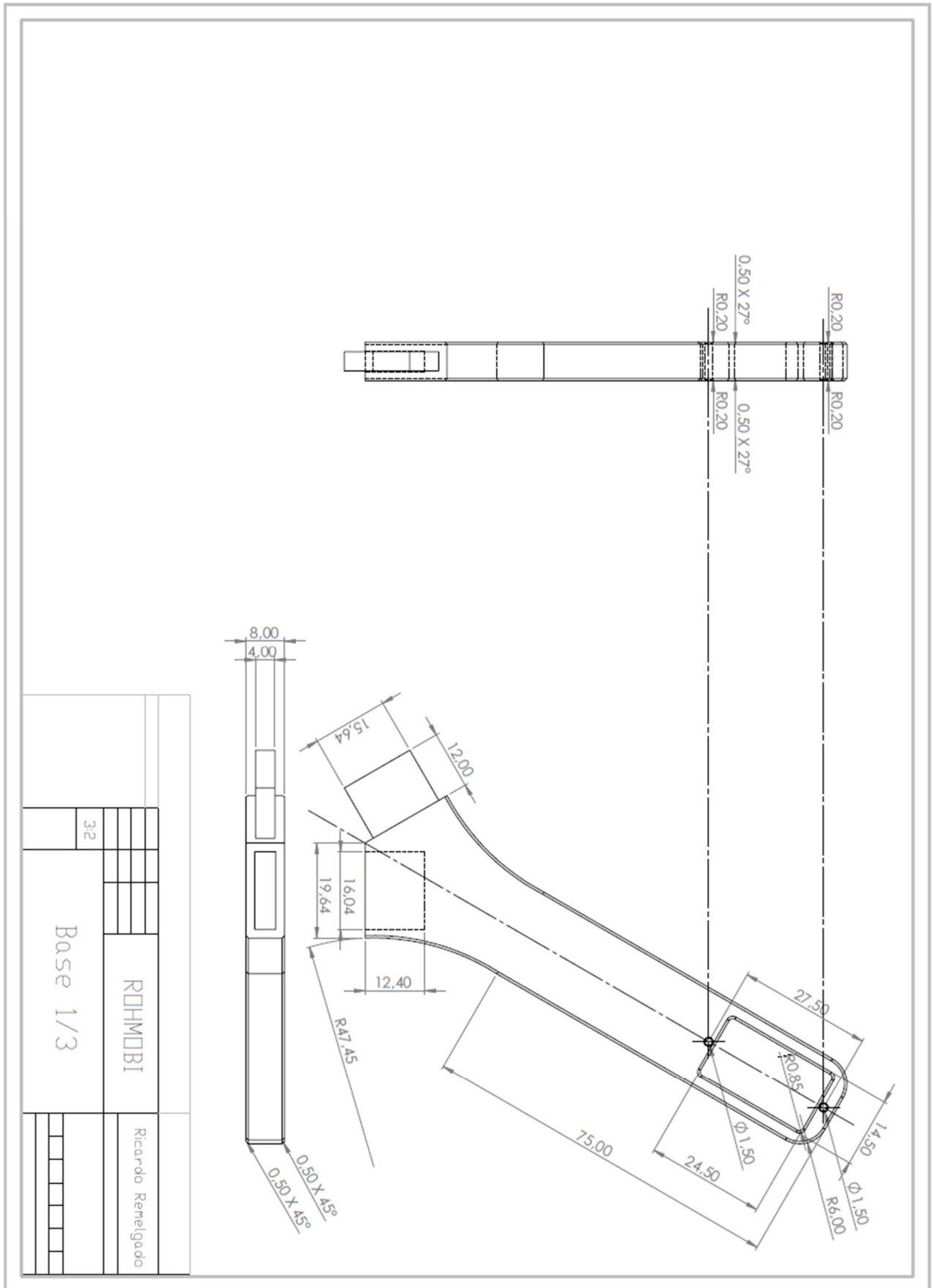


Figura D. 5- Desenho técnico de um componente da base

APÊNDICE E: PROPRIEDADES INERCIAIS DOS MEMBROS DAS PERNAS

As propriedades inerciais dos membros foram determinadas recorrendo às modulações em *SolidWorks* que permitiu obter uma descrição bastante precisa de várias propriedades inerciais.

- Membro inferior (Figura E. 1):
 - Massa = 7,71 g
 - Volume = 5969.52 mm³
 - Área superficial = 3707.71 mm²
 - Posição do CG:
 - $x = 0,00$ mm
 - $y = 0,61$ mm
 - $z = -26,54$ mm
 - Principais eixos e momentos de inércia
 - $I_x = (0,00; 0,00; 1,00)$, $P_x = 204,21$ g*mm²
 - $I_y = (1,00; 0,00; 0,00)$, $P_y = 3231,80$ g*mm²
 - $I_z = (0,00; 1,00; 0,00)$, $P_z = 3380,97$ g*mm²

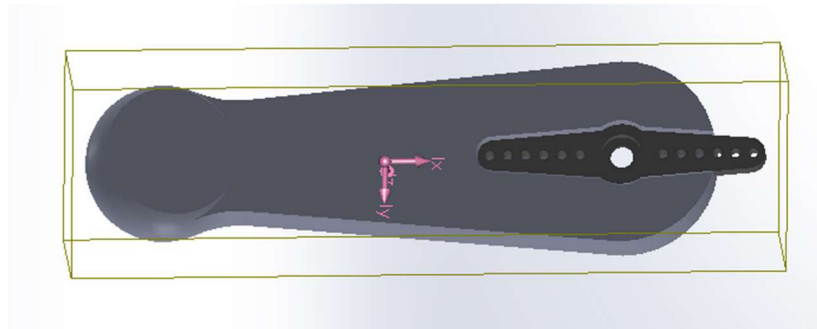


Figura E. 1- Centro de gravidade do membro inferior da perna

- Membro superior (Figura E. 2):
 - Massa = 20,92 g
 - Volume = 10252,40 mm³
 - Área superficial = 13224,48 mm²
 - Posição do CG:
 - $x = 0,01$ mm

