

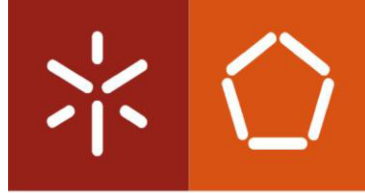


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Rafaela Torre e Sá

**Dinâmica de um Robô Móvel Hexápode:  
Controlo e Otimização**

Fevereiro de 2021



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Rafaela Torre e Sá

**Dinâmica de um Robô Móvel Hexápode:  
Controlo e Otimização**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau  
de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor António Alberto Caetano Monteiro

Professor Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes

Fevereiro de 2021

## 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.



Atribuição  
CC BY

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



## AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, pelo interesse apresentado desde o início na participação deste projeto. Ao Professor Alberto Caetano Monteiro, por todo o apoio, compreensão e auxílio prestado durante este projeto, ao Professor Gil, pela disponibilidade, preocupação e toda a assistência prestada ao longo da realização desta dissertação.

Agradeço também às pessoas importantes para este projeto que se cruzaram comigo, em especial à Joana Coelho, por toda a disponibilidade, a qualquer hora e momento, todo companheirismo, conselhos e dicas, e sempre acreditar nas minhas capacidades, ao Tiago Ribeiro, pela disposição em auxiliar sempre que solicitado, e ainda, ao Professor Fernando Ribeiro, pelo fornecimento do espaço de trabalho.

Um agradecimento gigante à minha família, sempre disponíveis para mim e sempre tão orgulhosos do meu percurso. Aos meus pais, por sempre apoiarem as minhas decisões e se desdobrarem para que todo este percurso fosse possível, por tentarem sempre ajudar-me e se interessarem pelos meus projetos mesmo sem os conhecimentos suficientes. Aos meus tios, primos e avós, pela preocupação constante com o meu sucessos e toda a disponibilidade.

Aos que a universidade me trouxe e tanto me preencheram enquanto pessoa. Ao João, que me acompanhou praticamente o curso todo, agradeço por acreditar sempre em mim e nas minhas capacidades, estar sempre lá e ser um grande apoio nos bons e maus momentos, aos grandes amigos e amigas que me acompanharam todos estes anos, pelos momentos partilhados e tudo o que me ensinaram.

Um agradecimento muito especial aos meus grandes amigos, membros e ex-membros do Grupo de Jovens Esperança, por todo o apoio e amizade demonstrado e por estarem sempre lá quando necessário.

Por fim, a todas as restantes pessoas que demonstraram interesse neste projeto e que de alguma forma contribuíram para a sua realização.

## 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.

## RESUMO

O interesse no desenvolvimento de robôs móveis autônomos tem vindo a aumentar, principalmente para a execução de tarefas de forma autônoma em ambientes considerados perigosos para o ser humano. Para o deslocamento em ambientes complexos, os robôs hexápodes apresentam uma boa solução devido ao seu elevado número de marchas estáveis com potencial para se adaptarem a qualquer topologia de terreno. Outra característica que motiva o seu desenvolvimento é a sua elevada estabilidade corporal, que é considerada uma prioridade para a navegação nestes cenários.

O principal objetivo desta dissertação é gerar uma locomoção trípede para um robô hexápode em plano regular, de forma a que este seja capaz de alterar a sua trajetória para ultrapassar obstáculos autonomamente, utilizando a formulação dinâmica das suas pernas para o controlo da sua atuação. O trabalho é realizado em ambiente virtual, usando um modelo robótico desenvolvido pelo Laboratório de Automação e Robótica (LAR). Após revisão bibliográfica dos conceitos relevantes para a execução deste trabalho, realiza-se a análise cinemática e estática da perna robótica para formular a atuação correta das juntas em relação ao apoio do pé e estudar os esforços estáticos a que o mecanismo está sujeito nestas condições. Com o objetivo de otimizar o modelo estudado, propõe-se um novo desenho para o apoio da perna, para inserir um sensor de força, e ainda se analisa uma possível redução de massa para os componentes da tibia e o fémur, reduzindo o binário necessário para os seus atuadores. De seguida, elabora-se a arquitetura de controlo do robô, usando a formulação de *Newton-Euler* das pernas para verificar o efeito das forças e momentos externos na atuação do sistema. A geração de trajetórias e a tomada de decisão para contorno de obstáculos são também implementadas em *Python*. Para testar o sistema de controlo idealizado, recorre-se ao programa de simulação robótica *CoppeliaSim* e ao ROS (*Robot Operating System*) para transporte de informação. Nesta simulação é possível compreender a viabilidade do sistema através da análise da estabilidade da locomoção.

Palavras-Chave: Robô Hexápode, Controlo, Dinâmica, ROS, CoppeliaSim

## ABSTRACT

The interest in the development of autonomous mobile robots has been increasing, mainly for the execution of autonomous tasks in environments considered dangerous for human beings. For navigating across complex environments, hexapod robots provide a good solution due to their high number of stable gaits which can be adapted to any terrain topology. Another characteristic that motivates their design is their inherent body stability, which is prioritized for walking in these scenarios. The main objective of this dissertation is to generate a tripod locomotion for a hexapod robot walk across a regular plane which allows the change of the robot's trajectory to autonomously overcome obstacles, using the dynamic formulation of its limbs to control its efficiency. The work is carried out in a virtual environment, using a robotic model designed by the Automation and Robotics Laboratory (LAR). After the bibliographic review of the concepts considered relevant for the execution of this work, the kinematic and static analyses of the robotic leg are performed to formulate the correct actuation of the joints considering the desired position of the foot-tip, and to study the static efforts which the mechanism is subjected in these conditions. To optimize the model studied, a new design is proposed for the leg support to insert a force sensor, and a possible reduction in the mass of the components of the tibia and femur is also analyzed, reducing the torque required for the actuators. Following this train of thought, the robot's control architecture is elaborated, using the Newton-Euler formulation of the legs to verify the impact of the external forces and moments on the system's efficiency. The generation of trajectories and decision-making for surmounting obstacles are also implemented in Python. To test the idealized control system, the CoppeliaSim robotic simulation program and the ROS (Robot Operating System) are used to transport information. In this simulation, it is possible to understand the reliability of the system through the analysis of the locomotion stability.

KEYWORDS: HEXAPOD ROBOT, CONTROL, DYNAMICS, ROS, COPPELIASIM



## ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiv
Lista de Constantes e Variáveis.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2. Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Robôs hexápodes.....	5
2.1.1 Conceito de redundância.....	5
2.1.2 Arquitetura do robô.....	6
2.1.3 Tipos de pernas.....	7
2.1.4 Tipos de juntas.....	8
2.1.5 Robôs hexápodes bio-inspirados.....	9
2.2 Controlo de robôs hexápodes.....	13
2.2.1 Índices de desempenho.....	13
2.2.2 Tipos de marcha.....	15
2.2.3 Controlo da locomoção.....	17
2.3 Programas de simulação dinâmica de robôs.....	17
2.4 Análise cinemática e dinâmica de sistemas multicorpo.....	20
2.4.1 Sistemas de coordenadas.....	21
2.4.2 Formulação de <i>Newton-Euler</i> .....	22
2.4.3 Métodos de integração de tempo.....	23
2.5 ROS ( <i>Robot Operating System</i> ).....	24
2.6 Método de Planeamento de Experiências (PDE).....	26

3.	Projeto mecânico .....	28
3.1	Requisitos iniciais de projeto do mecanismo .....	28
3.1.1	Projeto do mecanismo das pernas .....	29
3.1.2	Sistema de coordenadas da perna .....	31
3.1.3	Amplitude do movimento de cada articulação.....	32
3.2	Cinemática direta .....	33
3.3	Cinemática inversa.....	36
3.4	Formulação para análise estática.....	38
3.5	Modelo conceitual .....	41
3.6	Otimização das pernas .....	45
3.7	Conclusões do capítulo.....	50
4.	Controlo e análise dinâmica .....	51
4.1	Análise dinâmica.....	51
4.2	Controlo.....	55
4.2.1	Gerador de trajetórias .....	57
4.2.2	<i>CoppeliaSim</i> .....	60
4.2.3	ROS ( <i>Robot Operating System</i> ).....	64
4.3	Avaliação de desempenho .....	65
4.4	Conclusões do capítulo.....	68
5.	Conclusões e trabalho futuro.....	69
	Bibliografia .....	71
	Apêndice I – Desenhos técnicos do apoio .....	73
	Apêndice II – Componentes para o projeto mecânico do robô .....	76
	Apêndice III – Resultados da análise estrutural.....	77
	Apêndice IV – Análise dinâmica nos planos XY e XZ .....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formas do corpo de um robô hexápode.....	6
Figura 2 - Tipos e diferentes características das pernas de um robô hexápode. Adaptado de (Tedeschi & Carbone, 2014).....	7
Figura 3 - Representação dos diferentes tipos de juntas: (a) junta esférica, (b) junta revolução, (c) junta prismática, (d) junta cilíndrica (Flores, 2015). ....	8
Figura 4 - Robô hexápode - LAURON V (Roennau et al., 2014).....	9
Figura 5 - Robô hexápode – RHex (Haynes et al., 2012).....	10
Figura 6 - Robô hexápode – MAX (Elfes et al., 2017).....	10
Figura 7- Robô hexápode - Octopus-III (Zhao et al., 2018).....	11
Figura 8 - Robô hexápode – SiLVIA (Wang et al., n.d.). ....	11
Figura 9 - Robô hexápode - PH-Robot (Xin et al., 2017). ....	12
Figura 10 - Modelação do robô hexápode desenvolvido no LAR (Coelho, 2018).....	12
Figura 11 - Projeção do CG no solo e limitações do seu polígono de suporte. Adaptado de (Kajita & Espiau, 2008). ....	14
Figura 12 – Diagrama esquemático da margem de estabilidade do PMZ (Deng et al., 2017). ....	14
Figura 13 – Diagrama de uma marcha periódica para um hexápode, em função do tempo.....	16
Figura 14 - Esquema básico do controlo de um robô hexápode. Adaptado de (Tedeschi & Carbone, 2014).....	17
Figura 15 - Tipos de coordenadas utilizados em sistemas multicorpo. Adaptado de (Flores, 2015). ....	22
Figura 16 - Fluxograma para a implementação da formulação de Newton-Euler. Adaptado de (Flores & Lankarani, 2016).....	23
Figura 17 - Comunicação entre os conceitos básicos da computação gráfica do ROS. Adaptado de (ROS.org, 2014) .....	26
Figura 18 - Representação da perna e a rotação de cada articulação.....	30
Figura 19 - Representação dos CM dos segmentos no plano XZ. ....	31
Figura 20 - Representação dos CM dos segmentos no plano XY. ....	32
Figura 21 - Representação do espaço de trabalho da perna.....	33
Figura 22 – Representação dos referenciais relativos utilizados na cinemática direta. ....	34
Figura 23 - Representação gráfica da variação de posição do pé. ....	35
Figura 24 - Representação geométrica utilizada para o cálculo de $\phi_1$ . ....	36

Figura 25 - Representação geométrica para o cálculo de $\theta_{32}$ .	36
Figura 26 - Diagrama de corpo livre da tíbia.	38
Figura 27 - Diagrama de corpo livre do fémur.	40
Figura 28 - Diagrama de corpo livre da coxa.	40
Figura 29 - Montagem final do robô.	41
Figura 30 - Representação dos componentes da perna.	41
Figura 31 - Configuração das juntas.	42
Figura 32 - Representação dos componentes do membro de apoio.	43
Figura 33 - Sensor resistivo utilizado para o contacto.	44
Figura 34 - Protótipo da perna montado com acionamento de um servomotor e o sensor de força.	44
Figura 35 - Esquema elétrico da ligação do sensor de força e um servomotor ao arduino.	45
Figura 36 - Representação das variáveis em estudo na tíbia.	46
Figura 37 - Representação das variáveis em estudo no fémur.	48
Figura 38 - Arquitetura do controlo do robô hexápode.	51
Figura 39 - Partes do movimento efetuado pela perna no plano XY.	52
Figura 40 - Partes do movimento efetuado pela perna no plano XZ.	52
Figura 41 - Diagrama global das etapas de controlo programadas em Python.	55
Figura 42 - Diagrama das etapas que constituem um passo, programadas em Python.	56
Figura 43 - Representação do sistema de eixos utilizado.	57
Figura 44 - Representação das trajetórias do pé para cada perna na marcha frontal.	58
Figura 45 - Camada de visualização CoppeliaSim.	61
Figura 46 - Camada de simulação dinâmica CoppeliaSim.	61
Figura 47 - Hierarquia do cenário CoppeliaSim:	62
Figura 48 - Peça do pé simplificada com sensor de força.	63
Figura 49 - Força de contacto ao longo de um ciclo de trajetória.	64
Figura 50 - Cenário da simulação em CoppeliaSim.	64
Figura 51 - Avaliação da estabilidade estática.	66
Figura 52 - Posicionamento do PMZ no polígono de suporte.	66
Figura 53 - Binário exigido aos motores de uma perna durante a simulação.	67
Figura 54 - Esforços H1, H2 e H3 aplicados numa perna durante um ciclo de simulação.	67
Figura 55 - Esforços V2 e V3 aplicados numa perna durante um ciclo de simulação.	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidades de simulação de atuação. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018).....	18
Tabela 2 - Capacidades de simulação do ambiente. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018). ....	18
Tabela 3 - Diferentes modelos de simulação. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018).....	19
Tabela 4 - Interfaces de simulação. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018).....	19
Tabela 5 - Exemplo de aplicação do método DOE com duas variáveis.....	26
Tabela 6 – Parâmetros de rotação e translação de <i>Denavit-Hartenberg</i> .....	34
Tabela 7 - Seleção do material para cada componente.....	42
Tabela 8 - Iterações realizadas na análise estrutural da tíbia.....	46
Tabela 9 - Resultados da análise estrutural da tíbia para o caso inicial e as iterações 3 e 5.....	47
Tabela 10 - Iterações realizadas na análise estrutural do fêmur. ....	48
Tabela 11 - Resultados da análise estrutural do fêmur para o caso inicial e as iterações 1 e 5. ....	49
Tabela 12 - Sensores utilizados na simulação. ....	62
Tabela 13 - Tópicos de ROS utilizados no controlo do robô.....	65
Tabela 14 - Descrição dos componentes necessários para o projeto mecânico do robô.....	76
Tabela 15 - Resultados da análise estrutural da tíbia para as restantes iterações .....	77
Tabela 16 - Resultados da análise estrutural do fêmur para as restantes iterações.....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Abreviatura	Significado
“ATHENA”	<i>All Terrain Hexapod for Environment Navigation Adaptability</i>
CG	Centro de Gravidade
CM	Centro de Massa
DAC	Desenho Assistido por Computador
GDL	Graus de Liberdade
LAR	Laboratório de Automação e Robótica
PDE	Planeamento de Experiência
PLA	Ácido Poliláctico
PMZ	Ponto de Momento Zero
ROS	<i>Robot Operating System</i>
SM	Sistema Multicorpo
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>

## LISTA DE CONSTANTES E VARIÁVEIS

Constante e varáveis	Significado e unidades
$\alpha, \beta$	Ângulos auxiliares (°)
$\phi, \theta$	Posição angular dos corpos das pernas (°)
$\hat{q}$	Junta da perna
$F$	Força (N)
$g$	Constante gravítica (9.81m/s <sup>2</sup> )
$H$	Força de reação para o eixo X (N)
$l$	Comprimento (m)
$M$	Momento estático (Nm)
$m$	Massa (kg)
$P_x, P_y, P_z$	Posições lineares do pé (m)
$\vec{q}$	Vetor das coordenadas generalizadas
$R$	Força de reação para o eixo Y (N)

**Constante e varáveis** **$T$**  **$V$**  **$x, y, z$** **Significado e unidades**

Matriz de transformação

Força de reação para o eixo Z ( $N$ )Posições lineares dos corpos ( $m$ )





# 1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação está enquadrada no projeto “ATHENA” (*All-Terrain Hexapod for Environment Navigation Adaptability*), que está a ser desenvolvido em conjunto com o LAR e o *Center For MicroElectroMechanical Systems* (CMEMS), e cujo objetivo é a construção de um robô hexápode inteligente com aprendizagem reforçada, capaz de se movimentar em qualquer tipo de topologia de terreno. Como será visto ao longo do trabalho realizado, o principal objetivo é gerar uma locomoção tripode para que o robô hexápode desenvolvido se mova num plano regular usando a formulação dinâmica de mecanismos das suas pernas para o controlo da atuação. Além disso, o sistema de controlo deve ser versátil para conseguir alterar a direção da locomoção e contornar obstáculos. Posto isto, deste trabalho é possível retirar constatações importantes relativamente ao controlo dinâmico.

## 1.1 Enquadramento

A relevância no desenvolvimento de robôs móveis autónomos tem aumentado, principalmente para a execução de tarefas em ambientes considerados perigosos para o ser humano, como missões espaciais, operações de resgate ou vigilância, e ainda transporte de cargas e recolha de amostras em ambientes audaciosos. Os robôs hexápodes destacam-se dos restantes robôs móveis, não só por conseguirem gerar um elevado número de marchas estáveis, mas também pela sua estabilidade corporal e potencial adaptabilidade a qualquer topologia de terreno.

A produção destes sistemas robóticos exige um bom sistema de controlo, capaz de coordenar todos os atuadores com base na informação sensorial recebida. Também é necessário que a sua estrutura seja o mais estável possível durante a locomoção. Por isso, no desenvolvimento de uma estrutura robótica móvel é necessário realizar dois estudos fundamentais, as análises estruturais e dinâmicas, sendo que na primeira se determinam as solicitações estáticas a que o robô estará sujeito e na segunda está implícito o estudo das solicitações inerentes ao movimento.

O estudo da análise dinâmica é geralmente realizado recorrendo a simulações virtuais em programas especializados em análise dinâmica de sistemas multicorpo. No entanto, esses programas requerem licenças específicas e conhecimento de linguagens de programação próprias. Sendo assim, neste trabalho pretende-se desenvolver um programa focado na análise dinâmica de sistemas robóticos móveis, robusto e versátil, que possa ser incluído em simuladores robóticos e que seja baseado numa linguagem de programação corrente, de forma a ser de livre acesso.

## 1.2 Objetivos

O foco desta dissertação reside no estudo e elaboração do controlo e formulação dinâmica de um robô hexápode, sendo que o desenvolvimento de um protótipo físico deste robô se prende com os objetivos deste trabalho, também a análise da locomoção adotada em robôs hexápodes e desenvolvimento de um sistema de controlo para deteção e contorno de obstáculos são metas a atingir.

Este projeto tem como finalidade o estudo das solicitações dinâmicas existentes em robôs móveis e desenvolvimento de um programa de análise dinâmica para os mesmos. O objetivo desta formulação dinâmica é a sua incorporação para estimar as posições das juntas com base nas forças e momentos externos aplicados nas pernas do robô e comparação com os valores recebidos das posições das juntas na simulação, e assim otimizar o sistema robótico móvel durante a locomoção em planos regulares.

Por fim, pretende-se a avaliação dinâmica das solicitações dinâmicas do robô, por comparação entre os resultados obtidos na simulação do seu movimento e os valores dos ensaios experimentais.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo que a ordem de apresentação destes representa a sequência de etapas realizadas para o desenvolvimento deste projeto. A divisão é a seguinte,

- No Capítulo 1, introduz-se o tema, faz-se um enquadramento do trabalho e mostra-se os objetivos delineados para esta dissertação.
- No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica sobre as diferentes características de um robô hexápode e ainda um levantamento de projetos de robôs hexápodes já realizados. Também neste capítulo se expõem vários conceitos necessários ao controlo deste tipo de robôs.
- No Capítulo 3, trata-se a análise cinemática do mecanismo de uma perna, determinando a formulação matemática para o valor das juntas consoante a posição do pé, e vice-versa. Aborda-se também a análise dinâmica da perna, apresentando as equações para os esforços existente nos três eixos lineares. Também algumas características do modelo concetual são expostas e o estudo para a redução da massa da tibia e do fémur.
- No Capítulo 4, é expressa a formulação dinâmica de *Newton-Euler* para uma perna deste robô, o controlo necessário para essa análise dinâmica e contorno de obstáculos, explicitando mais detalhadamente cada etapa deste controlo. Apresenta-se também as propriedades do

simulador *CoppeliaSim* e do sistema operativo ROS, utilizados nesta simulação. Por fim, avalia-se o desempenho do robô durante um ciclo de simulação.

- Finalmente, no Capítulo 5 tiram-se as conclusões sobre o trabalho realizado e os resultados obtido e define-se o trabalho que deve ser feito no futuro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A robótica móvel é uma área de estudo e desenvolvimento em rápida ascensão, pois permite a substituição de humanos, ou de outros robôs, em tarefas complexas ou executadas em ambientes nocivos, como por exemplo, vigilância, exploração planetária, operações de resgate de emergência, desmantelamento de minas e agricultura (Bruzzone & Quaglia, 2012).

O desenvolvimento de robôs móveis visa que estes se movam autonomamente, ou seja, sem auxílio do operador. Logo, é necessário que sejam capazes de adaptar as suas ações com base nas informações que recebem do meio ambiente. As diferentes características destes robôs dependem dos princípios básicos da robótica móvel, ou seja, da locomoção, percepção, cognição e navegação. Esta dissertação foca-se maioritariamente no estudo da locomoção, que corresponde à compreensão dos mecanismos, análise cinética e dinâmica, e do seu controlo (Rubio et al., 2019).

Dos tipos de locomoção existentes para robôs móveis, pode distinguir-se entre três formatos base: rodas, lagartas e pernas. Existem também combinações híbridas como, pernas-rodas, pernas-lagartas, rodas-lagartas e ainda pernas-rodas-lagartas. O vasto número de opções de mobilidade permite uma melhor escolha do mecanismo que mais se adequa às capacidades que se pretende implementar no robô (Bruzzone & Quaglia, 2012). Tendo em consideração os mecanismos base de locomoção, os robôs de pernas possuem vantagens significativas relativamente aos restantes, pois têm uma grande transversalidade e eficiência no que diz respeito à facilidade de percorrer vários tipos de terreno, desde os mais simples aos mais complexos, mantendo uma melhor eficiência energética, estabilidade e um menor impacto no terreno, pois não necessitam de contacto direto com o solo na sua locomoção (Bruzzone & Quaglia, 2012). Os robôs de pernas apresentam também uma maior habilidade para evitar obstáculos, em comparação com os robôs de rodas ou lagartas, uma vez que são não-holonómicos, o que significa que não se conseguem mover em direções arbitrárias (Zhao et al., 2018). Nestes sistemas móveis bio-inspirados existe também uma maior capacidade de transpor obstáculos e percorrer trajetos acidentados, já que estes não necessitam de se deslocar em contacto direto com a superfície, como é o caso dos robôs de rodas e lagartas. Todas estas capacidades dos robôs de pernas foram inspiradas em casos existentes da natureza, como os humanos, mamíferos, insetos e outros seres artrópodes (Chen et al., 2014).

Apesar da existência de combinações híbridas pernas-rodas, estas têm uma mobilidade mais reduzida em relação aos robôs de pernas, não conseguindo executar uma locomoção tão versátil por não serem eficientes ao caminhar apenas numa direção e subir degraus muito altos ou estreitos. Sendo assim, a

solução mais apropriada para este projeto é o desenvolvimento de um robô móvel com pernas (Goldschmidt et al., 2012).

A classificação dos robôs de pernas passa essencialmente pelo número de pernas que possuem e, por isso, podem-se encontrar robôs apenas com uma perna e até robôs com mais de oito. Geralmente, com o aumento do número de pernas obtém-se uma maior capacidade de suporte e aumenta a segurança da carga útil. No entanto, aumenta também a complexidade do sistema de controlo (Rubio et al., 2019).

Neste caso de estudo, será utilizado um robô com 6 pernas, pois possui maior capacidade de transpor obstáculos e percorrer trajetórias acidentadas, em terrenos complexos, mantendo a estabilidade do corpo.

Este capítulo tem como objetivo a aquisição e melhor compreensão dos conceitos teóricos a aplicar neste caso de estudo, bem como a análise de projetos semelhantes já desenvolvidos. Por isso, neste capítulo serão abordados vários conceitos relacionados com robôs hexápodes e com o seu controlo, como também programas de simulação dinâmica de robôs, conceitos e formulações para a análise cinemática e dinâmica de sistemas multicorpo, noções de ROS (*Robot Operating System*) é ainda apresentada a metodologia de planeamento de experiências.

## 2.1 Robôs hexápodes

Os robôs hexápodes apresentam seis pernas acopladas ao corpo do robô, o que lhes permite uma melhor qualidade e facilidade de locomoção tanto em terrenos simples como complexos, com diversos obstáculos e de geometria variável. Estes robôs têm ainda uma maior capacidade de deslocamento omnidirecional.

Nesta secção aborda-se o conceito de redundância, a arquitetura do robô hexápode, mais especificamente os tipos de pernas e de juntas, e ainda a análise a projetos já existentes de robôs bio-inspirados.

### 2.1.1 Conceito de redundância

Durante a locomoção, o número de membros de um robô influencia não só a estabilidade da estrutura em movimento, mas também o tipo de marcha e a velocidade de deslocação. Quantas mais pernas, maior é a estabilidade do robô, isto é, quantos mais membros a suportar o corpo, menor é o número de oscilações sofridas pelo corpo quando o robô transita entre as diferentes fases de suporte e de

movimento de cada perna. Um maior número de pernas possibilita também um aumento das marchas estáveis (Coelho, 2018).

Caso se pretenda comparar um robô quadrupede a um hexápode, a principal diferença entre eles é o facto de o último apresentar maior redundância, e por isso maior estabilidade estática. De facto, para o deslocamento de um corpo seriam necessárias apenas duas pernas e não tantas como tem um robô hexápode. No entanto, esta característica de redundância, permite ao hexápode em caso de avaria de uma das pernas, que haja um reajuste da sua marcha, sem perder a sua capacidade de equilíbrio.

O conceito de redundância torna as estruturas mais complexas, mas também lhes possibilita exercer marchas com maior velocidade e com maior facilidade em terrenos complexos, e ainda permite também o transporte de cargas mais elevadas, pois é possível obter um maior número de membros em atuação simultânea, como no caso dos robôs hexápodes (Zhao et al., 2018).

### 2.1.2 Arquitetura do robô

A forma do corpo destes robôs pode ser retangular ou hexagonal, sendo que no formato retangular as pernas se distribuem simetricamente dos dois lados do corpo, ficando três pernas de cada lado. Nos robôs em que o seu corpo se apresenta hexagonal, as pernas encontram-se repartidas de forma axi-simétrica, em formato hexagonal ou circular (Tedeschi & Carbone, 2014). Na Figura 1 encontram-se representadas as diferentes formas do corpo.

