

macrφ@ufmg  
MECHATRONICS, CONTROL, AND ROBOTICS



Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# Controle planar para a movimentação de um robô quadrúpede

Gabriel Duarte Gonçalves Pedro

Belo Horizonte - Minas Gerais, Abril, 2023

Gabriel Duarte Gonçalves Pedro

**Controle planar para a movimentação de um robô  
quadrúpede**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas

Belo Horizonte - Minas Gerais

Abril, 2023

P372c

Pedro, Gabriel Duarte Gonçalves.

Controle planar para a movimentação de um robô quadrúpede  
[recurso eletrônico] / Gabriel Duarte Gonçalves Pedro. - 2023.  
1 recurso online (71 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Gustavo Medeiros Freitas.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 77-82.

Apêndice: f. 83-86.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Robôs - Teses. 3. Robótica - Teses.  
4. Automação - Teses. 5. Locomoção animal - Teses. 6. Corpo - Teses.  
7. Caminhada - Teses. 8. Controle (Engenharia) - Teses.  
I. Freitas, Gustavo Medeiros. II. Universidade Federal de Minas Gerais.  
Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"CONTROLE PLANAR PARA MOVIMENTAÇÃO DE UM ROBÔ QUADRUPEDO"

GABRIEL DUARTE GONÇALVES PEDRO

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 27 de abril de 2023. Por:

Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas  
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Thiago Boaventura Cunha  
DEM/EESC (USP - São Carlos)

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Junior  
DEM (PUCminas)



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Medeiros Freitas, Professor do Magistério Superior**, em 27/04/2023, às 12:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Boaventura Cunha, Usuário Externo**, em 27/04/2023, às 13:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior, Usuário Externo**, em 09/05/2023, às 13:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2246899** e o código CRC **2939966B**.



*Dedico este trabalho os amigos e principalmente meus pais que sempre me apoiaram e incentivaram nos sonhos que teimo buscar.*

# Agradecimentos

Agradeço a todos que conheci no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, que direta e indiretamente me auxiliaram, me ensinaram e apoiaram em todo processo dessa pós-graduação, e a CAPES pelo apoio com financiamentos. Em especial agradeço o meu orientador Gustavo Medeiros Freitas, que em meio a situações adversas que todos passamos, parou para me escutar e aceitou me orientar. Sua dedicação e compromisso me motivou e me fez acreditar no meu potencial, mesmo quando ainda não nos conhecemos pessoalmente. Muito obrigado pelo o que me ensinou e pelas portas que abriu.

# Resumo

Animais possuem a capacidade de locomoção em terrenos não estruturados. Na robótica é estudada esta capacidade para execução de tarefas em ambientes industriais, de mineração, petrolífero e de desastres. Porém, para um robô executar esta locomoção de forma eficiente em diferentes ambientes, é necessário o planejamento dos passos assim como o controle sincronizado das suas pernas. Esta dissertação considera um robô quadrupede com pernas modeladas por meio das equações de Euler-Lagrange. A estratégia de controle proposta assume um controle de impedância para cada perna, que recebe trajetórias de referências dos padrões de marcha por meio de curvas de Bézier de 6º grau. As curvas de Bézier são construídas com base nas velocidades das pernas por meio de um modelo cinemático planar do corpo do robô. Por fim, um controle do corpo permite que o robô siga uma trajetória definida. O controle das pernas, os padrões de marcha e o controle do corpo foram implementados no Matlab e simulados no CoopeliaSim utilizando o motor de física realista Vortex. Os resultados obtidos nas simulações demonstram que o controlador das pernas proposto conseguiu rastrear a curva de Bézier utilizada como referência, fazendo com que o robô se movimente com os padrões de marcha de caminhada estática e trote, possuindo complacência a forças aplicadas nos pés. Já o controle do corpo foi capaz de comandar o robô de forma a seguir uma trajetória de referência, definida neste caso por uma curva Lemniscata de Bernoulli.

*Keywords: Robôs Quadrúpedes; Curvas de Bézier; Controle de Impedância; Torque Computado; Linearização por Realimentação; Planejamento de Passos e Marchas.*

# Abstract

Animals have the ability to move in unstructured terrain. In robotics, the ability to perform tasks in industrial, mining, oil and disaster environments is studied. However, for a robot to locomote efficiently in different environments, it is necessary to plan the steps as well as to control its legs in a synchronized way. This dissertation considers a quadruped robot with legs modeled using Euler-Lagrange equations. The proposed control strategy assumes an impedance control for each leg, which receives reference trajectories from gait patterns through 6th degree Bézier curves. The Bézier curves are constructed based on leg velocities through a planar kinematic model of the robot body. Finally, a body control allows the robot to follow a defined trajectory. Leg control, gait patterns and body control were implemented in Matlab and simulated in CoopeliaSim using the realistic Vortex physics engine. The results obtained in the simulations demonstrate that the proposed leg controller was able to track the Bézier curve used as a reference, making the robot move with static walking and trotting gait patterns, while presenting compliance to forces applied to the feet. The body control was able to command the robot to follow a reference trajectory, defined in this case by a Bernoulli Lemniscate curve.

Keywords: *Quadruped Robots; Bézier Curves, Impedance control; Computed Torque; Feedback Linearization; Step and Gait Planning.*

# Lista de Figuras

Figura 1 – Modelos dos robôs quadrúpedes comerciais da ANYbotics, Unitree e Boston Dynamics. Fonte: [ANYbotics, 2023, Unitree, 2023, Boston Dynamics, 2023]. . . . .	15
Figura 2 – Plataformas robóticas utilizadas pela equipe CERBERUS na final da <i>DARPA Subterranean Challenge</i> . Fonte: [Evan Ackerman, 2021]. . . . .	16
Figura 3 – Plataformas robóticas utilizadas pela equipe CSIRO Data61 na final da <i>DARPA Subterranean Challenge</i> . Fonte: [Evan Ackerman, 2021]. . . . .	17
Figura 4 – Plataformas robóticas utilizadas pela equipe MARBLE na final da <i>DARPA Subterranean Challenge</i> . Fonte: [Evan Ackerman, 2021]. . . . .	17
Figura 5 – (a) O robô ANYmal mapeando uma maquete de helicóptero . . . . .	18
Figura 6 – Visão geral do pé desenvolvido para inspeção de esgoto. (a) Subconjuntos do pé, (b) vista inferior do pé e (c) vista lateral do pé. Fonte: [Kolvenbach et al., 2020]. . . . .	19
Figura 7 – ANYmal andando sobre biofilme no esgoto. Fonte: [Kolvenbach et al., 2020].	19
Figura 8 – Sequência de imagens do movimento de inspeção tátil com a fase de colocação do pé (a), localização inicial do movimento de inspeção (b), fase de inspeção principal (c), alvo do movimento (d), movimento de reposicionamento (e) e posição final (f). Fonte: [Kolvenbach et al., 2020]. . . . .	19
Figura 9 – Exemplos ilustrando as condições de superfície encontradas nos esgotos. (a) Bom estado com água; (b) estado satisfatório com biofilme; (c) estado razoável molhado. Fonte: [Kolvenbach et al., 2020]. . . . .	20
Figura 10 – SpaceBok (A) e ANYmal (B) nas instalações de testes de robôs no RUAG Space. Fonte: [Kolvenbach et al., 2022]. . . . .	20
Figura 11 – O pé passivo adaptativo desenvolvido para o SpaceBok. Fonte: [Kolvenbach et al., 2022]. . . . .	21
Figura 12 – Robô ANYmal equipado com carga útil durante o Desafio de Recursos Espaciais. Fonte: [Kolvenbach et al., 2022]. . . . .	22
Figura 13 – Teste do ANYmal na usina de Cauê, em Itabira (MG). Fonte: [O Especialista, 2021]. . . . .	23
Figura 14 – Teste do ANYmal na Refinaria Henrique Lage no dia 15/12/2022 – Divulgação Petrobras. Fonte: [Flavia Marinho, 2022]. . . . .	23

Figura 15 – Robô Go1 presente no Grupo de Robôs com Pernas na Universidade de São Paulo, campus São Carlos. Fonte: [EESC-USP, 2022]. . . . .	24
Figura 16 – Potência específica por velocidade de vários mecanismos de locomoção. Fonte: [Siegwart et al., 2011 apud Todd, 1985]. . . . .	26
Figura 17 – Os robôs com pernas são particularmente adequados para terrenos acidentados, onde conseguem atravessar obstáculos como degraus (a), lacunas (b) ou terrenos macios (c) intransponíveis para sistemas com rodas. Além disso, o alto número de graus de liberdade permite que o robô se levante quando caído (d), que mantenha sua carga nivelada (e). Como os sistemas com pernas não requerem um caminho contínuo para suporte, eles podem contar com alguns pontos de apoio selecionados, o que também reduz o impacto ambiental (f). Fonte: [Siegwart et al., 2011]. . . . .	27
Figura 18 – Diagrama da curva de Bézier de 9° e 16° grau [Hou et al., 2020] (esquerda) e de 6° grau [Jin et al., 2019] (direita). . . . .	31
Figura 19 – Vista de cima para baixo dos movimentos gerados para um robô quadrúpede movendo-se da esquerda para a direita. Fonte: [Winkler et al., 2017]. . . . .	32
Figura 20 – Movimentos produzidos pelo planejador <i>Trajectory Optimizer for Legged Robots</i> para saltadores unilaterais, bípedes e quadrúpedes. Fonte: [Winkler et al., 2018]. . . . .	33
Figura 21 – Elementos virtuais do HyQ (Hydraulic Quadruped robot). Fonte: [Semini et al., 2015]. . . . .	34
Figura 22 – Modelo de impedância de perna na situação de contato em terreno irregular. Fonte: [Park e Park, 2012]. . . . .	34
Figura 23 – Controlador de locomoção baseado em MPC em ação em um robô Unitree A1 simulado (esquerda) e real (direita). Dadas as referências geradas cinematicamente (curva vermelha e círculos amarelos), o planejador gera uma trajetória de base ideal (curva verde) e pontos de apoio (círculos laranja) que são viáveis dinamicamente. Fonte: [Kang et al., 2022]. . . . .	35
Figura 24 – O erro de estado proposto do MPC. O error é definido em um grupo das matrizes de Lie e linearizado na álgebra de Lie. Fonte: [Teng e Ghaffari, 2022]. . . . .	36
Figura 25 – O problema de seleção de ponto de apoio para um robô quadrúpede. Fonte: [Belter et al., 2019]. . . . .	36
Figura 26 – Visão geral do método de treinamento do controlador de locomoção proprioceptivo. Fonte: [Lee et al., 2020]. . . . .	37
Figura 27 – Controlador de locomoção proprioceptivo implementado e testado em diversos ambientes desafiadores. Fonte: [Lee et al., 2020]. . . . .	38
Figura 28 – Visão geral dos métodos de treinamento e implantação do controlador de locomoção proprioceptivos e exteroceptivos. Fonte: [Miki et al., 2022]. . . . .	39

Figura 29 – O controlador de locomoção proprioceptivos e exteroceptivos percebe o ambiente por amostras de altura (pontos vermelhos) de um mapa de elevação (a). O controlador é resistente a muitos desafios de percepção comumente encontrados, como informações de mapa ausentes em campo devido à falha de detecção (b, c, g), informações de mapa enganosas devido a terreno não rígido (d, e) e desvio de estimativa de pose blue(f). Fonte: [Miki et al., 2022]. . . . .	40
Figura 30 – Diferentes robôs quadrúpedes com modelo morfológico comum. Fonte: [Feng et al., 2022]. . . . .	40
Figura 31 – Diagrama de controle para diferentes robôs quadrúpedes com modelo morfológico comum. Fonte: [Feng et al., 2022]. . . . .	41
Figura 32 – Teste em diferentes robôs quadrúpedes simulados e reais. Realizando marchas ritmadas usando um único controlador de locomoção. As imagens (a) e (d) são do robô A1 da Unitree, as imagens (b) e (e) são do robô Mini Cheetah, e as imagens (c) e (f) são do robô Sirius. Fonte: [Feng et al., 2022]. . . . .	41
Figura 33 – Diagramas de marchas quadrúpedes com fases relativas típicas dos pés. Fonte: [Alexander, 1984]. . . . .	49
Figura 34 – Diagrama de um robô móvel diferencial planar. . . . .	50
Figura 35 – Curva de Bézier para implementar as fases de suporte e balanço durante o passo de uma perna visualizada em 3D com a visualização dos parâmetros $d$ , $h$ e $\theta$ . . . . .	54
Figura 36 – Curvas de Bézier no espaço para diferentes parâmetros com visualização do ajuste dos pontos $P$ . . . . .	55
Figura 37 – Diagramas de marchas quadrúpedes de fases relativas para caminhada estática e trote. Fonte: [Alexander, 1984]. . . . .	56
Figura 38 – Diagrama de Hildebrand com fator de ocupação de 0.8. . . . .	57
Figura 39 – Resultado da função para cálculo de comprimento e frequência de passo para velocidade até 0,36 $m/s$ . . . . .	59
Figura 40 – Diagrama de um robô quadrúpede planar . . . . .	61
Figura 41 – Diagrama da estratégia de controle proposta. . . . .	65
Figura 42 – Diagrama do controle de impedância utilizando curva de Bézier de 6 <sup>o</sup> grau como referência. . . . .	65
Figura 43 – Diagrama de controle da estratégia completa para a movimentação do robô A1. . . . .	66
Figura 44 – Trajetórias de referência definidas por curvas de Bézier para movimentos frontal e lateral, junto com as trajetórias realizadas pelos pés do robô. Curvas de Bézier utilizadas como referência destacadas na cor laranja. . . . .	69
Figura 45 – Saída de controle $\tau$ e torque aplicado na simulação $T_{q_i}$ às juntas da perna durante a execução de 4 passos em caminhada estática. . . . .	70
Figura 46 – Erro de posição no espaço de trabalho do pé durante a execução de 4 passos em caminhada estática. . . . .	71

Figura 47 – Forças Externas no pé do Robô ( $F_e$ ) durante a execução de 4 passos em caminhada estática. . . . .	71
Figura 48 – Representação do movimento dos padrões de marcha. . . . .	72
Figura 49 – Simulações do controle corpo do robô utilizando como trajetória de referência uma curva Lemniscata de Bernoulli, executando padrões de marcha de caminhada estática e trote. . . . .	73
Figura 50 – Esquemático das juntas, centro de massa e sistemas de coordenadas de uma perna do robô A1. . . . .	84



# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela dos parâmetros de Denavit-Hartenberg das pernas direita e esquerda . . . . .	83
Tabela 2 – Valores utilizados no modelo dinâmico da perna do robô. . . . .	86
Tabela 3 – Limites das juntas do robô A1 . . . . .	86

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Motivação	25
1.2	Objetivos	28
1.3	Estrutura da dissertação	29
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>30</b>
2.1	Geração de trajetória de passos	30
2.2	Controle de robôs quadrupedes	33
2.2.1	Controle de impedância com linearização por realimentação	33
2.2.2	Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC)	35
2.2.3	Controle por aprendizado de máquina	36
2.3	Contribuições desta dissertação	42
<b>3</b>	<b>Fundamentos teóricos</b>	<b>43</b>
3.1	Dinâmica e controle de força do espaço de tarefas de um manipulador	43
3.1.1	Dinâmica no espaço das juntas de um manipulador	43
3.1.2	Controle de torque com linearização por realimentação	44
3.1.3	Relação do espaço de trabalho com espaço das juntas	45
3.1.4	Controle de impedância no espaço de trabalho	46
3.2	Curvas de Bézier	46
3.2.1	Ajuste de curva	47
3.3	Padrões de marcha	48
3.4	Modelo de robô móvel diferencial	49
<b>4</b>	<b>Estratégia de controle para movimentação de robô quadrúpede</b>	<b>51</b>
4.1	Determinação da curva de Bézier	51
4.2	Passo e padrão de marcha utilizando curvas de Bézier	53
4.3	Modelo cinemático planar do corpo	60
4.4	Controle planar do corpo	64
4.5	Visão geral das estratégias de controle	65
<b>5</b>	<b>Resultados e análise da simulação</b>	<b>67</b>
5.1	Implementação da simulação no CoppeliaSim integrado com Matlab	67
5.2	Controle das pernas seguindo curvas de Bézier	68
5.3	Controle coordenado das pernas executando padrões de marcha	69
5.4	Controle do corpo	73
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>74</b>
6.1	Trabalhos futuros	76

Referências . . . . .	77
Apêndice A Modelo dinâmico das pernas . . . . .	83

# Capítulo 1

## Introdução

Os avanços atuais no desenvolvimento de sistemas de locomoção com pernas levaram ao surgimento de diferentes plataformas robóticas comerciais que são desenvolvidas, testadas e vendidas para utilização em diferentes ambientes. Estas plataformas robóticas executam operações de busca e salvamento, inspeções, vigilância, mapeamento entre outras funções, principalmente em ambientes hostis ao ser humano.

Dentre os robôs com pernas, os robôs quadrúpedes apresentam uma relação adequada de quantidade de pernas considerando equilíbrio e mobilidade do corpo do robô. Atualmente empresas como Boston Dynamics<sup>1</sup>, ANYbotics<sup>2</sup>, Unitree<sup>3</sup>, entre outras, apresentam versões comerciais de robôs quadrúpedes (figura 1) que podem ser utilizados em indústrias, minas, plataformas de petróleo ou em qualquer outro ambiente necessário [Fankhauser e Hutter, 2018, Kolvenbach et al., 2020, Wang et al., 2020].

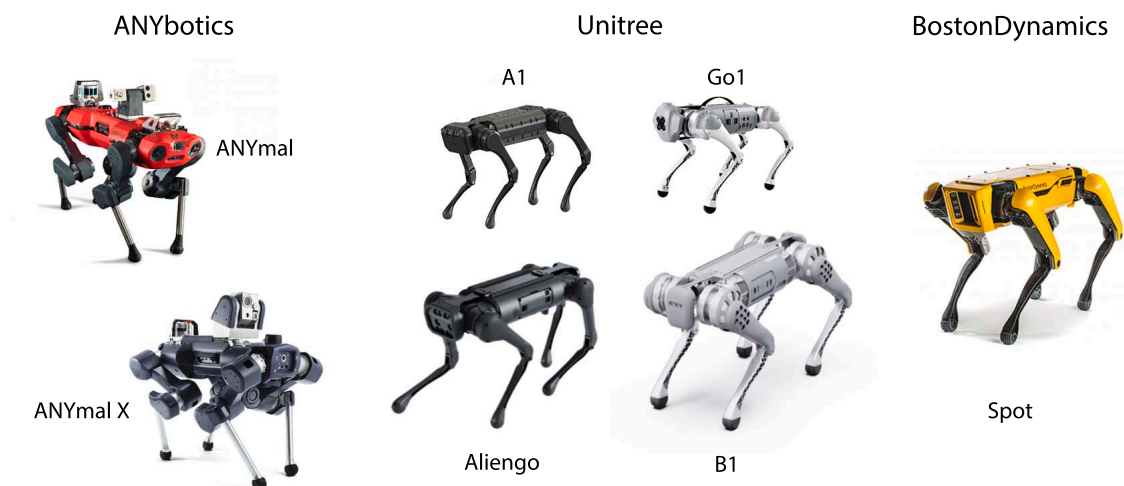


Figura 1 – Modelos dos robôs quadrúpedes comerciais da ANYbotics, Unitree e Boston Dynamics.  
Fonte: [ANYbotics, 2023, Unitree, 2023, Boston Dynamics, 2023] .

<sup>1</sup> <https://www.bostondynamics.com>

<sup>2</sup> <https://www.anybotics.com>

<sup>3</sup> <https://www.unitree.com>

Diferentes pesquisas vêm sendo realizadas nessas plataformas robóticas, sejam elas comerciais ou desenvolvidas pelos próprios laboratórios. As pesquisas envolvem a locomoção destes robôs em diferentes terrenos, estruturados ou não, percepção robótica para mapeamento de terrenos e planejamento de caminhada, estimadores de estado e posição, controle dessas plataformas robóticas e principalmente pesquisas envolvendo aplicações destas plataformas robóticas como exploração e patrulha de ambientes não estruturados, cooperação em sistemas multiagente, inspeção autônoma, teleoperação, manipulação móvel, entre outras.