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípedes

- $y = -0,40 \text{ mm}$
- $z = -37.72 \text{ mm}$
- Principais eixos e momentos de inércia
 - $I_x = (0,00; 0,00; 1,00)$, $P_x = 1283,62 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$
 - $I_y = (0,01; -1,00; 0,00)$, $P_y = 6583,48 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$
 - $I_z = (1,00; 0,01; 0,00)$, $P_z = 6923,91 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$

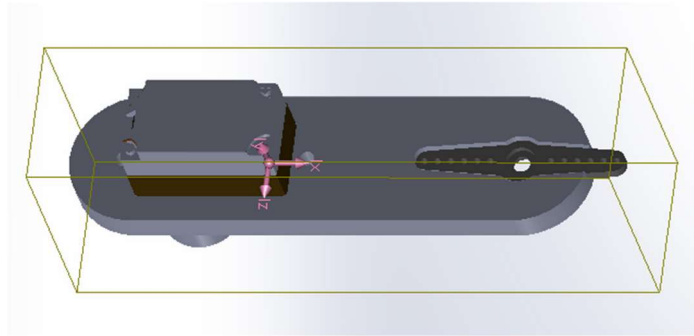


Figura E. 2- Centro de gravidade do membro superior da perna

APÊNDICE F: ALGORITMO DE VISÃO PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES

PRÁTICOS

O algoritmo de visão foi essencial na realização dos testes práticos e na recolha de dados. Este algoritmo permite comandar o ROHMOBI, recolher imagens da câmara, sincronizar o movimento do robô com a recolha de dados, cronometrar o tempo de teste, medir a velocidade média, medir a velocidade instantânea, delinear a trajetória do robô e guardar os dados recolhidos em ficheiros no próprio computador.

Este algoritmo foi escrito em *Python*, contudo é capaz de comandar o robô através do *Arduino UNO* que funciona com a linguagem *C++*. Para que isto seja possível, é necessário que o *Arduino UNO* tenha o código responsável pelo comando do robô carregado no processador, neste caso, o código do algoritmo de visão simplesmente envia os comandos para o *Arduino UNO* através da porta série do computador. Isto permite sincronizar a recolha de dados com o início do teste, pois a recolha de dados apenas irá começar quando o algoritmo de visão ler o comando *W* no teclado, o qual será enviado pela porta série para o *Arduino UNO* de modo a iniciar a marcha do ROHMOBI.

A componente da visão é responsável por gerar os dados que irão permitir analisar o desempenho do robô. Para poder analisar o movimento do robô é necessário ser capaz de o seguir. Para poder rastrear o movimento do robô é utilizado o rastreador representado na Figura F. 1.



Figura F. 1- Rastreador (30x30 mm) do movimento do ROHMOBI

Este rastreador é acoplado à base do robô e ergue-se sobre os restantes componentes do robô de modo que o quadrado verde no topo possa ser bem captado pela câmara. Através das funções da biblioteca *Open CV* o algoritmo de visão procura na imagem por áreas verdes

dentro de um intervalo de valores HSV definido. O espaço de teste é preparado de modo que o rastreador seja o único componente verde na imagem, a luminosidade durante os testes é constante e o quadrado verde é feito de alcatifa de modo a reduzir o efeito da reflexão da luz. Todas estas considerações permitem definir a área e o centro do rastreador em qualquer posição da imagem com elevada fiabilidade. As sucessivas posições do centro são guardadas numa lista, o *plot* entre todos os elementos existentes nesta lista permite delinear a trajetória do robô. A velocidade instantânea é calculada através da razão entre a posição do centro atual e o centro anterior, pelo tempo de interação de cada ciclo do algoritmo. A velocidade média é obtida através da razão entre o somatório de todas as velocidades instantâneas e o tempo de teste decorrido. A velocidade é calculada em frames por segundo, no entanto, a conversão para unidades métricas é possível sabendo a quantos mm's de comprimento corresponde um frame. Como o rastreador é um quadrado com dimensões bem conhecidas é possível corresponder o comprimento da latera deste quadrado em frames ao comprimento real em mm.

ANEXO I: TABELA ASCII

Tabela I. 1- Representação de caracteres segundo tabela ASCII

Decimal	Binário	Hexadecimal	Carateres
97	01100001	61	a
98	01100010	62	b
99	01100011	63	c
100	01100100	64	d
101	01100101	65	e
102	01100110	66	f
103	01100111	67	g
104	01101000	68	h
105	01101001	69	i
106	01101010	6A	j
107	01101011	6B	k
108	01101100	6C	l
109	01101101	6D	m
110	01101110	6E	n
111	01101111	6F	o
112	01110000	70	p
113	01110001	71	q
114	01110010	72	r
115	01110011	73	s
116	01110100	74	t
117	01110101	75	u
118	01110110	76	v

Conceção e construção de um protótipo robótico hexápode com módulos bípedes

119	01110111	77	w
120	01111000	78	x
121	01111001	79	y
122	01111010	7A	z