A simetria bilateral dos robôs retangulares pode ser mais adequada que a simetria radial para percorrer trajetos em linha reta. No entanto os robôs hexagonais permitem diferentes tipos de marchas e mudanças de direção com maior facilidade, pois a sua simetria radial impõe que todas as pernas sejam iguais e o robô não tenha frente ou traseira e por isso não tem nenhuma direção de movimento preferencial (Tedeschi & Carbone, 2014).

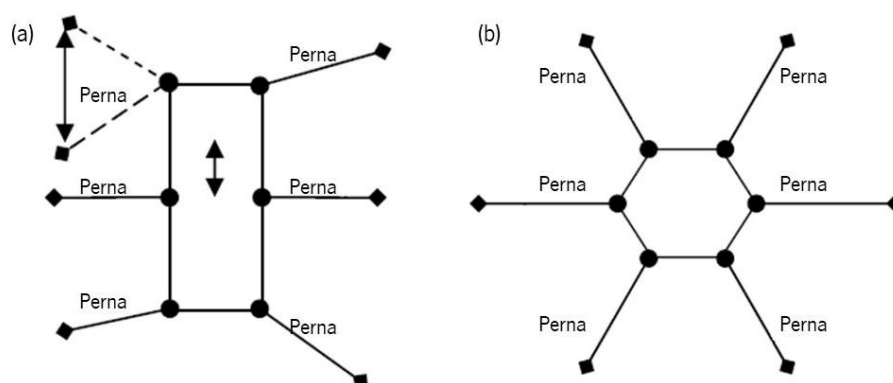


Figura 1 - Formas do corpo de um robô hexápode  
(a) Robô retangular; (b) Robô hexagonal. Adaptado de (Ding et al., 2010).

### 2.1.3 Tipos de pernas

As pernas dos robôs hexápodes podem ser de vários tipos e com diferentes características. Como se pode observar na Figura 2(a), existem pernas bio-inspiradas e as que não o são, que são geralmente combinações híbridas criadas pelo Homem. As pernas bio-inspiradas têm características semelhantes às dos mamíferos, aracnídeos e répteis, sendo que a inspiração retirada dos mamíferos se prende com o facto de o corpo se encontrar acima das pernas, e por isso dão menos apoio ao corpo e requerem um menor consumo de energia para o seu suporte, mas implica uma maior estabilidade que os restantes animais. Na configuração dos aracnídeos, os joelhos encontram-se superiores ao corpo, por isso o centro de massa fica mais baixo e permite melhor navegação em terrenos complexos. Normalmente, as pernas com esta configuração são compostas por cinco segmentos básicos conectados por articulações, que são a coxa, o trocânter, o fémur, a tibia e o tarso sendo que, o trocânter e o tarso são omitidos devido às suas funções e tamanho reduzido, considera-se a perna com três segmentos: coxa, fémur e tibia (Chen et al., 2014).

No caso dos répteis, as pernas são colocadas nas extremidade do corpo e os joelhos situam-se ao nível do corpo (Tedeschi & Carbone, 2014).

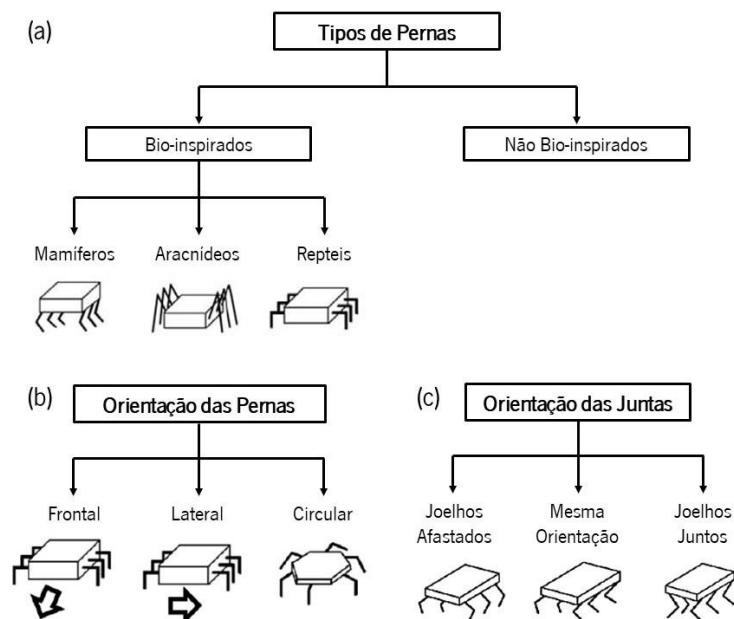


Figura 2 - Tipos e diferentes características das pernas de um robô hexápode. Adaptado de (Tedeschi & Carbone, 2014).

A Figura 2(b), permite observar as diferentes formas de orientação das pernas do robô relativamente ao corpo, podendo ter três possíveis configurações: frontal, lateral e circular. No posicionamento frontal as instruções de avanço das pernas são perpendiculares ao corpo; já no caso da configuração lateral, essa informação é dada paralelamente ao corpo e por isso, é nessa direção que se irá mover o robô.

No caso da orientação circular, as pernas são posicionadas de forma radial em torno do corpo, permitindo que o mecanismo se mova em qualquer direção (Tedeschi & Carbone, 2014).

Nas pernas bio-inspiradas em mamíferos, as juntas podem ter diferentes orientações como joelhos afastados, na mesma orientação, ou ainda, uma orientação oposta, que os aproxima (Tedeschi & Carbone, 2014). Estas diferentes orientações das juntas dos joelhos podem ser observadas na Figura 2(c).

#### 2.1.4 Tipos de juntas

As juntas de ligação entre os diferentes componentes de um mecanismo permitem a sua união e estão diretamente relacionadas com o tipo de movimento relativo e com os constrangimentos que se pretende. Na Figura 3 é possível observar uma representação dos diferentes tipos de juntas sendo que a junta esférica permite a rotação em torno dos três eixos cartesianos, mas não permite translação, tendo três graus de liberdade no total. Por sua vez, a junta de revolução possibilita apenas a rotação em torno de um eixo do sistema coordenado e, como também impede a translação dos corpos, tem apenas um grau de liberdade. No caso contrário às duas juntas apresentadas anteriormente, a junta prismática permite apenas a translação segundo um eixo, sendo por isso bastante utilizada para representar a capacidade de alongamento e amortecimento do impacto dos músculos. No entanto impossibilita todas as rotações, o que resulta em apenas um grau de liberdade. Por fim, a junta cilíndrica proporciona translação e rotação em torno de um determinado eixo do sistema cartesiano e por isso, tem dois graus de liberdade (Flores, 2015).

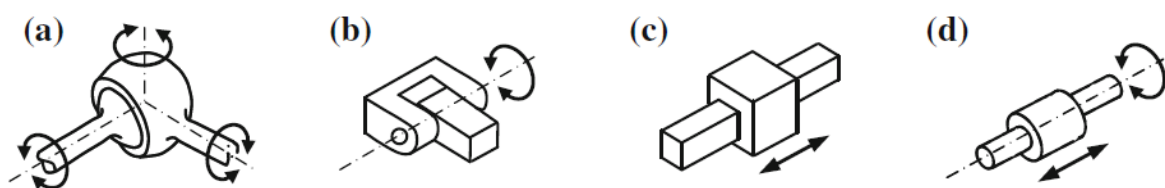


Figura 3 - Representação dos diferentes tipos de juntas: (a) junta esférica, (b) junta revolução, (c) junta prismática, (d) junta cilíndrica (Flores, 2015).

A configuração mais utilizada em robôs de pernas inclui três juntas rotacionais, pois para além de permitir todos os movimentos necessários à locomoção, também facilita o projeto das pernas, das dimensões do robô e ainda o controlo deste (Buschmann & Trimmer, 2017).



### 2.1.5 Robôs hexápodes bio-inspirados

Atualmente, existem já muitos robôs hexápodes desenvolvidos, sendo a grande maioria para investigação e prova de conceito. Alguns dos hexápodes já existentes são:

- **LAURON V**

Este robô foi projetado com o objetivo de melhorar as capacidades de escalada das versões anteriores, que participaram na *SpaceBot Cup 2013* organizada pelo Centro Aeroespacial Alemão, mantendo a sua robustez mecânica e permitindo que o robô execute tarefas mais complexas com as suas pernas dianteiras (Heppner et al., 2015).

O robô LAURON V teve inspiração em animais como o bicho-pau, e por isso é composto por seis pernas e um corpo retangular, para suportar o sistema de controlo. Cada perna possui quatro juntas de revolução e a cabeça pode rodar em torno de dois eixos distintos. Assim, este robô apresenta no total vinte e seis graus de liberdade (Roennau et al., 2014).

Na Figura 4 é possível observar o robô LAURON V, cuja carga própria é cerca de 42 kg e é capaz de transportar uma carga extra de 10 kg (Roennau et al., 2014).



Figura 4 - Robô hexápode - LAURON V (Roennau et al., 2014).

- **RHex**

Este robô é caracterizado pela simplicidade mecânica, uma vez que a quantidade de atuadores é mínima, e também pela sua robustez.

O RHex consiste num corpo rígido, de forma retangular, com seis pernas distribuídas simetricamente, em que cada uma possui apenas um grau de liberdade correspondente a uma junta de revolução, todos os pontos de fixação das pernas são fixos em relação ao corpo (Saranli et al., 2001). É possível observar este robô hexápode na Figura 5.



Figura 5 - Robô hexápode – RHex (Haynes et al., 2012).

- **MAX**

O desenho mecânico deste robô é evidentemente inspirado em aracnídeos como se pode verificar na Figura 6, realçando a relação de baixa massa/alta eficiência de locomoção e também a grande capacidade de carga útil em comparação com a massa total do sistema (Elfes et al., 2017).



Figura 6 - Robô hexápode – MAX (Elfes et al., 2017).

O robô hexápode MAX possui, no total, 18 GDL, sendo que correspondem a três graus de liberdade atribuídos a cada perna pela presença de três juntas de revolução. Estas pernas encontram-se distribuídas bilateralmente, em relação ao corpo central em forma retangular (Elfes et al., 2017).

- **Octopus-III**

Este robô foi criado com o intuito de realizar resgates e outras tarefas em ambiente hostil, mantendo a segurança humana, uma vez que o utilizador não teria de estar exposto a estes ambientes e a tarefas potencialmente perigosas, e sem colidir com obstáculos.

O robô Octopus-III, que se encontra na Figura 7, possui um corpo hexagonal com seis pernas simetricamente distribuídas, sendo cada uma constituída por três juntas universais, três juntas prismáticas e, ainda duas juntas esféricas.



Figura 7- Robô hexápode - Octopus-III (Zhao et al., 2018).

- **SiLVIA**

Sistema robótico muito eficaz para serviços de entregas, pois permite transportar objetos em segurança e permanecer estável enquanto se move, tem ainda uma configuração que impede o dano ou perda do objeto.

Este robô hexápode, representado na Figura 8, é considerado de tamanho médio e apresenta corpo em forma hexagonal, possuindo um total de dezoito graus de liberdade, com seis pernas acopladas radialmente. Cada uma destas pernas possui três juntas de revolução (Wang et al., 2018).

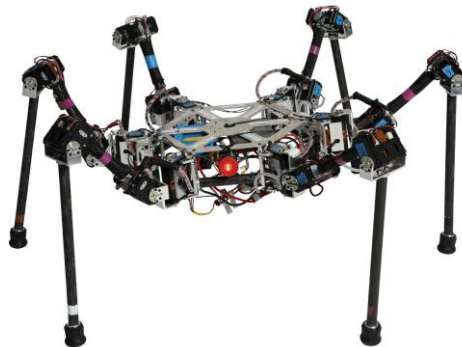


Figura 8 - Robô hexápode – SiLVIA (Wang et al., 2018).

- **PH-Robot**

O robô PH-Robot tem como principal função o transporte de cargas úteis muito pesadas. Na Figura 9, é possível observar este robô hexápode, constituído por um corpo hexagonal e seis pernas. Tem, no total, dezoito graus de liberdade, sendo que correspondem três a cada perna.

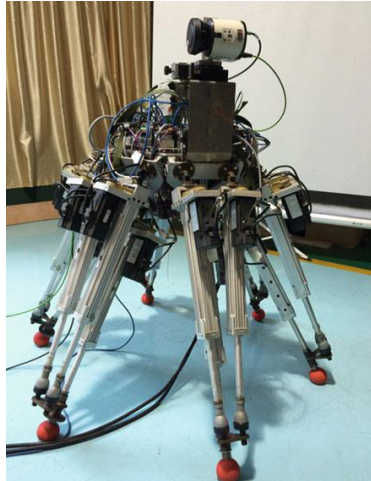


Figura 9 - Robô hexápode - PH-Robot (Xin et al., 2017).

- **Robô Hexápode desenvolvido no LAR**

No Laboratório de Automação e Robótica da Universidade do Minho (LAR), foi também desenvolvido e simulado o conceito de um robô hexápode bio-inspirado em aracnídeos, como se pode observar na Figura 10.

O objetivo deste robô é o combate a incêndios, e por isso era necessário transportar um reservatório de água, tendo por isso grandes dimensões, em que cada perna tem um comprimento total de 2303 mm e no corpo hexagonal, entre o centro e os vértices onde se encontram as pernas, dista 393,59 mm, existindo assim a necessidade de utilizar atuadores pneumáticos (Coelho, 2018).

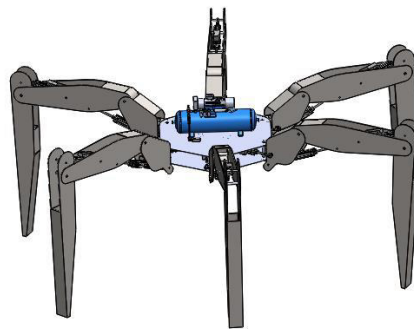


Figura 10 - Modelação do robô hexápode desenvolvido no LAR (Coelho, 2018).

Este robô é constituído por seis pernas distribuídas axi-simetricamente, tendo cada perna três graus de liberdade, o que totaliza dezoito graus de liberdade (Coelho, 2018).

## 2.2 Controlo de robôs hexápodes

O controlo é um fator muito importante no projeto de um robô, pois deste depende a escolha do tipo de marcha e do método de controlo da locomoção, que se refletem nos índices de desempenho avaliados durante a locomoção do hexápode.

Neste subcapítulo são apresentados diferentes métodos de avaliação dos índices de desempenho do robô, os vários tipos de marchas que podem ser implementados e ainda um sistema básico do controlo de locomoção.

### 2.2.1 Índices de desempenho

O desempenho dos robôs móveis é diferente entre si, sendo por isso necessário proceder à sua avaliação. Para essa avaliação de desempenho surgem os seguintes métodos, fator de serviço, critério de estabilidade estática e margem de estabilidade dinâmica.

- 1) O fator de serviço ( $\beta$ ) é definido pela Equação 1 e consiste na razão entre a duração da fase de apoio das pernas e o tempo de ciclo:

$$\beta = \frac{T_{st}}{T_{st} + T_{sw}} \quad (1)$$

Em que,  $T_{st}$ , representa o tempo em fase de apoio e,  $T_{sw}$ , a duração em fase de balanço. Este fator pode variar entre zero e um, e permite a distinção entre caminhada e corrida, pois para caminhada  $\beta \geq 0,5$  e para corrida  $\beta < 0,5$  (Campos et al., 2010; Tedeschi & Carbone, 2014)

Os animais aumentam a velocidade de locomoção diminuindo a duração do ciclo de passos, ou seja, aumentando o número de passos por segundo, por intermédio da diminuição da duração da fase de apoio, enquanto que a fase de balanço permanece praticamente constante para qualquer velocidade de locomoção (Campos et al., 2010).

- 2) O critério da estabilidade estática relaciona a projeção do centro de gravidade (CG) no solo, com o número de apoios existentes. Quando um robô é estaticamente estável a sua projeção do CG está inserida no polígono de suporte, formado pelos seus apoios (Figura 11).

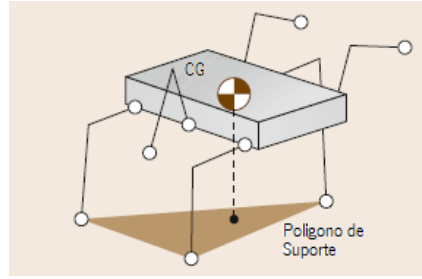


Figura 11 - Projeção do CG no solo e limitações do seu polígono de suporte. Adaptado de (Kajita & Espiau, 2008).

Quanto maior o polígono de suporte maior a estabilidade do robô, o que significa que quantos mais membros, mais estável o robô é (Coelho, 2018).

- 3) A margem de estabilidade dinâmica pode ser definida, para um robô de caminhada dinâmica, como a distância mínima do PMZ (Ponto de Momento Zero), para os limites do polígono de suporte, uma vez que o PMZ corresponde ao ponto onde os momentos gerados pelas forças aplicadas no eixo vertical se contrapõem.

O robô é considerado estável quando as coordenadas do PMZ estão circunscritas ao polígono de suporte, como visto no ponto anterior. Logo, a distância entre as fronteiras do polígono de suporte e do PMZ também permite avaliar o equilíbrio do sistema, como se pode observar na Figura 12.

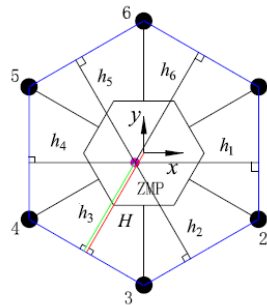


Figura 12 – Diagrama esquemático da margem de estabilidade do PMZ (Deng et al., 2017).

As coordenadas do PMZ são expressas pelas Equações 2 e 3 como:

$$x_{PMZ} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_{i=1}^n z_i m_i (\ddot{x}_i + g_x)}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (2)$$

$$y_{PMZ} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_{i=1}^n z_i m_i (\ddot{y}_i + g_y)}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_y)} \quad (3)$$

Onde  $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$  são as coordenadas do CM da tíbia de cada perna,  $m_i$  é a massa da tíbia e  $(g_x, g_y, g_z)$  é o vetor da aceleração gravítica.

### 2.2.2 Tipos de marcha

A marcha pode ser definida como uma sequência de movimentos de uma perna combinados com uma sucessão de deslocamentos do corpo para mover o robô na direção e com a orientação desejada. As pernas que se encontram no chão estão em fase de apoio, enquanto que as pernas que estão a dar o impulso de movimento se apresentam em fase de balanço; o conjunto de uma fase de apoio e uma fase de balanço corresponde a um “passo” e por sua vez, de um conjunto de passos resulta uma marcha (Kottege et al., 2015).

As marchas podem distinguir-se, de modo geral, entre marchas aperiódicas e marchas periódicas. As primeiras caracterizam-se por depender apenas da posição inicial dos apoios e da trajetória definida, e por isso permitem uma maior adaptabilidade ao terreno. Com estas marchas aperiódicas surgem as marchas livres, cuja sequência de movimentos dos membros depende da trajetória, das condições dos terrenos e do estado do robô. As marchas aperiódicas permitem um maior número de combinações de movimentos satisfazendo as restrições cinemáticas do robô (Coelho, 2018).

As marchas periódicas são mais adequadas para terrenos lisos e caracterizam-se por uma sequência de estados semelhantes da mesma perna durante passos sucessivos, que ocorrem no mesmo intervalo de tempo para todas as pernas (Tedeschi & Carbone, 2014). Estas marchas periódicas podem ser contínuas, em que o corpo está em constante deslocamento graças ao movimento sequencial das pernas, ou descontínuas, que ocorrem quando o corpo é projetado para a frente ou para trás, com todos os membros pousados no solo, movendo um de cada vez (Coelho, 2018).

Usualmente, os movimentos hexápodes possuem um grau de simetria, que de uma forma geral se descrevem por duas premissas: 1) nenhuma perna avança até que a de trás esteja em posição de apoio; e 2) as pernas do mesmo par estão sempre em alternância estrita, realizando o ciclo de etapas fora de fase (0,5 fora de fase) (Campos et al., 2010).

Serão estudadas mais especificamente as diferentes marchas periódicas, como marcha metacronal, trípole e onda. Na Figura 13 é possível observar os diagramas representativos de cada um destes tipos de marcha, em que estão apresentados os instantes em que cada perna se encontra em rotação (preto) ou na fase de suporte (branco), e também o esquema de identificação de cada uma das pernas.

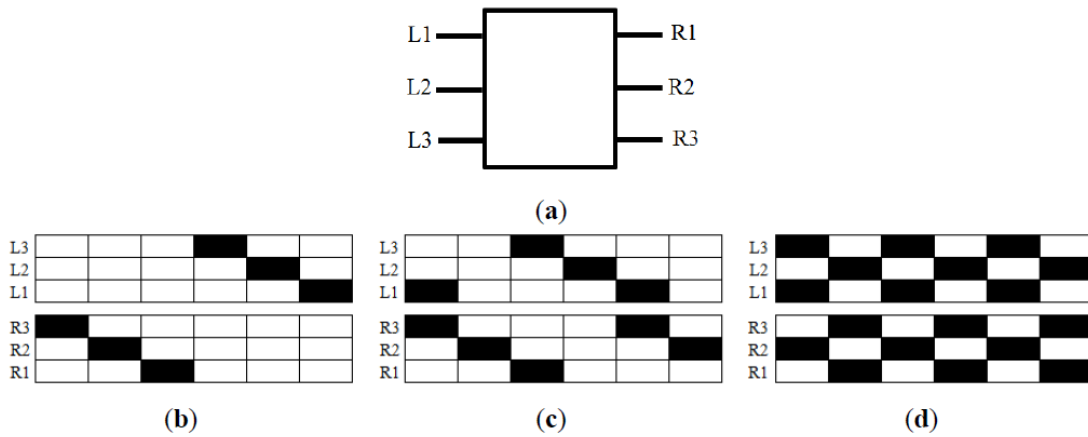


Figura 13 – Diagrama de uma marcha periódica para um hexápode, em função do tempo  
 (a) identificação de cada perna; (b) marcha metacronal; (c) marcha de onda; (d) marcha tripode (Tedeschi & Carbone, 2014).

A marcha metacronal, apresentada na Figura 13(b), pode ser descrita como uma marcha de propagação de trás para a frente, movendo primeiro os membros do lado direito e depois os do lado esquerdo. As pernas adjacentes de cada metade do corpo (por exemplo, R3 e R2, R2 e R1) estão 60° fora de fase e pernas contralaterais (R3 e L3) ficam meio período (ou 180°) fora de fase. Este tipo de marcha é usado quando se pretende uma locomoção a velocidade baixa e geralmente o seu fator de serviço é igual a  $\frac{3}{4}$  (Campos et al., 2010).

Na Figura 13(c), é possível observar o diagrama para a marcha de onda em função do tempo. Esta marcha é adotada para se mover a uma velocidade média, com um fator de serviço de  $\frac{5}{8}$ . Na marcha de onda os membros L1 e R3, L3 e R1 movem-se juntos em fase (Campos et al., 2010).

Já a marcha tripode permite deslocar-se a velocidade rápida e é caracterizada pelo seu fator de serviço igual a  $\frac{1}{2}$ . Como é possível verificar na Figura 13(d), a cada movimento, as pernas anterior e posterior ipsilaterais (L1, L3, R1 e R3) e as pernas média contralaterais (L2 e R2) deslocam-se em fase (Campos et al., 2010).



### 2.2.3 Controlo da locomoção

O controlo de um robô hexápode é feito recorrendo a sistemas hierárquicos, sendo que um exemplo básico do sistema de controlo da locomoção de um hexápode se encontra representado na Figura 14.

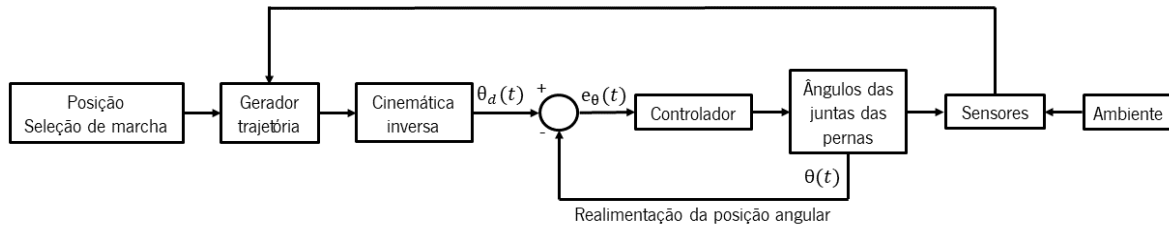


Figura 14 - Esquema básico do controlo de um robô hexápode. Adaptado de (Tedeschi & Carbone, 2014).

Inicialmente, são definidas a posição final desejada e o tipo de marcha para esta locomoção, sendo que estes são os dados de entrada para o gerador de trajetória, que por sua vez, envia as coordenadas da perna para o modelo de cinemática inversa de cada perna. Este modelo cinemático recalcula as coordenadas dadas em coordenadas angulares para cada junta de articulação e são estes resultados que permanecem no ciclo de controlo, recolhendo as coordenadas instantâneas do robô por meio dos sensores (Tedeschi & Carbone, 2014).

## 2.3 Programas de simulação dinâmica de robôs

Os simuladores de análise dinâmica de robôs em tempo real têm sido muito utilizados, pois permitem uma prototipagem rápida e flexível, otimização da seleção de atuadores, ensino de robótica, validação de controladores e planeamento de trajetórias. De uma forma geral, os programas de simulação permitem concluir a parte inicial de pesquisa antes de iniciar experiências reais.

Os elementos mais básicos são o modelo robótico e o modelo ambiente, sendo que o modelo robótico fornece informações específicas, como os graus de liberdade, parâmetros mecânicos, sensores, estrutura geométrica, propriedades dos atuadores, entre outros. O modelo ambiente consiste nas propriedades físicas do mundo virtual, como a aceleração gravítica, tipo de terreno, elementos do ambiente (por exemplo, paredes, escadas, objetos), rigidez e atrito do solo.

O programa de simulação deve ser capaz de calcular as grandezas físicas resultantes das interações dinâmicas entre o robô a ser simulado, e o ambiente virtual por um determinado período. O grau de realismo do resultado da simulação depende de como é desenvolvida a precisão dinâmica do ambiente e do robô enquanto se executa o programa de simulação (Ivaldi et al., 2018).