Um exemplo de aplicação destas plataformas robóticas foi evidenciado na competição de robótica *DARPA Subterranean Challenge*<sup>4,5</sup> onde os robôs quadrúpedes demonstraram versatilidade em ambientes não estruturados com terreno irregulares, seja interagindo ou coletando dados relevantes nestes ambientes. A final do evento promoveu desafios em três ambientes: circuito do túnel, circuito urbano e circuito da caverna. Os robôs exploraram os ambientes, procurando objetos chamados de artefatos de interesse e reportaram a localização exata destes objetos, em túneis subterrâneos, em infraestrutura de um metrô e cavernas naturais. Durante a competição estes robôs atravessaram espaços confinados, terrenos acidentados e áreas obscurecidas, inclusive por fumaça densa [Team CERBERUS, 2021].

A equipe vencedora foi a CERBERUS<sup>6</sup> (*CollaborativE walking & flying RoBots for autonomous ExploRation in Underground Settings*) que desenvolveu um sistema de exploração subterrânea autônoma utilizando colaboração robótica entre robôs quadrúpedes e drones. Quatro robôs ANYmal C (figura 2) compuseram o grupo principal de exploração. A equipe CERBERUS venceu o evento final marcando 23 pontos ao detectar e localizar corretamente 23 dos 40 artefatos presentes nos ambientes.



Figura 2 – Plataformas robóticas utilizadas pela equipe CERBERUS na final da *DARPA Subterranean Challenge*. Fonte: [Evan Ackerman, 2021].

<sup>4</sup> <https://www.subtchallenge.com>

<sup>5</sup> <https://www.darpa.mil/program/darpa-subterranean-challenge>

<sup>6</sup> <https://www.subt-cerberus.org>

A equipe classificada em segundo lugar, CSIRO Data61, possuía dois robôs Spot e dois robôs com esteiras (figura 3), os quais realizaram exploração cooperativa, e também marcaram 23 pontos. No entanto, o relato do último artefato foi atrasado em relação à equipe vencedora, e este foi o critério de desempate. O terceiro lugar ficou com a equipe MARBLE que marcou 18 pontos, e utilizaram dois robôs Spot e dois robôs com rodas (figura 4) [Team CERBERUS, 2021].

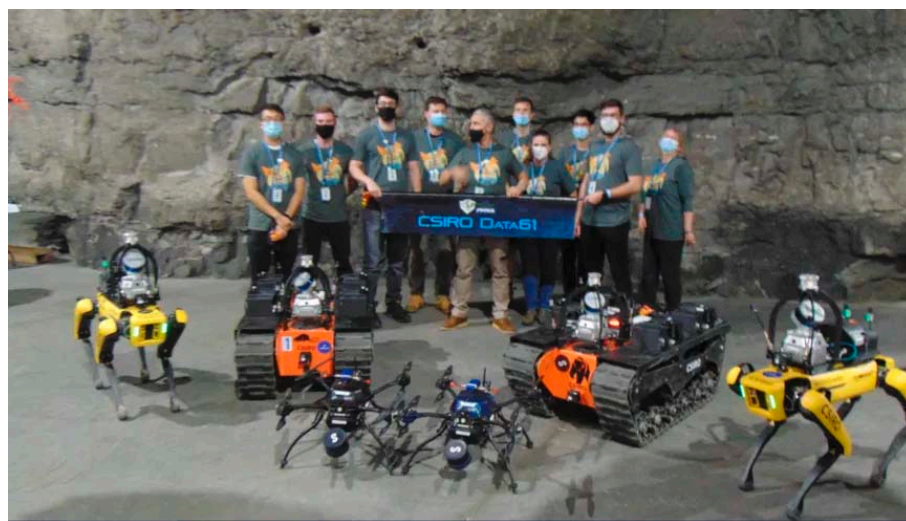


Figura 3 – Plataformas robóticas utilizadas pela equipe CSIRO Data61 na final da *DARPA Subterranean Challenge*. Fonte: [Evan Ackerman, 2021].

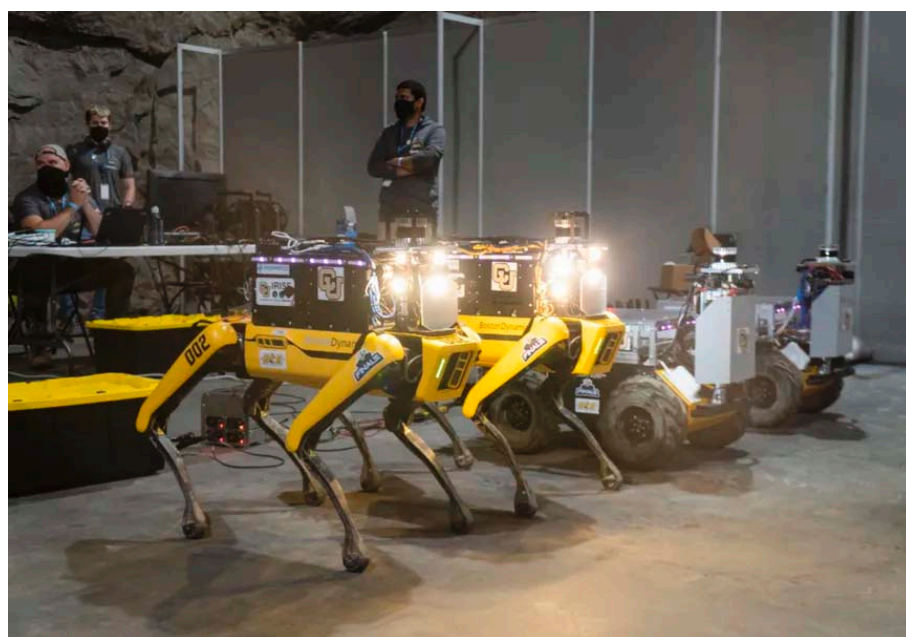


Figura 4 – Plataformas robóticas utilizadas pela equipe MARBLE na final da *DARPA Subterranean Challenge*. Fonte: [Evan Ackerman, 2021].



Uma aplicação dessas plataformas para além dos desafios de robótica é evidenciado em [Wang et al., 2020] ao apresentar um sistema de mapeamento ativo online que permite um robô quadrúpede fazer levantamentos autônomos de grandes estruturas físicas como mostra a figura 5, no qual o robô ANYmal realizou o mapeamento de uma maquete de helicóptero no *Fire Service College em Gloucestershire* no Reino Unido. Esse sistema de mapeamento com um robô quadrúpede pode ser útil em inspeções regulares e monitoramento de instalações remotas ou perigosas, como plataformas de petróleo marítimas.

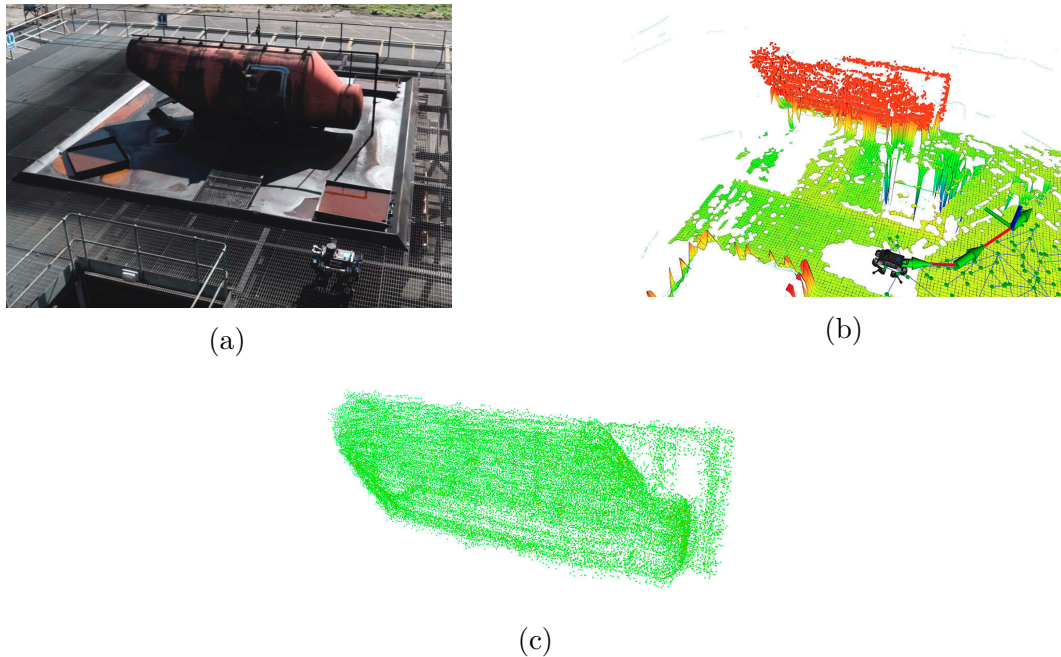


Figura 5 – (a) O robô ANYmal mapeando uma maquete de helicóptero no *Fire Service College em Gloucestershire*, Reino Unido; (b) O estado do sistema de mapeamento mostrando a reconstrução do objeto, mapa de elevação LiDAR, caminho planejado utilizando algoritmo RRT e o próximo objetivo de caminhada; (c) Reconstrução do modelo do corpo do helicóptero realizada pelo sistema de mapeamento. Fonte: [Wang et al., 2020].

Kolvenbach et al. [2020] apresentam uma aplicação do robô ANYmal substituindo um inspetor humano na avaliação da deterioração do piso de concreto dos canais de esgoto da Suíça, usando interação tátil. Este sistema de inspeção robótica foi desenvolvido a fim de avaliar a deterioração do concreto, por meio da interação tátil utilizando de sensores inerciais, força e torque, especialmente projetados e adaptados nos pés do robô (figura 6). A interação tátil é usada uma vez que o piso é frequentemente coberto por água e biofilme, tornando a inspeção visual muito desafiadora como é visto na figura 7. A inspeção ocorre por meio de um movimento de raspagem bem definido usando uma das pernas do ANYmal em contato com o piso de concreto (figura 8).

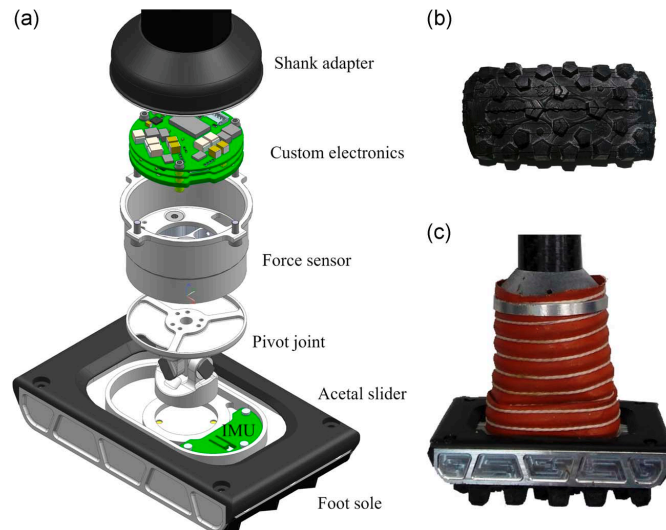


Figura 6 – Visão geral do pé desenvolvido para inspeção de esgoto. (a) Subconjuntos do pé, (b) vista inferior do pé e (c) vista lateral do pé. Fonte: [Kolvenbach et al., 2020].

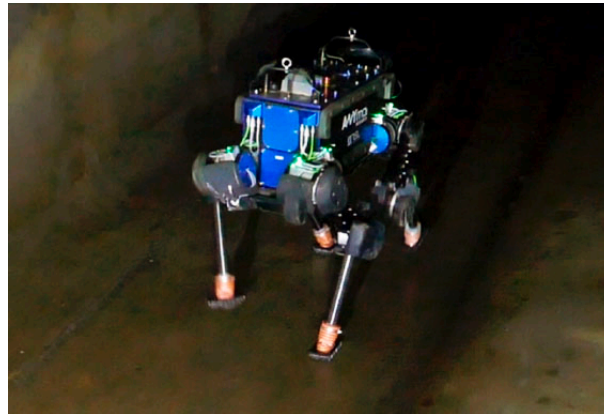


Figura 7 – ANYmal andando sobre biofilme no esgoto. Fonte: [Kolvenbach et al., 2020].

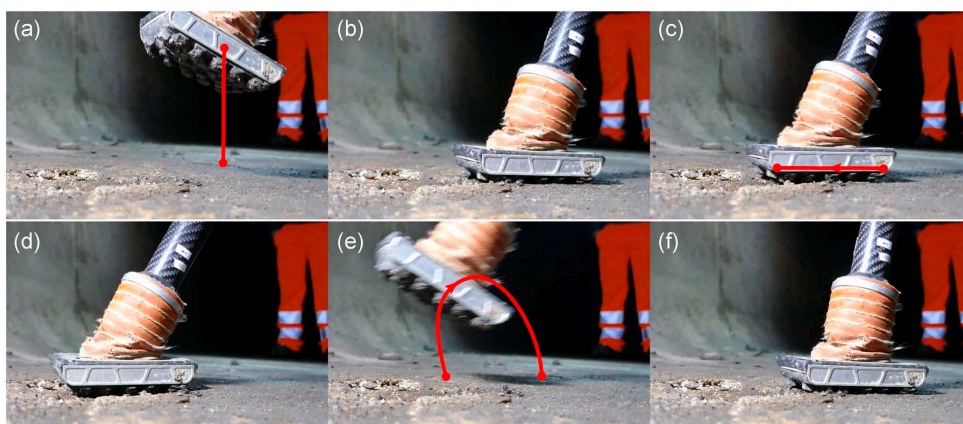


Figura 8 – Sequência de imagens do movimento de inspeção tátil com a fase de colocação do pé (a), localização inicial do movimento de inspeção (b), fase de inspeção principal (c), alvo do movimento (d), movimento de reposicionamento (e) e posição final (f). Fonte: [Kolvenbach et al., 2020].



O sistema de inspeção robótico desenvolvido permitiu realizar missões de inspeção autônomas verificando a aspereza do piso e a presença de rachaduras (figura 9). A inspeção regular dos esgotos é essencial para avaliar o nível de degradação e planejar os trabalhos de manutenção.

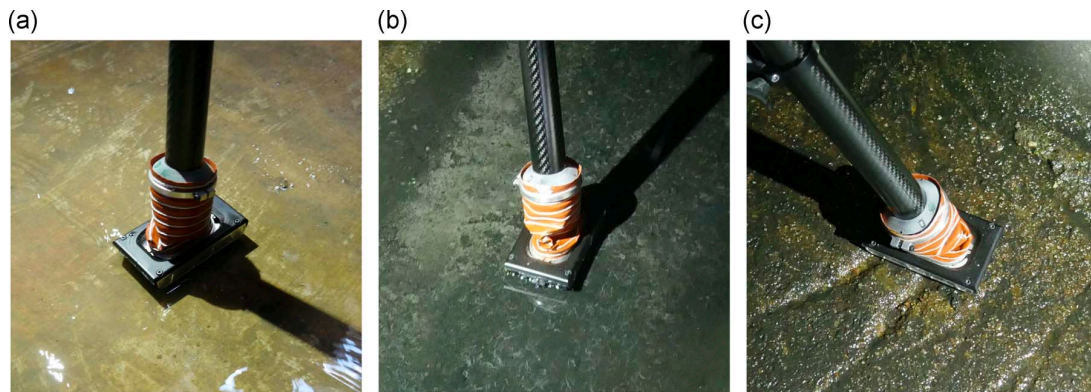


Figura 9 – Exemplos ilustrando as condições de superfície encontradas nos esgotos. (a) Bom estado com água; (b) estado satisfatório com biofilme; (c) estado razoável molhado. Fonte: [Kolvenbach et al., 2020].

Uma das mais audaciosas aplicações na utilização de robôs móveis com quadro pernas é na exploração espacial. A exploração robótica de corpos celestes com sistemas de rodas já é realizada com sucesso. Estes corpos celestes, contudo, apresentam regiões altamente desestruturadas, compressíveis e inclinadas. Esses ambientes são muito desafiadores no que tange os sistemas com rodas [Kolvenbach et al., 2022]. Por outro lado, os avanços da última década tornaram viáveis as aplicações comerciais de robôs quadrúpedes, motivando o interesse na pesquisa da utilização de robôs quadrúpedes na exploração espacial. Kolvenbach et al. [2022] ressaltam os avanços dos robôs quadrúpedes para futuras missões de exploração planetária. O artigo apresenta experimentos nas plataformas robóticas ANYmal e SpaceBok (figura 10) para validação da locomoção com pernas na travessia de encostas análogas às marcianas, granulares e íngremes.

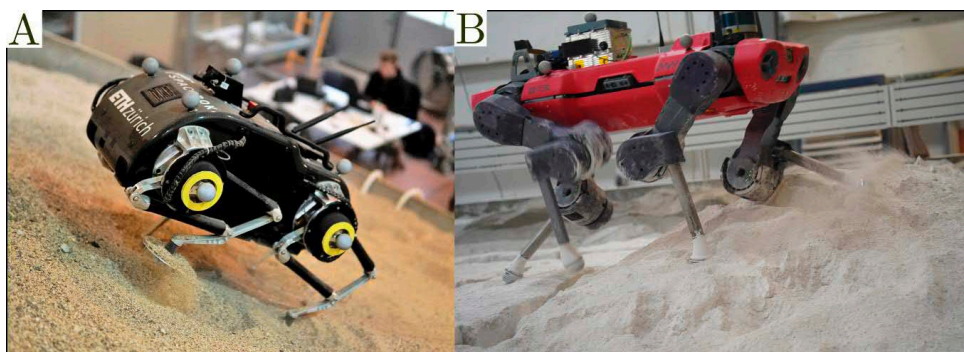


Figura 10 – SpaceBok (A) e ANYmal (B) nas instalações de testes de robôs no RUAG Space. Fonte: [Kolvenbach et al., 2022].

O Spacebok, nesse artigo, utilizou um controlador para locomoção baseado em modelo virtual com um padrão de marcha predefinido, utilizando pés pontuais e pés planares adaptativos passivos especialmente projetados para testar a interação das pernas no solo (figura 11). Os pés adaptativos passivos reduzem o afundamento e fornecem tração em solo granular plano e inclinado. O ANYmal usou um controlador de locomoção baseado em aprendizado de reforço com pés pontuais. O artigo apresenta a simulação do ANYmal se locomovendo em baixa gravidade, a fim de compreender os requisitos do sistema em relação aos gastos de energia, riscos de operação e especificação dos atuadores.

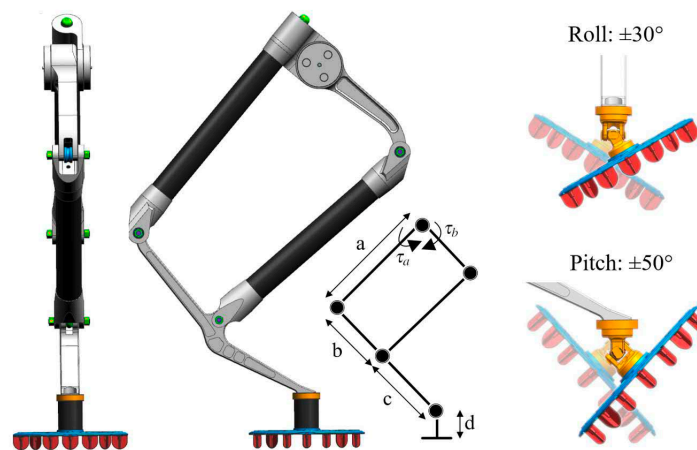


Figura 11 – O pé passivo adaptativo desenvolvido para o SpaceBok. Fonte: [Kolvenbach et al., 2022].