Apesar de existirem inúmeras ferramentas de simulação, não existe um simulador de uso geral que domine todos os fatores de desempenho e aplicação. Destaca-se a maior utilização do simulador

Gazebo para robôs humanóides, e os programas *CoppeliaSim* e Webots como os simuladores comerciais preferidos dos utilizadores (Ivaldi et al., 2018).

Nas Tabela 1 a Tabela 4 é possível observar as diferentes capacidades dos diversos simuladores existentes, em que na Tabela 1 se observam as capacidades de simulação dos sistemas de atuação presentes nos diferentes programas, na Tabela 2 as diferentes possibilidades de simulação do ambiente, na

Tabela 3 está representada a capacidade que cada simulador possui de tratar diferentes geometrias de robôs, e ainda na Tabela 4 se analisam as diferentes interfaces de simulação que cada programa pode oferecer.

Tabela 1 - Capacidades de simulação de atuação. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018)

<b>Simulador</b>	<b>Incorpora dinâmica do atuador</b>	<b>Simula conformidade passiva</b>	<b>Possui controlo do momento</b>
Robotran	X	X	X
Gazebo			X
Klamp't	X	X	X
<i>CoppeliaSim</i>	X	X	X
Drake	X	X	X
Moby	X	X	X

Tabela 2 - Capacidades de simulação do ambiente. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018).

<b>Simulador</b>	<b>Permite criar um ambiente e terrenos</b>	<b>Fornece um conjunto de diferentes ambientes</b>	<b>Fornece ferramentas no meio ambiente</b>	<b>Permite gerar perturbações no robô</b>
Robotran				X
Gazebo		X	X	X
Klamp't	X			X
<i>CoppeliaSim</i>	X	X	X	X
Drake	X	X	X	X

Moby	X	X
------	---	---

Tabela 3 - Diferentes modelos de simulação. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018).

Simulador	Incorpora modelo humano	Inclui diferentes geometrias de robôs	Permite a importação do modelo DAC
Robotran			
Gazebo		X	
Klamp't		X	X
<i>CoppeliaSim</i>	X	X	X
Drake		X	X
Moby	X	X	

Tabela 4 - Interfaces de simulação. Adaptado de (Ivaldi et al., 2018).

Simulador	Permite executar várias simulações simultaneamente	Possui uma interface <i>Matlab/Simulink</i>	Tem uma interface ROS ( <i>Robot Operating System</i> )
Robotran	X	X	
Gazebo			X
Klamp't	X		X
<i>CoppeliaSim</i>	X	X	X
Drake	X	X	X
Moby	X		

Estas tabelas são seguidas de uma breve descrição de cada um dos simuladores em análise (Ivaldi et al., 2018):

- **Robotran** é um programa que gera modelos simbólicos de sistemas multicorpo que podem ser analisados e simulados em Matlab e Simulink. Foi desenvolvido no Centro de Pesquisa em Mecatrônica, da *Université Catholique de Louvain*.
- **Gazebo** é um simulador de vários robôs para ambientes externos, desenvolvido pela *Open-Source Robotics Foundation*. Este simulador, suporta diferentes máquinas físicas (*ODE, Bullet, DART*) e, devido à sua estrutura modular baseada em *plugins*, pode ser facilmente estendido com novos recursos.

- **Klamp't** é um programa multiplataforma que permite modelação, simulação e planeamento de robôs complexos, particularmente para tarefas de manipulação e locomoção. Este simulador permite simulação robusta de corpo rígido com malha triangular/colisões com malha triangular. Além disso, é possível capturar objetos reais, utilizando um sensor Kinect, que é diretamente integrado no simulador.
- **CoppeliaSim** é um programa com capacidade de simular vários robôs, produzido pela *Coppelia Robotics*. Este simulador fornece um ambiente de desenvolvimento integrado baseado numa arquitetura de controlo distribuído. Cada objeto/modelo robótico pode ser controlado separadamente utilizando um *script* incorporado ou um *plug-in*. Semelhante ao Gazebo, suporta várias máquinas físicas, como *ODE*, *Bullet* e *Vortex*.
- **Drake** não só é um simulador, mas também um programa com ferramentas para analisar a dinâmica dos robôs e construir sistemas de controlo.
- **Moby** é um simulador de dinâmica de corpos multi-rígidos, desenvolvido pela *Positronics Lab* na *George Washington University*. Este programa permite a simulação de corpos deformáveis, juntamente com as suas interações com corpos rígidos/articulados.

Atualmente, o V-Rep foi descontinuado, mas a *Coppelia Robotics* lançou o *CoppeliaSim*, que é semelhante àquele, mas com ainda mais funcionalidades, permitindo assim a importação da modelação DAC (Desenho Assistido por Computador). Apresenta uma versão gratuita para educação sendo, por isso o programa que será utilizado para a análise dinâmica do robô em estudo (*Coppelia Robotics*, n.d.).

Da mesma forma, o simulador da *Coppelia Robotics* é o mais comumente utilizado no Laboratório de Automação e Robótica (LAR), havendo assim, uma base sólida de conhecimento da plataforma (Ribeiro et al., 2019).

## 2.4 Análise cinemática e dinâmica de sistemas multicorpo

As análises cinemática e dinâmica de sistemas multicorpo são parte integrante do controlo da locomoção. De forma a efetuar esta análise, é necessário definir corretamente o sistema de coordenadas a utilizar, a formulação dinâmica, neste caso a formulação de *Newton-Euler*, e ainda a metodologia de integração de tempo. Por conseguinte, nesta secção abordam-se os sistemas de coordenadas, a formulação de *Newton-Euler* e, por fim diferentes métodos de integração de tempo.

#### 2.4.1 Sistemas de coordenadas

De forma a estudar a análise dinâmica de um sistema multicorpo, é necessário identificar previamente a forma como esses corpos serão descritos. As variáveis descritivas, também conhecidas como “coordenadas generalizadas”, devem permitir a caracterização da configuração do sistema, ou seja, a posição em que se encontram todos os pontos materiais que compõem o conjunto, em qualquer instante. Esta expressão, coordenadas generalizadas, pretende englobar coordenadas lineares e angulares (Flores & Lankarani, 2016).

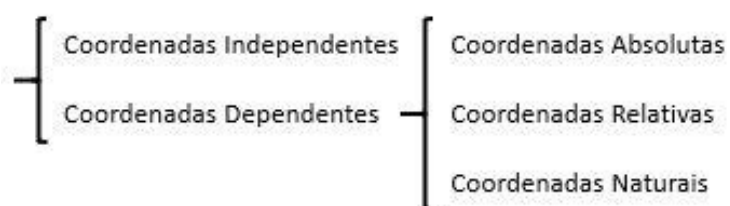
O número mínimo de variáveis necessárias para descrever completamente a configuração de um sistema denomina-se graus de liberdade (GDL) do sistema, ou de forma mais simples, mobilidade (Müller, 2009).

Os graus de liberdade estão diretamente relacionados com o número de juntas do sistema e com o seu tipo, e podem ser calculados pelo critério de Grübler-Kutzback apresentado na Equação 4 (Flores & Claro, 2007)(Flores, 2015),

$$n_{GL} = 6n_b - m \quad (4)$$

em que  $n_b$  é o número de corpos que compõem o mecanismo e  $m$  corresponde ao número de restrições independentes.

No âmbito da classificação dos diferentes tipos de coordenadas, a definição do critério que pode ser utilizado para descrever a configuração de sistemas multicorpo não é unânime. No entanto, a regra geral para agrupar as coordenadas generalizadas é dividi-las em dependentes e independentes. As coordenadas independentes podem variar arbitrariamente, enquanto as coordenadas dependentes são necessárias para satisfazer as equações de restrições. Por sua vez, as coordenadas dependentes são ainda classificadas como coordenadas absolutas, relativas e naturais (Flores, 2015). Na Figura 15, é possível observar os diferentes tipos de coordenadas mais comumente utilizados para descrever configurações de sistemas multicorpo.



A principal diferença entre as coordenadas absolutas e relativas é que esta última permite a definição da posição de um corpo em relação a um sistema de coordenadas em movimento, enquanto as coordenadas absolutas necessitam que a posição de cada corpo no espaço seja definida em função de um sistema de coordenadas global fixo.

#### 2.4.2 Formulação de *Newton-Euler*

O princípio de *Newton-Euler* considera que para um sistema multicorpo (SMC) as equações de movimento se expressam pela Equação 5,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\phi}_q^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{g} \quad (5)$$

em que  $\mathbf{M}$  é a matriz de massa,  $\ddot{\mathbf{q}}$  é o vetor da aceleração das coordenadas generalizadas  $\mathbf{q}$ ,  $\boldsymbol{\phi}_q$  é a matriz jacobiana das restrições, ou seja, as suas derivadas parciais em relação ao tempo,  $\boldsymbol{\lambda}$  corresponde às forças de reação em função das restrições e  $\mathbf{g}$  é o vetor das forças externas. Esta formulação pode ser entendida como uma adaptação da segunda lei do movimento de Newton e, por isso esta análise inclui as forças e restrições aplicadas a cada corpo do sistema, considerando a segunda lei do movimento de Newton e a equação de Euler para a rotação de um corpo rígido, como apresentado na Equação 6:

$$\sum \mathbf{M} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} \quad (6)$$

em que  $\mathbf{M}$  é o momento aplicado,  $\mathbf{J}$  é o momento mássico de inércia e  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$  representa a aceleração angular.

Na Equação 5 não se encontra implícita a inclusão das restrições pois, uma vez que esta formulação lida com acelerações lineares e angulares para a análise dinâmica, as restrições  $\boldsymbol{\phi}$  devem ser aplicadas ao nível da aceleração, o que impõe o uso da segunda derivada e, por isso as restrições são expressas pela Equação 7,

$$\boldsymbol{\phi}_q \ddot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\gamma} \quad (7)$$

no qual  $\boldsymbol{\gamma}$  é o lado direito da equação das restrições ao nível da aceleração.

De forma a simplificar esta formulação, incluindo as forças e momentos aplicados e as restrições, estas equações devem ser expressas da forma matricial representada pela Equação 8.

$$\begin{bmatrix} M & \phi_q^T \\ \phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

Neste caso será aplicada análise dinâmica direta que permite calcular dados do movimento, com base no conhecimento das forças e momentos que atuam no sistema. A implementação desta formulação numa análise computacional implica a integração de  $q$  para atualização das posições e velocidades a cada intervalo de tempo, como se pode observar na Figura 16.

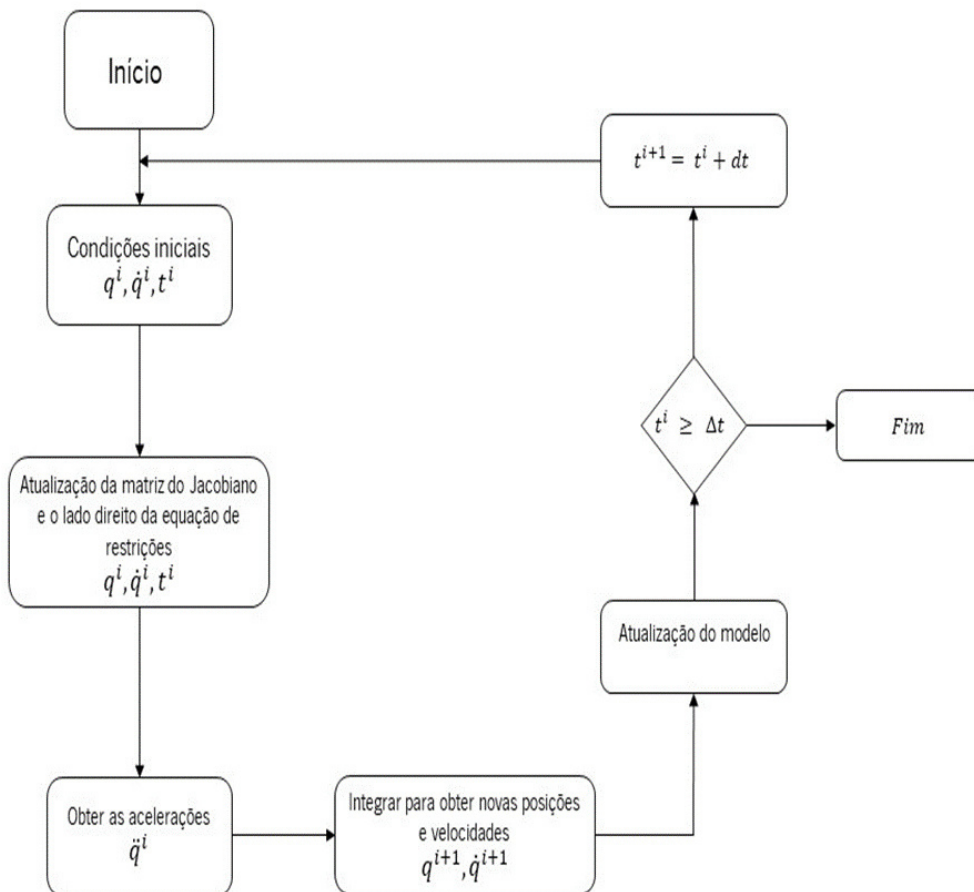


Figura 16 - Fluxograma para a implementação da formulação de *Newton-Euler*. Adaptado de (Flores & Lankarani, 2016)

A formulação de *Newton-Euler* considera apenas constrangimentos do sistema multicorpo ao nível da aceleração e, por isso as simulações com grandes intervalos de tempo acabam por violar esses constrangimentos, causando desvios nas posições e velocidades do centro de massa dos corpos do sistema.

#### 2.4.3 Métodos de integração de tempo

Como constatado na formulação de *Newton-Euler*, a implementação da dinâmica direta em simulações computacionais fornece os valores das coordenadas independentes, que devem ser integradas para se obter as velocidades e posições dos centros de massa.

Os métodos computacionais consideram cálculos passo a passo para obter uma aproximação mais verdadeira dos valores, uma vez que não pode haver integração linear das variáveis. Assim sendo, a escolha das abordagens numéricas influencia a eficiência computacional, e ainda, a consistência dos dados de saída, por diminuição da acumulação de erros locais.

Neste estudo são considerados dois métodos de integração numérica para a implementação dinâmica:

- Método de integração de Euler

Este método é simples pois, só necessita de um cálculo, como se pode observar na Equação 9.

$$q^{i+1} = q^i + h\dot{q}(t^i, q^i) \quad (9)$$

Onde  $q^{i+1}$ , é o próximo valor da variável  $q$ , e depende do seu valor atual  $q^i$  e da sua primeira derivada  $\dot{q}(t^i, q^i)$ .

O método de integração de Euler corresponde a uma aproximação linear do valor, o que provoca a acumulação de erros locais de ordem  $h^2$ . Por esta razão, o intervalo de tempo  $h$  considerado ao longo do processo de integração deve ser pequeno, para aumentar a precisão do resultado (Flores & Lankarani, 2016).

- Método de Runge-Kutta de segunda ordem

O método integração de Runge-Kutta de segunda ordem, apresentado na Equação 10, é mais preciso que o método de integração de Euler pois executa o cálculo em duas etapas adicionais, representadas pelas Equações 11 e 12.

$$q^{i+1} = q^i + \frac{h}{2}(f_1 + f_2) \quad (10)$$

Onde,

$$f_1 = \dot{q}(t^i, q^i) \quad (11)$$

$$f_2 = \dot{q}(t^i + h, q^i + hf_1) \quad (12)$$

Destas equações é possível retirar que  $q^{i+1}$  depende de uma média entre a primeira derivada para dois instantes distintos, tais como o estado atual e o estado seguinte  $\dot{q}(t^i + h, q^i + hf_1)$ . Neste método o erro local é de ordem  $h^3$  logo, o valor de  $h$  pode ser maior que no método de integração anterior (Flores & Lankarani, 2016).

## 2.5 ROS (*Robot Operating System*)



ROS é uma estrutura para desenvolvimento de um programa do robô fornecendo funcionalidades semelhantes a um sistema operativo. É uma estrutura de código aberto que contém ferramentas e bibliotecas que permitem obter, construir, escrever e executar código em vários computadores, e por isso permite uma comunicação flexível e conveniente para os processos distribuídos (ROS.org, 2018). Esta plataforma funciona em vários sistemas operativos, embora seja recomendado o uso do *Linux Ubuntu*, e permite também a utilização de diferentes linguagens de programação, sendo as mais comuns *python* e *C++*.

A computação gráfica (*Computer Graphics*) é a rede ponto a ponto de processos em ROS onde se processam dados em conjunto. Os conceitos básicos deste nível de computação gráfica são os nós, mestre, servidor de parâmetros, mensagens, serviços e tópicos (ROS.org, 2014); a relação entre estes conceitos encontra-se representada na Figura 17.

- **Nós:** são processos que executam a computação como por exemplo, um nó controla os motores das rodas, um nó executa a localização e outro nó fornece a visão gráfica do sistema;
- **Mestre:** o mestre em ROS fornece registo de nome e pesquisa para a restante computação gráfica. Sem o mestre os nós não seriam capazes de se encontrar, trocar mensagens ou invocar serviços;
- **Servidor de parâmetros:** permite que os dados sejam armazenados por chave num local central, faz parte do mestre;
- **Mensagens:** os nós comunicam passando mensagens, que são simplesmente uma estrutura de dados. As mensagens são encaminhadas por meio de um sistema de transporte com a semântica de publicação/subscrição;
- **Tópicos:** um nó envia uma mensagem publicando-a num determinado tópico. O tópico é o nome usado para identificar o conteúdo da mensagem, por exemplo, um nó que está interessado num certo tipo de dados vai subscrever o tópico apropriado;
- **Serviços:** a solicitação/resposta é feita por meio de serviços, que são definidos por um par de estruturas de mensagem, uma para a solicitação e outra para a resposta;

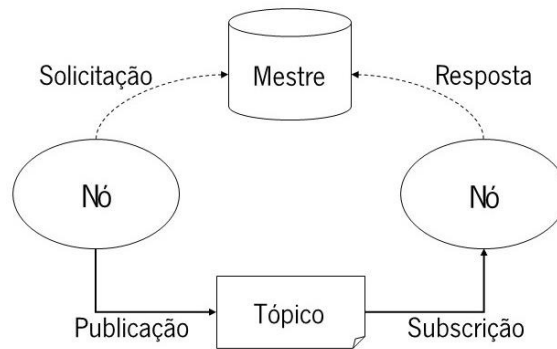


Figura 17 - Comunicação entre os conceitos básicos da computação gráfica do ROS. Adaptado de (ROS.org, 2014)

Neste caso, é utilizado o ROS uma vez que é uma das maneiras fornecidas pelo *CoppeliaSim* para controlar um robô ou uma simulação por meio de um nó e, embora o *CoppeliaSim* ofereça uma vasta gama de sistemas de controlo robótico, a escolha para o ROS deve-se à sua aplicabilidade, grande número de bibliotecas compatíveis e ainda ao facto de ser o sistema mais utilizado no laboratório (LAR).

## 2.6 Método de Planeamento de Experiências (PDE)

O planeamento de experiências (PDE) é definido como um ramo da estatística aplicada que trata do planeamento, condução, análise e interpretação de testes para avaliar os fatores que controlam o valor de um parâmetro ou grupo de parâmetros.

Com o objetivo de aplicar este método, é recomendado o acompanhamento das seguintes etapas:

1. Adquirir o conhecimento completo das entradas e saídas que se pretende estudar;
2. Determinar o parâmetro adequado para os resultados de saída, de preferência um parâmetro variável;
3. Criar a matriz de planeamento para os fatores em estudo. A matriz deve mostrar todas as combinações possíveis para os níveis pretendidos de cada fator de entrada. O número necessário de iterações pode ser calculado por  $2^n$ , sendo  $n$  o número de variáveis de entrada. Na Tabela 5 é possível observar um exemplo geral de aplicação deste método para duas variáveis.

Tabela 5 - Exemplo de aplicação do método PDE com duas variáveis.

Iterações	Nível de entrada A	Nível de entrada B
1	-1	-1
2	-1	+1

3	+1	-1
4	+1	+1

---

Este método permite a manipulação de múltiplos fatores de entrada, determinando o seu efeito sobre uma saída desejada pois, ao manipular várias entradas ao mesmo tempo, este método pode identificar interações importantes que se podiam perder ao analisar os fatores em separado (Chu et al., 2011).

### 3. PROJETO MECÂNICO

Enquadrado com o projeto “ATHENA” (*All-Terrain Hexapod for Environment Navigation Adaptability*), que se encontra na primeira fase e se pretende que passe por vários testes, e após a revisão bibliográfica sobre robôs de pernas bio-inspirados, conclui-se que o robô deveria seguir o modelo hexápode, ou seja, ser constituído por seis pernas.

Este robô pretende manter alto rendimento estável e alta capacidade de manobra pois só assim é possível percorrer terrenos complexos e superar os diversos obstáculos que podem surgir nos diferentes terrenos. Para além dos modelos estruturais, o sistema geral procura garantir simplicidade no modelo de movimento e de dinâmica e, ainda na arquitetura de controlo e construção do protótipo, mantendo o custo total reduzido, o que implica uma otimização dos componentes de forma a reduzir a sua massa. Com esta redução, é possível, também reduzir o consumo total de energia, que é um requisito importante a cumprir.

Neste capítulo, são apresentados os requisitos para o projeto mecânico da perna, as cinemáticas direta e inversa e, ainda a análise estática.

A análise estática do mecanismo da perna é importante para a determinação da magnitude não só das forças aplicadas, mas também das forças de reação nas articulações, permitindo o estudo de otimização de alguns componentes. Consequentemente, é relevante o estudo da seleção dos materiais e atuadores, e também o projeto e montagem do robô.

#### 3.1 Requisitos iniciais de projeto do mecanismo

De forma a seguir a metodologia correspondente ao projeto de robôs de pernas, estes parâmetros quantitativos podem ser apresentados pelos seguintes requisitos:

- Alta estabilidade,
  - O centro de massa do robô deve ter uma altura baixa;
  - Deve haver alta absorção de impacto em cada ponto de apoio;
  - Ao longo do movimento, pelo menos três pernas devem estar em fase de apoio, para suportar o peso do corpo;

- Alta destreza,
  - O corpo do robô deve ser hexagonal;
  - As pernas devem ter pelo menos 3 GDL para garantir a destreza necessária;
  - A rotação do segmento equivalente à coxa deve estar dentro de uma faixa de 60°;
  - A rotação do segmento correspondente ao fêmur deve variar numa faixa de 70°;
  - A rotação do segmento equivalente à tíbia deve estar numa faixa de 110°;
  - A coxa deve ter um comprimento igual ou superior a 50 mm;
- Baixa complexidade,
  - O corpo e as pernas devem ter um desenho mecânico replicável, para facilitar a velocidade de construção;
  - Uma vez que não há necessidade de transportar carga pesada, todas as juntas podem ser rotativas;
- Custo global reduzido,
  - Os elementos projetados devem ser fabricados por impressão 3D ou corte a laser de metal;
  - Utilização de componentes prontos para a conexão das peças;
- Baixo consumo de energia,
  - A redução e otimização da massa dos segmentos permite reduzir o momento necessário para os atuadores.

### 3.1.1 Projeto do mecanismo das pernas

Relativamente à configuração das pernas, observou-se que, como estas são responsáveis apenas pela locomoção e não necessitam de manipular objetos, é possível manter a simplicidade do sistema projetando todos os membros como um sistema multicorpo aberto (SMC). Adicionalmente, a sua cadeia cinemática pode ser simplificada para 3 GDL pois, para artrópodes, foi afirmado que necessitam principalmente da coxa, fêmur e tíbia (Buschmann & Trimmer, 2017). Na Figura 18 pode ver-se a representação da configuração para o robô hexápode a projetar.

No que se refere à dimensão dos segmentos de cada perna, a configuração ideal para pernas com três segmentos, deve reger-se pela seguinte proporção (Chen et al., 2014),

$$\text{Coxa: fêmur: tíbia} = 1: 4: 3$$

Logo, como a coxa  $l_1$  deve ter o comprimento de 50 mm,

- Fémur  $l_2$ : 200 mm;
- Tíbia  $l_3$ : 150 mm.

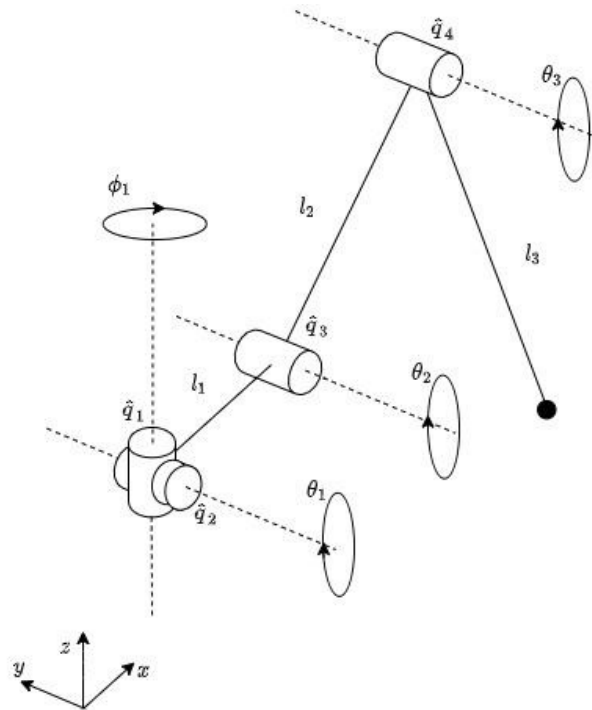


Figura 18 - Representação da perna e a rotação de cada articulação.

Nesta representação é possível observar que se assume apenas três segmentos, neste caso: coxa ( $l_1$ ), fémur ( $l_2$ ) e tíbia ( $l_3$ ), e ainda quatro juntas rotacionais, sendo que a posição de  $\hat{q}_2$  é considerada constante, de forma a reduzir complexidade da perna. Caso o espaço de trabalho não seja suficiente para o objetivo a cumprir é possível acrescentar um GDL nesta junta. A junta  $\hat{q}_1$  é a única articulação com rotação não-plana.

Sendo que a perna possui um total de três segmentos e três juntas rotacionais, substituindo na Equação 4 conclui-se que o mecanismo possui três GDL por perna, o que resulta em dezoito GDL no total do robô hexápode.

Considerando a análise de uma única perna, o seu movimento pode ser representado utilizando quatro coordenadas independentes, que correspondem às coordenadas angulares de cada centro de massa (CM) do corpo, presentes na Equação 13,

$$q = [\phi_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \quad (13)$$

em que,  $q$  é o vetor das posições generalizadas.

### 3.1.2 Sistema de coordenadas da perna

As análises cinemática e dinâmica da perna exigem a definição de um sistema global de coordenadas para representar cada centro de massa durante o movimento. Para simplificar os cálculos, todos os segmentos têm o CM localizado no ponto médio entre as duas juntas.

Como a perna possui um movimento não planar, a análise será dividida em dois casos diferentes, de forma a simplificar a compreensão da análise. Na Figura 19 é apresentado o centro de massa de cada segmento para o plano XZ.

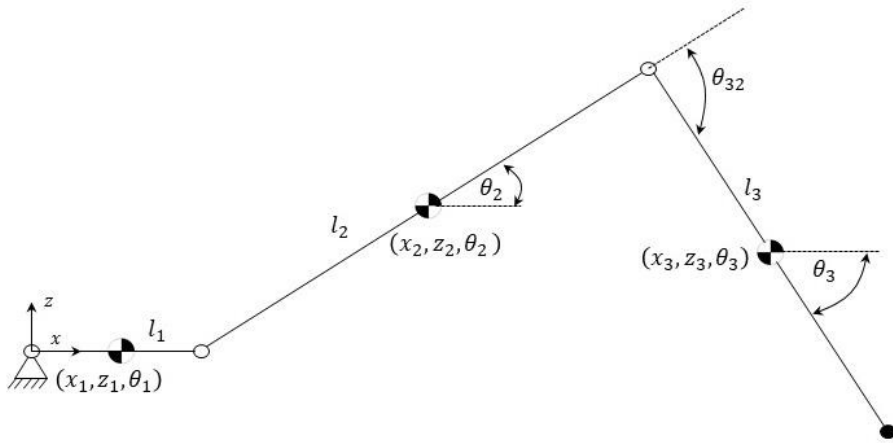


Figura 19 - Representação dos CM dos segmentos no plano XZ.

O ângulo  $\theta_3$  corresponde ao valor absoluto do ângulo  $\theta_{32}$  que se expressa pela Equação 14,

$$\theta_3 = \theta_2 + \theta_{32} \quad (14)$$

Assumindo coordenadas absolutas, o movimento do mecanismo para este plano é descrito pelo seguinte vetor de posições generalizadas  $\vec{q}$ , apresentado na Equação 15.

$$\vec{q} = [x_1, z_1, \theta_1, x_2, z_2, \theta_2, x_3, z_3, \theta_3]^T \quad (15)$$

Em que,

$$x_1 = \frac{l_1}{2} \cos(\theta_1) \quad (16)$$

$$z_1 = \frac{l_1}{2} \sin(\theta_1) \quad (17)$$

$$x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + \frac{l_2}{2} \cos(\theta_2) \quad (18)$$

$$z_2 = l_1 \sin(\theta_1) + \frac{l_2}{2} \sin(\theta_2) \quad (19)$$

$$x_3 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + \frac{l_3}{2} \cos(\theta_3) \quad (20)$$

$$z_3 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) + \frac{l_3}{2} \sin(\theta_3) \quad (21)$$

A Figura 20 mostra a rotação dos corpos no plano XY. Assim,  $q$  é expresso pela Equação 22,

$$q = [x_1, y_1, \phi_1, x_2, y_2, \phi_2, x_3, y_3, \phi_3]^T \quad (22)$$

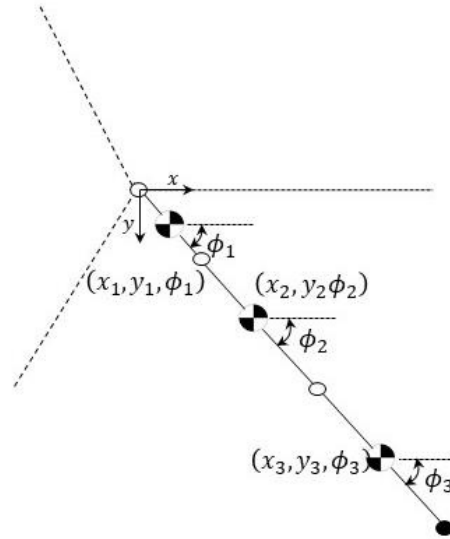


Figura 20 - Representação dos CM dos segmentos no plano XY.

como apenas  $\hat{q}_1$  fornece movimento angular neste plano, todos os segmentos têm a mesma rotação com o valor de  $\phi_1$ . Logo, as coordenadas dos centros de massa expressam-se pelas Equações 23 a 28.

$$x_1 = \frac{l_1}{2} \cos(\phi_1) \quad (23)$$

$$y_1 = \frac{l_1}{2} \sin(\phi_1) \quad (24)$$

$$x_2 = \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right) \cos(\phi_1) \quad (25)$$

$$y_2 = \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right) \sin(\phi_1) \quad (26)$$

$$x_3 = \left(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}\right) \cos(\phi_1) \quad (27)$$

$$y_3 = \left(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}\right) \sin(\phi_1) \quad (28)$$

### 3.1.3 Amplitude do movimento de cada articulação

A rotação de cada junta deve permitir o cumprimento dos requisitos estabelecidos e por isso, para garantir que o CM do robô seja próximo do solo,  $\hat{q}_3$  deve ser sempre positivo. Além disso, para este estudo  $\hat{q}_2$  é considerado nulo para reduzir o número de atuadores, obtendo assim a configuração mais



comum para hexápodes, com três juntas rotacionais. Assim, foram estipuladas as seguintes amplitudes de movimento:

- $\hat{q}_1 (\phi_1)$ :  $[-20; 20]^\circ$ ;
- $\hat{q}_2 (\theta_1)$ :  $0^\circ$ ;
- $\hat{q}_3 (\theta_2)$ :  $[0; 70]^\circ$ ;
- $\hat{q}_4 (\theta_{32})$ :  $[-120, 0]^\circ$ .

Utilizando a amplitude de movimento estabelecida para cada articulação, o espaço de trabalho da perna é apresentado na Figura 21.

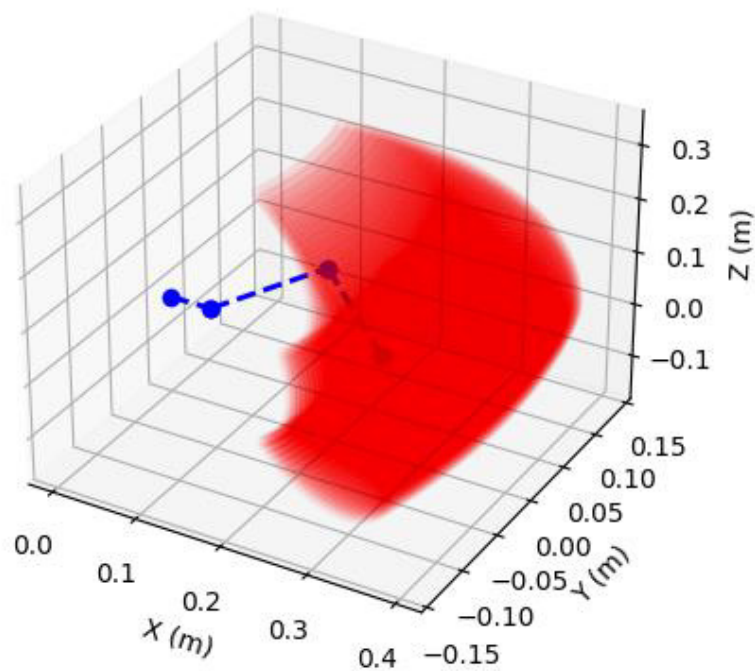


Figura 21 - Representação do espaço de trabalho da perna.

### 3.2 Cinemática direta

A cinemática direta permite determinar a relação entre o valor angular de cada articulação e a posição dos apoios para cada passo e assim controlar as trajetórias das pernas. Na Figura 22 é possível observar a representação dos referenciais relativos utilizados no cálculo da cinemática direta do robô. De salientar que nesta análise os ângulos utilizados correspondem a ângulos relativos, mas  $\phi_1$  e  $\theta_2$  equivalem aos ângulos absolutos.

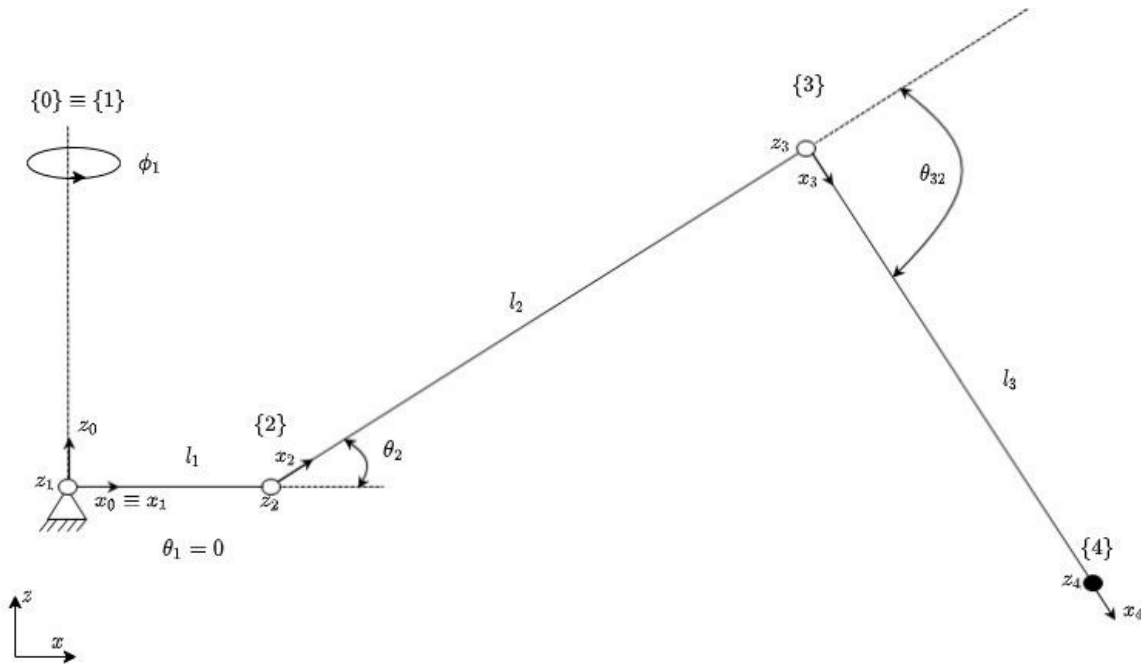


Figura 22 – Representação dos referenciais relativos utilizados na cinemática direta.

Recorrendo à formulação de *Denavit-Hartenberg*, que permite descrever as transformações relativas entre os referenciais, e considerando que o modelo das pernas é homólogo a manipuladores de três graus de liberdade, é possível determinar a cinemática direta da perna. Nesta análise, será considerado que a posição relativa da ponta do pé é definida com base na posição do quadril, ou seja, a articulação  $\hat{q}_1$ . Na Tabela 6 encontram-se os parâmetros de *Denavit-Hartenberg* que exprimem as transformações ao longo da perna.

Tabela 6 – Parâmetros de rotação e translação de *Denavit-Hartenberg*.

Transformação	Translação em X ( $a_{i-1}$ )	Rotação em X ( $\alpha_{i-1}$ )	Translação em Z ( $d_i$ )	Rotação em Z ( $\theta_i$ )
{0} → {1}	0	0°	0	$\phi_1$
{1} → {2}	$l_1$	90°	0	$\theta_2$
{2} → {3}	$l_2$	0°	0	$\theta_{32}$
{3} → {4}	$l_3$	0°	0	0°

Na generalidade, a matriz de transformação entre os diferentes referenciais pode ser dada pela Equação 29:

$$T_{i+1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen } \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \text{sen } \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\text{sen } \alpha_{i-1} & -\text{sen } \alpha_{i-1} d_i \\ \text{sen } \alpha_{i-1} \text{sen } \theta_i & \text{sen } \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Desta matriz resulta a posição relativa do ponto final da transformação, que corresponde ao vetor:  $\vec{p} = [a_{i-1}; -\text{sen } \alpha_{i-1} d_i; \text{cos } \alpha_{i-1} d_i]^T$ .

Com o intuito de obter as coordenadas relativas do pé em relação ao quadril, utiliza-se a Equação 30 para esse cálculo,

$$T_4^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 \quad (30)$$

A matriz resultante (Equação 31) desta multiplicação encontra-se apresentada abaixo,

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 \cos(\theta_2 + \theta_{32}) & -\cos \phi_1 \sin(\theta_2 + \theta_{32}) & \text{sen } \phi_1 & p_x \\ \text{sen } \phi_1 \cos(\theta_2 + \theta_{32}) & -\text{sen } \phi_1 \sin(\theta_2 + \theta_{32}) & -\cos \phi_1 & p_y \\ \text{sen}(\theta_2 + \theta_{32}) & \text{cos}(\theta_2 + \theta_{32}) & 0 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Assim, atinge-se também os valores das coordenadas relativas do pé, ponto final da perna, no espaço em relação ao quadril, que se encontram no vetor  $\vec{p}$ , representado pela Equação 32.

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 (l_3 \cos(\theta_2 + \theta_{32}) + l_2 \cos \theta_2 + l_1) \\ \text{sen } \phi_1 (l_3 \cos(\theta_2 + \theta_{32}) + l_2 \cos \theta_2 + l_1) \\ l_3 \text{sen}(\theta_2 + \theta_{32}) + l_2 \text{sen } \theta_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Todas estas equações foram implementadas em *python*, permitindo visualizar a possível trajetória do pé, tanto para o plano XY (Figura 23(a)), em que se considera todo o intervalo de variação angular das juntas, como para o plano XZ (Figura 23(b)), onde se atribui zero ao valor da junta  $\phi_1$  e se faz variar as restantes juntas ( $\theta_2$  e  $\theta_{23}$ ) em todo o intervalo de valores.

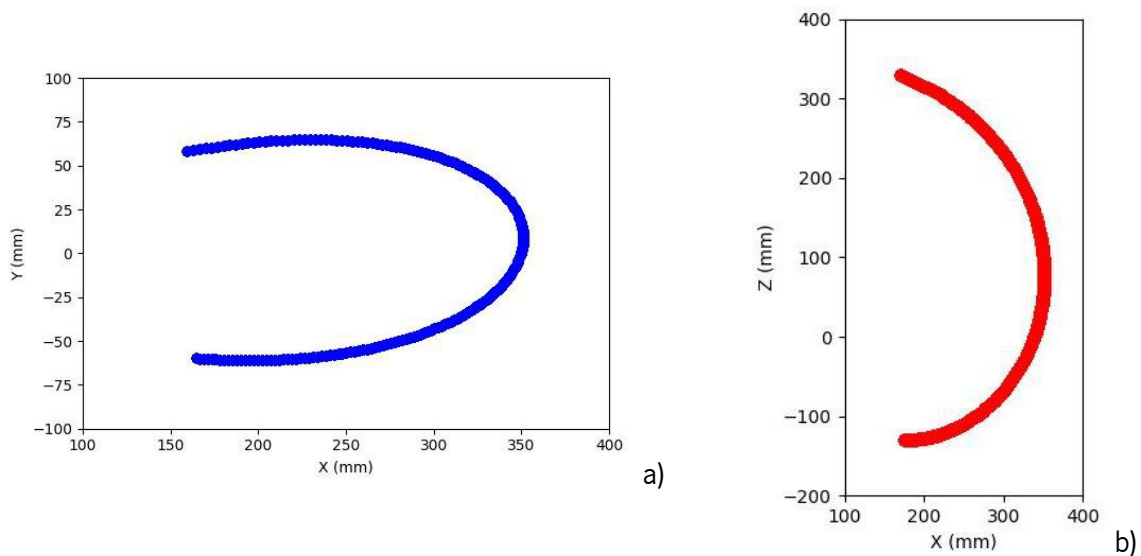


Figura 23 - Representação gráfica da variação de posição do pé.  
a) plano XY; b) planos XZ

### 3.3 Cinemática inversa

A cinemática inversa é importante, em alguns casos, para determinar os valores dos elementos do conjunto, de acordo com a posição desejada da ponta do pé, principalmente quando se pretende recalcular a trajetória e a posição da perna. Utilizando o referencial assumido nos cálculos anteriores, é possível observar na Figura 24 a representação geométrica que permitiu calcular a rotação da articulação  $\hat{q}_1$ , dada pela Equação 33,

$$\phi_1 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{P_y}{P_x}\right), & \text{se } P_y \neq 0 \text{ e } P_x \neq 0 \\ 0, & \text{se } P_y = 0 \end{cases} \quad (33)$$

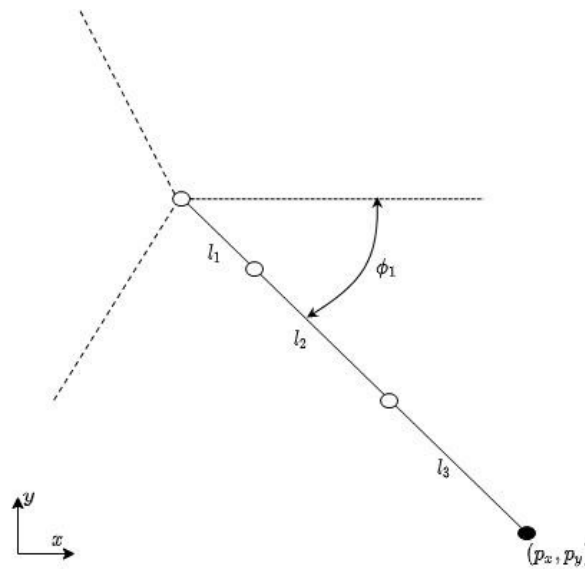


Figura 24 - Representação geométrica utilizada para o cálculo de  $\phi_1$ .

Com o intuito de determinar o valor de  $\theta_{32}$ , recorreu-se à representação geométrica apresentada na Figura 25.

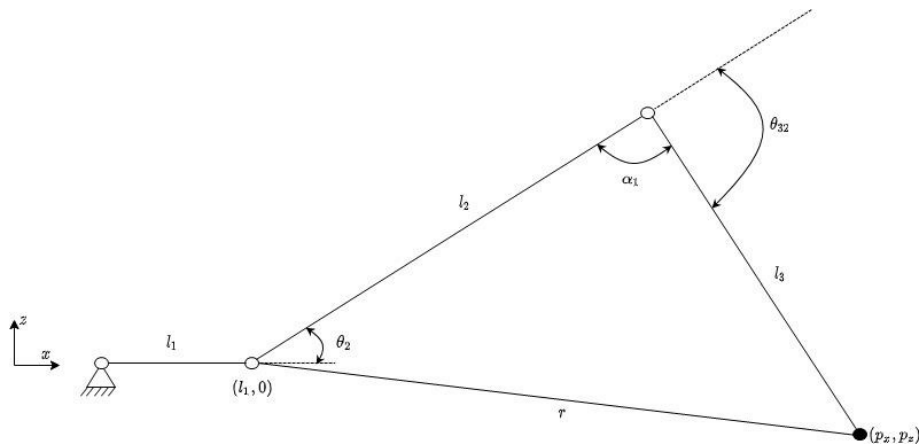


Figura 25 - Representação geométrica para o cálculo de  $\theta_{32}$ .

É possível obter a norma do vetor  $r$  por meio da Equação 34, utilizando as coordenadas da ponta do pé  $(P_x, P_y, P_z)$  e da junta  $\hat{q}_2(P_{x02}, P_{y02}, P_{z02})$ ,

$$r = \sqrt{(P_x - P_{x02})^2 + (P_y - P_{y02})^2 + (P_z - P_{z02})^2} \quad (34)$$

Então, pela Figura 25, é possível perceber que  $\alpha_1 = \pi - \theta_{32}$ , e pela lei dos cossenos determina-se o valor de  $\alpha_1$  apresentado na Equação 35,

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{r^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2}\right) \quad (35)$$

Substituindo  $\alpha_1$ , o valor de  $\theta_{32}$  é dado pela Equação 36,

$$\theta_{32} = \pi - \arccos\left(\frac{r^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2}\right) \quad (36)$$

Para o cálculo de  $\theta_2$ , e após confirmação de que o cálculo geométrico era acompanhado por um erro de valor não constante, é utilizado um método de cálculo matricial tal como em (Liu et al., 2017).

Com o auxílio da Equação 31, é possível obter as matrizes  $T_2^1, T_3^2, T_4^3$  e calcular  $T_4^1$  como apresentado na Equação 37,

$$T_4^1 = T_2^1 T_3^2 T_4^3 \quad (37)$$

Substituindo as matrizes intermédias obtém-se a Equação 38,

$$T_4^1 = \begin{bmatrix} c(\theta_2 + \theta_{32}) & -s(\theta_2 + \theta_{32}) & 0 & l_3 c(\theta_2 + \theta_{32}) + l_2 c(\theta_2) + l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s(\theta_2 + \theta_{32}) & c(\theta_2 + \theta_{32}) & 0 & l_3 s(\theta_2 + \theta_{32}) + l_2 s(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

E considerando a informação da Equação 39,

$$\begin{aligned} T_4^1[3,4] &= P_z \text{ e } T_4^1[1,4] = P_x \\ P_x' &= \frac{P_x}{\cos \phi_1} \end{aligned} \quad (39)$$

O valor de  $\theta_2$  é dado por pela Equação 40,

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{P_x' - l_1 + \frac{l_3 \sin \theta_{32} P_z}{l_2 + l_3 \cos \theta_{32}}}{l_2 + l_3 \cos \theta_{32} + \frac{l_3^2 (\sin \theta_{32})^2}{l_2 + l_3 \cos \theta_{32}}}\right) \quad (40)$$

### 3.4 Formulação para análise estática

Esta análise estática implica a aplicação do Princípio D'Alembert para sistemas estáticos, que estabelece que a soma de todas as forças e momentos aplicados deve ser igual a zero, como apresentado nas Equações 41 e 42,

$$\sum F = 0 \quad (41)$$

$$\sum M = 0 \quad (42)$$

Como este mecanismo corresponde a um sistema multicorpo (SMC), cada segmento deve ser analisado independentemente dos outros. De forma a compreender melhor as forças aplicadas no sistema, cada corpo necessita do seu diagrama de corpo livre. A Figura 26 representa o diagrama de corpo livre da tibia.

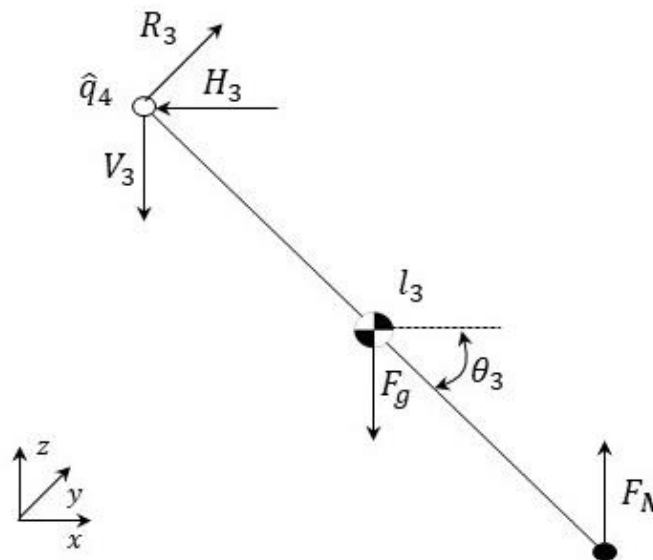


Figura 26 - Diagrama de corpo livre da tibia.

As forças aplicadas neste segmento correspondem ao seu peso  $F_g$  e às forças de reação para os eixos X, Y e Z ( $H_3, R_3, V_3$ , respetivamente). Durante a fase de apoio existe ainda uma força de contacto  $F_N$  aplicada no pé. Neste caso, esta força ( $F_N$ ) corresponde à força de reação do solo devido ao peso do robô. Esta força aumenta quando o número de pernas na fase de apoio diminui. Como esta é a situação mais crítica para a tibia, a aplicação das Equações 41 e 42 para  $\hat{q}_4$  leva às seguintes condições apresentadas pelas Equações 43 a 48.

$$\sum F_3^x = 0 \Leftrightarrow -H_3 = 0 \quad (43)$$

$$\sum M_3^x = 0 \quad (44)$$

$$\sum F_3^y = 0 \Leftrightarrow -R_3 = 0 \quad (45)$$

$$\sum M_3^y = 0 \quad (46)$$

$$\sum F_3^z = 0 \Leftrightarrow F_N = V_3 + F_g \quad (47)$$

$$\sum M_3^z = 0 \Leftrightarrow M_3^z = l_3 F_N \sin(\theta_3) - \frac{l_3}{2} F_g \sin(\theta_3) \quad (48)$$

No caso do fêmur, para além da força gravitacional, este segmento está também sujeito às forças de reação de  $\hat{q}_3$  e  $\hat{q}_4$ . A Figura 27 mostra o diagrama de corpo livre desse segmento. Pelo mesmo princípio, as condições estáticas para  $\hat{q}_3$  são expressas pelas Equações 49 a 54,

$$\sum F_2^x = 0 \Leftrightarrow H_3 - H_2 = 0 \quad (49)$$

$$\sum M_2^x = 0 \quad (50)$$

$$\sum F_2^y = 0 \Leftrightarrow R_3 - R_2 = 0 \quad (51)$$

$$\sum M_2^y = 0 \quad (52)$$

$$\sum F_2^z = 0 \Leftrightarrow V_3 = V_2 + F_g \quad (53)$$

$$\sum M_2^z = 0 \Leftrightarrow M_2^z = l_2 V_3 \sin(\theta_2) - \frac{l_2}{2} F_g \sin(\theta_2) \quad (54)$$

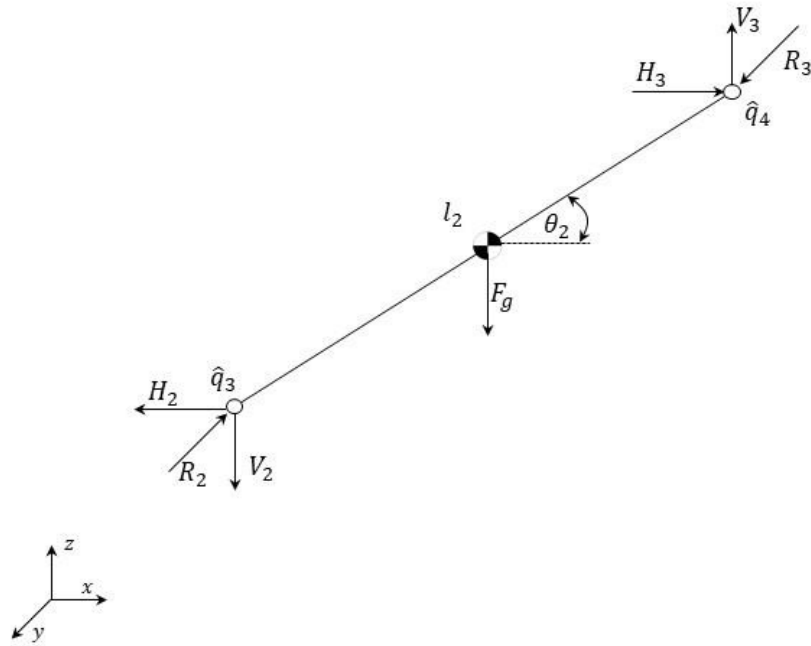


Figura 27 - Diagrama de corpo livre do fêmur.