Os autores, além disso, descrevem sua participação no *ESA-ESRIC Space Resources Challenge*<sup>7</sup> iniciado pela *European Space Agency* (ESA) e o *European Space Resources Innovation Centre* (ESRIC) com o intuito de avaliar as atuais tecnologias prospectivas de recursos fora do planeta e acelerar o desenvolvimento de tecnologias críticas. O teste de campo do desafio ocorreu em um ambiente análogo ao lunar simulando as condições adversas no polo sul da lua. O desafio apresentou um terreno desconhecido com solo granular, encostas íngremes, iluminação de alta incidência solar, além de comunicações de rede com atraso de 2,5s e perda de sinal intermitente. Os autores equiparam o robô ANYmal com um espectrômetro Raman, um gerador de imagens em uma cabeça pan-tilt que fornecia imagens de contexto e zoom, e um microscópio para fornecer informações microscópicas na superfície da rocha (figura 12). Nesta competição o ANYmal não apresentou problemas ao transpor os obstáculos ou o material granular, destacando a aplicabilidade de tais robôs para futuras missões de exploração espacial.

<sup>7</sup> <https://www.spaceresourceschallenge.esa.int>

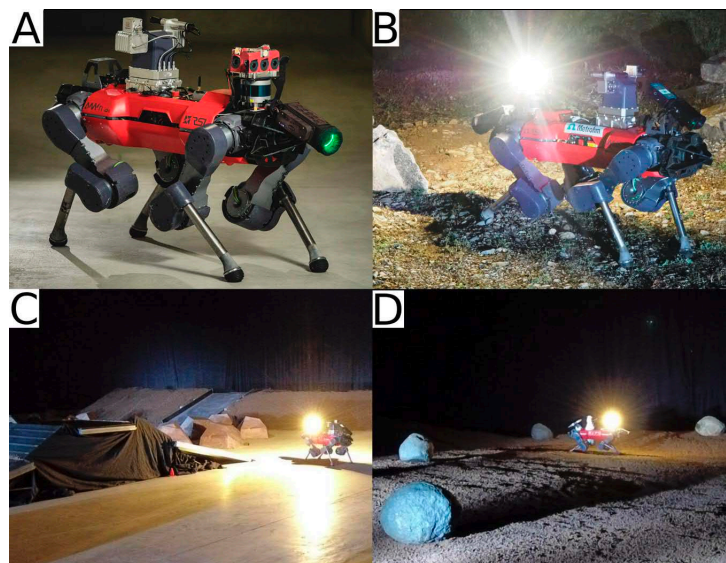


Figura 12 – Robô ANYmal equipado com carga útil durante o Desafio de Recursos Espaciais. Fonte: [Kolvenbach et al., 2022].

No Brasil, a empresa mineira PUR é representante exclusiva da companhia suíça ANYbotics [Flavia Marinho, 2022], e foi a responsável por trazer o primeiro robô quadrúpede para o mercado brasileiro [R7, 2022, Luiz Gustavo Pacete, 2022]. A presença desta plataforma robótica no Brasil chamou atenção das empresas Vale e Petrobras que já investem em robôs móveis a fim de realizar inspeções perigosas [Bruno Villas Bôas, 2021, O Especialista, 2021].

A Vale em parceria com a PUR realizou uma prova de conceito do robô ANYmal realizada na usina de Cauê, em Itabira (MG) e em maio de 2022 adquiriu um robô ANYmal devido ao sucesso da prova de conceito [Brasil Mineral, 2022] (figura 13). Durante essa prova, o robô ANYmal manobrou em torno da plataforma, superou obstáculos, criou e exibiu um mapa digitalizado da área sob inspeção, executou o planejamento de rotas definindo caminhos para inspeção de objetos e instrumentos específicos. Além disso, o ANYmal transmitiu e gravou imagens visuais e térmicas, entre outras funções [Diário do Comércio, 2021]. Este robô ANYmal foi adaptado para as operações de mineração com apoio da equipe Vale [Diário do Comércio, 2021]. Em 2022 a equipe de manutenção do Porto de Tubarão da Vale, em Vitória (ES), passou por treinamento com robô ANYmal. Cerca de 10 inspetores das áreas de manutenção elétrica e mecânica do porto foram treinados para atuar diretamente com o robô [Brasil Mineral, 2022].

Além desta iniciativa com o ANYmal, o Instituto Tecnológico Vale (ITV) desenvolve robôs, drones e soluções de inteligência artificial para operações de mineração [Diário do Comércio, 2021]. O ITV possui os seus robôs de inspeção para operações de mineração e adquiriu recentemente um robô A1 da Unitree.





Figura 13 – Teste do ANYmal na usina de Cauê, em Itabira (MG). Fonte: [O Especialista, 2021].

A Petrobras também realizou testes com ANYmal na primeira semana de dezembro de 2022 na Refinaria Henrique Lage (Revap) (figura 14), em São José dos Campos [Flavia Marinho, 2022, R7, 2022] em parceria com a PUR. Os testes e treinamento foram ministrados por técnicos da ANYbotics e da PUR, permitindo capacitar cerca de 20 petroleiros de diferentes unidades da estatal. Equipes da Petrobras planejam mais testes a fim de explorar as oportunidades que o robô ANYmal traz para as operações no setor de óleo e gás, inclusive em ambiente de plataforma de petróleo marítimas, *offshore*, em janeiro de 2023. A Petrobras assinou contrato para participar do programa de *early adopters* do ANYmal X, modelo do robô ANYmal direcionada a ambientes sujeitos à presença de atmosferas explosivas [Flavia Marinho, 2022, R7, 2022].

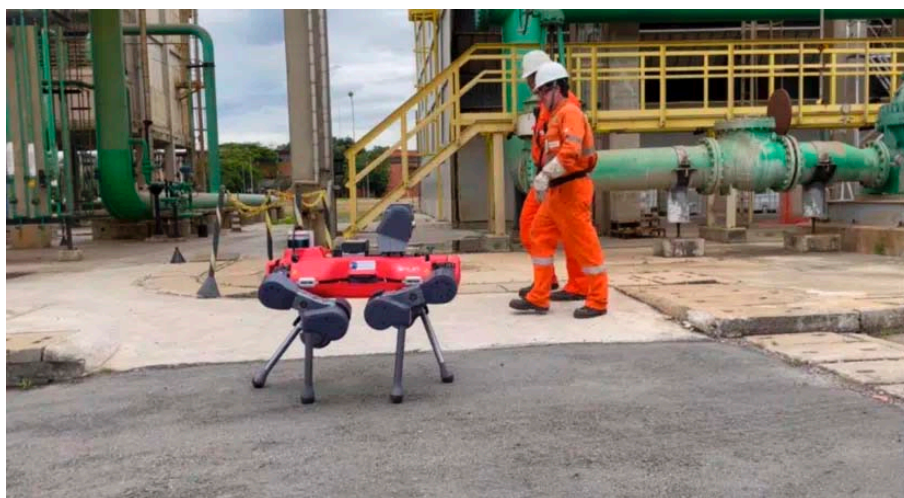


Figura 14 – Teste do ANYmal na Refinaria Henrique Lage no dia 15/12/2022 – Divulgação Petrobras. Fonte: [Flavia Marinho, 2022].

No âmbito da pesquisa acadêmica brasileira, vale ressaltar a inauguração do Grupo de Robôs com Pernas (*Legged Robotics Group*) do Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (SEM-EESC) na Universidade de São Paulo (USP). Este grupo de robótica, que inclui mestrandos, doutorandos e pós-doutorandos, é o primeiro grupo de pesquisa no Brasil com foco na área de robôs com pernas quadrúpedes e bípedes, com parcerias com diversas instituições de prestígio nesse segmento de pesquisa no exterior. O Grupo de Robôs com Pernas visa alavancar a pesquisa e inovação na robótica com foco em aplicações de interesse nacional, como a área agrícola e petrolífera [EESC-USP, 2022]. O Grupo possui um robô Go1 (figura 15) da Unitree e negocia a aquisição de outras plataformas robótica com pernas como os robôs ANYmal, Spot e B1.



Figura 15 – Robô Go1 presente no Grupo de Robôs com Pernas na Universidade de São Paulo, campus São Carlos. Fonte: [EESC-USP, 2022].

O planejamento e controle dos movimentos executados pelas pernas de um robô, utilizando-se de contatos intermitentes com solo e evitando colisões com o ambiente e o próprio corpo é um dos grandes desafios apresentados para a implementação destes dispositivos. O problema de planejamento e controle de movimento com múltiplos contatos tem um especial desafios em ambientes com terrenos não planos, sejam estruturados ou não, sendo a abordagem deste problema necessária para operação destes robôs de forma autônoma [Fankhauser et al., 2016].

Buscando uma estratégia locomoção adequada destes dispositivos, essa dissertação propõe o controle de um robô quadrúpede com 3 graus de liberdade em cada perna, com o modelo dinâmico das pernas sendo obtido por meio das equações de Euler-Lagrange. Cada perna possui um controle de impedância com linearização por realimentação que recebe as trajetórias de referências dos passos por meio de curvas de Bézier de 6º grau que descrevem o movimento de balanço e suporte dos pés. As curvas de Bézier são definidas conforme o comprimento, altura, direção, frequência e padrão de marcha dos passos.

O padrão de marcha sincroniza o movimento dos passos gerados pelas curvas de Bézier de cada perna, conforme os padrões de marcha de trote ou caminhada estática, com base na velocidade desejada do corpo do robô fornecidas por um controle de posição e orientação do corpo. A direção, comprimento e frequência dos passos são determinados com uma altura de passo fixa. O controle de posição e orientação do corpo é baseado em um modelo cinemático planar omnidirecional de um robô móvel também linearizado por realimentação e utilizando um controle auxiliar proporcional.

O sistema de controle proposto foi implementado no Matlab<sup>8</sup> e por meio da *Legacy remote API* simulado no CoppeliaSim<sup>9</sup> com o motor físico Vortex<sup>10</sup>. As simulações foram realizadas utilizando o motor físico Vortex devido o seu realismo nas soluções de contato de objetos. O robô simulado foi o robô quadrúpede A1 da Unitree que seguiu as trajetórias de referência enviadas para o controle proposto em um ambiente plano.

## 1.1 Motivação

Os robôs móveis apresentam várias possibilidades de aplicações em ambientes naturais, industriais ou urbanos, sejam estes aéreos, terrestres ou aquáticos. A forma de locomoção desses robôs esta intrinsecamente ligada ao ambiente para o qual eles foram projetados. Dos robôs móveis terrestres, os robôs com rodas são os mais comuns.

Os robôs móveis terrestres com rodas apresentam alta eficiência energética na locomoção. A eficiência desses robôs com rodas é relacionada com a estrutura do ambiente nos quais eles se movem. A maior eficiência é obtida em ambientes planos e com pouca irregularidade, pois o atrito de rolamento é menor. A fim de obter a máxima eficiência, o ambiente deve ser estruturado de acordo com aplicação, por exemplo, utilizando estradas e ferrovias.

Contudo, mesmo ambientes urbanos estruturados podem se mostrar desafiadores para a locomoção de um robô com rodas, dependendo da sua aplicação, devido à falta de acessibilidade para rodas em ambientes projetados para pessoas. Nesses ambientes robôs com rodas enfrentam dificuldades como transpor degraus, escadas ou passar por calçadas pouco regulares. Nos ambientes industriais, o uso de robôs móveis com rodas pode ser amplamente considerado desde que sejam analisadas as limitações estruturais do ambiente. Por exemplo, os armazéns automatizados com robôs móveis são construídos pensando na aplicação destes robôs. Nas fábricas robôs móveis com rodas utilizados para transporte de peças encontram poucas dificuldades, pois o ambiente já é estruturado para estes dispositivos, como AGVs e empilhadeiras.

<sup>8</sup> <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

<sup>9</sup> <https://www.coppeliarobotics.com>

<sup>10</sup> <https://www.cm-labs.com/vortex-studio/>

Entretanto, outros ambientes industriais apresentam desafios para o uso de rodas. Ambientes de mineração, petróleo e gás, construção civil e outros, são exemplos de ambientes dinâmicos e comumente não estruturados. Na mineração, caminhões e escavadeiras autônomas não encontram dificuldade com o terro devido ao tamanho das rodas e esteiras. No entanto, aplicações em escala menor nestes ambientes são desafiadores para robôs móveis com rodas ou esteiras, especialmente devido o terreno macio. Nos terrenos macios, robôs com rodas e esteiras possui uma eficiência locomoção menor devido ao maior atrito de rolagem [Siegwart et al., 2011].

Robôs móveis terrestre podem apresentar outras formas de locomoção: uma delas é o uso de pernas. Na locomoção com pernas ha maior eficiência em superfícies macias, porque essa consiste em contatos pontuais com o solo, como pode ser verificado no gráfico da figura 16 que compara diferentes meios de locomoção em relação a sua potência específica e sua velocidade de movimento [Siegwart et al., 2011]. A potência específica é usada como uma medida de desempenho de um veículo. A potência usada no movimento é dividida pelo peso ou massa do veículo, de maneira a fornecer uma métrica de comparação independente do tamanho e massa dos veículos.

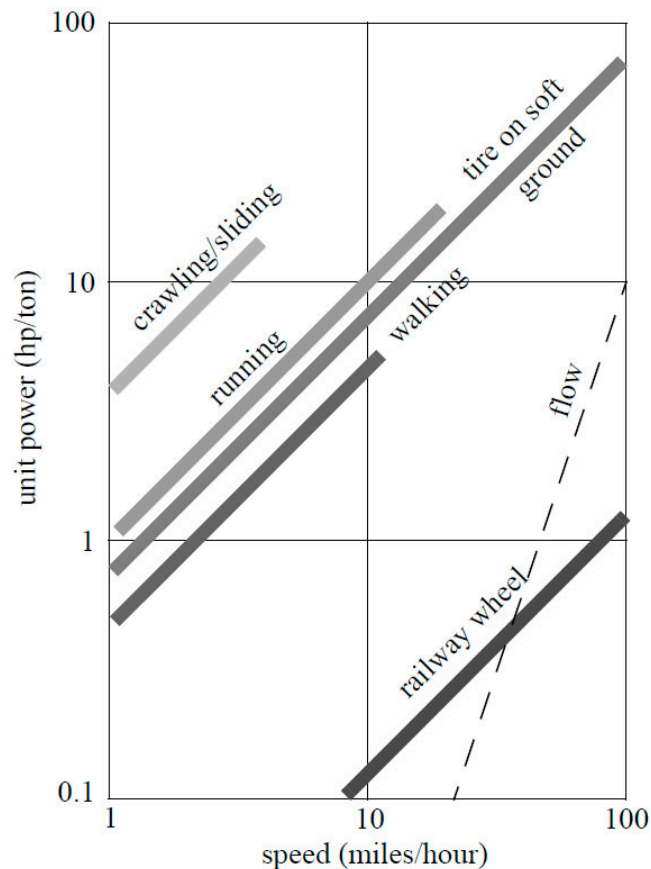


Figura 16 – Potência específica por velocidade de vários mecanismos de locomoção. Fonte: [Siegwart et al., 2011 apud Todd, 1985].



Neste gráfico é possível observar que: rodas em trilhos apresentam a maior eficiência de locomoção; o movimento de caminhar é mais eficiente do que a locomoção usando rodas em terrenos macios; e o movimento de correr é ligeiramente menos eficiente do que rodas em terrenos macios; rastejar e escorregar é a forma de locomoção com menor eficiência.

Apesar da locomoção com pernas ser menos eficiente do que com rodas em certos contextos como apresentado no gráfico, pernas em geral permitem uma maior adaptabilidade e manobrabilidade comparado a rodas. Adaptabilidade e manobrabilidade advêm das diferentes possibilidades de locomoção, como andar, trotar, correr e saltar, além das pernas, facilitar a travessia de fendas e buracos, e na recuperação de uma queda ou tombamento (figura 17). Essa maior adaptabilidade e manobrabilidade pode ser uma vantagem para se mover e se recuperar de quedas, principalmente nos ambientes não estruturados com terrenos irregulares, que apresentam maiores desafios para a locomoção.

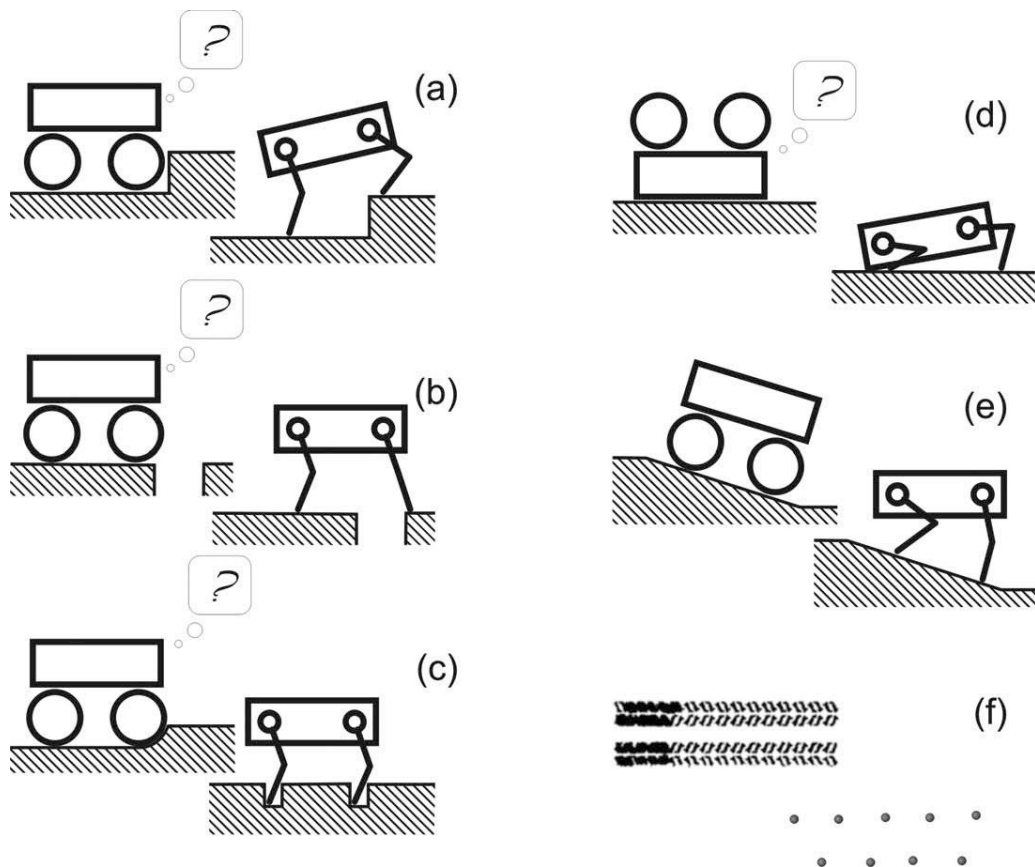


Figura 17 – Os robôs com pernas são particularmente adequados para terrenos acidentados, onde conseguem atravessar obstáculos como degraus (a), lacunas (b) ou terrenos macios (c) intransponíveis para sistemas com rodas. Além disso, o alto número de graus de liberdade permite que o robô se levante quando caído (d), que mantenha sua carga nivelada (e). Como os sistemas com pernas não requerem um caminho contínuo para suporte, eles podem contar com alguns pontos de apoio selecionados, o que também reduz o impacto ambiental (f). Fonte: [Siegwart et al., 2011].



Animais se locomovem usando pernas com grande versatilidade em terrenos acidentados e ambientes não estruturados [Hutter et al., 2012], e podem alcançar um melhor desempenho com respeito à velocidade, eficiência energética e habilidade de negociação de obstáculos [Hutter et al., 2017], além de serem capazes de se locomover com velocidade e eficiência em superfícies menos exigentes [Hutter et al., 2012]. Nesse contexto, robôs móveis com pernas são pesquisados como uma alternativa de solução para locomoção terrestre nesses ambientes não estruturados com terrenos irregulares, emulando a locomoção de animais, uma vez que não é possível utilizar rodas e esteiras em todas as superfícies terrestres [Raibert et al., 2008] e nem todos ambientes não estruturados. Robôs móveis com pernas, dependendo da sua aplicação nestes ambientes, podem ter vantagens devido ao seu meio de locomoção comparado com outros robôs móveis [Fankhauser e Hutter, 2018]. Essa capacidade de locomoção com pernas visa auxiliar robôs móveis na execução de tarefas sujas, enfadonhas e perigosas em terrenos não estruturados e irregulares [Fankhauser e Hutter, 2018, Kolvenbach et al., 2020, Wang et al., 2020, Buchli et al., 2009].

Entretanto, a complexidade tecnológica de construção e controle destes robôs dificulta a sua utilização em cenários reais, como evidenciado por Hutter et al. [2017]. Apesar desta complexidade tecnológica, a locomoção estável de robôs com pernas, no caso andar sem cair, já foi demonstrada em diferentes publicações (Raibert et al. [2008], Hutter et al. [2017], Seok et al. [2013]), e parte destes desafios tecnológicos para locomoção de um robô com pernas foram superadas por diferentes pesquisadores.

Neste contexto, motivado pelo sucesso no desenvolvimento destes robôs com pernas que alcançaram uma locomoção estável, e o crescimento do interesse da aplicação de plataformas robóticas comerciais que utilizam pernas nas tarefas de inspeção e monitoramento industrial, esta dissertação tem o objetivo de desenvolver uma estratégia de controle para locomoção de robôs quadrúpedes.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é implementar e validar uma estratégia de controle das pernas e corpo de um robô quadrúpede. Será utilizada a simulação de um robô quadrúpede para análise da estratégia de controle das pernas e corpo do robô. A simulação contempla um modelo virtual do robô A1 (figura 1), com o controle de impedância das pernas por meio de sensores de forças nos pés, um padrão de locomoção utilizando curvas de Bézier para as trajetórias dos pés e um controle cinemático planar do corpo do robô A1. A seguir são apresentados os objetivos específicos determinados para esta dissertação.

- Modelagem dinâmica da perna do robô A1;
- Desenvolvimento e implementação do controle de impedância da perna;
- Desenvolvimento e implementação de curvas de Bézier utilizadas como referência para definir as fases de suporte e balanço dos pés;
- Desenvolvimento e implementação dos padrões de locomoção de caminhada estática e trote utilizando as curvas de Bézier;
- Desenvolvimento e implementação do controle cinemático planar do corpo do robô quadrúpede;
- Simulação o robô A1 utilizando o software CoppeliaSim com controle implementado no software Matlab;
- A validação da metodologia desenvolvida por meio das simulações realizadas.

### 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica de robôs quadrúpedes incluindo os atuadores utilizados em robôs quadrúpedes, as estratégias de geração de trajetória dos pés e as abordagens de controle utilizadas em robôs quadrúpedes como controle de impedância com linearização por realimentação, controle preditivo por modelo (MPC) e controle por aprendizado de máquinas.

No terceiro capítulo é apresentada a fundamentação teórica necessária para compreensão da metodologia aplicada para o controle de locomoção utilizado nesta dissertação. A fundamentação teórica aborda a dinâmica e controle de força no espaço de tarefas de um manipulador robótico, as curvas de Bézier, padrões de marcha de animais e por fim o modelo diferencial de um robô móvel.

O quarto capítulo detalha a metodologia aplicada na dissertação. Neste são apresentados o modelo dinâmico utilizado para as pernas, o controle de impedância aplicada a este modelo, assim como a definição da curva de Bézier aplicada para a trajetória dos pés, e o padrão de marcha de caminhada estática e trote inspirado no estudo de animais quadrúpedes e o controle cinemático planar do corpo utilizado. A metodologia também apresenta a implementação da simulação utilizando o Matlab e o CoppeliaSim com o motor físico Vortex.

Para o quinto capítulo são apresentados os resultados e análises obtidos das simulações realizadas para os dois padrões de locomoção.

O sexto e último capítulo apresenta a conclusão dos experimentos apresentados, assim como propostas de trabalhos futuros a serem desenvolvidos na sequência desta dissertação.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Dentre os grandes desafios para o controle de robôs com pernas estão incluídos os problemas de planejamento e controle de movimento com contatos intermitentes com solo, evitando colisões com o ambiente e o próprio corpo. É necessário abordar esses problemas de controle para aplicação real nesses robôs. Além disso, a aplicação desses controles em robôs reais deve considerar a segurança, o desempenho e a robustez a incertezas de atuação e sensoriamento [Fankhauser et al., 2016].

O objetivo deste capítulo é apresentar trabalhos presentes na literatura que abordam parte da solução desses problemas para robôs quadrúpedes, como geração de trajetória de passos, além de diferentes abordagens de controle de robôs quadrúpedes, incluindo controle de impedância com linearização por realimentação, controle preditivo baseado em modelo, e técnicas de aprendizado de máquinas.

### 2.1 Geração de trajetória de passos

Para o robô com pernas andar os pés precisam se mover dando passos, e estes podem ser dividido em duas fases: fase de suporte que sustenta o peso do robô, e fase de balanço onde os pés se movimentam em busca de um novo ponto de apoio. Este ciclo se repete em diferentes padrões de marcha. Como apresentado por Gehring et al. [2013], muito da mobilidade dos animais está na capacidade de mudar o padrão de marcha para se mover com eficiência em diferentes velocidades diante de perturbações causadas por irregularidades no solo.

A fim de obter essa mobilidade, o movimento correto de um passo nos robôs com pernas pode ser obtido por um controlador dedicado a cada perna do robô, utilizando como referência a trajetória dos passos definidos por um padrão de marcha. Estas trajetórias devem ser definidas utilizando curvas suaves, que podem ser alteradas conforme novos parâmetros de movimentação e marcha do robô.

O planejamento de trajetória comumente utiliza de diferentes curvas polinomiais. Um dos possíveis polinômios a se utilizar são os nomeados como curvas de Bézier, definidas como uma curva formada pela interpolação linear de um conjunto de pesos ou pontos de controle, representados como os pontos no diagrama apresentado na figura 18, a qual apresenta a trajetória do passo gerada por essas curvas [Hou et al., 2020, Jin et al., 2019]. Em [Hou et al., 2020] uma curva de Bézier de 8º grau com 9 pontos de controle descreve o movimento da fase de suporte dos pés e uma curva de 16º grau com 17 pontos de controle descreve o movimento da fase de balanço dos pés. Já em [Jin et al., 2019] é utilizada uma curva de Bézier 6º grau com 7 pontos de controle somente para a fase de balanço dos pés. Com estas curvas de Bézier sincronizadas é possível realizar diferentes padrões de marcha.

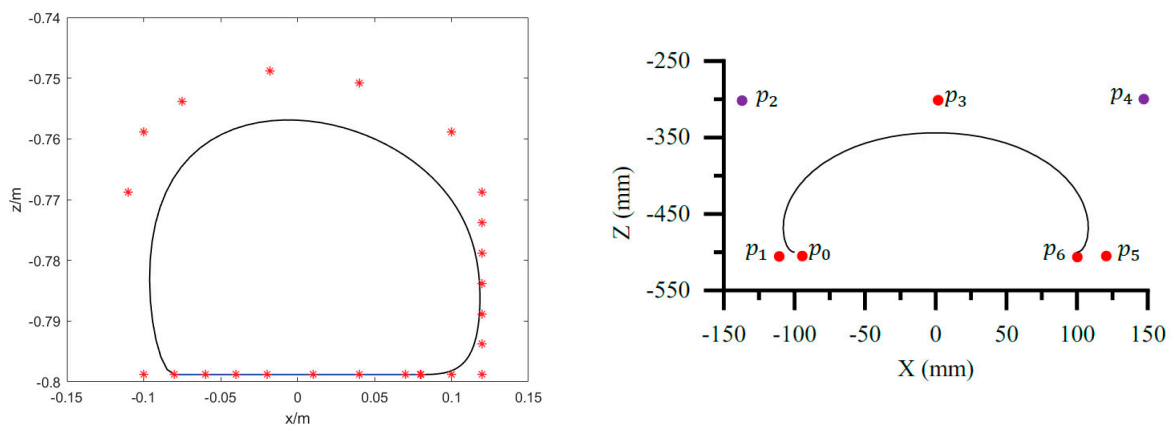


Figura 18 – Diagrama da curva de Bézier de 9º e 16º grau [Hou et al., 2020] (esquerda) e de 6º grau [Jin et al., 2019] (direita).

O problema de gerar trajetórias dos pés e padrões de marcha de um robô com pernas também pode ser solucionado com a formulação de problemas de otimização de trajetória dos pés, nos quais critérios de otimização e restrições como: o ponto de momento zero (ZMP), movimento do centro de massa do corpo, pontos de apoio e cones de atrito dos pés [Winkler et al., 2017]. A solução desses problemas de otimização são resolvidos por métodos numéricos. A figura 19 representa a vista superior de diferentes soluções numéricas da posição dos pés para diferentes padrões de marcha em relação o centro de massa, obtidas por otimização numérica. A solução vista na figura 19 (a) foi obtida utilizando o padrão de marcha de caminhada estática na qual uma perna se movimenta de cada vez. A solução ilustrada na figura 19 (b) corresponde ao padrão de marcha em trote no qual as pernas diagonalmente opostas se movimentam juntas. Na figura 19 (c) é apresentada a solução de um padrão de marchado do qual o centro de massa balança entre a direita e esquerda, e a solução da figura 19 (d) corresponde a um padrão similar ao padrão da figura 19 (c), porém com o balanço do centro de massa sendo realizado para frente e para trás.

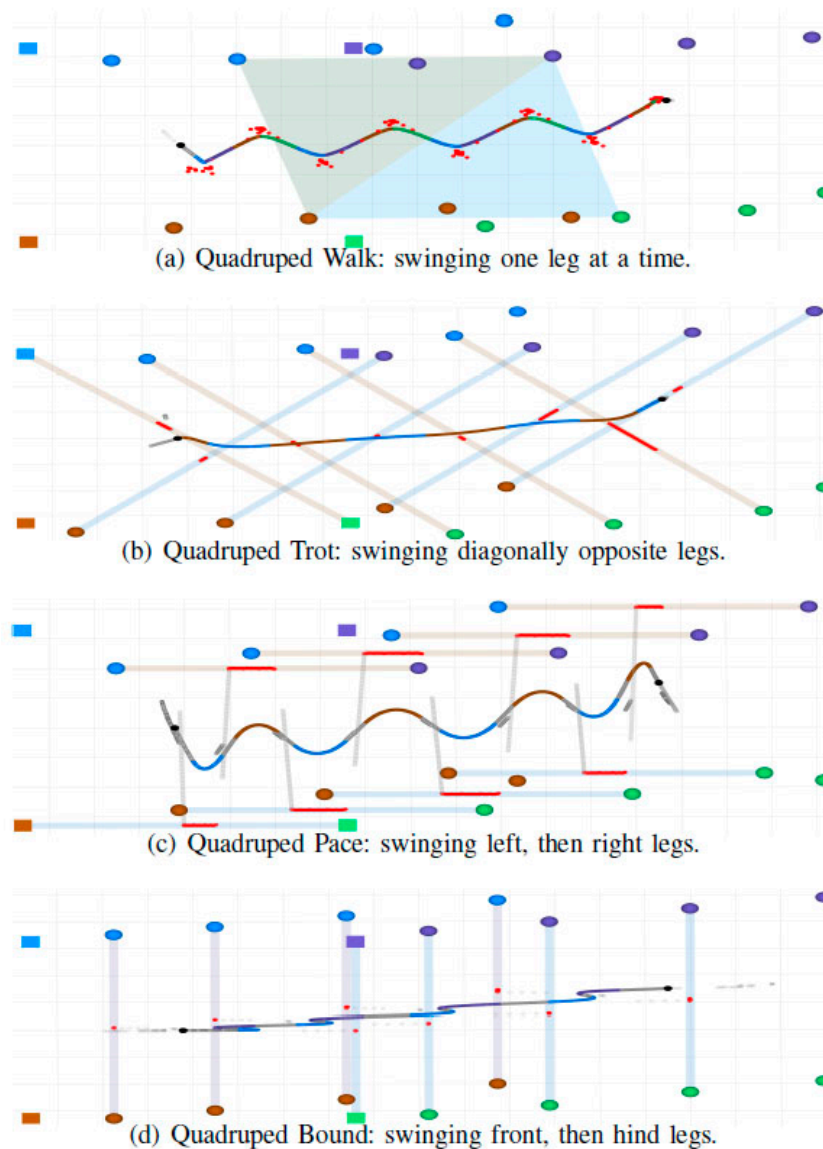


Figura 19 – Vista de cima para baixo dos movimentos gerados para um robô quadrúpede movendo-se da esquerda para a direita. Fonte: [Winkler et al., 2017].

A vantagem da utilização de técnicas de otimização é que mais critérios podem ser incluídos, como informações da irregularidade do terreno [Winkler et al., 2018], escorregamento dos pés [Carius et al., 2019], ou qualquer outra restrição e critério de otimização que possa contribuir para a solução do problema. A figura 20 referente a [Winkler et al., 2018] apresenta a solução de padrões de marcha para diferentes robôs com pernas, gerados para superar terrenos com diferentes superfícies, inclusive superfícies inclinadas e fendas, que um robô com pernas necessita ultrapassar. O conjunto destes problemas de otimização, resolvidos de forma rápida, podem ser utilizados em um controle preditivo por modelo [Winkler et al., 2018].

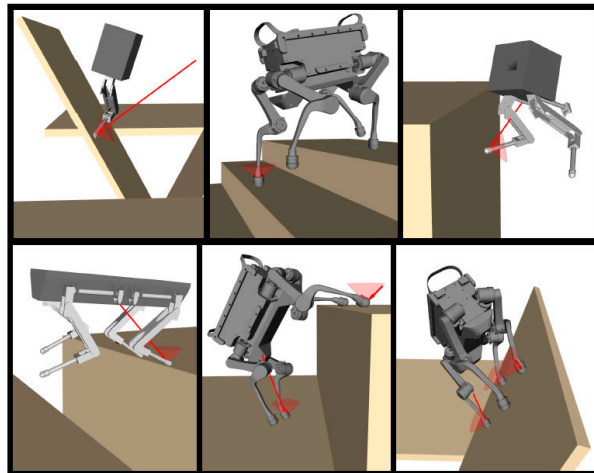


Figura 20 – Movimentos produzidos pelo planejador *Trajectory Optimizer for Legged Robots* para saltadores unilaterais, bípedes e quadrúpedes. Fonte: [Winkler et al., 2018].

## 2.2 Controle de robôs quadrúpedes

Existe uma relação relevante acerca do número de pernas nos robôs quadrúpedes. As quatro pernas possibilitam o robô se locomover mantendo um polígono de sustentação com uma perna no ar e as outras três em contato com o terreno, mas também é possível se mover com um padrão de corrida ou trote similar ao de animais. A fim de alcançar esse objetivo de movimentação e equilíbrio, é necessário um controle para o corpo e pernas do robô, porém a representação por modelos matemáticos destes sistemas mecânicos apresenta não linearidades. Devido a isso, técnicas de controle não linear podem ser empregadas para atingir o desempenho que se espera de um robô com pernas, incluindo o controle de impedância com linearização por realimentação (seção 2.2.1), o MPC (seção 2.2.2), e as técnicas de aprendizado de máquinas (seção 2.2.3).

### 2.2.1 Controle de impedância com linearização por realimentação

A técnica de controle conhecida como linearização por realimentação (em inglês, *feedback Linearization*) é uma das abordagens de controle não linear utilizada em robôs com pernas conforme proposto em [Boaventura et al., 2012, Pandala et al., 2020]. Essa linearização por realimentação pode ser aplicada tanto para controle das pernas, como também para controle do robô considerando o modelo de corpo completo (em inglês, *Whole-Body Control*) [Liu et al., 2019]. Uma possível abordagem da linearização é computar a dinâmica inversa para obter os torques das juntas do robô, conhecida como torque computado, utilizado tanto em robôs com atuação hidráulica quanto elétrica [Boaventura et al., 2012, Buchli et al., 2009, Semini et al., 2015, Park e Park, 2012].

O controle de impedância visa mudar a rigidez e amortecimento das pernas. Como apresentado na figura 21, a rigidez e amortecimento podem ser referentes ao espaço das juntas, mola de torção verde, ou espaço de trabalho, mola e amortecedor vermelhos. A mudança de rigidez e amortecimento permite absorver forças externas devido à irregularidade do terreno [Park e Park, 2012], e forças de impacto devido a movimentos dinâmicos dos passos [Boaventura et al., 2012], evitando danos as pernas e atuadores do robô. Um modelo do controle de impedância da perna na situação de contato em um terreno irregular, absorvendo as irregularidades do terreno, e representado na figura 22, evidenciando a complacência no eixo vertical conforme a aplicação de forças no pé do robô.

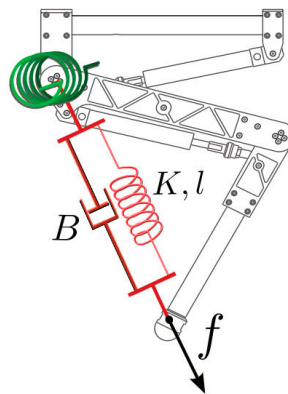


Figura 21 – Elementos virtuais do HyQ (Hydraulic Quadruped robot). Fonte: [Semini et al., 2015].

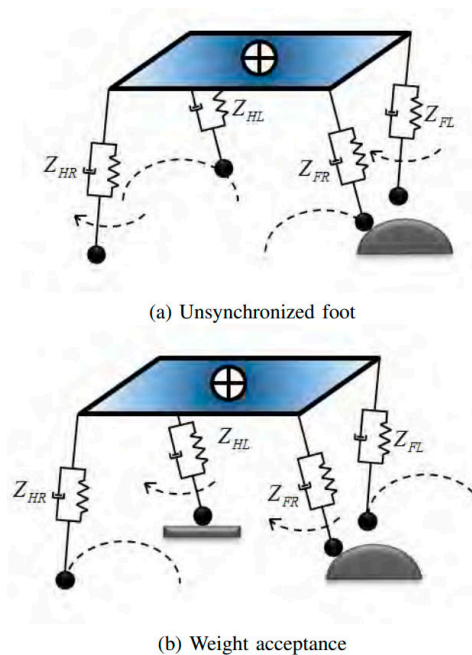


Figura 22 – Modelo de impedância de perna na situação de contato em terreno irregular. Fonte: [Park e Park, 2012].



## 2.2.2 Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC)

O Controle Preditivo baseado em Modelo consiste na solução de problemas de otimização em um horizonte de tempo finito resolvidos em tempo real, permitindo calcular a ação de controle necessária para o sistema controlado [Kang et al., 2022]. A figura 23 mostra uma representação do funcionamento do controle MPC, com a previsão dos passos em laranja.

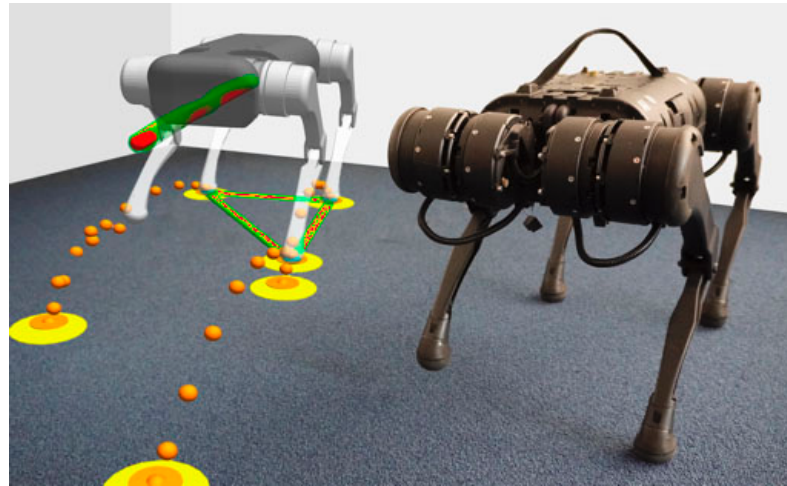


Figura 23 – Controlador de locomoção baseado em MPC em ação em um robô Unitree A1 simulado (esquerda) e real (direita). Dadas as referências geradas cinematicamente (curva vermelha e círculos amarelos), o planejador gera uma trajetória de base ideal (curva verde) e pontos de apoio (círculos laranja) que são viáveis dinamicamente. Fonte: [Kang et al., 2022].