O diagrama de corpo livre da coxa, apresentado na Figura 28, é semelhante ao do fêmur.

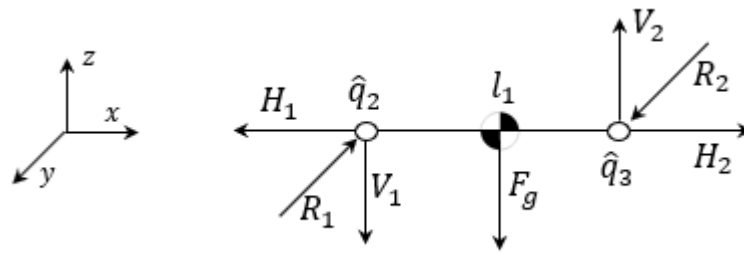


Figura 28 - Diagrama de corpo livre da coxa.

Logo, as condições estáticas para  $\hat{q}_2$  são expressas pelas Equações 55 a 60,

$$\sum F_1^x = 0 \Leftrightarrow H_2 - H_1 = 0 \quad (55)$$

$$\sum M_1^x = 0 \quad (56)$$

$$\sum F_1^y = 0 \Leftrightarrow R_2 - R_1 = 0 \quad (57)$$

$$\sum M_1^y = 0 \quad (58)$$

$$\sum F_1^z = 0 \Leftrightarrow V_2 = V_1 + F_g \quad (59)$$

$$\sum M_1^z = 0 \Leftrightarrow M_1^z = l_1 V_2 - \frac{l_1}{2} F_g \quad (60)$$



### 3.5 Modelo concetual

Com base nos resultados de pesquisa do Capítulo 2 e no seguimento de conceitos previamente definidos no projeto, nesta secção é apresentado o modelo concetual do mecanismo do robô, sendo que o objetivo desta dissertação não consiste no desenho de um novo robô hexápode, mas sim na otimização do modelo já existente no âmbito do projeto “ATHENA”. A Figura 29 mostra a montagem final do robô e a Figura 30 apresenta com maior detalhe os componentes da perna.

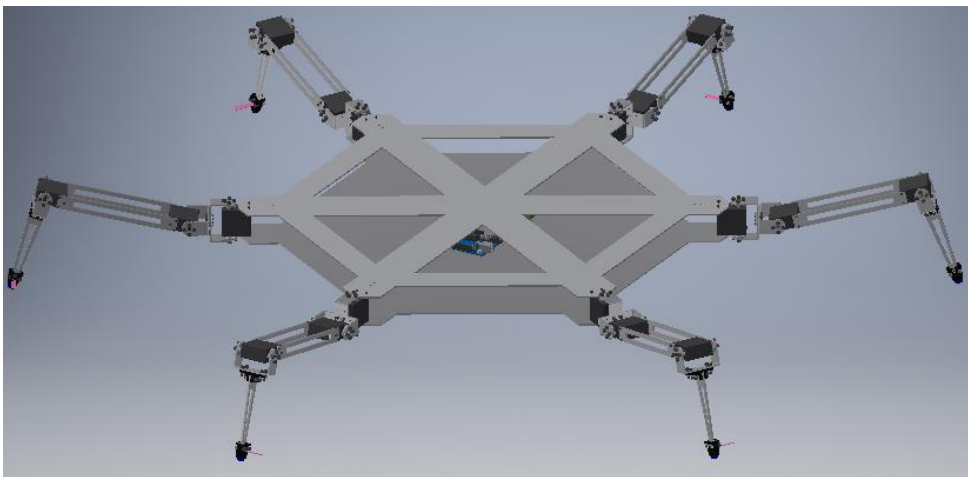


Figura 29 - Montagem final do robô em *Autodesk Inventor*.

Atualmente, as seis pernas do robô são exatamente iguais, visto que se trata de um modelo para protótipo. Deste modo, há uma simplificação da sua produção e montagem dos componentes. Além disso, esta solução facilita também possíveis alterações no projeto, pois as peças são todas iguais. Como não é necessária a aplicação de nenhum manipulador na extremidade da perna, também não existe justificação para o desenho de modelos diferentes.

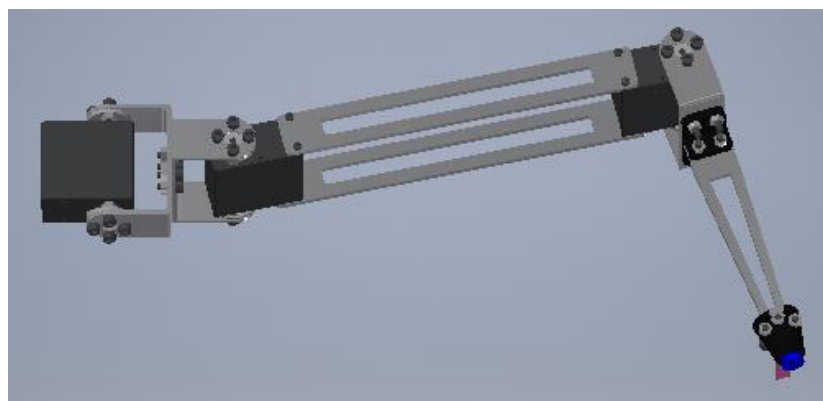


Figura 30 - Representação dos componentes da perna.

Relativamente ao corpo do robô, é ainda necessário um microcontrolador para o controlo e atuação corretos do robô, uma vez que coordena os atuadores com base nas informações recolhidas pelos sensores, e uma placa de controlo do motor, para fornecer maior precisão de momento e movimento.

De referir ainda que a placa superior tem uma forma diferente da outra placa do corpo, pois não possui massa adicional e apenas precisa de restringir os servomotores da coxa. Além disso, o sistema necessita de sensores para detetar o contacto da perna com o solo e para ter perceção da distância entre o corpo e os obstáculos.

A seleção do material de cada peça depende essencialmente da sua funcionalidade e da magnitude das forças aplicadas na mesma. Na Tabela 7 é possível observar a seleção do material, o processo de manufatura e a massa de cada componente considerando as dimensões do modelo concetual, já previamente estipulados no seguimento do projeto.

Tabela 7 - Seleção do material para cada componente.

Componentes	Material	Processo de manufatura	Massa (kg)
Corpo	Liga de alumínio	Corte laser	1,974
Juntas	PLA	Impressão 3D	Coxa: 0,017
	PLA	Impressão 3D	Fémur: 0,020
	PLA	Impressão 3D	Tíbia: 0,024
Apoio da perna	PLA	Impressão 3D	0,013
Segmentos	Liga de alumínio	Corte laser	Fémur: 0,069
	Liga de alumínio	Corte laser	Tíbia: 0,033

Tal como os materiais e os processos de manufatura, também os atuadores já se encontram definidos e por isso, sendo utilizados servomotores de dois eixos que apresentam um momento de arranque de 1,892 Nm e são responsáveis pela atuação de todas as articulações dos membros.

O desenvolvimento do modelo concetual inclui também montagem de todos os componentes. Assim, na Figura 31 é possível observar a configuração das juntas da coxa, do fémur e da tíbia, respetivamente.

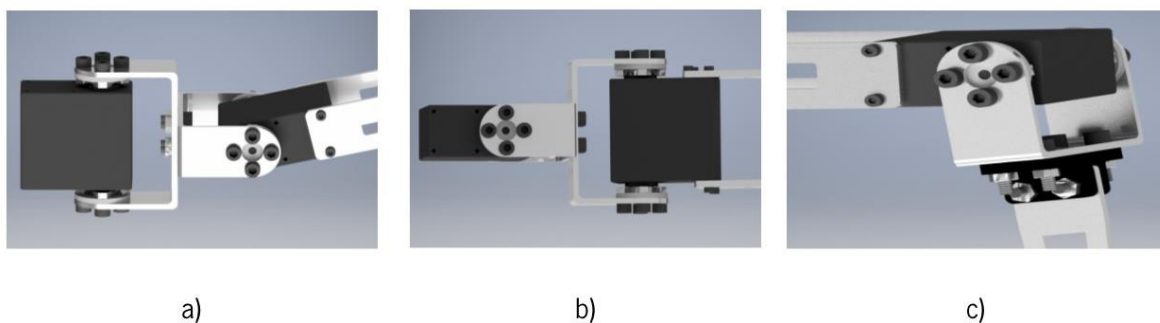


Figura 31 - Configuração das juntas.  
a) junta da coxa; b) junta do fémur; c) junta da tíbia

As configurações observadas na Figura 31, aproveitam as peças que acompanham os servomotores para realizar o mecanismo de rotação horizontal e vertical, substituem assim a sua produção em filamento polimérico. Como o material destes elementos se trata de uma liga de alumínio, fornecem uma resistência mecânica maior do que as peças impressas em 3D. Contudo, devido às dimensões dos componentes, o comprimento da coxa aumentou, tendo então, um total de 53,80 mm.

No desenvolvimento desta dissertação surgiu a necessidade de redesenhar o mecanismo de apoio, de forma a possibilitar a inclusão de um sensor de força, como se pode observar na Figura 32. Similarmente aos restantes componentes, também o projeto mecânico do membro de apoio não é definitivo. Nesta fase do projeto, o apoio é constituído por várias partes impressas em 3D e um sensor de força, pois apenas se pretende estudar o movimento do robô em solo não acidentado. Logo, não se considerou necessário aumentar a capacidade de absorção de impacto, pois as forças de contacto não são consideravelmente grandes. No entanto, caso seja necessário para outra fase do projeto, o material utilizado pode ser alterado.

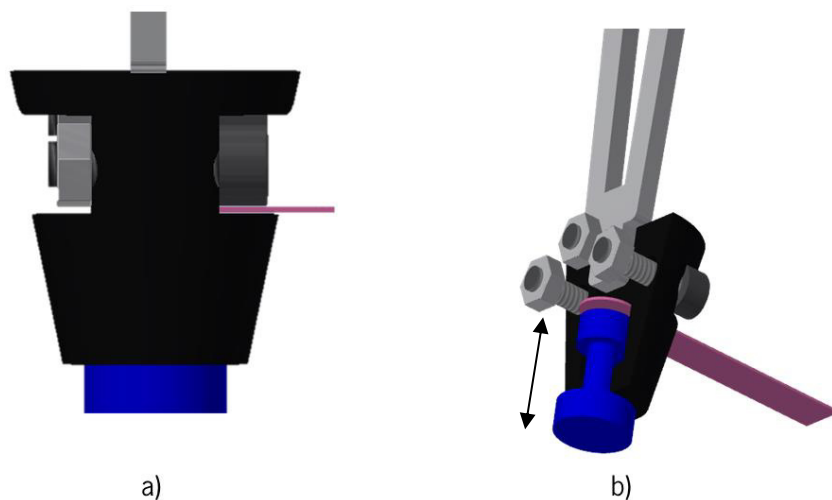


Figura 32 - Representação dos componentes do membro de apoio.  
a) conjunto completo; b) representação da localização do sensor.

O objetivo deste mecanismo é que a componente azul, apresentada na Figura 32, deslize ao longo do seu eixo quando a perna entra em contacto com o solo e cause uma variação de valores de força no sensor (cor de rosa), que se encontra acoplado ao invólucro preto, a montagem deste conjunto, depende ainda de três parafusos de cabeça sextavada preta M3x12. Na Figura 32 a representação do sensor é feita de uma forma estática, mas, na realidade, este comporta-se como um corpo flexível, permitindo assim a sua fixação ao longo da tibia. No Apêndice I – Desenhos técnicos do apoio, é possível encontrar os desenhos técnicos do suporte e do êmbolo do apoio.

O sensor utilizado é um sensor de força do tipo resistivo, com uma área de detecção de 7 mm de diâmetro, apresenta uma sensibilidade para detecção de duas gramas e a sua gama de sensibilidade em força varia de 0,1 N a 10 N (Interlink Electronics, 2010). Este sensor encontra-se na Figura 33.



Figura 33 - Sensor resistivo utilizado para o contacto.

A descrição de todos os conjuntos e dos respetivos elementos, em termos de quantidade, material e processo de fabrico, incluindo componentes seleccionados anteriormente no seguimento do projeto, encontra-se no Apêndice II – Componentes para o projeto mecânico do robô.

Com o intuito de analisar a viabilidade do sistema projetado, foram impressas em PLA, com recurso a impressora 3D, as peças constituintes de uma perna, de forma a permitir a montagem de um protótipo, como é possível observar na Figura 34. No entanto, foi necessário alterar ligeiramente algumas dimensões das peças, já que estas não estavam projetadas para este processo de fabrico.

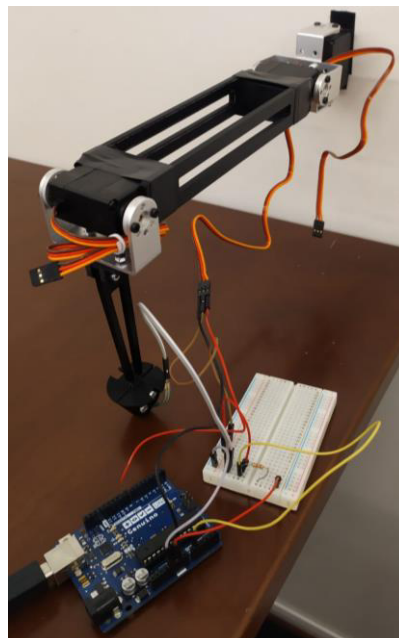


Figura 34 - Protótipo da perna montado com acionamento de um servomotor e o sensor de força.

Para este teste foi acionado apenas o servomotor da junta do fémur de modo a provocar movimento vertical da tíbia. Na Figura 35 encontra-se a ligação feita entre o servomotor, o sensor de força e o arduíno, que é alimentado pelo computador.

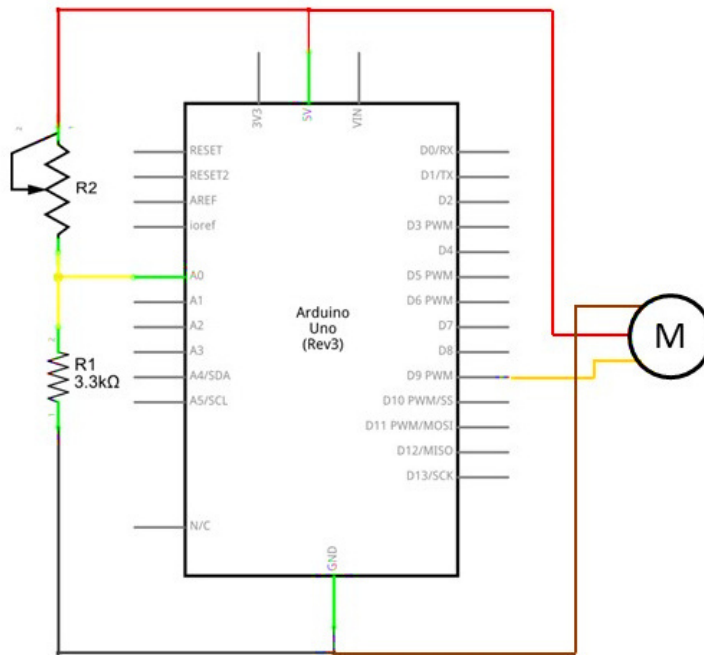


Figura 35 - Esquema elétrico da ligação do sensor de força e um servomotor ao arduino.

Este ensaio permitiu perceber que o sensor de força deteta claramente o momento de contacto com o solo fazendo variar o valor de força lido. No entanto este sensor apresenta baixa precisão, pois os valores obtidos não apresentam repetibilidade entre os sucessivos contactos com o solo, pelo que não seria a melhor escolha para esta aplicação, uma vez que o valor deste sensor de força seria utilizado no controlo dinâmico e por isso, é necessário que este seja o mais verdadeiro possível.

### 3.6 Otimização das pernas

Nesta secção é apresentado o estudo estático de otimização das pernas, cujo objetivo é a redução de massa. Desta forma, o momento necessário para atuar as juntas diminui. O estudo incide sobre a tíbia e o fémur, uma vez que são os componentes maiores da perna e por isso apresentam maior massa. Com o auxílio do método PDE apresentado no Capítulo 2.6, é possível concluir que são necessárias quatro iterações para cada segmento, aplicando este método a duas variáveis. Neste caso de estudo, os níveis em análise são ambos negativos, pois o que se pretende é o estudo da redução da massa, sem que a tensão máxima sentida nas peças seja maior que a tensão de cedência do alumínio.

- Otimização da tíbia

No caso da tíbia, as variáveis alteradas são os espaçamentos representados por (c) e (d) na Figura 36. Sendo que a variável (d) varia simetricamente do lado oposto, os valores a alterar ao longo das iterações realizadas encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Iterações realizadas na análise estrutural da tibia.

Iterações	c	d
1	-2	-2
2	-2	-4
3	-4	-2
4	-4	-4

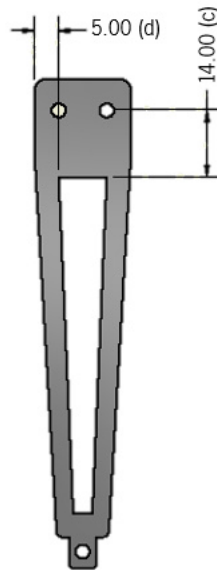


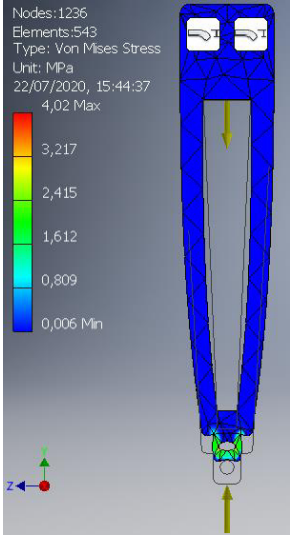
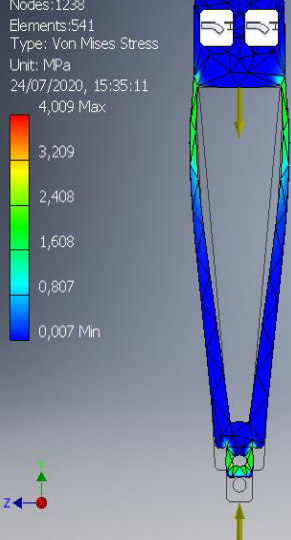
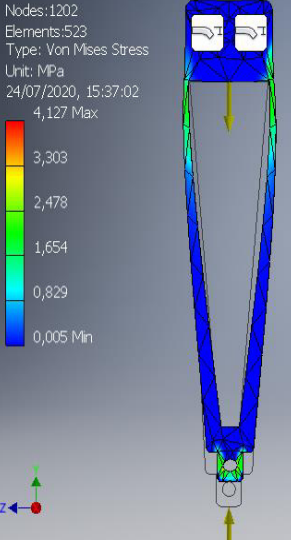
Figura 36 - Representação das variáveis em estudo na tibia.

Nesta análise, que se realizou com auxílio do programa *Autodesk Inventor*, foram aplicados constrangimentos de fixação nos furos da tibia que fazem a ligação com os restantes componentes e ainda as forças de contacto e gravítica.

O valor da força de contacto resulta da divisão por três do peso total do robô, uma vez que, como referido anteriormente, quando apenas se encontram três pernas em fase de apoio este esforço é maior. Relativamente à força gravítica, é necessário salientar que se utiliza a massa total do subsistema da tibia para a sua aplicação, apesar de, por simplificação, a simulação ser efetuada apenas com o segmento da tibia. Também o local de aplicação desta força foi simplificado, pois não era possível localizar no centro de massa da tibia.

Com o objetivo de reduzir a massa do segmento, as iterações três e quatro apresentam valores relevantes das tensões máximas analisadas comparativamente com o projeto mecânico inicialmente definido para a tibia, como se pode constatar na Tabela 9, o resultado das restantes iterações encontram-se no Apêndice III – Resultados da análise estrutural.

Tabela 9 - Resultados da análise estrutural da tíbia para o caso inicial e as iterações 3 e 5.

Iterações	Simulação	Forças aplicadas
Inicial		<p><math>Volume = 2,67 \text{ cm}^3</math></p> <p><math>F_N = 12,58 \text{ N}</math></p> <p><math>F_g = 0,26 \text{ N}</math></p>
3		<p><math>Volume = 1,92 \text{ cm}^3</math></p> <p><math>F_N = 12,54 \text{ N}</math></p> <p><math>F_g = 0,24 \text{ N}</math></p>
4		<p><math>Volume = 1,86 \text{ cm}^3</math></p> <p><math>F_N = 12,54 \text{ N}</math></p> <p><math>F_g = 0,24 \text{ N}</math></p>

Dado que a tensão de cedência da liga de alumínio é de aproximadamente 270 MPa (International, 1990), e como se pode observar na Tabela 9 esse valor não é ultrapassado, qualquer solução das iterações apresentadas pode ser aplicada para a redução de massa do segmento da tibia.

- Otimização do fêmur

Na análise ao fêmur, as variáveis a sofrer alterações encontram-se representadas por (a) e (b) na Figura 37, sendo que ambas variam simetricamente do lado oposto.



Figura 37 - Representação das variáveis em estudo no fêmur.

Na Tabela 10 é possível observar as variações de cada variável para as iterações realizadas.

Tabela 10 - Iterações realizadas na análise estrutural do fêmur.

Iterações	a	b
1	-3	-3
2	-3	-5
3	-5	-3
4	-5	-5

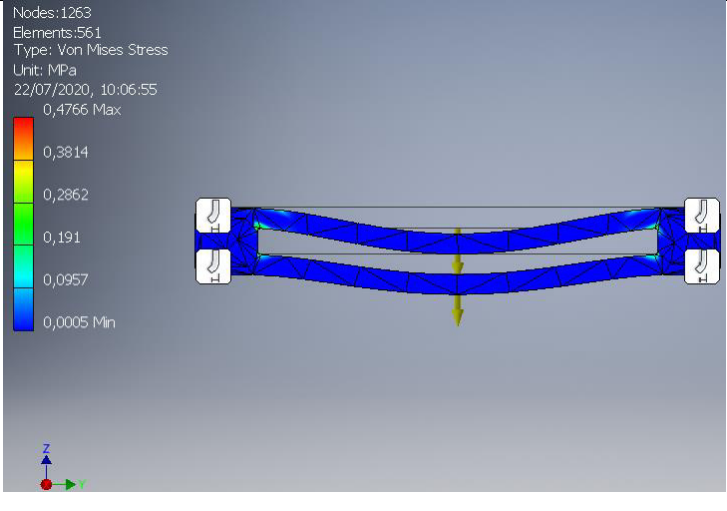
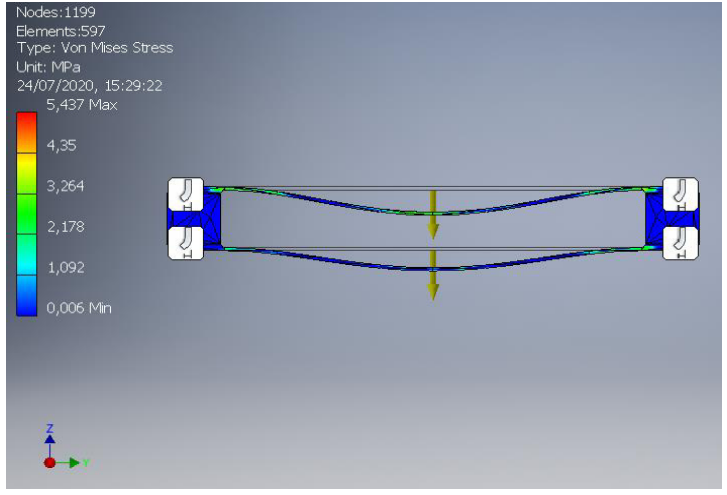
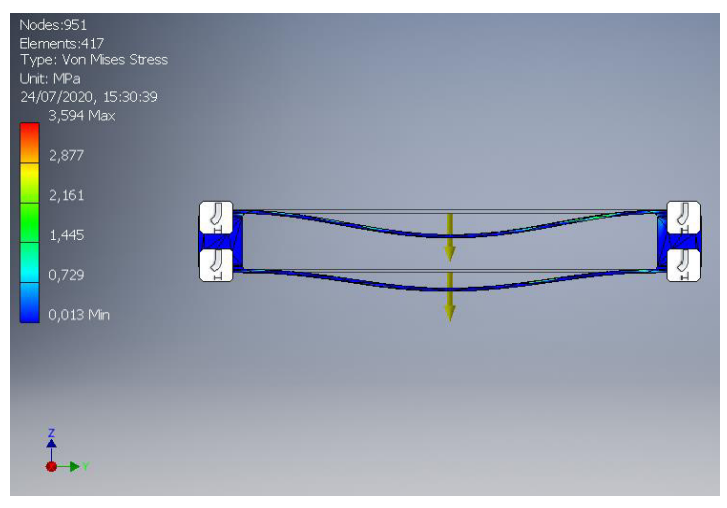
Neste caso, a simulação é realizada com constrangimentos fixos nos quatro furos que permitem a ligação aos restantes componentes do conjunto e a aplicação da força gravítica.

A força gravítica é calculada tendo em consideração a massa de todo o conjunto do fêmur. No entanto, por simplificação, é aplicada apenas a um segmento, o que obriga a que apenas se utilize metade dessa força. Como não é possível aplicar esta força no centro de massa do segmento, esta é distribuída de igual forma pelas duas faces mais próximas.

Na Tabela 11 encontram-se os resultados das iterações três e quatro, pois são os casos em que a redução de massa é mais evidente, em comparação com o projeto mecânico inicial do fêmur. Os resultados das restantes iterações podem ser observados no Apêndice III – Resultados da análise estrutural.



Tabela 11 - Resultados da análise estrutural do fêmur para o caso inicial e as iterações 1 e 5.

Iterações	Simulação	Forças aplicadas
Inicial	 <p>Nodes:1263 Elements:561 Type: Von Mises Stress Unit: MPa 22/07/2020, 10:06:55 0,4766 Max 0,3814 0,2862 0,191 0,0957 0,0005 Min</p>	<p><math>Volume = 5,43 \text{ cm}^3</math> <math>F_g = 0,38 \text{ N}</math></p>
3	 <p>Nodes:1199 Elements:597 Type: Von Mises Stress Unit: MPa 24/07/2020, 15:29:22 5,437 Max 4,35 3,264 2,178 1,092 0,006 Min</p>	<p><math>Volume = 2,16 \text{ cm}^3</math> <math>F_g = 0,36 \text{ N}</math></p>
4	 <p>Nodes:951 Elements:417 Type: Von Mises Stress Unit: MPa 24/07/2020, 15:30:39 3,594 Max 2,877 2,161 1,445 0,729 0,013 Min</p>	<p><math>Volume = 1,98 \text{ cm}^3</math> <math>F_g = 0,36 \text{ N}</math></p>

Pela observação da Tabela 11, é possível concluir que qualquer solução das iterações apresentadas pode ser aplicada para a redução de massa do segmento do fêmur, pois nesta análise não se considera o efeito do deslocamento, e a tensão de cedência da liga de alumínio, que é aproximadamente 270 MPa (International, 1990), não é ultrapassada.

### 3.7 Conclusões do capítulo

Deste capítulo é possível concluir que por meio da cinemática direta e inversa é possível obter as coordenadas da extremidade da perna em relação aos valores das juntas e vice-versa. Também se pode realizar a análise estática recorrendo às equações estabelecidas.

Este robô será essencialmente constituído por liga de alumínio e PLA, o que permite manter a baixa massa do conjunto como é pretendido. O apoio proposto durante a otimização do sistema foi testado e o seu mecanismo de êmbolo é funcional, no entanto o sensor de força deve ser substituído em versões futuras do projeto, uma vez que se pretende um sensor com maior precisão e repetibilidade.

De salientar que todos os membros do robô podem sofrer alterações ao longo das diferentes versões do projeto, e como um dos principais objetivos é a redução de massa sem consequências mecânicas, neste capítulo constatou-se que é possível reduzir a massa dos segmentos da tibia e do fêmur quando estes estão sujeitos às forças estáticas, sem prejuízo da sua viabilidade.

## 4. CONTROLO E ANÁLISE DINÂMICA

O controlo de um robô é definido por várias etapas, entre as quais é passada informação. Por isso é necessário organizar todas essas etapas de forma a melhor compreender o controlo. Na Figura 38 é possível observar a arquitetura do controlo implementada no robô hexápode.

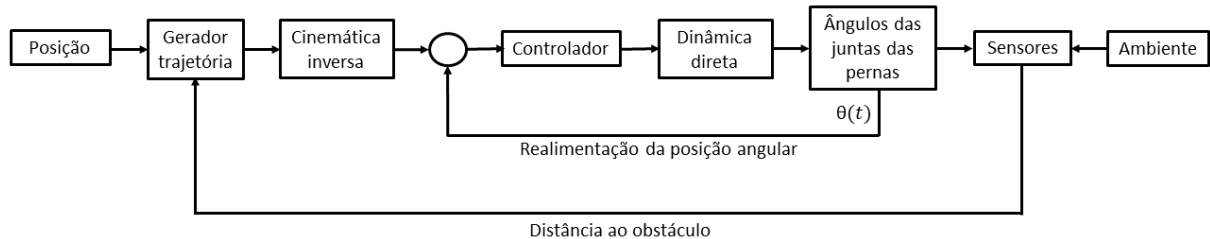


Figura 38 - Arquitetura do controlo do robô hexápode.

Na simulação a posição da base é conhecida, e corresponde à variável de entrada para o gerador de trajetória, que define as posições lineares dos pés do robô. De seguida, usando a cinemática inversa, são calculadas as posições angulares das juntas que permitem atingir as posições pretendidas. A informação proveniente da cinemática inversa é enviada para o controlador (robô), que assume a posição enviada pelo gerador de trajetória. A dinâmica direta recebe esses dados enviados anteriormente e é executada para determinar quais as posições dos centros de massa tendo em conta a atuação das forças e momentos externos. Desta análise avaliam-se também os esforços das juntas e as posições das juntas posteriormente corrigidas pela realimentação do sistema, de forma a manter a estabilidade estática e dinâmica. Os sensores recolhem as posições e velocidades instantâneas de cada junta, e ainda a distância ao obstáculo, o que permite ao gerador de trajetória escolher a que melhor se adequa a essa informação.

Estas etapas do controlo são explicadas mais detalhadamente nos subcapítulos seguintes.

### 4.1 Análise dinâmica

A análise dinâmica é realizada com base na formulação de *Newton-Euler* e, após o estudo dos conceitos teóricos, efetuou-se a sua aplicação ao caso do robô hexápode. Esta formulação dinâmica é incorporada para estimar as posições das juntas com base nas forças e momentos externos aplicados nas pernas do robô e comparação com os valores recebidos das posições das juntas na simulação.

Como cada perna tem movimento em dois planos, mais especificamente em XY e XZ, a análise dinâmica foi efetuada inicialmente para esses planos separadamente, utilizando a cinemática direta para a definição dos corpos.

Inicialmente, esta simulação dinâmica não inclui o controle dos motores e por isso a perna comporta-se como corpos livres, apenas sujeitos à força gravítica. No plano XY ocorre a variação livre de todos os ângulos; já no plano XZ é possível o bloqueio de  $\phi_1$ , e por isso só existe movimento do fêmur e da tíbia.

Nas Figura 39 e Figura 40 observa-se partes do movimento realizado pela perna nos planos XY e XZ, respetivamente.

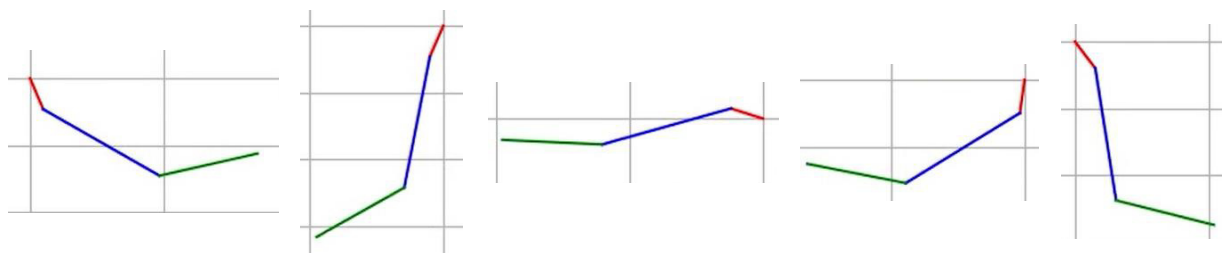


Figura 39 - Partes do movimento efetuado pela perna no plano XY.

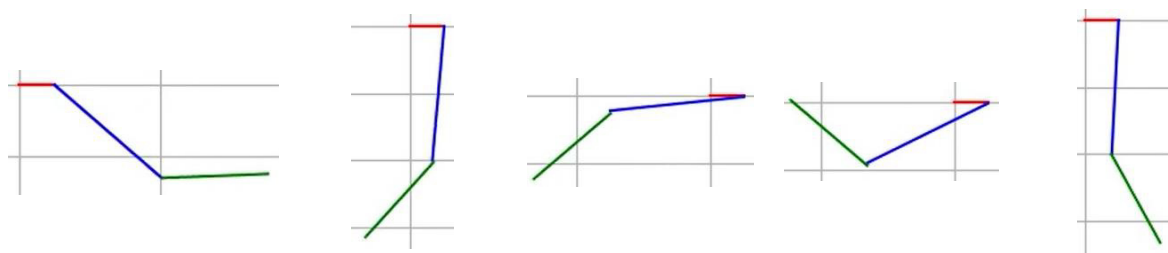


Figura 40 - Partes do movimento efetuado pela perna no plano XZ.

No Apêndice IV – Análise dinâmica nos planos XY e XZ encontram-se as matrizes responsáveis por esta análise dinâmica.

Após a análise nos dois planos em separado é necessário a realização do estudo da análise dinâmica tridimensional da perna e, por isso surgiu a necessidade de definir o corpo 1 (coxa) para os dois planos anteriormente referidos. Uma vez que em ambos este corpo está sujeito a forças de reação devido aos seus constrangimentos na junta.

Estas simulações foram executadas em *python* considerando o método apresentado na Figura 16 e, por isso é necessário definir um vetor com as posições iniciais, quer lineares como angulares dos corpos, posições estas que são relativas ao centro de massa de cada membro. Na Equação 61 é possível observar esse vetor de posições ( $q$ ) e as respetivas posições correspondentes, sendo que se assumiu a origem do referencial como origem da perna.

$$q = [0,025, 0, 0, 0,025, 0, 0, 0,15, 0, 0, 0,325, 0, 0] \quad (61)$$

$$q = [x_1, y_1, \phi_1, x_1, z_1, \theta_1, x_2, z_2, \theta_2, x_3, z_3, \theta_{32}]$$

É importante mencionar que as posições lineares são expressas em metros, as posições angulares em radianos e, por conseguinte, as velocidades lineares expressam-se em metros por segundo e as angulares em radianos por segundo.

Tendo por base a Equação 8, seguem-se as matrizes utilizadas para a análise dinâmica da perna do robô hexápode, representadas pelas Equações 62 a 67.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$\phi_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & a_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & a_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & a_{55} & 1 & 0 & a_{58} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & a_{65} & 0 & 1 & a_{68} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & a_{78} & 1 & 0 & a_{711} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & a_{88} & 0 & 1 & a_{811} \end{bmatrix} \quad (63)$$

Onde,  $a_{02} = \frac{l_1}{2} \sin \phi_1$ ,  $a_{12} = -\frac{l_1}{2} \cos \phi_1$ ,  $a_{25} = a_{55} = \frac{l_1}{2} \sin \theta_1$ ,  $a_{35} = a_{65} = -\frac{l_1}{2} \cos \theta_1$ , e ainda,  $a_{58} = a_{78} = \frac{l_2}{2} \sin \theta_2$ ,  $a_{68} = a_{88} = -\frac{l_2}{2} \cos \theta_2$ , por fim,  $a_{711} = \frac{l_3}{2} \sin \theta_{32}$ ,  $a_{811} = -\frac{l_3}{2} \cos \theta_{32}$ .

$$\ddot{q} = [\ddot{x}_1, \ddot{y}_1, \ddot{\phi}_1, \ddot{x}_1, \ddot{z}_1, \ddot{\theta}_1, \ddot{x}_2, \ddot{z}_2, \ddot{\theta}_2, \ddot{x}_3, \ddot{z}_3, \ddot{\theta}_{32}]^T \quad (64)$$

$$\lambda = [H_1, R_1, H_1, V_1, M_1, H_2, V_2, H_3, V_3]^T \quad (65)$$

$$g = [0, 0, m_1, 0, -m_1g, 0, 0, -m_2g, m_2, 0, -m_3g, m_3]^T \quad (66)$$

Onde,  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$  correspondem aos momentos impostos pelos servomotores, tal como observado em (Mahapatra et al., 2019).

$$\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{l_1}{2} \dot{\phi}_1^2 \cos \phi_1 \\ -\frac{l_1}{2} \dot{\phi}_1^2 \sin \phi_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 \\ -\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \\ -\left(\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 + \frac{l_3}{2} \dot{\theta}_{32}^2 \cos \theta_{32}\right) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + \frac{l_3}{2} \dot{\theta}_{32}^2 \sin \theta_{32}\right) \end{bmatrix} \quad (67)$$

A aplicação desta formulação para a análise computacional depende da atualização dos valores da matriz para cada intervalo de tempo ( $dt$ ) e por isso, utiliza-se a integração de tempo de 2º grau por *Runge-Kutta* para obter as velocidades e posições seguintes, uma vez que este método de integração apresenta uma acumulação de erros menor. Assim, apresenta a mesma precisão para um maior  $dt$ , em comparação com a integração de Euler. No entanto este  $dt$  não pode ser demasiado grande, pois provoca a violação dos constrangimentos. Deste modo o tempo de computação necessário para uma simulação inteira é menor.

## 4.2 Controlo

As etapas responsáveis pelo controlo do robô foram programadas em *Python*. Na Figura 41 é possível observar a sequência de etapas que decorrem no controlo do robô, sendo que as etapas de atribuição das posições iniciais ocorrem em paralelo e as restantes etapas em série.

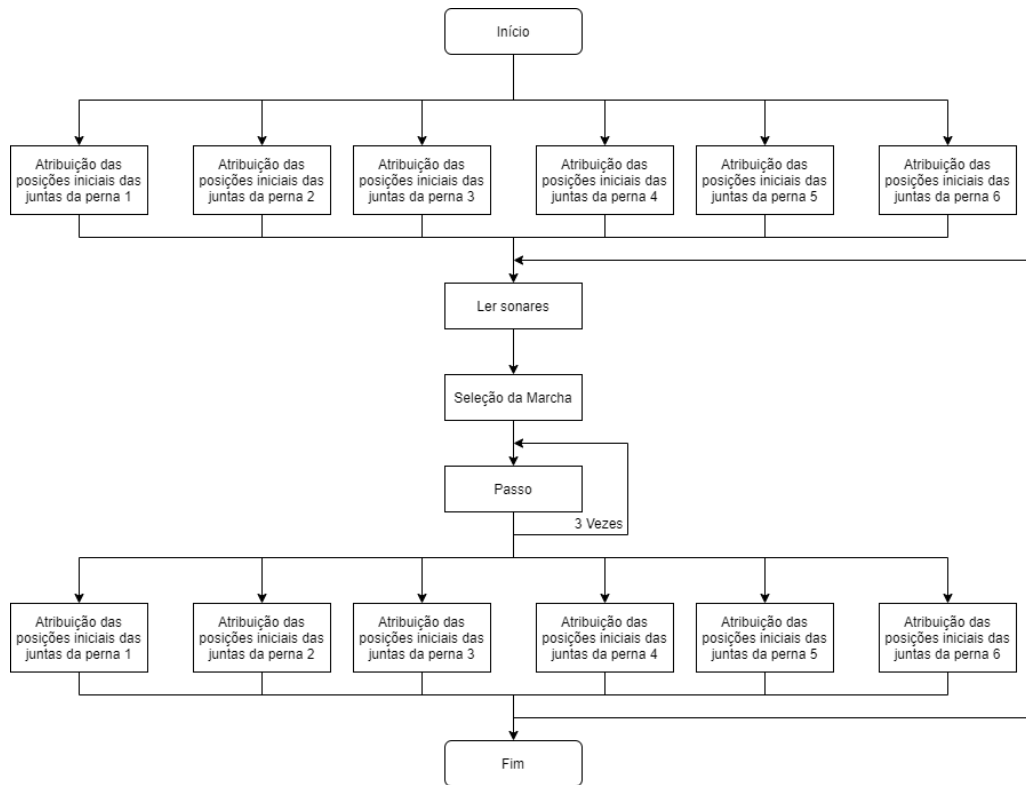


Figura 41 - Diagrama global das etapas de controlo programadas em *Python*.

Ainda na Figura 41, constata-se que a etapa “Passo” acontece três vezes sucessivas. Isto é uma mera consideração para que o programa se torne mais simples e o robô efetue três passos seguidos sem estar recorrentemente a verificar os sonares. Esta etapa engloba um grande conjunto de etapas apresentados mais detalhadamente na Figura 42.

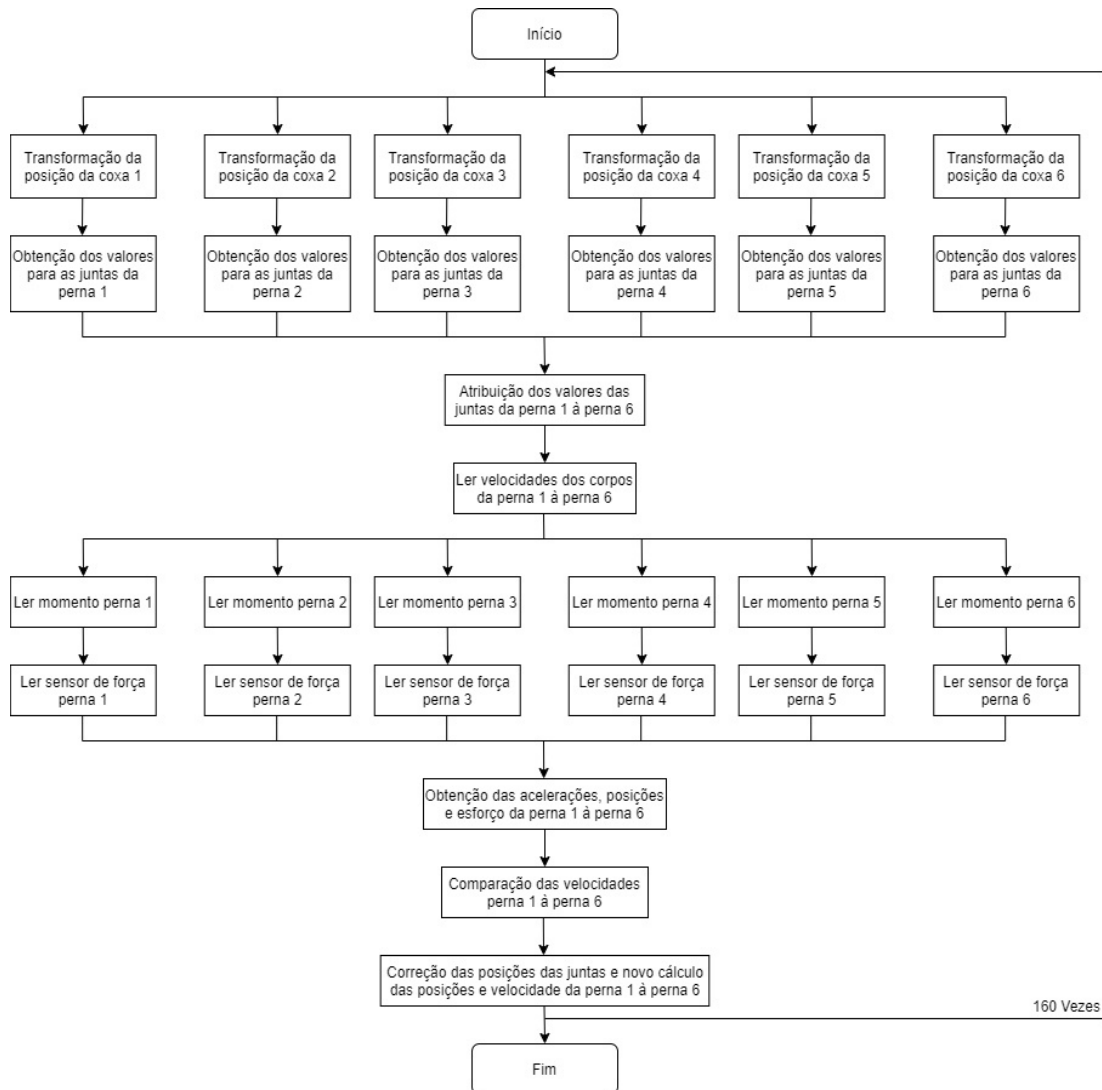


Figura 42 - Diagrama das etapas que constituem um passo, programadas em *Python*.

Neste diagrama encontram-se representadas funções que ocorrem em paralelo para todas as pernas e funções que acontecem em série, em que a atribuição ou avaliação é feita perna a perna. Um passo corresponde a um conjunto de 160 iterações deste diagrama, uma vez que a cada 80 iterações os dois grupos de pernas trocam entre a fase de balanço e a de contacto, permitindo assim a realização de um passo completo para cada perna. É possível perceber na Figura 42 as etapas relativas à formulação dinâmica. A aplicação desta formulação no controlo permite considerar as forças e momentos externos que causam o movimento do corpo.

A obtenção dos valores para as juntas de cada perna acontece por meio da geração de trajetórias e da cinemática inversa apresentadas mais especificamente nos restantes capítulos desta secção. Também o controlador do robô que é simulado em *CoppeliaSim* e os sensores instalados são mais detalhados nesta secção.



#### 4.2.1 Gerador de trajetórias

Relativamente à definição das trajetórias, esta exigiu uma pesquisa bibliográfica devido ao facto de se pretender equações não dependentes do tempo para a movimentação das pernas. Assim, seguiu-se a metodologia proposta por (Sun et al., 2017), que considera um cálculo iterativo das coordenadas das extremidades dos membros do robô, tendo em conta apenas a posição do centro de massa do robô, a posição atual dos pés e as coordenadas das coxas.

Para aplicação das trajetórias é essencial um sistema de eixos, definido de forma que todos os componentes se orientem pelo mesmo sistema. Uma vez que o sistema de controlo é testado no simulador *CoppeliaSim*, convém utilizar a mesma orientação dos eixos definida no programa. Na Figura 43 encontra-se esquematizado o sistema de eixos utilizado para o corpo do robô e para cada perna.

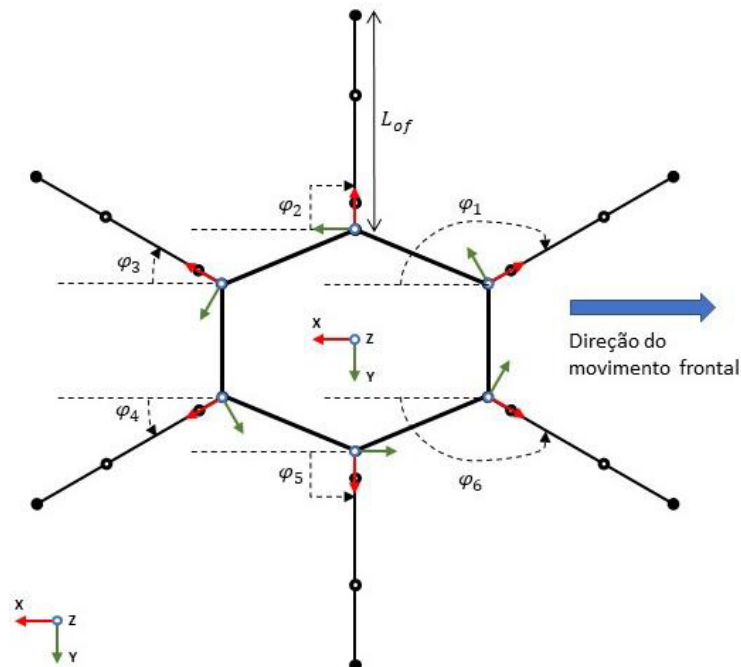


Figura 43 - Representação do sistema de eixos utilizado.

Na Figura 43 é possível observar que o sentido de movimento da marcha frontal é o sentido negativo do eixo X, e também que  $\varphi_3 = -30$ ,  $\varphi_2 = -90$ ,  $\varphi_1 = -150$  e ainda,  $\varphi_4 = 30$ ,  $\varphi_5 = 90$ ,  $\varphi_6 = 150$ , como posições angulares iniciais.

No sentido de determinar as coordenadas da coxa em relação ao centro de massa do corpo do robô, é necessário recorrer ao método de transformação de coordenadas, sendo que para cada perna o sistema de eixos do corpo sofre uma translação e uma rotação, como apresentado na Equação 68.

$$\begin{aligned}
{}^0T_1 &= Trans(px_1, py_1, pz_1).Rot(Z_0, \varphi) = \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & px_1 \\ 0 & 1 & 0 & py_1 \\ 0 & 0 & 1 & pz_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & px_1 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & py_1 \\ 0 & 0 & 1 & pz_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{68}$$

Onde,  $px_1$ ,  $py_1$ ,  $pz_1$  corresponde às novas coordenadas da origem do referencial e  $\varphi$  representa a rotação angular em torno do eixo Z; esta transformação ocorre para cada perna sendo atribuídas as coordenadas e rotação respetivas.

Após atribuição do novo referencial para cada perna, e depois de se obter as coordenadas da coxa, é possível avançar para a definição das equações das trajetórias onde se obtêm as coordenadas desejadas para o pé.

Para a marcha frontal considera-se como direção de movimento a que se encontra representada na Figura 43 e distinguem-se três conjuntos de pernas com equações diferentes, que se encontram descritos na Figura 44.

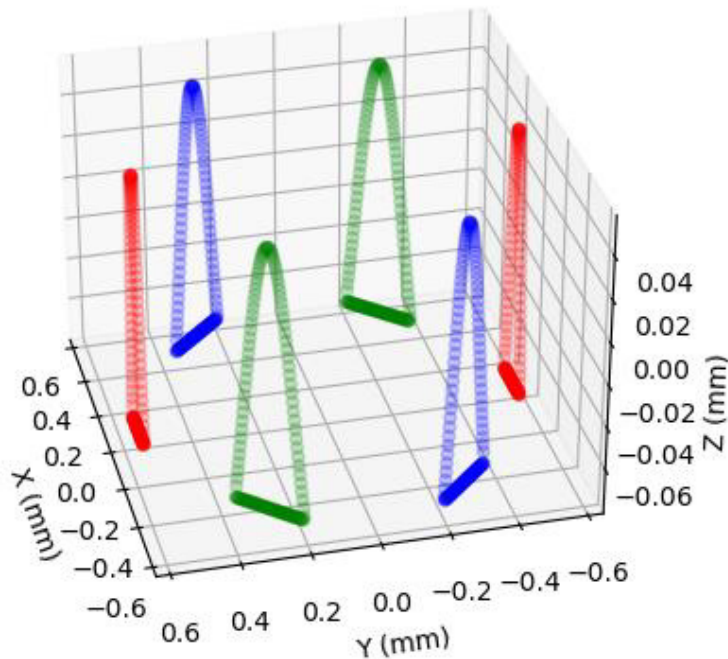


Figura 44 - Representação das trajetórias do pé para cada perna na marcha frontal.