O MPC tem sido utilizado como método de controle para sistemas não lineares, dado os avanços na velocidade de processamento de dados e da utilização de métodos matemáticos como álgebra de Lie para linearização de sistemas não lineares [Teng e Ghaffari, 2022], ou do algoritmo de Gaus-Newton para solução de sistemas não lineares [Kang et al., 2022]. A figura 24 ilustra a utilização da álgebra e matrizes de Lie para a solução de sistemas utilizados em MPC. Estes avanços tecnológicos e matemáticos permitiram que os problemas de otimização fossem resolvidos de forma rápida para aplicação do controle de um sistema não linear.

O MPC se encontra cada vez mais presente em aplicações de robótica, desde robôs bípedes [Chignoli et al., 2021] quanto em robôs quadrúpedes [Dini e Majd, 2020, Grandia et al., 2019, Rathod et al., 2021, Norby et al., 2022]. Esta técnica é utilizado para controlar a posição do centro de massa do robô [Horvat et al., 2017], no controle do movimento corpo do robô baseado na informação do terreno [Villarreal et al., 2020] e para a locomoção dinâmica de robôs quadrúpedes [Kim et al., 2019].



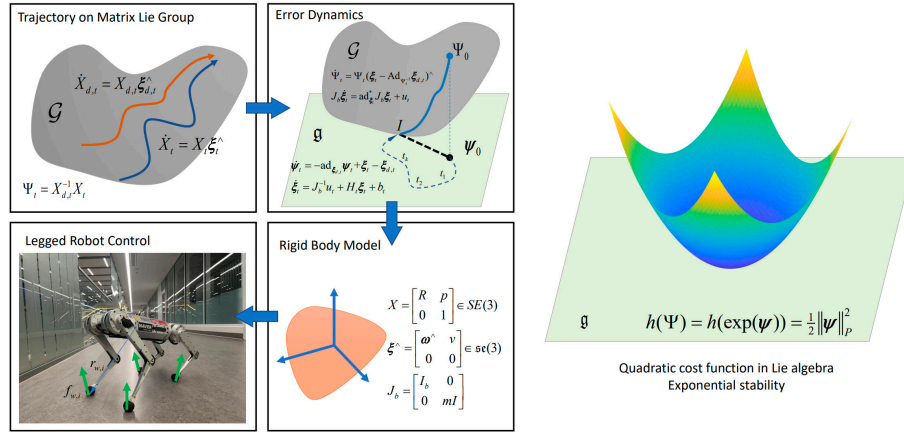


Figura 24 – O erro de estado proposto do MPC. O error é definido em um grupo das matrizes de Lie e linearizado na álgebra de Lie. Fonte: [Teng e Ghaffari, 2022].

### 2.2.3 Controle por aprendizado de máquina

O aprendizado de máquina explora o estudo e construção de algoritmos que podem ser melhorados via dados de treinamento sem programação explícita [Koza et al., 1996], automatizando a construção de modelos analíticos para análise de dados, tomada de decisões e controle. A utilização do aprendizado de máquina tem se tornado comum em diferentes aplicações.

No controle de robô quadrúpedes, uma das aplicações é na tomada de decisão para a escolha ótima dos pontos de apoio dos pés, como apresentado por Belter et al. [2019] que utilizou da técnica de aprendizagem profunda chamada redes neurais convolucionais. Essas redes neurais foram treinadas para aprender e enviar para o controle do robô a relação entre o mapa de elevação local e a qualidade dos potenciais pontos de apoio, considerando restrições cinemáticas, colisões e a características geométricas de cada célula no mapa de elevação, como apresentado na figura 25.

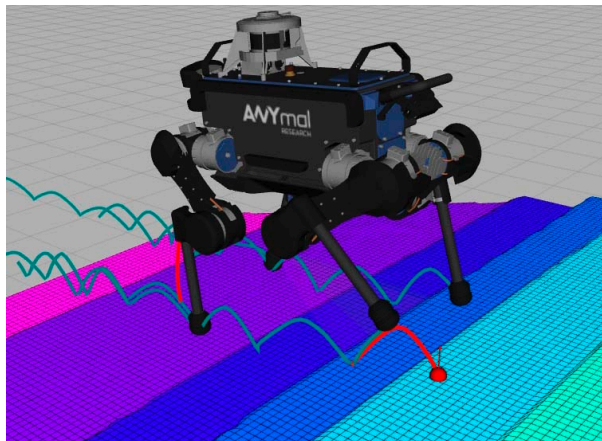


Figura 25 – O problema de seleção de ponto de apoio para um robô quadrúpede. Fonte: [Belter et al., 2019].

O aprendizado de máquina, utilizando da técnica de aprendizado por reforço, surge como uma alternativa para o controle do corpo do robô, como visto em [Lee et al., 2020]. Utilizando funções de recompensa e sensores proprioceptivos de posição das juntas e inercia do corpo do robô, uma rede neural convolucional é treinada em ambiente de simulação com um modelo do robô. Na simulação o robô é treinado em diferentes ambientes gerados proceduralmente, ou seja, ambientes gerados com procedimentos aleatórios a fim de produzir sempre ambientes diferentes um dos outros. A visão geral desse método de treinamento utilizado é representado na figura 26, a qual detalha as políticas de treinamento de duas redes neurais, a rede neural professor e a rede neural estudante.

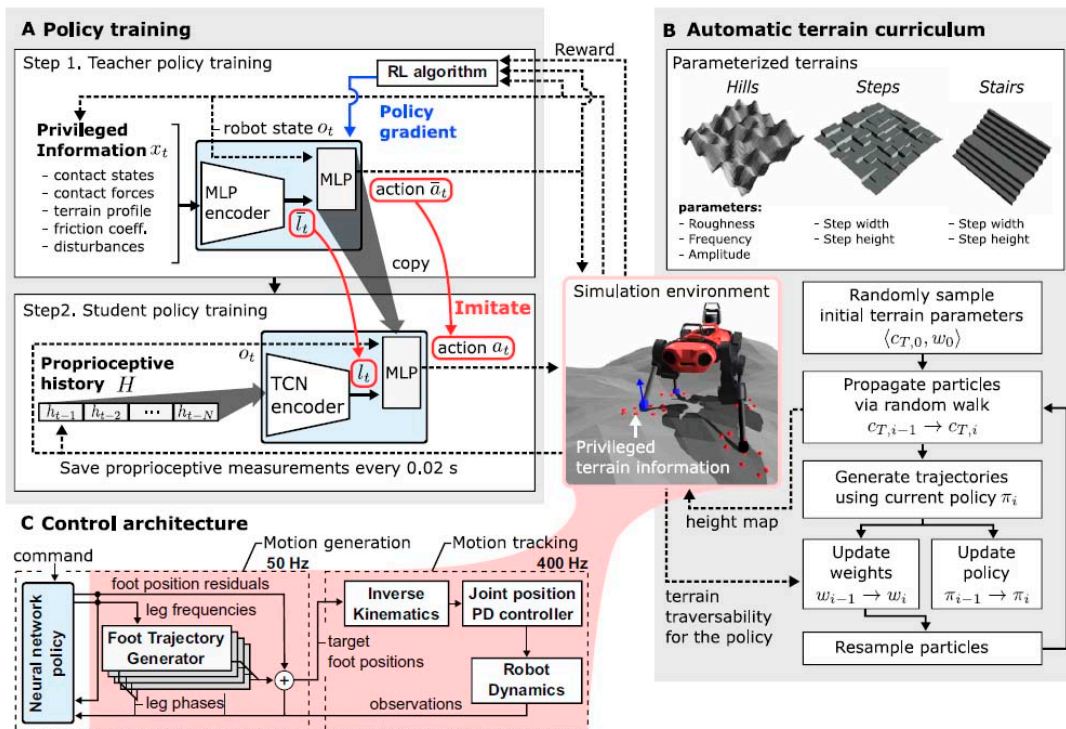


Figura 26 – Visão geral do método de treinamento do controlador de locomoção proprioceptivo. Fonte: [Lee et al., 2020].

Lee et al. [2020] treinaram a rede neural nomeada de professor em diferentes terrenos gerados proceduralmente e com informações privilegiadas acerca do terreno, e rede neural professor ensinou a rede neural nomeada estudante que não possuía essas informações privilegiadas. Esta abordagem de professor e estudante foi utilizada com objetivo de obter uma arquitetura de controle proprioceptiva generalista para a plataforma robótica ANYmal caminhar mesmo em ambientes desconhecidos.

Após o término do treinamento das redes neurais, o controle desenvolvido com rede neural em ambiente simulado foi aplicado no robô ANYmal e testado em diferentes ambientes naturais como trilhas íngremes nas montanhas, riachos com água corrente, lama, vegetação densa, cascalho solto, colinas cobertas de neve e uma floresta úmida. O ANYmal não apresentou problemas para se locomover nestes ambientes como visto na figura 27.



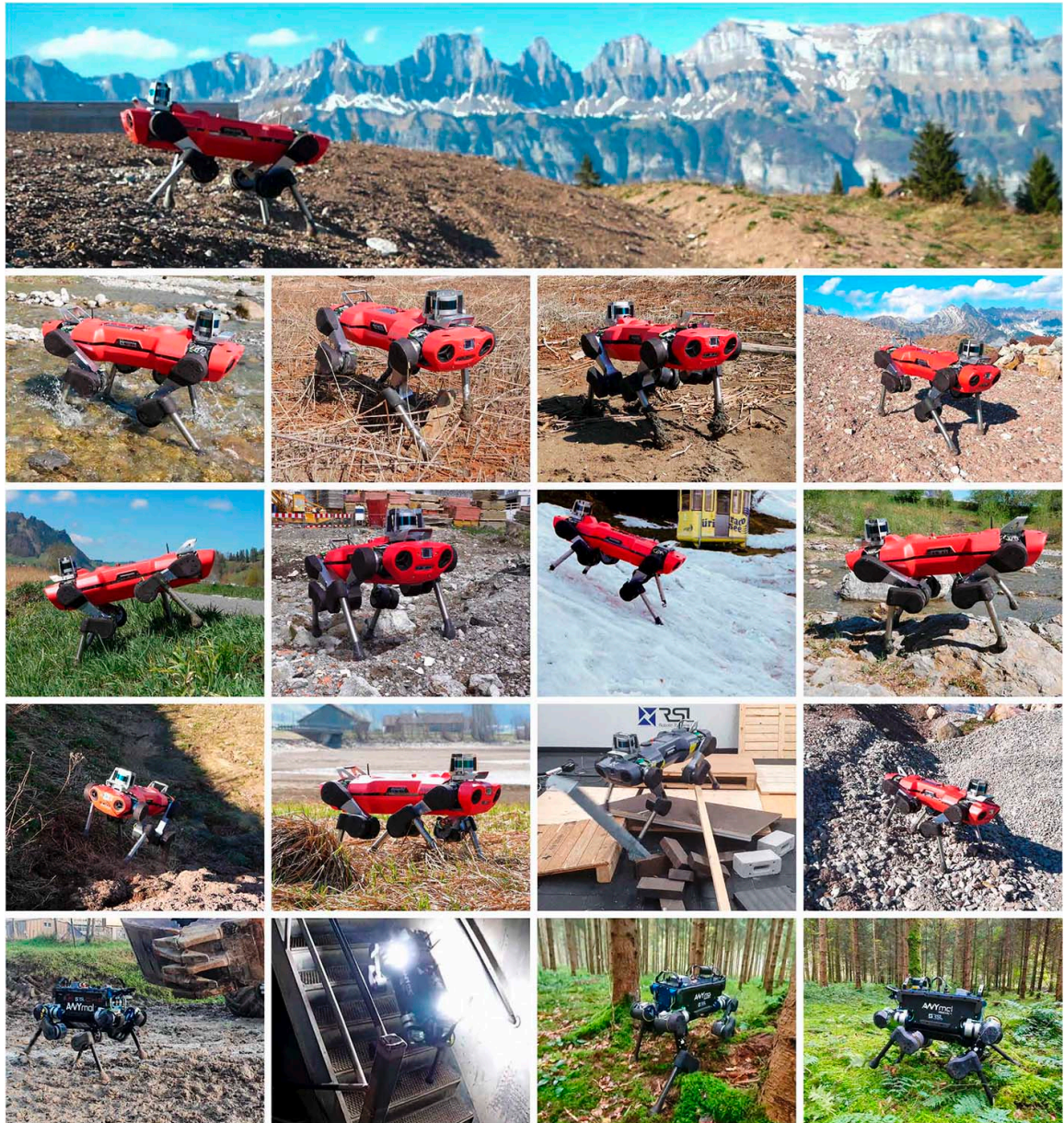


Figura 27 – Controlador de locomoção proprioceptivo implementado e testado em diversos ambientes desafiadores. Fonte: [Lee et al., 2020].

Miki et al. [2022] apresentaram uma continuação do artigo [Lee et al., 2020] em que uma rede neural foi treinada com aprendizado por reforço para utilizar sensores proprioceptivos, posição das juntas e inércia do corpo, como em [Lee et al., 2020], e com o sensor exteroceptivo LIDAR (em inglês *Light Detection and Ranging*). A figura 28 mostra que [Miki et al., 2022] utilizou a mesma abordagem de professor e estudante utilizados em [Lee et al., 2020] para o controle proprioceptivo. Outra rede neural foi treinada para movimentar o robô ANYmal utilizando os mapas de elevações gerados por meio do sensor exteroceptivo. Foi usada a mesma abordagem de treinamento em ambiente virtual e testes em ambiente real.

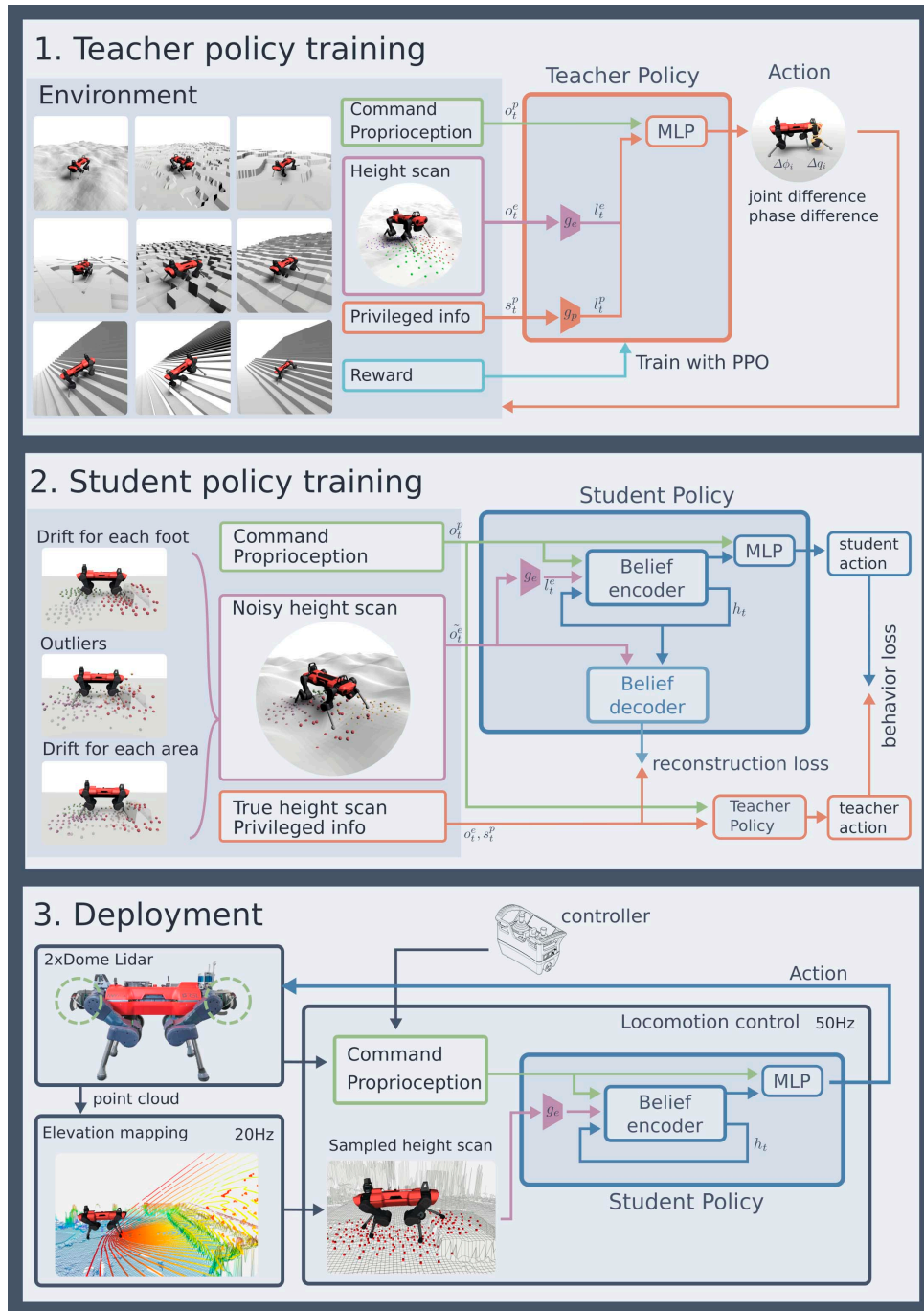


Figura 28 – Visão geral dos métodos de treinamento e implantação do controlador de locomoção proprioceptivos e exteroceptivos. Fonte: [Miki et al., 2022].

A rede neural treinada permitiu uma locomoção mais robusta em ambientes desafiadores, mesmo em situações onde os dados dos sensores exteroceptivos são incertos, incluindo a operação em ambientes com presença de fumaça, poeira, objetos translúcidos, variações de iluminação. Nesses ambientes desafiadores a rede neural utiliza mais as informações dos sensores proprioceptivos. A figura 29 mostra esta rede neural em funcionando exibindo os mapas de elevação gerados em cada um destes ambientes desafiadores.



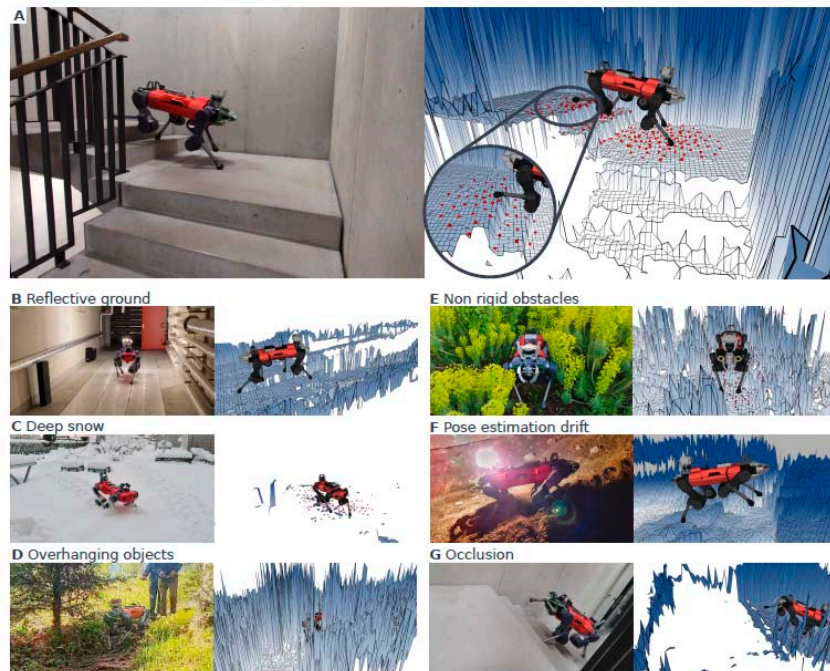


Figura 29 – O controlador de locomoção proprioceptivos e exteroceptivos percebe o ambiente por amostras de altura (pontos vermelhos) de um mapa de elevação (a). O controlador é resistente a muitos desafios de percepção comumente encontrados, como informações de mapa ausentes em campo devido à falha de detecção (b, c, g), informações de mapa enganosas devido a terreno não rígido (d, e) e desvio de estimativa de pose blue(f). Fonte: [Miki et al., 2022].

Outra aplicação abordada no aprendizado de máquina consiste no treinamento de uma rede neural a fim de controlar a locomoção de diferentes plataformas robóticas com quatro pernas e morfologia comum, independente das diferenças em suas dimensões e massa [Feng et al., 2022], como visto na figura 30.

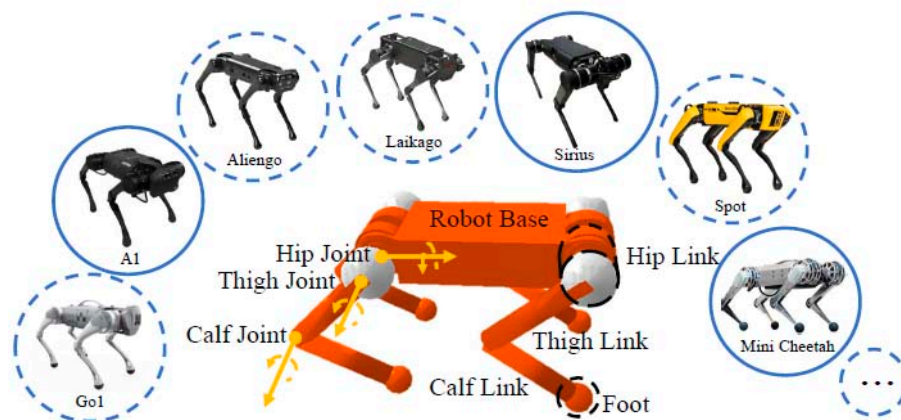


Figura 30 – Diferentes robôs quadrúpedes com modelo morfológico comum. Fonte: [Feng et al., 2022].

A proposta do controle de Feng et al. [2022] é treinar uma rede neural por meio do aprendizado por reforço com objetivo de controlar diferentes plataformas robóticas com morfologia comum em um ambiente virtual, como mostrado na figura 31. O treinamento desta rede neural chamada de GenLoco, *Generalized Locomotion Controllers for Quadrupedal Robots*, usou diferentes modelos de robôs quadrúpedes com morfologia similar alterando os comprimentos e massas dos elos e corpo dos robôs.

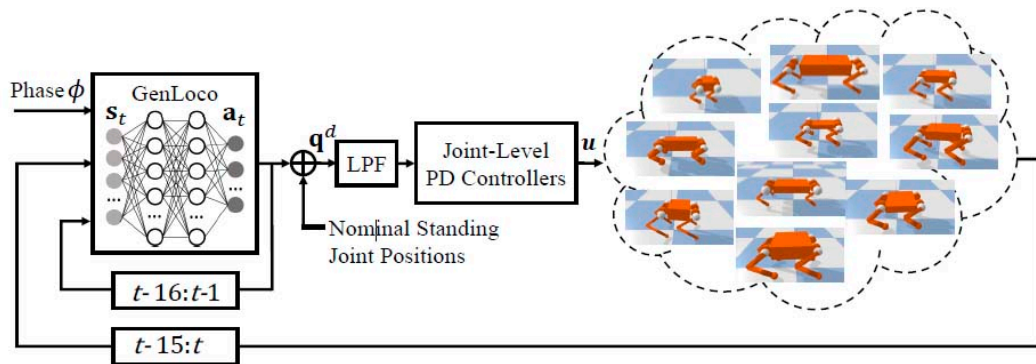


Figura 31 – Diagrama de controle para diferentes robôs quadrúpedes com modelo morfológico comum. Fonte: [Feng et al., 2022].

O treinamento desta rede neural permitiu o controle de locomoção generalizado para diferentes robôs quadrúpedes sem necessariamente treinar explicitamente nos robôs específicos que foram controlados. Essa rede neural foi testada em diferentes plataformas robóticas reais com morfologia similar como apresentado na figura 32.

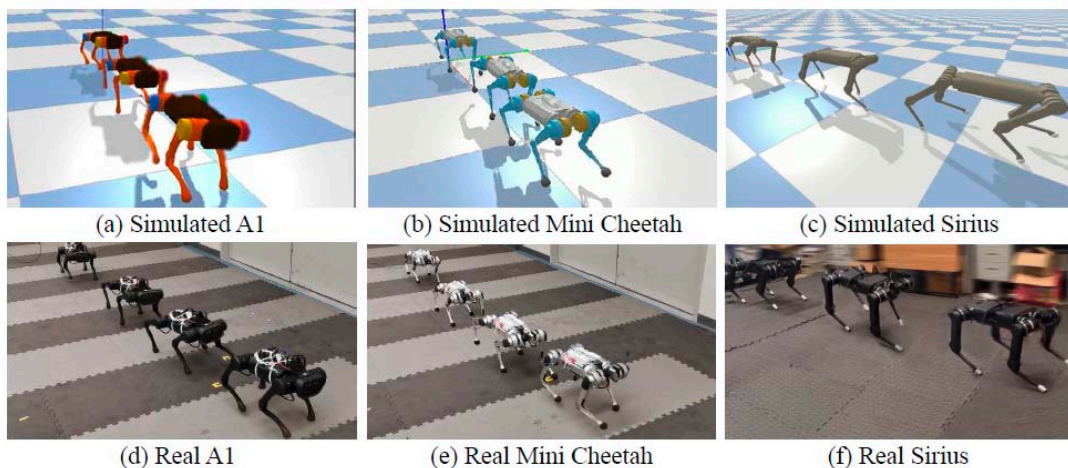


Figura 32 – Teste em diferentes robôs quadrúpedes simulados e reais. Realizando marchas ritmadas usando um único controlador de locomoção. As imagens (a) e (d) são do robô A1 da Unitree, as imagens (b) e (e) são do robô Mini Cheetah, e as imagens (c) e (f) são do robô Sirius. Fonte: [Feng et al., 2022].

## 2.3 Contribuições desta dissertação

As contribuições dessa dissertação correspondem ao estudo e implementação do controle de impedância das pernas de um robô quadrúpede, permitindo que estas possuam um amortecimento a forças externas aplicadas nos pés, assim como absorvam forças de impacto dos pés com o solo, semelhante o apresentado na sessão 2.2.1. Além disso, é possível citar a implementação de dois padrões de locomoção para o robô - caminhada estática e trote, gerando as trajetórias de suporte e balanço de cada pé utilizando uma curva de Bézier fechada de 6º grau, possuindo um grau menor do que os utilizados nos trabalhos apresentados na sessão 2.1. Essa dissertação também contribui com o desenvolvimento de um modelo cinemático diferencial planar do corpo do robô assim como um controle de posição no plano usando este modelo. As pesquisas realizadas para esta dissertação de mestrado renderam a publicação de 2 artigos descritos a seguir:

- O primeiro artigo [Pedro e Freitas, 2021] foi publicado com o título: “Controle complacente de passo para um robô quadrúpede utilizando curvas de Bézier” e apresentado no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI) em 2021. Neste artigo é apresentada a modelagem dinâmica de uma perna do robô quadrúpede A1, um controle de impedância da perna no espaço das juntas do robô e um planejador de trajetória dos pés do robô utilizando uma curva de Bézier de 5º grau. O modelo da perna, controle de impedância e planejador de trajetória foram simulados no Matlab utilizando a ferramenta Simulink.
- O segundo artigo [Pedro e Freitas, 2022] foi publicado com o título “Controle dinâmico de marcha e passo para um robô quadrúpede utilizando curvas de Bézier” e apresentado no Congresso Brasileiro de Automática (CBA) em 2022. Este artigo é uma continuação do primeiro, utilizando do mesmo modelo dinâmico, porém com um controle de impedância no espaço de tarefa do pé do robô e utilizando uma curva de Bézier de 6º grau com um ajuste de curva de modo que a fase de suporte tivesse um tempo do ciclo do passo maior que a fase de balanço. Com esta curva de Bézier foram implementados os padrões de marcha de caminhada estática e trote para as pernas do robô A1. O controle da perna, controle de impedância e padrão de marcha foram implementados no Matlab para o controle das quatro pernas do robô A1 simulados no software CoppeliaSim utilizando o motor físico Vortex.

# Capítulo 3

## Fundamentos teóricos

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica necessária para compreensão da metodologia aplicada para o controle de locomoção utilizado nesta dissertação. Primeiramente é mostrada a dinâmica e controle de força no espaço de tarefas de um manipulador robótico, pois as pernas do robô são modeladas como um manipulador robótico. Em seguida são abordadas as curvas de Bézier, e por fim, o modelo diferencial planar de um robô móvel, pois este modelo é utilizado no desenvolvimento do modelo cinemático do corpo apresentado no capítulo 4.

### 3.1 Dinâmica e controle de força do espaço de tarefas de um manipulador

As tarefas de um manipulador no espaço são tipicamente planejadas em relação à posição e velocidade do seu efetuador, ou seja, a ponta do manipulador em que estaria uma garra, uma ferramenta, um pé ou qualquer estrutura que pode interagir com o ambiente para a execução de sua tarefa dentro do seu espaço de trabalho. Neste contexto, utilizar um controle no espaço de trabalho do efetuador é uma abordagem mais direta de controle comparada com enviar coordenadas das posições das juntas do manipulador. A seguir é detalhada a dinâmica no espaço de tarefa e como podemos usar um controle de posição, orientação e força para um manipulador robótico.

#### 3.1.1 Dinâmica no espaço das juntas de um manipulador

A equação típica da dinâmica do movimento de um manipulador robótico no espaço das juntas, no caso a equação (3.1), pode ser obtida utilizando o método de Euler-Lagrange. Por meio deste método de modelagem dinâmica, é possível encontrar a seguinte equação não linear:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau, \quad (3.1)$$



onde  $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é a matriz de inércia,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é a matriz de forças de Coriolis,  $g(q) \in \mathbb{R}^n$  é o vetor de forças gravitacionais,  $\tau \in \mathbb{R}^n$  é o vetor de torques das juntas,  $q$ ,  $\dot{q}$  e  $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$  são a posição, velocidade e aceleração das  $n$  juntas de um manipulador robótico.

A interação de um manipulador com o ambiente, por meio do efetuador, produz forças e momentos na sua extremidade. Sendo assim, seja  $F_e = [F_x, F_y, F_z, n_x, n_y, n_z]^T$  o vetor de forças e torques externos no efetuador. Os componentes deste vetor em cada direção do eixo coordenado são  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  para força e  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  para torque. Por meio da matriz jacobiana do efetuador e o princípio do trabalho virtual é possível encontrar uma relação entre as forças externas do efetuador  $F_e$  e o torque gerado nas juntas do manipulador devido forças externas  $\tau_e$ . Esta relação é apresentada na equação (3.2):

$$\tau_e = J^T(q) F_e, \quad (3.2)$$

onde  $J^T(q) \in \mathbb{R}^{n \times 6}$  é a transposta da matriz Jacobiana do efetuador.

Quando o manipulador está em contato com o ambiente por meio do efetuador, a equação (3.1) precisa ser modificada para incluir as reações de força e torque aplicados no efetuador. A equação de movimento modificada (3.3) que inclui as forças e torques resultantes no efetuador, pode ser obtido adicionando os termos da equação (3.2) na equação (3.1), resultando na equação (3.3):

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) + J^T(q) F_e = \tau. \quad (3.3)$$

A equação (3.3) representa a equação da dinâmica de movimento de um manipulador de  $n$  juntas considerando as possíveis forças externas aplicadas no efetuador devido a sua interação com o ambiente.

### 3.1.2 Controle de torque com linearização por realimentação

Para o sistema dinâmico apresentado na equação (3.3), é proposta uma linearização por realimentação. A aplicação desta estratégia de linearização em sistemas mecânicos também é conhecida como torque computado ou controle de torque. O controle de torque permite a aplicação de várias formas de controle auxiliar, incluindo controle de impedância, controle de forças de contato, controle de modelo virtual, controles baseados em modelo, controle baseado em dinâmica de corpo rígido e controle de espaço operacional [Boaventura et al., 2012]. Para esta dissertação é escolhida uma equação de controle por dinâmica inversa modificada apresentada pela equação (3.4):

$$\tau = M(q) a_q + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) + J^T(q) a_f, \quad (3.4)$$

onde  $a_q \in \mathbb{R}^n$  e  $a_f \in \mathbb{R}^n$  são funções de controle auxiliar de aceleração e força respectivamente.

### 3.1.3 Relação do espaço de trabalho com espaço das juntas

O controle auxiliar de aceleração da equação (3.4) de torque computado está no espaço das juntas do manipulador, porém é desejado que o controle auxiliar seja projetado no espaço de tarefa do efetuador. Portanto o controle auxiliar de aceleração  $a_q$  precisa ser representado em coordenadas do espaço de trabalho do manipulador. Esta transformação de coordenadas das juntas para o efetuador é possível utilizando a derivada da equação da cinemática diferencial inversa do manipulador, apresentadas nas equações (3.5) e (3.6).

$$\dot{q} = J(q)^{-1}\dot{x}, \quad (3.5)$$

$$\ddot{q} = J(q)^{-1}[\ddot{x} - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}]. \quad (3.6)$$

Desta forma,  $J(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é a Jacobiana e  $J(q)^{-1}$  é a inversa da Jacobiana,  $\dot{J}(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é a derivada desta Jacobiana no tempo,  $\dot{q}$  e  $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$  são os vetores de velocidade e aceleração no espaço das juntas, e  $\dot{x}$  e  $\ddot{x} \in \mathbb{R}^6$  são os vetores de velocidades e aceleração linear e angular no espaço de trabalho do manipulador.

Igualando as equações (3.3) e (3.4), é possível obter a equação (3.7):

$$a_q = \ddot{q} + M^{-1}(q)J^T(q)(F_e - a_f), \quad (3.7)$$

Trocando as variáveis  $\ddot{q}$  e  $\ddot{x}$  da equação (3.6) por  $a_q$  e  $a_x$  tal que  $a_q = J(q)^{-1}[a_x - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}]$ , e em seguida substituindo na equação (3.7) é possível encontrar a equação (3.8):

$$a_x = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} + J(q)M^{-1}(q)J^T(q)(F_e - a_f), \quad (3.8)$$

Pela equação (3.6) é visto que  $\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}$ . Com essa relação a equação (3.8) é reescrita resultando na equação (3.9):

$$\ddot{x} = a_x - J(q)M^{-1}(q)J^T(q)(F_e - a_f). \quad (3.9)$$

Existe uma vantagem conceitual em separar os termos de controle de posição  $a_x$  e força  $a_f$ , utilizando funções de controle separadas para posição e força. No entanto, por motivos de simplificação, é assumido  $a_f = F_e$  para cancelar a força do ambiente  $F_e$ , e recuperar o sistema integrador duplo do espaço de trabalho, conforme apresentado em [Spong et al., 2006]. Com esta simplificação e assumindo que quaisquer termos adicionais de realimentação de força estão incluídos no termo de controle,  $a_x$  é obtido por:

$$\ddot{x} = a_x. \quad (3.10)$$

Isso não acarreta perda de generalidade, desde que a Jacobiana seja inversível [Spong et al., 2006].

### 3.1.4 Controle de impedância no espaço de trabalho

O controle de impedância tem como ideia regular a impedância mecânica, a inércia aparente, o amortecimento e a rigidez por meio da realimentação de força. Para o controle auxiliar  $a_x$  é formulado a seguinte lei de controle de impedância [Spong et al., 2006]:

$$a_x = \ddot{x}_d - M_d^{-1} [B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) + F_e], \quad (3.11)$$

onde  $M_d \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  é uma matriz de inércia desejada,  $B_d \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  é uma matriz de amortecimento desejado,  $K_d \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  é uma matriz de rigidez desejada, e  $x_d$ ,  $\dot{x}_d$  e  $\ddot{x}_d \in \mathbb{R}^6$  são a posição, velocidade e aceleração da trajetória desejada utilizada como referência. Substituindo a equação (3.11) na equação (3.10), e assumindo os erros de aceleração, velocidade e posição como  $\ddot{e} = (\ddot{x} - \ddot{x}_d)$ ,  $\dot{e} = (\dot{x} - \dot{x}_d)$  e  $e = (x - x_d)$ , é obtida a seguinte dinâmica do erro:

$$M_d \ddot{e} + B_d \dot{e} + K_d e = -F_e, \quad (3.12)$$

que resulta nas propriedades de impedância desejadas do manipulador. Observe que, para  $F_e = 0$ , o rastreamento da trajetória de referência  $x_d(t)$  é alcançado; já no caso de forças externas sendo aplicadas ao sistema, o rastreamento não é necessariamente alcançado. A realimentação do erro no espaço de trabalho é obtida utilizando a cinemática direta e diferencial do manipulador do robô.

## 3.2 Curvas de Bézier

A matemática básica para o desenvolvimento das curvas de Bézier foi estabelecida em 1912, porém estes polinômios só foram amplamente divulgados na década de 1960 pelo engenheiro francês Pierre Bézier, que os utilizou para projetar carrocerias de automóveis na Renault [Farin, 2014].

A curva de Bézier  $B(u)$  é definida como sendo a curva formada pela interpolação linear de um conjunto de pesos  $W_0$  a  $W_{n+1}$ , onde  $n \in \mathbb{N}$  corresponde ao seu grau. A construção desta curva é realizada utilizando a equação (3.13) que define uma curva de Bézier de qualquer ordem:

$$B(u) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-u)^{n-i} u^i W_i, \quad (3.13)$$

sendo  $\binom{n}{i}$  o coeficiente binominal calculado como:

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}. \quad (3.14)$$

O termo  $B(u) \in \mathbb{R}^m$  representa a curva de Bézier,  $W_i \in \mathbb{R}^m$  são vetores de peso da curva,  $u$  é a variável de parametrização da curva onde  $\{u \in \mathbb{R} \mid 0 \leq u \leq 1\}$ .

A curva de Bézier pode ter um tempo de percurso desejado correlacionado o intervalo de parametrização  $u$  de 0 a 1 com o tempo. A curva de Bézier inclusive pode correlacionar tempos diferentes de percurso em segmentos da curva de Bézier, desde que respeite o intervalo de parametrização de 0 a 1.

As derivadas de uma curva de Bézier também são curvas de Bézier com grau reduzido, podendo ser obtidas recursivamente com a equação (3.15):

$$\dot{B}(u) = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} (1-k)^{k-i} u^i n (W_{i+1} - W_i), \quad (3.15)$$

onde  $\binom{k}{i}$  corresponde ao coeficiente binomial da derivada,  $k$  é o grau reduzido da curva de Bézier sendo  $k = n - 1$ , e  $n(W_{i+1} - W_i)$  é o cálculo dos novos vetores de pesos com base no grau e pontos de controle da curva de Bézier derivada.

### 3.2.1 Ajuste de curva

Quando é desejado que uma curva de Bézier passe em algum ponto determinado que pertença à curva, esta curva pode ser ajustada a um conjunto de pontos de controle  $P_i$ , determinando inclusive em que valor do intervalo de parametrização  $u$  este ponto de controle é alcançado. Os pesos  $W_i$  da curva de Bézier que ajustam a curva com base nesses pontos de controle são calculados usando a equação (3.16):

$$W = M^{-1} (T^T T)^{-1} T^T P, \quad (3.16)$$

onde  $W \in \mathbb{R}^{(n+1) \times m}$  é a matriz referente aos pesos, sendo  $W_i$  cada linha correspondente,  $M \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$  é a matriz diagonal da curva de Bézier referente aos coeficientes binomiais obtida pela expansão polinomial da curva de Bézier,  $P \in \mathbb{R}^{(n+1) \times m}$  corresponde a matriz de pontos de ajuste da curva, onde cada linha da matriz é referente a  $P_i$ , e  $T \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$  é uma matriz com informações temporais, cujas linhas são vetores  $u_i = [1 \ u \ u^2 \ \dots \ u^n]$  contendo os tempos determinados para  $P_i$  dentro do intervalo de 0 a 1.