As trajetórias das pernas 1 e 4 estão representadas a azul, tendo as equações de trajetória para fase de balanço e de contacto com o solo apresentadas na Equação 69. As pernas 2 e 5 estão indicadas a vermelho e com as suas respetivas equações de trajetória na Equação 70, e por fim a verde encontram-se as pernas 3 e 6, cujas trajetórias se apresentam na Equação 71.

$$Azul \left\{ \begin{array}{l} \text{Balanço} \left\{ \begin{array}{l} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi + aK - b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi - aK + b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Zc = pz_1 - c + d \cos \left( \pi \frac{(Yc - py_1 - L_{of} \sin \varphi)}{e} \right) \end{array} \right. \\ \text{Contacto} \left\{ \begin{array}{l} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi - aK + b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi + aK - b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Zc = pz_1 - f \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (69)$$

$$Vermelho \left\{ \begin{array}{l} \text{Balanço} \left\{ \begin{array}{l} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi + aK - b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi \\ Zc = pz_1 - c + d \cos \left( \pi \frac{(Xc - px_1 - L_{of} \cos \varphi)}{e} \right) \end{array} \right. \\ \text{Contacto} \left\{ \begin{array}{l} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi - aK + b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi \\ Zc = pz_1 - f \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (70)$$

$$Verde \left\{ \begin{array}{l} \text{Balanço} \left\{ \begin{array}{l} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi + aK - b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi + aK - b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Zc = pz_1 - c + d \cos \left( \pi \frac{Yc - py_1 - L_{of} \sin \varphi}{e} \right) \end{array} \right. \\ \text{Contacto} \left\{ \begin{array}{l} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi - aK + b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi - aK + b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Zc = pz_1 - f \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (71)$$

Onde:

- $Xc, Yc, Zc$  corresponde às coordenadas pretendidas para o pé em relação à coxa, utilizando as coordenadas  $px_1, py_1, pz_1$ ;
- $L_{of}$  representa a distância da coxa ao pé projetada no chão aquando da posição inicial, conhecido como extensão da perna e apresentado na Figura 43;
- $\varphi$  é a rotação em torno de Z em relação ao centro de massa;
- $a = 0,002$ , constrangimento definido no documento de referência;
- $b = 0,08$ , corresponde ao valor de  $N/1000$ , considerando  $N = 80$  que indica o número de pontos de amostragem por fase;
- $c = 0,127$ , representa um valor de ajuste no eixo Z;
- $d = 0,12$ , refere um valor de ajuste da amplitude do gráfico;
- $e = 0,16$ , corresponde ao total de iterações de uma trajetória (fases de balanço e contacto);
- $f = 0,127$ , tal como  $c$ , representa um ajuste no eixo Z.

Utilizando as mesmas variáveis, as marchas transversais também apresentam movimento de balanço e de contacto que se apresentam nas Equações 72 e 73.

$$\begin{cases} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi + aK - b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Zc = pz_1 - c + d \cos\left(\pi \frac{Yc - py_1 - L_{of} \sin \varphi}{e}\right) \end{cases} \quad (72)$$

$$\begin{cases} Xc = px_1 + L_{of} \cos \varphi \\ Yc = py_1 + L_{of} \sin \varphi - aK + b, \quad K = 0,1, \dots, N \\ Zc = pz_1 - f \end{cases} \quad (73)$$

Destas equações resultam as coordenadas dos pés dos membros para cada iteração. Todavia, é necessário determinar ainda as posições angulares respectivas para cada junta. Sendo assim, tal como apresentado na Figura 38, é necessário recorrer à cinemática inversa. No entanto, antes disso é necessário transformar as coordenadas do pé, pois estas têm de estar em relação ao centro de massa do corpo, usando-se a Equação 74.

$${}^0T_c = {}^0T_1^{-1} * P_c \quad (74)$$

Em que,  ${}^0T_c$  corresponde ao vetor com as coordenadas do pé já transformadas para o centro de massa do robô e  $P_c$  representa o vetor com as coordenadas do pé em função da coxa.

Apesar de anteriormente se ter formulado as equações da cinemática inversa, no controlo utiliza-se a formulação apresentada por (Sun et al., 2017), para estar em conformidade com as equações de marcha definidas. As equações de cinemática inversa encontram-se na Equação 75.

$$\begin{cases} \phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Yc}{Xc}\right) \\ \theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{Zc}{\sqrt{(l_3 \cos \theta_{32} + l_2)^2 + (l_3 \sin \theta_{32})^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{l_3 \sin \theta_{32}}{l_3 \cos \theta_{32} + l_2}\right) \\ \theta_{32} = \sin^{-1}\left(\frac{(\cos \phi_1 Xc + \sin \phi_1 Yc - l_1)^2 + Zc^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_2 l_3}\right) - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (75)$$

Todo o controlo foi implementado em *Python* e no simulador robótico *CoppeliaSim*, que é explicado mais detalhadamente na próxima secção.

#### 4.2.2 *CoppeliaSim*

O *CoppeliaSim* possui uma grande diversidade de funcionalidades, possibilidades de comunicação com várias linguagens de programação, e permite também a importação de modelos DAC, para além da vantagem de disponibilizar licença gratuita para fins educacionais. Assim sendo, cumpre os requisitos do objetivo desta simulação, que é testar o controlo do robô para uma marcha tripode, num terreno regular com obstáculos.

Este simulador é dividido, essencialmente, em duas camadas: a camada de visualização e a camada de simulação dinâmica, sendo que a cada uma estão atribuídas 8 câmaras. Como o nome indica, a camada de visualização é onde se visualiza o robô como é importado do DAC, os objetos são estáticos

e não responsivos. Para que esta importação seja possível os ficheiros com os componentes do robô devem ser exportados no formato STL (*Standard Tessellation Language*). Na camada de simulação dinâmica, o robô é transformado em corpos de formas simples, como retângulos, cilindros e esferas, e as peças do robô são dinâmicas e responsivas. Na Figura 45 é possível observar a camada de visualização, enquanto que na Figura 46 se encontra a camada de simulação dinâmica.

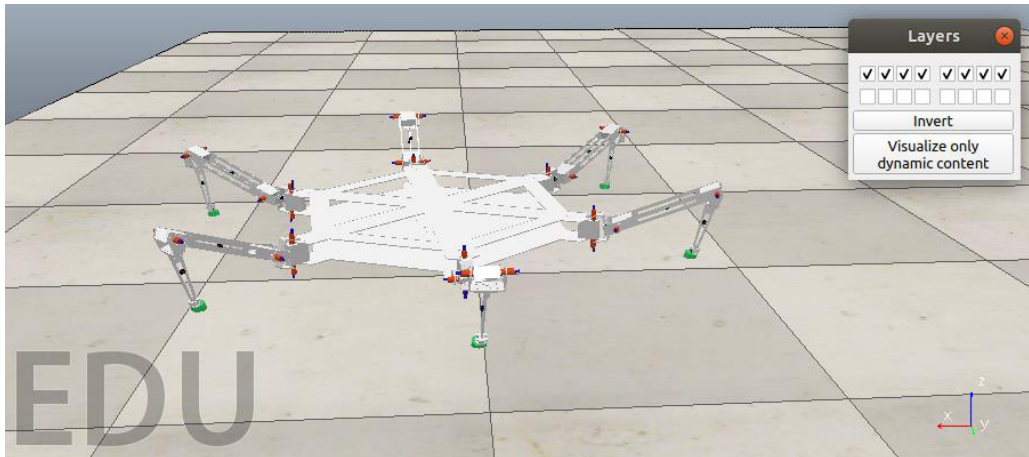


Figura 45 - Camada de visualização *CoppeliaSim*.

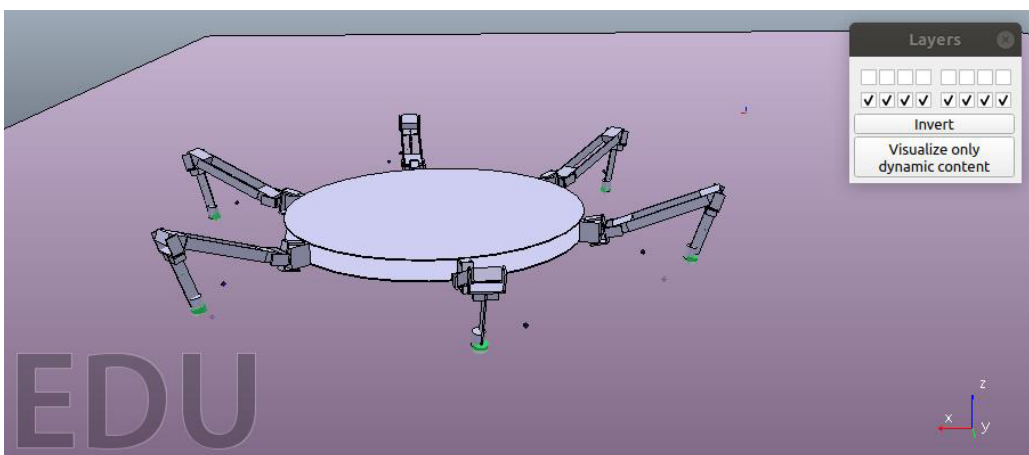


Figura 46 - Camada de simulação dinâmica *CoppeliaSim*.

O *CoppeliaSim* possui a funcionalidade de hierarquia, onde exibe o conteúdo do cenário, ou seja, todos os objetos que contém o cenário. Esta funcionalidade permite também organizar os objetos do cenário numa estrutura hierárquica, o que confere aos objetos secundários uma função de dependência de movimentos em relação aos objetos principais. Na Figura 47 a) apresenta-se a hierarquia global do cenário e na Figura 47 b) é possível observar mais em detalhe a hierarquia da perna 1.

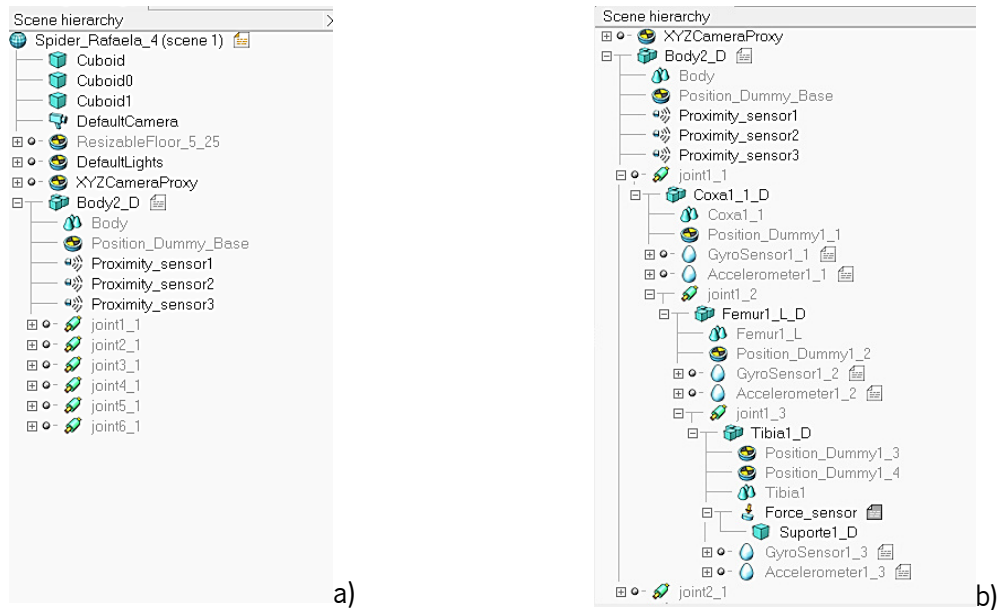
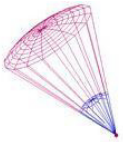
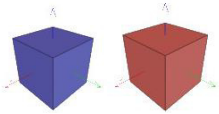




Figura 47 - Hierarquia do cenário *Coppeliasim*.  
a) Hierarquia global o cenário, b) Hierarquia da perna 1.

Toda esta simulação está dependente dos sensores instalados no simulador que recolhem informações sobre o ambiente e o estado do robô, sendo estes apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Sensores utilizados na simulação.

Sensores	Quantidade	Informação recolhida	Representação no <i>Coppeliasim</i>
Sonar	3	Distância ao obstáculo (m)	
Giroscópio	18 (3 x 6)	Velocidade(m/s)	
Acelerómetro	18 (3 x 6)		
Sensor de Força	6	Força de contacto (N)	
Sensor de posição	24 (4 x 6)	Coordenadas lineares da posição (m)	

Considerando que os corpos são indeformáveis e que as juntas são perfeitas, os giroscópios e os acelerómetros são colocados no centro dos objetos. Estes sensores funcionam em conjunto para obter os valores de velocidade linear dos corpos. O ideal seria obter do simulador as acelerações dos corpos

para comparação direta aquando da análise dinâmica, mas com integração das velocidades também é possível obter as acelerações e as posições de cada corpo, por integração e derivação dos valores obtidos.

O sensor de força permite a obtenção do valor da força de contacto quando o pé está em contacto com o solo. Este sensor necessita de estar acoplado à peça que vai estar sujeita à força e, por isso, foi necessário separar o pé dos restantes componentes da tibia. Como é possível observar na Figura 47 b), na hierarquia o pé passa a estar dependente do sensor, para que o valor fosse medido quando o pé está em contacto com o solo.

Os vinte e quatro sensores de posição correspondem a quatro sensores por cada perna, sendo que permitem obter as coordenadas lineares em relação ao cenário, do centro de massa de cada corpo (coxa, fémur e tibia). Ainda foi adicionado um para obter as coordenadas do pé na superfície que entra em contacto com o solo.

Contudo, na aplicação dos conceitos no simulador foram necessárias algumas alterações ao inicialmente estabelecido, sendo que o pé definido no Capítulo 3.5 foi simplificado apenas para uma peça, excluindo o movimento do êmbolo e aplicando o sensor de força na extremidade da peça, como é possível observar na Figura 48.

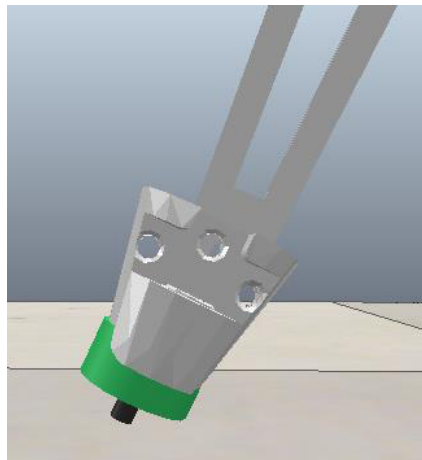


Figura 48 - Peça do pé simplificada com sensor de força.

Também a definição da alternância de fases, entre fase de balanço e a de apoio, sofreu alterações. O inicialmente projetado era que essa alternância ocorresse aquando do contacto com o solo após a fase de balanço, mas as trajetórias não ficando perfeitas invalidam esta transição, porque o contacto é feito antes de terminar o movimento todo de  $\phi_1$ . Por isso, a alternância entre fases é feita por um ciclo incremental que ocorre oitenta vezes, como é possível observar na Figura 49, em que se constata que o sensor de força do apoio deteta contacto, ou seja, força diferente de zero, ainda durante a fase de balanço.

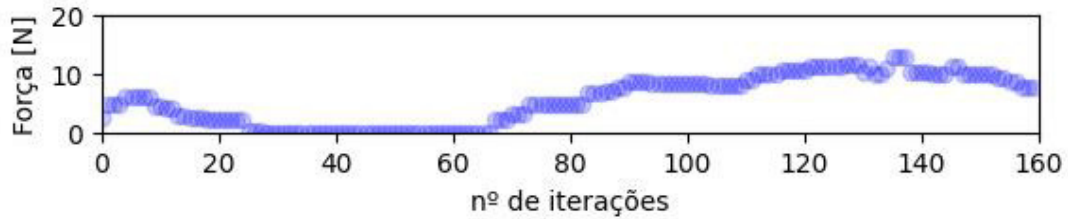


Figura 49 - Força de contacto ao longo de um ciclo de trajetória.

Por fim, seria pretendido obter do *CoppeliaSim* diretamente as acelerações a cada instante; porém por simplificação da comunicação entre o ROS e o *CoppeliaSim* são obtidas apenas as velocidades.

A simulação acontece num ambiente de solo regular e de objetos controlados, onde os obstáculos são cubos de lado igual a 0,4 metros, como é possível observar na Figura 50.

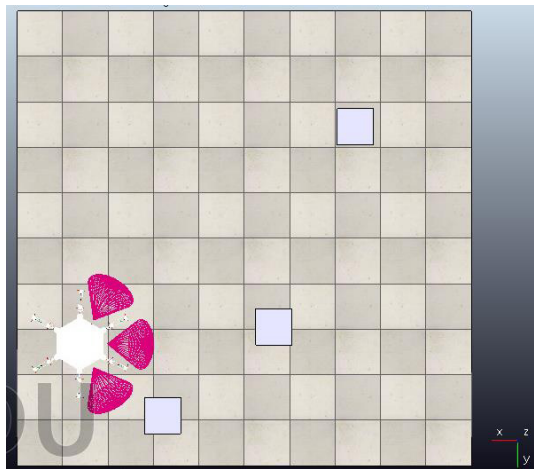


Figura 50 - Cenário da simulação em *CoppeliaSim*.

#### 4.2.3 ROS (*Robot Operating System*)

O controlador do robô consiste em dois nós em ROS, um para o simulador, denominado */sim\_ros\_interface* e outro para o programa de controlo em *Python*, chamado */TR\_Control*. Estes dois nós interagem por via de tópicos ROS, de forma a estabelecer uma comunicação organizada e eficiente.

Foram projetados vários tópicos para a transição de dados e controlo da simulação. Nos tópicos que se apresentam na Tabela 13, # representa números inteiros de um a seis que representam as seis pernas do robô, permitindo assim apresentar apenas um tópico e não os seis.



Tabela 13 - Tópicos de ROS utilizados no controlo do robô.

Tópicos	Quantidade	Informação recolhida
<i>/Coxa#_Position</i> <i>/Femur#_Position</i> <i>/Tibia#_Position</i> <i>/EndEff#_Position</i>	24 (4 x 6)	Cada tópico envia os três valores correspondentes às coordenadas lineares da coxa, do fémur, da tibia e do pé, respetivamente.
<i>/Robot_Position</i>	1	Envia as coordenadas lineares do centro de massa do corpo do robô
<i>/Leg#_Effort</i>	6	Envia o valor do momento de cada junta de uma perna.
<i>/Force_Sens#</i>	6	Envia o valor da força de contacto de cada perna.
<i>/Vel_Thigh#</i> <i>/Vel_Femur#</i> <i>/Vel_Tibia#</i>	18 (3 x 6)	Envia as velocidades angulares e lineares dos três eixos cartesianos, do centro de massa da coxa, do fémur e da tibia, respetivamente e de cada perna.
<i>/Proximity_Sensor</i>	1	Envia o valor da distância aos objetos dos três sensores de proximidade.
<i>Leg#_Joint_Pos</i>	6	Atribuição a posição angular pretendida para cada junta de cada perna.

De referir que a programação do ROS contou com o auxílio de elementos do Laboratório de Automação e Robótica (LAR) com maior conhecimento nestes conceitos.

### 4.3 Avaliação de desempenho

Tal como descrito na Secção 2.2.1 existem índices que permitem avaliar o desempenho de um robô. Neste caso, o fator de serviço ( $\beta$ ) é igual a 0,5 pois, este fator consiste na razão entre a duração da fase de apoio da perna e o tempo total de ciclo (Equação 1). Como referido anteriormente, a duração da fase de apoio está controlada de forma a corresponder a metade do tempo de ciclo, e conclui-se que a locomoção do robô se faz em modo de caminhada e não em corrida, uma vez que esse modo se aplica nos casos em que  $\beta < 0,5$ .

Relativamente ao critério de estabilidade estática, é considerado o centro do corpo do robô como o centro de gravidade, pois também é este ponto o assumido como centro de massa. Quando a projecção

do centro de gravidade no solo está inserida no polígono de suporte, formado por três apoios, o robô está estaticamente estável.

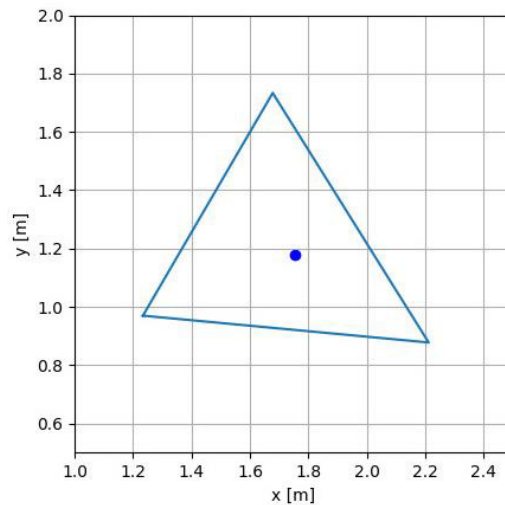


Figura 51 - Avaliação da estabilidade estática.

Como é possível observar na Figura 51, neste caso de estudo o robô é estaticamente estável.

No que diz respeito à margem de estabilidade dinâmica, esta é avaliada de forma semelhante ao critério de estabilidade estática. No entanto o ponto que se pretende circunscrito no polígono de suporte corresponde ao PMZ e as suas coordenadas são calculadas por meio das Equações 2 e 3.

Na Figura 52 é possível constatar que o PMZ se encontra no interior do polígono de suporte e, por isso o robô é considerado estável dinamicamente.

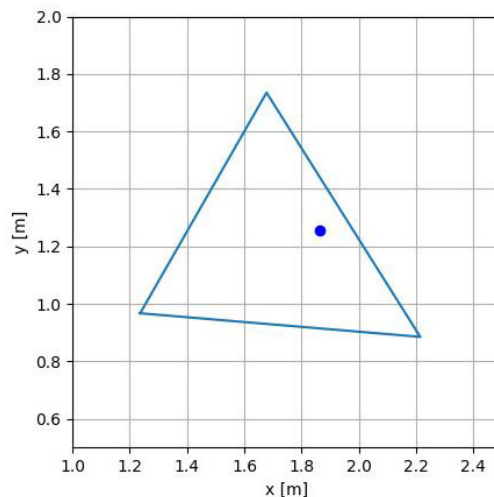


Figura 52 - Posicionamento do PMZ no polígono de suporte.

É ainda importante avaliar o momento exigido aos motores das juntas rotacionais durante a simulação. Na Figura 53 pode observar-se que o esforço exigido não excede o momento máximo disponível dos motores selecionados para o projeto, pois este é de 1,89 Nm.

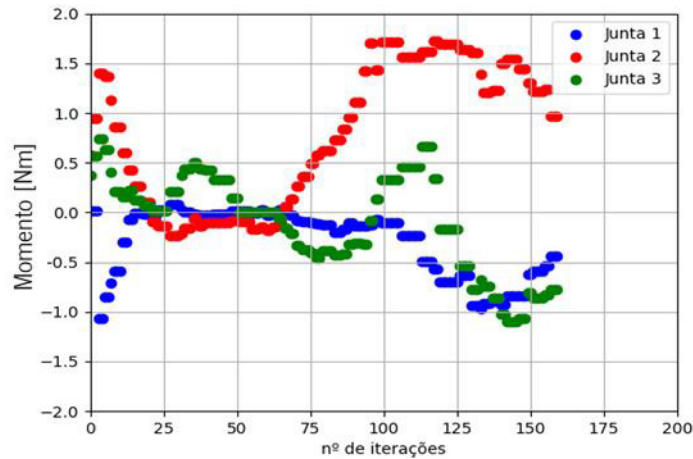


Figura 53 - Binário exigido aos motores de uma perna durante a simulação.

Por fim, é possível uma avaliação dos esforços estáticos estabelecidos aquando da análise estática. Sendo que esta análise parte do princípio descrito na Equação 42 onde se observa que a soma de todos os momentos aplicados deve ser igual a zero, esta avaliação efetua-se tendo por base os valores dos esforços na iteração  $i = 50$ .

Tendo por base as Equações 43, 49 e 55 é espectável que nesse instante  $H_1 = H_2 = H_3 = 0$ . Como é possível observar na Figura 54 para  $i = 50$  os valores dos  $H_s$  encontra-se próximo de zero.

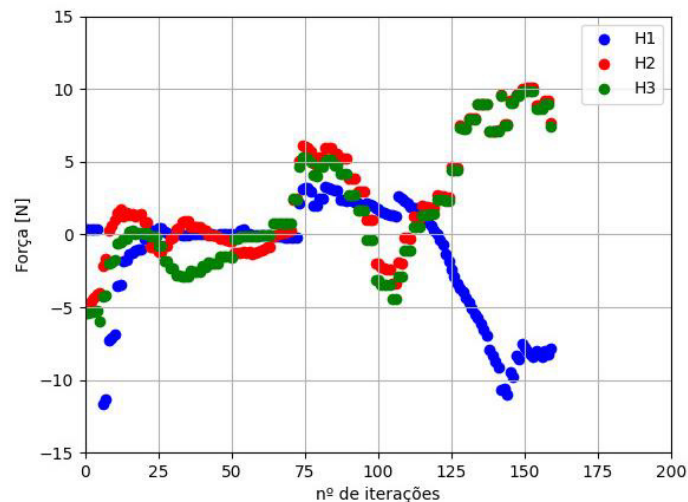


Figura 54 - Esforços H1, H2 e H3 aplicados numa perna durante um ciclo de simulação.

Também os esforços  $V_2$  e  $V_3$  podem ser avaliados, com alusão às Equações 47 e 53 e uma vez que neste instante  $F_N = 0$  e  $F_g = m_3g = 0,257 N$ , ambos os esforços possuem valores próximos de zero, como se contata na Figura 55.

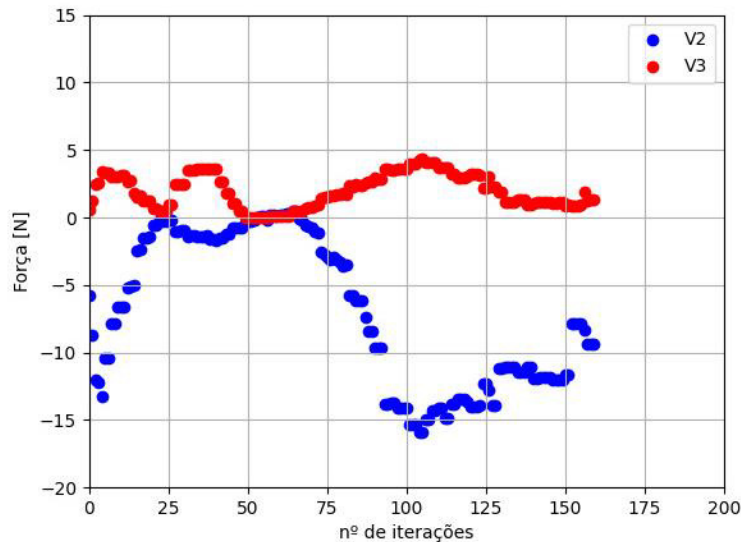


Figura 55 - Esforços V2 e V3 aplicados numa perna durante um ciclo de simulação.

#### 4.4 Conclusões do capítulo

Esta secção permitiu concluir que é viável a aplicação de controlo dinâmico neste robô por via da formulação de *Newton-Euler* e com o auxílio da integração de tempo de Euler e Runge-Kutta de segundo grau, uma vez que é possível gerar locomoção para um robô hexápode em plano regular utilizando a formulação dinâmica dos mecanismos das pernas para controlo da atuação. Todo o controlo foi programado em *Python* e simulado em *CoppeliaSim*, sendo utilizado o ROS como meio de comunicação entre estas.