### 3.3 Padrões de marcha

O padrão de marcha define como um animal se locomove. No estudo de padrões de marcha de animais foram definidos alguns termos para caracterizar um passo e o padrão de marcha. As definições destes termos são: *passo* - ciclo completo de movimento de uma perna; *frequência de passo* - quantidade de passos dados em uma unidade de tempo; *comprimento do passo* - distância percorrida em cada passo; *fator de ocupação* - fração de tempo do passo que esta na fase de suporte dos pés; *fase relativa* — diferença do tempo do ciclo do passo de uma perna em relação uma perna escolhida como referencial, equivalente à diferença em que cada perna começa o ciclo do seu movimento [Alexander, 1984].

Padrões de marcha tem diferentes classificações. Uma das classificações distingue os padrões de marcha entre caminhada ou corrida, tendo como principal diferença o fator de ocupação, ou seja, a fração de tempo do passo que esta na fase de suporte dos pés, onde 1 seria o pé sempre na fase de suporte durante todo ciclo do passo e 0 o pé estaria sempre na fase de balanço. Corridas costumam possuir fator de ocupação menor que 0.5 do tempo do ciclo do passo, e caminhadas costumam ter valores acima de 0.5 [Alexander, 1984].

Os padrões de marcha também podem ser classificados como simétricos ou assimétricos. Os padrões simétricos são os padrões onde as pernas possuem o mesmo fator de ocupação e fase relativa de 0.5 em relação a alguma perna; já nos assimétricos, as pernas podem possuir diferentes fases e fatores de ocupação entre si [Alexander, 1984]. Desta maneira, corridas correspondem a padrões assimétricos, tendo momentos que os dois pés estão fora de contato com o chão, e as caminhadas geralmente correspondem a padrões simétricos, possuindo momentos que dois ou mais pés estão em contato com chão [Alexander, 1984].

Padrões de marcha de animais quadrúpedes possuem nomes específicos como andar, trotar e marchar, sendo estes padrões simétricos; e galope leve, galopar e saltar, sendo assimétricos [Alexander, 1984]. Estes padrões de marcha são exemplificados na figura 33 com as fases relativas referentes de cada perna. Quando animais se locomovem, as movimentações das pernas apresentam fases relativas geralmente próximas as apresentadas na figura 33. Os padrões de caminhada são executados somente em velocidades baixas. Os mamíferos quadrúpedes geralmente utiliza padrões de marcha simétricos para corridas lentas e para corridas rápidas padrões assimétricos. O trote é o padrão de corrida mais comum encontrado na natureza.

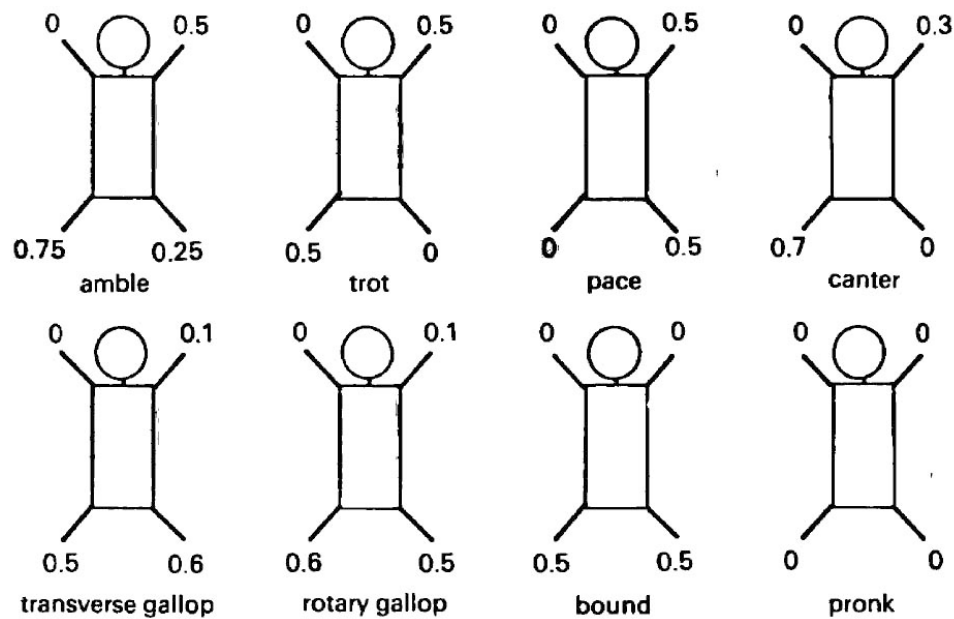


Figura 33 – Diagramas de marchas quadrúpedes com fases relativas típicas dos pés. Fonte: [Alexander, 1984].

### 3.4 Modelo de robô móvel diferencial

Apesar desta dissertação tratar de um robô móvel com pernas, o modelo cinemático planar utilizado para o corpo do robô com pernas foi deduzido a partir do modelo cinemático de um robô móvel diferencial. Essa seção apresenta o modelo diferencial de um robô móvel, e detalhes do modelo cinemático planar do corpo utilizado para controlar o robô quadrúpede são apresentados no capítulo 4.

O robô móvel diferencial consiste em um robô com duas rodas laterais que possuem o controle de velocidade independentes. As rodas são definidas como roda direita e roda esquerda e podem se mover em forma de arco quando possuem velocidades de rotação diferentes, por possuírem centro de giro coincidente alinhado aos eixos das rodas, denominado centro instantâneo de rotação (*CIR*). O modelo cinemático diferencial é baseado no unicyclo, que corresponde a um dos modelos mais simples de robôs móveis e considera que o robô só tem velocidade linear  $v_{rx}$  e velocidade angular  $\omega_{rz}$ , e não possui velocidade em  $v_{ry}$  devido a restrições não-holonômicas das rodas. Uma representação do robô diferencial é apresentada na figura 34, assim como as variáveis utilizadas e o sistemas de coordenadas do robô.

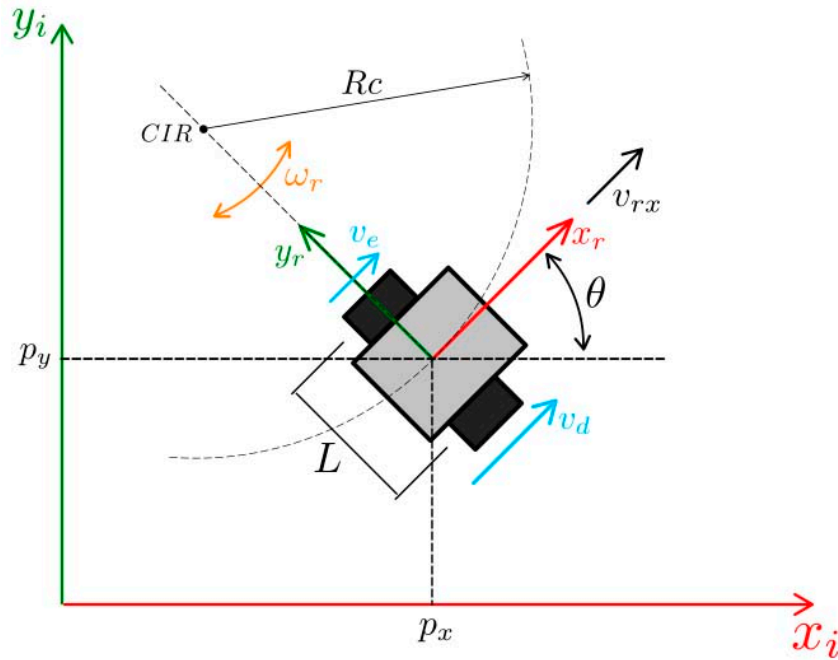


Figura 34 – Diagrama de um robô móvel diferencial planar.

Considerando as velocidades lineares  $v_d$  e  $v_e$  para as velocidades do lado direito e esquerdo respectivamente,  $L$  como largura entre as rodas do robô e  $\theta$  como a orientação do robô móvel no plano. As velocidades lineares  $v_x$ ,  $v_y$  e angular  $\omega$  no referencial inercial podem ser obtidas com a seguinte cinemática diferencial direta dada pela equação (3.17), e as velocidades lineares das rodas do robô diferencial podem ser obtidas pela cinemática diferencial inversa apresentada na equação (3.18) em função da velocidade linear  $v_{rx}$  e angular  $\omega_r$  do robô:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta)}{2} & \frac{\cos(\theta)}{2} \\ \frac{\sin(\theta)}{2} & \frac{\sin(\theta)}{2} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_e \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{L}{2} \\ 1 & -\frac{L}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{rx} \\ \omega_r \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Na figura 34, A letra  $Rc$  representa o raio da curva realizado pelo robô. Quando  $Rc$  é igual a  $\infty$ ,  $v_d$  e  $v_e$  são iguais e robô se movimenta para frente ou para trás. Quando  $Rc$  é igual a 0,  $v_d$  é igual a menos  $-v_e$  e o robô gira no seu eixo. Para qualquer outro valor de  $Rc$  o robô se movimenta realizando uma curva.

## Capítulo 4

# Estratégia de controle para movimentação de robô quadrúpede

Este capítulo descreve o conjunto de estratégias de controle desenvolvidas para a movimentação de um robô quadrúpede. Inicialmente é descrita a metodologia utilizada na determinação das curvas de Bézier adotadas como referência pelo controle das pernas, definidas conforme o padrão de marcha e velocidades dos passos do robô. Em seguida é apresentado um modelo cinemático planar utilizado para o corpo do robô que relaciona as velocidades das pernas com as velocidades do corpo por meio das cinemáticas direta e inversa. O capítulo descreve também o controle planar de posição proposto para o corpo do robô. Por fim é apresentada uma visão geral da estratégia de controle proposta.

### 4.1 Determinação da curva de Bézier

Na robótica, curvas de Bézier podem ser usadas para planejar trajetórias de manipuladores e robôs móveis. As trajetórias resultantes dessas curvas e suas derivadas podem ser empregadas como referência de controle tanto no espaço das juntas quanto no espaço de trabalho, sendo parametrizadas no intervalo de 0 a 1, o que facilita mudar o tempo de percurso de uma trajetória. Essa referência de controle é enviada para o controle de impedância apresentado na seção 3.1. Nesta dissertação, a curva de Bézier representa o movimento dos pés do robô no espaço de trabalho, sendo utilizada como referência para o controle de impedância.

Para o robô andar, os pés precisam se mover dando passos. Um passo pode ser dividido em fase de suporte que sustenta o peso do robô, e fase de balanço onde os pés se movem buscando um novo ponto de apoio. Este ciclo se repete em diferentes padrões de marcha. Dessa forma é necessário definir uma curva de Bézier que represente a trajetórias dos pés para o movimento de um passo. As curvas de Bézier foram utilizadas em outros estudos para implementar uma trajetória de balanço e suporte dos pés. Um exemplo é



apresentando em [Jin et al., 2019], que usam uma curva de Bézier de 6º grau para a fase de balanço. Já os autores de [Hou et al., 2020] empregam duas curvas de Bézier, uma de 8º grau para fase de suporte e uma de 16º grau para fase de balanço. A trajetória dos pés pode ser formada por outras curvas polinomiais ou por curvas que descrevem uma meia elipse parametrizada no tempo. Porém, existem vantagens em utilizar curvas de Bézier devido a simplicidade para obter curvas suaves e suas derivadas por meio de funções, e por serem parametrizadas no intervalo de 0 a 1 facilitando a implementação da sincronia de movimentos das pernas para diferentes frequências de passo.

Essa dissertação propõem utilizar uma única curva Bézier de 6º grau, percorrendo uma trajetória fechada para as duas fases do passo. Esta curva fechada é definida por 7 pontos de controle, visando simplificar o planejamento das trajetórias de balanço e suporte dos pés num espaço de solução reduzido. É escolhida uma curva de 6º grau capaz de gerar uma trajetória adequada para a movimentação dos pés do robô, com o tempo de suporte maior que o tempo de balanço dos pés no intervalo de parametrização.

Utilizando a equação (3.13) e expandindo o polinômio da curva de Bézier definida por essas equações, é possível reescrevê-la em sua forma matricial, possuindo o seguinte formato:

$$B(u) = \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ u^2 \\ u^3 \\ u^4 \\ u^5 \\ u^6 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & -30 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -20 & 60 & -60 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & -60 & 90 & -60 & 15 & 0 & 0 \\ -6 & 30 & -60 & 60 & -30 & 6 & 0 \\ 1 & -6 & 15 & -20 & 15 & -6 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_0 \\ W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \\ W_6 \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Utilizando a equação (3.15) recursivamente, foram encontradas as seguintes derivadas de 1º ordem  $\dot{B}(u) \in \mathbb{R}^3$  (4.2) e 2º ordem  $\ddot{B}(u) \in \mathbb{R}^3$  (4.3) da curva  $B(u)$  definida na equação (4.1), também apresentadas em sua forma matricial:

$$\dot{B}(u) = \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ u^2 \\ u^3 \\ u^4 \\ u^5 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & -20 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ -10 & 30 & -30 & 10 & 0 & 0 \\ 5 & -20 & 30 & -20 & 5 & 0 \\ -1 & 5 & -10 & 10 & -5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W'_0 \\ W'_1 \\ W'_2 \\ W'_3 \\ W'_4 \\ W'_5 \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

onde  $W'_i = 6(W_{i+1} - W_i)$  corresponde ao cálculo dos pesos de  $\dot{B}(u)$ ,

$$\ddot{B}(u) = \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ u^2 \\ u^3 \\ u^4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & -12 & 6 & 0 & 0 \\ -4 & 12 & -12 & 4 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W''_0 \\ W''_1 \\ W''_2 \\ W''_3 \\ W''_4 \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

e  $W''_i = 5(W'_{i+1} - W'_i)$  indica o cálculo dos pesos de  $\ddot{B}(u)$ .

## 4.2 Passo e padrão de marcha utilizando curvas de Bézier

O padrão de marcha define como um robô com pernas se locomove. No estudo de padrões de marcha de animais apresentado na seção 3.3, foram definidos alguns termos para caracterizar um passo e o padrão de marcha, incluindo *passo*, *frequência de passo*, *comprimento do passo*, *fator de ocupação* e *fase relativa*.

Seguindo estas definições foi determinado que os pontos inicial e final ( $P_0$  e  $P_6$ ) da curva de Bézier sejam coincidentes para ter uma trajetória fechada formando o ciclo completo de movimentação da perna, ou seja, um passo. Desta maneira, foi definido que o início e final do movimento ocorra na metade da fase de balanço da perna. Também foram definidas as variáveis de distância  $d \in \mathbb{R}$  referente ao comprimento do passo e altura  $h \in \mathbb{R}$  do passo, além de uma variável angular  $\theta \in \mathbb{S}$  que visa determina o sentido do passo no espaço. Uma visualização destes parâmetros é apresenta na figura 35.

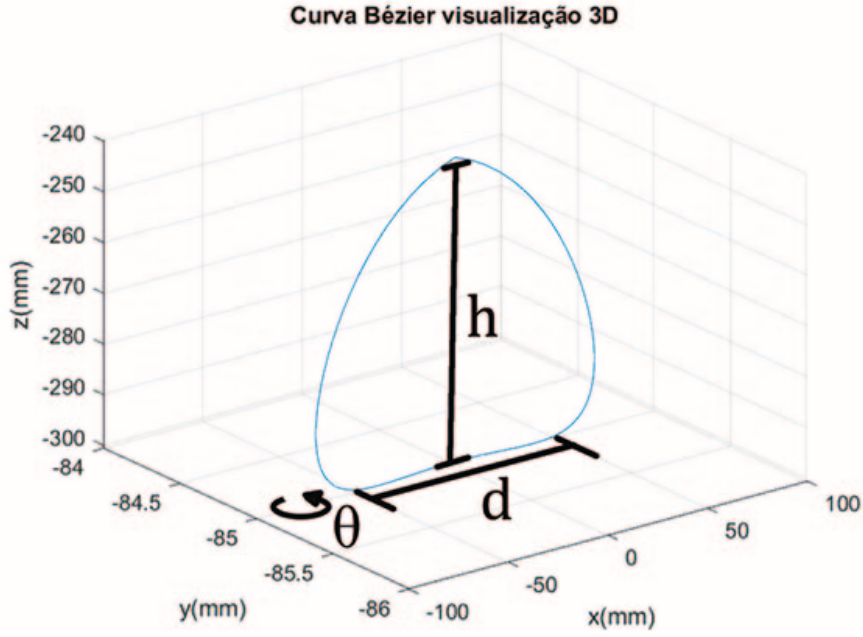


Figura 35 – Curva de Bézier para implementar as fases de suporte e balanço durante o passo de uma perna visualizada em 3D com a visualização dos parâmetros  $d$ ,  $h$  e  $\theta$ .

Determinando estas variáveis e definindo o ponto  $P_3$  do passo no espaço de trabalho do pé, é possível encontrar os outros seis pontos de ajuste da curva com as seguintes equações:

$$\begin{aligned}
 d_x &= d \, 0.7 \cos(\theta), & d_y &= d \, 0.7 \sin(\theta), \\
 P_0 &= [P_{3x}, P_{3y}, P_{3z} + h], \\
 P_1 &= [P_{3x} + d_x (4/5), P_{3y} + d_y (4/5), P_{3z} + h (3/5)], \\
 P_2 &= [P_{3x} + d_x (5/5), P_{3y} + d_y (5/5), P_{3z} + h (1/5)], \\
 P_3 &= [P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}], \\
 P_4 &= [P_{3x} - d_x (5/5), P_{3y} - d_y (5/5), P_{3z} + h (1/5)], \\
 P_5 &= [P_{3x} - d_x (4/5), P_{3y} - d_y (4/5), P_{3z} + h (3/5)], \\
 P_6 &= P_0.
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Os pontos  $P$  são os pontos que devem pertencer à curva de Bézier. Para encontrar a curva que se ajusta a esses pontos é necessário utilizar a equação (3.16) para calcular os pesos  $W$  da curva. Este ajuste é realizado em todas as curvas de Bézier definidas para os passos. Os tempos  $u_i$  da matriz  $T$  de (3.16) foram definidos como 0, 0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 0.9 e 1, para obter uma curva de Bézier com qualquer valor de  $d$  e  $h$ , sem ter uma trajetória deformada e com o fator de ocupação em  $u$  de 0.6. Com a determinação dos pontos  $P$  e o tempo em que deseja que a curva de Bézier passe por eles, é possível calcular os pesos  $W$  utilizando (3.16), e por conseguinte os pesos das derivadas. Após o cálculo de  $W$ , é possível obter a curva de Bézier correspondente para o passo das pernas.

Para exemplificar as curvas de Bézier calculadas, a figura 36 ilustra passos no espaço em diferentes orientações, com comprimento do passo de  $d = 100 \text{ mm}$  e  $d = 0 \text{ mm}$ , e altura de  $h = 60 \text{ mm}$ . Como ponto de início dos passos foi escolhido  $P_3 = [0, -0.085, -0.3]$  que equivale ao ponto abaixo do ombro frontal direito do robô A1.