Para analisar a viabilidade do controlo dinâmico foi necessário impor ao robô um controlo geral com implementação de trajetórias de marcha trípede, onde o hexápode é capaz de alternar deslocações nas direções frontal e transversal para contornar obstáculos, e alguns sensores como sonares, sensores de força, acelerómetros e sensores de posição.

As trajetórias executadas para a fase de balanço não estão perfeitas e acontece o contacto antes do momento pretendido, sendo por isso necessário uma melhor revisão desta trajetória no futuro.

Por fim, neste capítulo comprovou-se a estabilidade estática e dinâmica do robô para o controlo aplicado, e ainda se validaram as equações estabelecidas na análise estática mediante os valores dos esforços obtidos durante um ciclo de simulação.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Depois de realizado este trabalho é possível dizer que de uma forma geral os objetivos propostos foram cumpridos, pois o objetivo principal de gerar locomoção para um robô hexápode em plano regular foi alcançado, utilizando a formulação dinâmica dos mecanismos das pernas para controlo da atuação. Destaca-se ainda o objetivo alcançado de o robô conseguir autonomamente alterar a sua trajetória para ultrapassar obstáculos. No entanto, devido à pandemia da Covid-19 alguns dos objetivos ficaram inviabilizados, tais como o desenvolvimento do protótipo físico e as respetivas comparações deste com a simulação. De salientar ainda que, por se tratar de um projeto com várias fases, todo o conteúdo desta dissertação pode ser adaptado nas iterações seguintes de desenvolvimento.

No que diz respeito à cinemática, foram estabelecidas as devidas coordenadas gerais dos corpos que constituem uma perna e a amplitude em que cada junta trabalha, de forma a permitir a obtenção das equações da cinemática direta, onde por meio da coordenada pretendida para o pé, se obtêm os devidos valores das juntas e cinemática inversa, em que ocorre o processo inverso.

Relativamente à formulação para análise estática, esta permitiu a obtenção de equações para determinar os esforços a que a perna está sujeita nos três eixos lineares. O apoio foi testado e o seu mecanismo de êmbolo é funcional. No entanto o sensor de força escolhido e aplicado serve apenas para detetar o contacto, uma vez que apresenta fraca precisão e repetibilidade e o valor obtido não pode ser utilizado na formulação dinâmica.

Com auxílio do programa *Autodesk Inventor* e, aplicação dos constrangimentos de fixação nos furos que fazem a ligação com os restantes componentes e ainda as forças de contacto e gravítica, concluiu-se que é possível uma redução da massa da tíbia e do fémur sem pôr em causa a viabilidade estática da sua aplicação.

Quanto ao controlo, este foi programado em *Python* e simulado em *CoppeliaSim*, utilizando ROS como meio de transição de dados. Nesta fase concluiu-se que a aplicação do controlo dinâmico neste robô é viável por meio da formulação de *Newton-Euler*, onde se incluem os esforços, as forças externas e as acelerações. Com o auxílio da integração de tempo de Euler e Runge-Kutta de segundo grau, foi possível comparar e corrigir os valores pretendidos para as velocidades e posições angulares das juntas.

Deste controlo fazem parte também as trajetórias aplicadas para se obter uma marcha tripode nas direções frontal e transversal. Estas trajetórias incluem a fase de balanço e de suporte de cada perna e é por via destas que acontece a locomoção do robô.

No que diz respeito ao desempenho deste robô e o seu controlo, a avaliação efetuada comprova que o robô garante a estabilidade estática e dinâmica, e ainda foi possível validar as equações estabelecidas na análise estática por via dos esforços de uma perna, obtidos num ciclo de simulação aquando dos momentos iguais a zero.

Como este trabalho se encontra inserido no projeto “ATHENA” e passará por mais fases, há objetivos que se podem realizar futuramente.

Inicialmente, dever-se-á realizar o que não foi possível para este trabalho, como o desenvolvimento do protótipo do robô e uma análise do comportamento deste relativamente às trajetórias e sensores aplicados em simulação e comparação dos resultados obtidos em simulação e em protótipo.

Deve-se ter em atenção também o que já foi referido nesta dissertação como alterações a ser feitas, sendo o caso da alteração do sensor de força para um mais preciso e com melhor repetibilidade e também as equações das trajetórias para a fase de balanço, de forma que estas possibilitem que as coordenadas do pé estejam realmente em balanço durante toda a fase, e assim, a alternância entre fases se possa dar pela deteção do contacto com o solo.

É ainda possível estender este projeto, incluindo os diferentes tipos de marcha metacronal e marcha de onda que permitem que a locomoção se dê a diferentes velocidades, e ainda a hipótese de contornar os objetos com trajetória circular. Ainda mais além, é plausível a adaptação da marcha para terrenos irregulares.

Relativamente ao simulador *CoppeliaSim*, é pertinente, no futuro, alterar o apoio para o idealizado neste trabalho, com o êmbolo a movimentar-se dentro do suporte a acionar o sensor de força também dentro do suporte e não à superfície do êmbolo como se encontra na simulação realizada para esta dissertação.

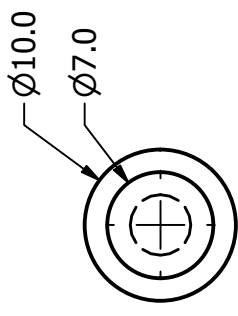
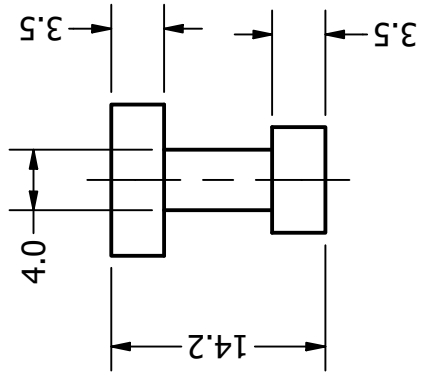
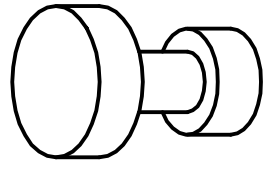
## BIBLIOGRAFIA

- Bruzzone, L., & Quaglia, G. (2012). Review article: locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments. *Mechanical Sciences*, 3(2), 49–62. <https://doi.org/10.5194/ms-3-49-2012>
- Buschmann, T., & Trimmer, B. (2017). *Bio-inspired Robot Locomotion 14 . 2 Mechanical Engineering Background and a Biological*. 443–472.
- Campos, R., Matos, V., & Santos, C. (2010). Hexapod locomotion: A nonlinear dynamical systems approach. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 1546–1551. <https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675454>
- Chen, J., Liu, Y., Zhao, J., Zhang, H., & Jin, H. (2014). Biomimetic design and optimal swing of a hexapod robot leg. *Journal of Bionic Engineering*, 11(1), 26–35. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(14\)60017-2](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60017-2)
- Chu, K. M., Trelles, M., & Ford, N. P. (2011). Quality of Care in Humanitarian Surgery. *World Journal of Surgery*, 35(6), 1169–1172. <https://doi.org/10.1007/s00268-011-1084-9>
- Coelho, J. (2018). *Estudo do Comportamento da Marcha de um Robô Hexápode para Combate a Incêndios*. Universidade do Minho.
- Coppelia Robotics. (n.d.). *CoppeliaSim*. Retrieved April 30, 2020, from <https://www.coppeliarobotics.com/>
- Deng, H., Xin, G., Zhong, G., & Mistry, M. (2017). Gait and trajectory rolling planning and control of hexapod robots for disaster rescue applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 95(June), 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.05.007>
- Ding, X., Wang, Z., Rovetta, A., & Zhu, J. M. (2010). Locomotion Analysis of Hexapod Robot. *Climbing and Walking Robots*, 291–311. <https://doi.org/10.5772/8822>
- Elfes, A., Steindl, R., Talbot, F., Kendoul, F., Sikka, P., Lowe, T., Kottege, N., Bjelonic, M., Dungavell, R., Bandyopadhyay, T., Hoerger, M., Tam, B., & Rytz, D. (2017). The Multilegged Autonomous eXplorer (MAX). *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1050–1057. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989126>
- Flores, P. (2015). *Concepts and Formulations for Spatial Multibody Dynamics (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology)* (Issue JANUARY).
- Flores, P., & Claro, J. C. P. (2007). *Cinemática de mecanismos*.
- Flores, P., & Lankarani, H. M. (2016). *Contact Force Models for Multibody Dynamics* (Vol. 226). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30897-5>
- Goldschmidt, D., Hesse, F., Worgotter, F., & Manoonpong, P. (2012). Biologically inspired reactive climbing behavior of hexapod robots. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4632–4637. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6386135>
- Haynes, G. C., Pusey, J., Knopf, R., Johnson, A. M., & Koditschek, D. E. (2012). Laboratory on legs: an architecture for adjustable morphology with legged robots. *Unmanned Systems Technology XIV*, 8387(November 2016), 83870W. <https://doi.org/10.1117/12.920678>
- Heppner, G., Roennau, A., Oberländer, J., Klemm, S., & Dillmann, R. (2015). LAUROPE - Six Legged Walking Robot for Planetary Exploration participating in the SpaceBot Cup. *13th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*. [http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2015/Papers/Session 5B/96035\\_Heppner.pdf](http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2015/Papers/Session%205B/96035_Heppner.pdf)
- Interlink Electronics. (2010). *DataSheet-FSR400*. <https://doi.org/94-00010> Rev. A
- International, A. (1990). *Metals Handbook*. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6>
- Ivaldi, S., Ugurlu, B., Ivaldi, S., Ugurlu, B., Free, C., & Software, S. (2018). *Chapter 35: Free*

- Kajita, S., & Espiau, B. (2008). Legged Robots. In *Springer Handbook of Robotics* (pp. 361–389). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_17)
- Kottege, N., Parkinson, C., Moghadam, P., Elfes, A., & Singh, S. P. N. (2015). Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015-June*(June), 5140–5147. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139915>
- Liu, F., Gao, G., Shi, L., & Lv, Y. (2017). Kinematic analysis and simulation of a 3-DOF robotic manipulator. *3rd IEEE International Conference On Computational Intelligence & Communication Technology (CICT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CICT.2017.7977291>
- Mahapatra, A., Shekhar, S., & Kumar, D. (2019). Study on feet forces ' distributions , energy consumption and dynamic stability measure of hexapod robot during crab walking. *Applied Mathematical Modelling, 65*, 717–744. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.09.015>
- Müller, A. (2009). Generic mobility of rigid body mechanisms. *Mechanism and Machine Theory, 44*(6), 1240–1255. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2008.08.002>
- Ribeiro, T., Goncalves, F., Garcia, I., Lopes, G., & Ribeiro, A. F. (2019). Q-Learning for Autonomous Mobile Robot Obstacle Avoidance. *2019 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICARSC.2019.8733621>
- Roennau, A., Heppner, G., Nowicki, M., & Dillmann, R. (2014). LAURONV: A versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 82–87. <https://doi.org/10.1109/AIM.2014.6878051>
- ROS.org. (2014). *ROS\_Concepts*. ROS\_Concepts. <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>
- ROS.org. (2018). *ROS\_Introduction*. ROS\_Introduction. <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>
- Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 16*(2), 1–22. <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
- Saranli, U., Buehler, M., & Koditschek, D. E. (2001). RHex: A simple and highly mobile hexapod robot. *International Journal of Robotics Research, 20*(7), 616–631. <https://doi.org/10.1177/02783640122067570>
- Sun, J., Ren, J., Jin, Y., Wang, B., & Chen, D. (2017). *Gait Design Based on the Foot End Trajectory*. 2611–2616.
- Tedeschi, F., & Carbone, G. (2014). Design Issues for Hexapod Walking Robots. *Robotics, 3*(2), 181–206. <https://doi.org/10.3390/robotics3020181>
- Wang, H., Zhang, J., & Shen, J. (2018). *Body Balancing Control of A Six-Legged Robot SiLVIA*.
- Xin, G., Deng, H., Zhong, G., & Wang, H. (2017). Gait and trajectory rolling planning for hexapod robot in complex environment. *Lecture Notes in Electrical Engineering, 408*, 23–33. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2875-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2875-5_3)
- Zhao, Y., Chai, X., Gao, F., & Qi, C. (2018). Obstacle avoidance and motion planning scheme for a hexapod robot Octopus-III. *Robotics and Autonomous Systems, 103*, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.01.007>



## APÊNDICE I – DESENHOS TÉCNICOS DO APOIO



DRAWN  
Rafaela Sá

CHECKED  
13/01/2021

QA

MFG

APPROVED

TITLE

Êmbolo do apoio

SIZE

A4

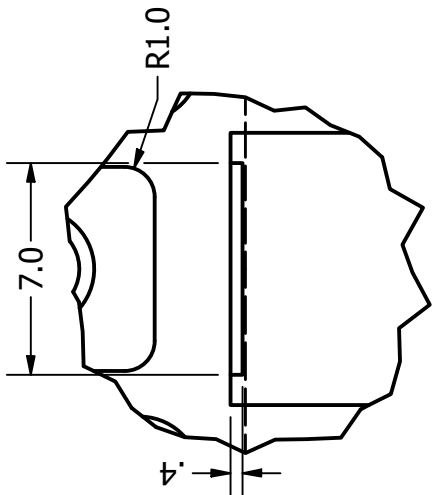
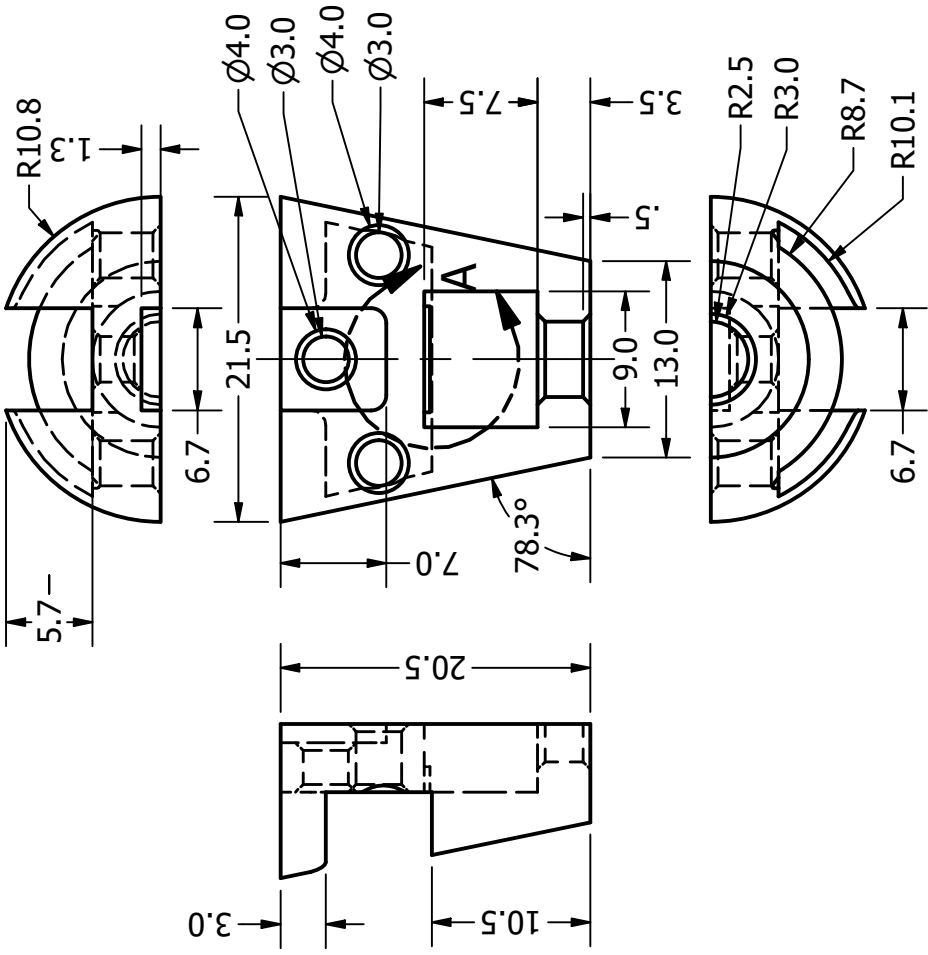
DWG NO

REV

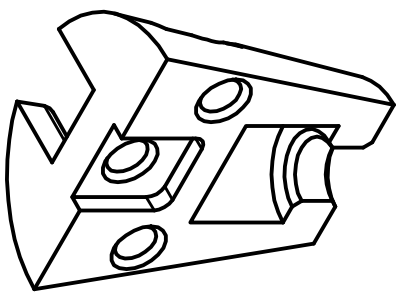
SCALE

2 : 1

SHEET 1 OF 1



**DETAIL A**  
**SCALE 4 : 1**



DRAWN	13/01/2021	TITLE	
Rafaela Sá		Suporte do apoio	
CHECKED		SIZE	DWG NO
QA		A4	
MFG		SCALE	2 : 1
APPROVED		REV	
		SHEET 1 OF 1	

## APÊNDICE II – COMPONENTES PARA O PROJETO MECÂNICO DO ROBÔ

Tabela 14 - Descrição dos componentes necessários para o projeto mecânico do robô.

Parte	Número de componentes	Conjunto	Material	Processo de fabrico
Placa superior	1	Corpo	Liga de	Corte a
Placa inferior	1		alumínio	laser
Fémur	12	Segmentos	Liga de	Corte a
Tíbia	6		alumínio	laser
Peça dos servomotores que permite a rotação horizontal e vertical	18	Articulações	Liga de alumínio	
Involucro	12	Apoio da perna	PLA	DMF
Pino deslizante	6		PLA	DMF
Sensor resistivo	6			
Servomotor	18	Atuadores		
Placa de controlo do motor	1	Componentes		
Microcontrolador (ATmega328P)	1	eletrónicos		
Parafusos de cabeça sextavada M3x6	168	Montagem		
Parafusos de cabeça sextavada preta M3x10	8			
Parafusos de cabeça sextavada preta M3x12	42			
Parafusos de cabeça sextavada preta M3x16	12			
Parafusos auto roscantes M2	30			
Porcas M3	230			

## APÊNDICE III – RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL

Tabela 15 - Resultados da análise estrutural da tibia para as restantes iterações

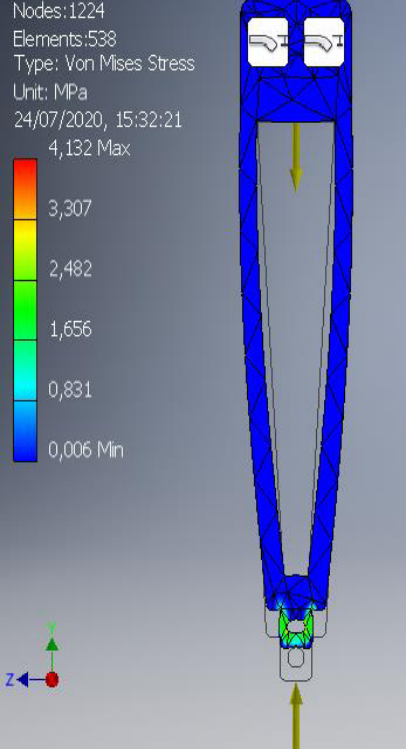
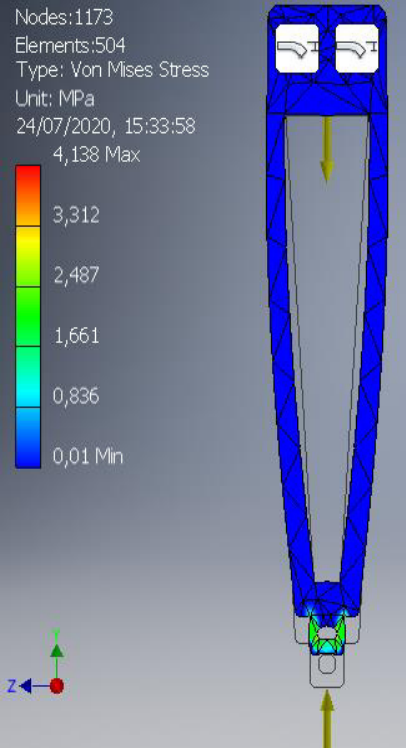
Iterações	Simulação	Forças aplicadas
1	<p>Nodes:1224 Elements:538 Type: Von Mises Stress Unit: MPa 24/07/2020, 15:32:21 4,132 Max</p> 	<p><math>Volume = 2,28 \text{ cm}^3</math> <math>F_N = 12,56 \text{ N}</math> <math>F_g = 0,25 \text{ N}</math></p>
2	<p>Nodes:1173 Elements:504 Type: Von Mises Stress Unit: MPa 24/07/2020, 15:33:58 4,138 Max</p> 	<p><math>Volume = 2,23 \text{ cm}^3</math> <math>F_N = 12,56 \text{ N}</math> <math>F_g = 0,25 \text{ N}</math></p>

Tabela 16 - Resultados da análise estrutural do fêmur para as restantes iterações.

Iterações	Simulação	Forças aplicadas
1	<p>Nodes:1230 Elements:548 Type: Von Mises Stress Unit: MPa 24/07/2020, 15:26:42 1,334 Max 1,067 0,801 0,535 0,269 0,002 Min</p>	<p><math>Volume = 3,42 \text{ cm}^3</math> <math>F_g = 0,37 \text{ N}</math></p>
2	<p>Nodes:977 Elements:431 Type: Von Mises Stress Unit: MPa 24/07/2020, 15:28:04 1,237 Max 0,991 0,746 0,5 0,254 0,008 Min</p>	<p><math>Volume = 3,28 \text{ cm}^3</math> <math>F_g = 0,37 \text{ N}</math></p>

## APÊNDICE IV – ANÁLISE DINÂMICA NOS PLANOS XY E XZ

Nesta secção são apresentadas as matrizes e vetores responsáveis pela análise dinâmica para os planos XY e XZ, tendo por base a Equação 8.

Para o plano XY, o vetor das posições iniciais corresponde à Equação 76.

$$q = [0.025, 0, 0, 0.15, 0, 0, 0.325, 0, 0]$$

$$q = [x_1, y_1, \phi_1, x_2, z_2, \theta_2, x_3, z_3, \theta_{32}] \quad (76)$$

Seguem-se então as matrizes utilizadas na análise dinâmica no plano XY, apresentadas pelas Equações 77 a 82.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (77)$$

$$\phi_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & a_{22} & 1 & 0 & a_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & a_{23} & 0 & 1 & a_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & a_{45} & 1 & 0 & a_{48} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & a_{55} & 0 & 1 & a_{58} \end{bmatrix} \quad (78)$$

Onde,  $a_{02} = a_{22} = \frac{l_1}{2} \sin \phi_1$ ,  $a_{12} = a_{32} = -\frac{l_1}{2} \cos \phi_1$ , e ainda  $a_{25} = a_{45} = \frac{l_2}{2} \sin \theta_2$ ,  $a_{35} = a_{55} = -\frac{l_2}{2} \cos \theta_2$ , e por fim  $a_{48} = \frac{l_3}{2} \sin \theta_{32}$  e  $a_{58} = -\frac{l_3}{2} \cos \theta_{32}$ .

$$\ddot{q} = [\ddot{x}_1, \ddot{y}_1, \ddot{\phi}_1, \ddot{x}_2, \ddot{z}_2, \ddot{\theta}_2, \ddot{x}_3, \ddot{z}_3, \ddot{\theta}_{32}]^T \quad (79)$$

$$\lambda = [H_1, R_1, H_2, V_2, H_3, V_3]^T \quad (80)$$

$$g = [0, -m_1g, 0, 0, -m_2g, 0, 0, -m_3g, 0]^T \quad (81)$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{l_1}{2} \dot{\phi}_1^2 \cos \phi_1 \\ -\frac{l_1}{2} \dot{\phi}_1^2 \sin \phi_1 \\ -\left(\frac{l_1}{2} \dot{\phi}_1^2 \cos \phi_1 + \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2\right) \\ -\left(\frac{l_1}{2} \dot{\phi}_1^2 \sin \phi_1 + \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2\right) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 + \frac{l_3}{2} \dot{\theta}_{32}^2 \cos \theta_{32}\right) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + \frac{l_3}{2} \dot{\theta}_{32}^2 \sin \theta_{32}\right) \end{bmatrix} \quad (82)$$

Para o plano XZ, o vetor das posições iniciais corresponde à Equação 83.

$$q = [0.025, 0, 0, 0.15, 0, 0, 0.325, 0, 0] \quad (83)$$

$$q = [x_1, z_1, \theta_1, x_2, z_2, \theta_2, x_3, z_3, \theta_{32}]$$

Seguem-se então as matrizes utilizadas na análise dinâmica no plano XZ, representadas pelas Equações 84 a 89.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (84)$$

$$\phi_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & a_{32} & 1 & 0 & a_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & a_{42} & 0 & 1 & a_{45} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & a_{55} & 1 & 0 & a_{58} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & a_{65} & 0 & 1 & a_{68} \end{bmatrix} \quad (85)$$

Onde,  $a_{02} = a_{32} = \frac{l_1}{2} \sin \theta_1$ ,  $a_{12} = a_{42} = -\frac{l_1}{2} \cos \theta_1$ , e ainda  $a_{35} = a_{55} = \frac{l_2}{2} \sin \theta_2$ ,  $a_{45} = a_{65} = -\frac{l_2}{2} \cos \theta_2$ , e por fim  $a_{58} = \frac{l_3}{2} \sin \theta_{32}$  e  $a_{68} = -\frac{l_3}{2} \cos \theta_{32}$ .

$$\ddot{q} = [\ddot{x}_1, \ddot{z}_1, \ddot{\theta}_1, \ddot{x}_2, \ddot{z}_2, \ddot{\theta}_2, \ddot{x}_3, \ddot{z}_3, \ddot{\theta}_{32}]^T \quad (86)$$

$$\lambda = [H_1, V_1, M_1, H_2, V_2, H_3, V_3]^T \quad (87)$$



$$g = [0, -m_1g, 0, 0, -m_2g, 0, 0, -m_3g, 0, 0]^T \quad (88)$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 \\ -\frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \\ 0 \\ -\left(\frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2\right) \\ -\left(\frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2\right) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 + \frac{l_3}{2} \dot{\theta}_{32}^2 \cos \theta_{32}\right) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + \frac{l_3}{2} \dot{\theta}_{32}^2 \sin \theta_{32}\right) \end{bmatrix} \quad (89)$$