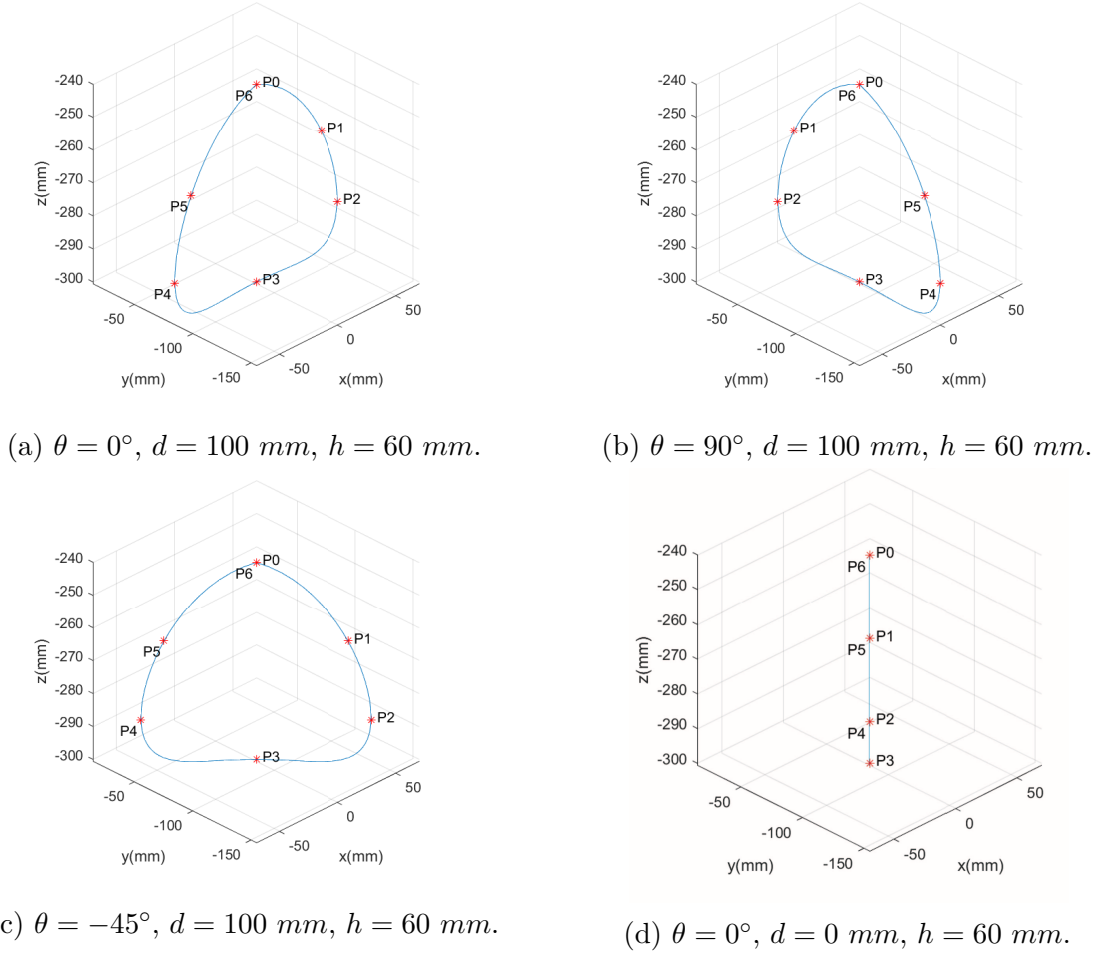


Figura 36 – Curvas de Bézier no espaço para diferentes parâmetros com visualização do ajuste dos pontos  $P$ .

Essas curvas de Bézier representam o ciclo de um passo com uma frequência de passo de  $1\text{Hz}$ , pois as curvas de Bézier são parametrizadas em  $u$  no intervalo de 0 a 1. A frequência do passo pode ser mudada mapeando o tempo  $t$  no intervalo de parametrização de  $u$ , podendo com uma única curva parametrizada alterar a frequência do passo, mudando o tempo  $t$ .

O fator de ocupação do passo, o qual é a fração de tempo do passo que está na fase de suporte dos pés, também pode ser alterado por meio do tempo  $t$  mapeado. O tempo  $t$  é dividido entre o tempo de suporte e balanço dos pés, e a parametrização dessas fases da curva de Bézier proposta é feita com o fator de ocupação desejado para o passo. A fase de suporte é parametrizada entre os pontos  $P_2$  a  $P_4$  e para fase de balanço entre os pontos  $P_0$  a  $P_2$  e  $P_4$  a  $P_6$ . Essa curva possui um fator de ocupação em relação à  $u$  entre os pontos  $P_2$  a  $P_4$  é de 0.6.

A parametrização da variável  $u$  em relação ao tempo  $t$  de um período  $T_p$  do ciclo do passo pode ser obtida com a equação (4.5) a seguir:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{t}{T_p} \left( \frac{\beta_u - 1}{\beta_t - 1} \right), & 0 \leq \frac{t}{T_p} < \frac{1 - \beta_t}{2} \\ \frac{\beta_u \left( \frac{2t}{T_p} - 1 \right)}{2\beta_t} + \frac{1}{2}, & \frac{1 - \beta_t}{2} \leq \frac{t}{T_p} \leq \frac{\beta_t + 1}{2} \\ \frac{\beta_u}{2} - \frac{(\beta_u - 1) \left( \beta_t - \frac{2t}{T_p} + 1 \right)}{2(\beta_t - 1)} + \frac{1}{2}, & \frac{\beta_t + 1}{2} < \frac{t}{T_p} \leq 1 \end{cases}, \quad (4.5)$$

onde  $t$  é o tempo no intervalo do período do passo  $T_p$ , sendo  $T_p = 1/f_p$ , sendo  $f_p$  a frequência do passo.  $\beta_u$  é o fator de ocupação do passo em relação a  $u$  no ajuste de curva com a equação (3.16) e  $\beta_t$  é o fator de ocupação desejado para passo em relação a  $t$ . Nos padrões de marcha de caminhada o fator de ocupação deve ser maior que 0.5, como apresentado na seção 3.3.

Os padrões de marcha escolhidos para serem reproduzidos foram os simétricos para caminhar, escolhendo reproduzir dois padrões da caminhada estática e trote, semelhante aos apresentados em [Ma et al., 2005, Zhang et al., 2006, Aeni et al., 2022]. Nos padrões simétricos, a escolha do comprimento do passo e a posição do seu início foi feita de forma a garantir um polígono ou linha de sustentação para o centro de massa do corpo, conforme apresentado em [Ma et al., 2005, Zhang et al., 2006].

O padrão de marcha do robô é definido determinando as fases relativas de cada perna para o padrão de locomoção, sincronizando o movimento das pernas para manter o polígono ou linha de sustentação do centro de massa. As fases relativas dos passos, definidas para as curva de Bézier de cada perna para estes padrões de marcha, são ilustradas no diagrama da figura 37 e podem ser visualizadas com o diagrama de Hildebrand [Hildebrand, 1985] na figura 38.

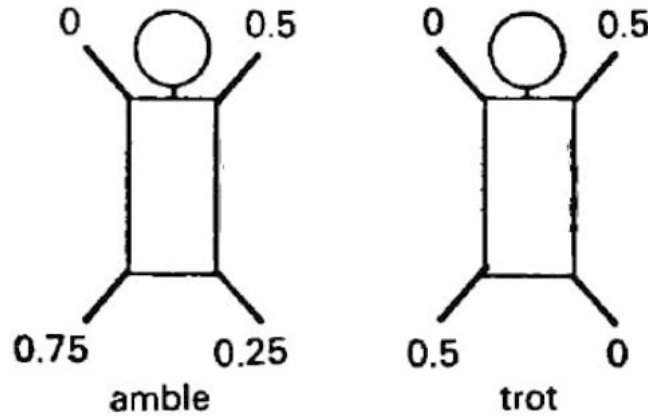


Figura 37 – Diagramas de marchas quadrúpedes de fases relativas para caminhada estática e trote. Fonte: [Alexander, 1984].

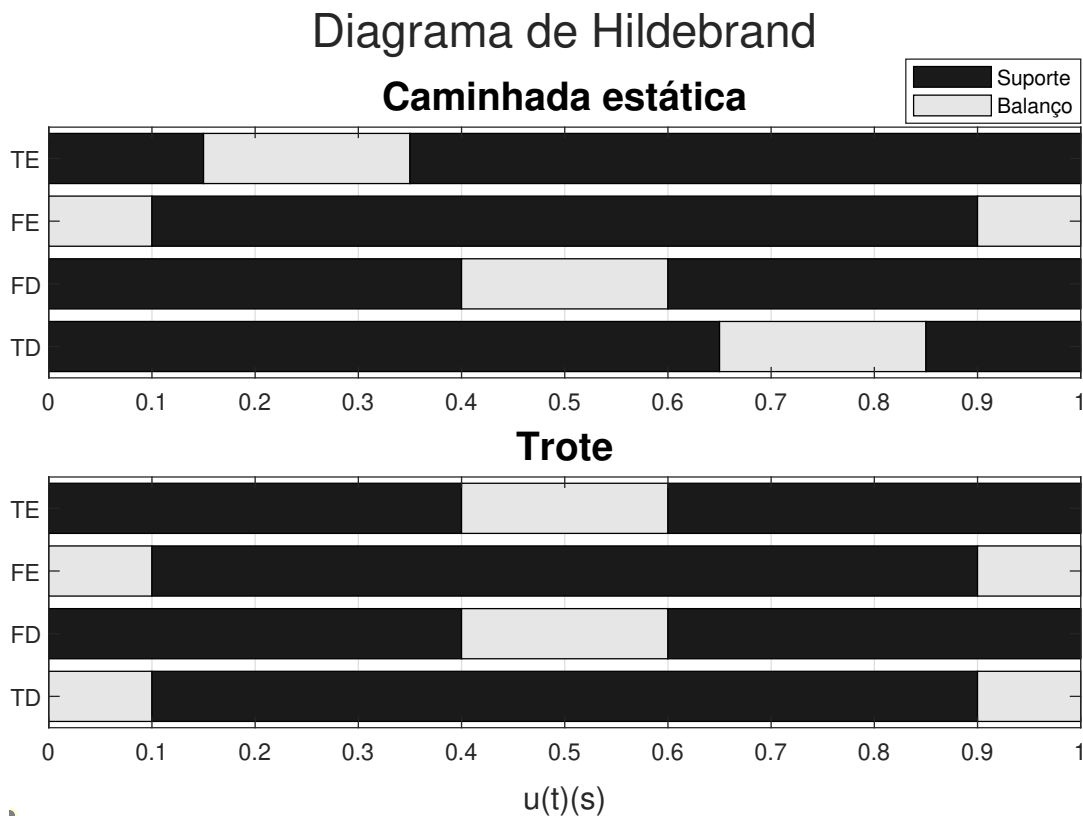


Figura 38 – Diagrama de Hildebrand com fator de ocupação de 0.8.

Imitar o padrão de marcha de animais, neste caso mamíferos quadrúpedes, tem como vantagem obter um padrão de marcha que possui um custo energético baixo para o movimento do robô, devido a similaridades do robô com estes animais, e por esses padrões de marcha já apresentarem movimentação otimizada para evitar movimentos desnecessários [Alexander, 1984, Kiguchi et al., 2002].

A velocidade média de locomoção com pernas,  $V_{mp}$ , considerando passadas bem sucedidas e constantes, pode ser estimada pela multiplicação da frequência do passo pelo seu comprimento [Alexander, 1984], utilizando a equação (4.6):

$$v_{mp} = d f_p. \quad (4.6)$$

Por meio desta equação foi desenvolvida uma função para calcular a frequência e comprimento de passo para uma dada velocidade da perna em um intervalo de frequência de passo. Essa função está resumida no pseudo-código 1:

**Input:**  $vel_d$ : velocidade desejada;  $cp_{max}$ : comprimento de passo máximo;  $freqP_{max}$ : frequência de passo máxima;  $freqP_{min}$ : frequência de passo mínima.

**Output:**  $cp$ : comprimento do passo;  $freqP$ : frequência do passo.

```

1 Function calc_cp_freqP(vel_d, cp_max, freqP_max, freqP_min):
2   %Inicição de variáveis.
3   a ← 1;
4   cp ← cp_max;
5   freq_p ← freqP_max;
6   %Verifica se a velocidade desejada é maior que a velocidade realizada com o comprimento máximo
   e frequência máxima.
7   if vel_d > freqP_max × cp_max then
8     | cp ← cp_max;
9     | freq_p ← freqP_max;
10  end
11  else
12    %Inicia a busca da frequência e comprimento de passo que resolva  $V_{mp} = d f_p$ .
13    while a = 1 do
14      %Verifica se encontrou uma frequência e comprimento de passo para a velocidade
   desejada.
15      if vel_d ≥ cp(freqP - freqP_min) and vel_d ≤ cp freqP then
16        %Encontrou uma frequência e comprimento de passo para a velocidade desejada.
17        freqP ← freqP + 0.001;
18        cp ← vel_d/freqP;
19        a ← 0;
20        %Finaliza a busca
21        break;
22      end
23      else if freqP ≤ freqP_min then
24        %Incrementa a o comprimento do passo se a varredura de frequência chegou na
   frequência mínima
25        cp ← cp + 0.005;
26        freqP ← freqP_max;
27        if cp > cp_max then
28          | cp ← 0;
29        end
30      end
31      else
32        %Decrementa a frequência de passo para a varredura
33        freqP ← freqP - 0.001;
34      end
35    end
36  end
37 return cp, freqP

```

**Pseudo-código 1:** Função para cálculo da frequência e comprimento de passo.

Essa função varre no intervalo de frequência máximo e mínimo para diferentes comprimentos de passo no intervalo de zero ao comprimento de passo máximo até encontrar uma solução da equação (4.6) para a velocidade desejada. Para essa dissertação foi considerado o intervalo de 1 a 2 passos por segundo, com o comprimento máximo de passo de 180 mm. Para essas condições a função  $calc\_cp\_freqP$  tem os seguintes resultados para velocidades até 0,36 m/s apresentados na figura 39.

A função  $calc\_cp\_freqP$  faz a frequência de passo variar linearmente com a velocidade até atingir a frequência de passo máxima. Ela também faz com que o comprimento do passo máximo só seja atingido quando está próximo da velocidade máxima, calculada pelo comprimento máximo e frequência máxima. O comprimento máximo é escolhido para se manter dentro da área de trabalho dos pés do robô.



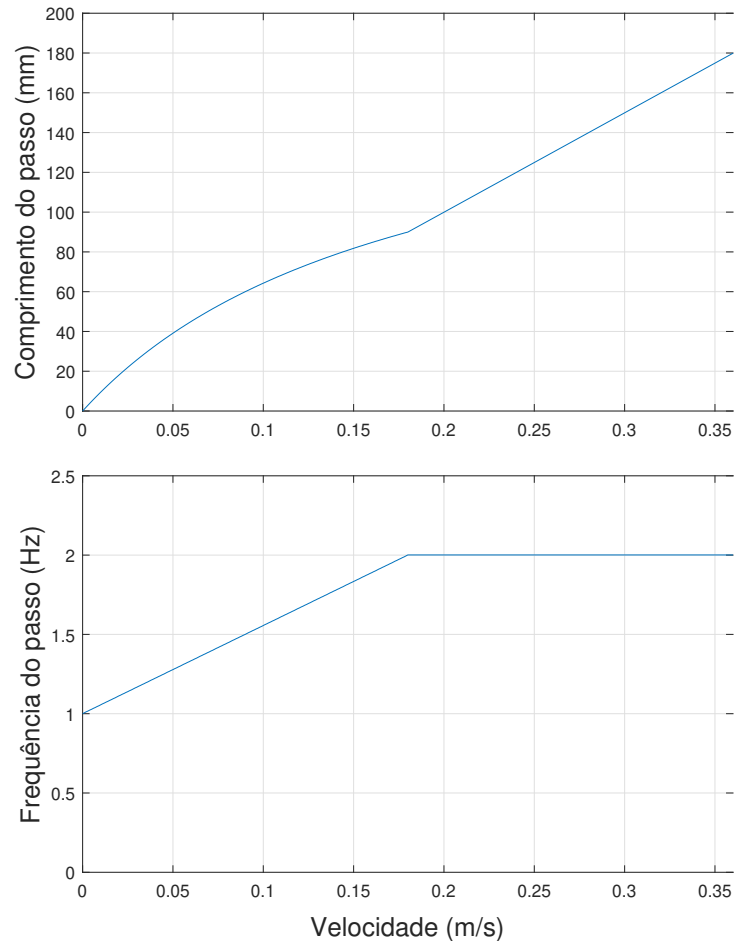


Figura 39 – Resultado da função para cálculo de comprimento e frequência de passo para velocidade até  $0,36 \text{ m/s}$ .

Essa função é usada para calcular a frequência e comprimento de passo da perna com maior velocidade. Após determinar o cálculo, a frequência de passo da perna com maior velocidade é usada para determinar o comprimento do passo das outras pernas com equação (4.6) utilizando a frequência da perna com maior velocidade. Desta maneira é possível modificar a frequência de passo dentro deste intervalo conforme a velocidade desejada aumenta, mantendo a sincronia dos passos por estarem na mesma frequência.

A fase relativa foi definida com base no padrão de marcha escolhido como ilustrado na figura 37. Para a caminhada estática as pernas possuem as seguintes fases relativas: perna frontal direita (FD) com 0,5, perna frontal esquerda (FE) com 0, perna traseira direita (TD) com 0,25, e perna traseira esquerda (TE) com 0,75. Para o trote as pernas FD e TE tem fase relativa de 0,5, e a FE e TD com fase relativa 0.

A partir destes cálculos e definições para fase relativa, altura, sentido e comprimento do passo, o gerador de marcha encontra uma curva de Bézier de 6º grau e suas derivadas para cada perna, que são utilizadas para definir as posições, velocidades e acelerações de referência de cada pé no espaço de trabalho.

### 4.3 Modelo cinemático planar do corpo

Na seção 3.4 é apresentado o modelo cinemático diferencial de um robô móvel com arquitetura diferencial. Este modelo é um dos modelos mais simples utilizados para robôs com rodas, especialmente robôs com duas rodas paralelas.

Esse modelo pode ser empregado, com suas devidas modificações, para representar robôs com quatro rodas ou esteiras. Um destes modelos modificados para robôs com 4 rodas ou esteiras é o modelo *skid steering* que lida com o escorregamento das rodas e esteiras em movimentos de rotação desses robôs.

No modelo diferencial apresentado as rodas possuem restrição não holonômica para movimentação na direção  $y_r$  do robô. Utilizar este modelo no robô quadrúpede faria com que as pernas do robô só se movimentassem na direção  $x_r$ , dificultando movimentos laterais e rotações. Além disso, esse modelo não considera escorregamentos, que podem causar o tombamento do robô.

Toda via a maioria das pernas de robôs quadrúpedes não possuem a limitação não holonômica de movimentos laterais como rodas possuem. Acrescentar esta possibilidade de movimento no modelo diferencial elimina o escorregamento das pernas devido os movimentos de rotação. Dessa maneira essa dissertação propõem um modelo simples inspirado no modelo diferencial em que é adicionado a possibilidade de movimento lateral das pernas, resultando em um modelo cinemático planar do robô. O modelo cinemático apresentado considera que o robô quadrúpede tem velocidades lineares nas direções  $x_r$  e  $y_r$  no plano, e velocidade angular  $\omega_r$ . Esse modelo cinemático também considera que os pés não escorregam quando executam passos. Uma representação de um robô quadrúpede é apresentado na figura 40, assim como as variáveis utilizadas e o sistemas coordenadas do robô.

Na figura 40, o sistema de coordenadas do robô foi posicionado no centro do segmento de reta que liga os ombros frontais do robô e não no seu centro geométrico. Esta escolha foi feita de maneira a simplificar a modelagem matemática e também a movimentação do robô, que será realizada utilizando esse ponto como referência. Na figura 40 é representada as velocidades laterais  $v_d$  da direita e  $v_e$  da esquerda na direção  $x_r$ , as velocidades da parte frontal  $v_f$  e traseira  $v_t$  na direção  $y_r$ . Também é representado a largura  $L$  entre as pernas da direita e esquerda, e comprimento  $C$  entre as pernas frontais e traseiras. A orientação do robô no plano é representada por  $\theta$ .  $Rc_x$  e  $Rc_y$  representam o raio de curvatura para o movimento em  $x$  e  $y$  com seus respectivos centro instantâneos de rotação  $CIR_x$  e  $CIR_y$ . Os valores dos raios de curvatura se comportam da mesma maneira apresentado na seção 3.4.

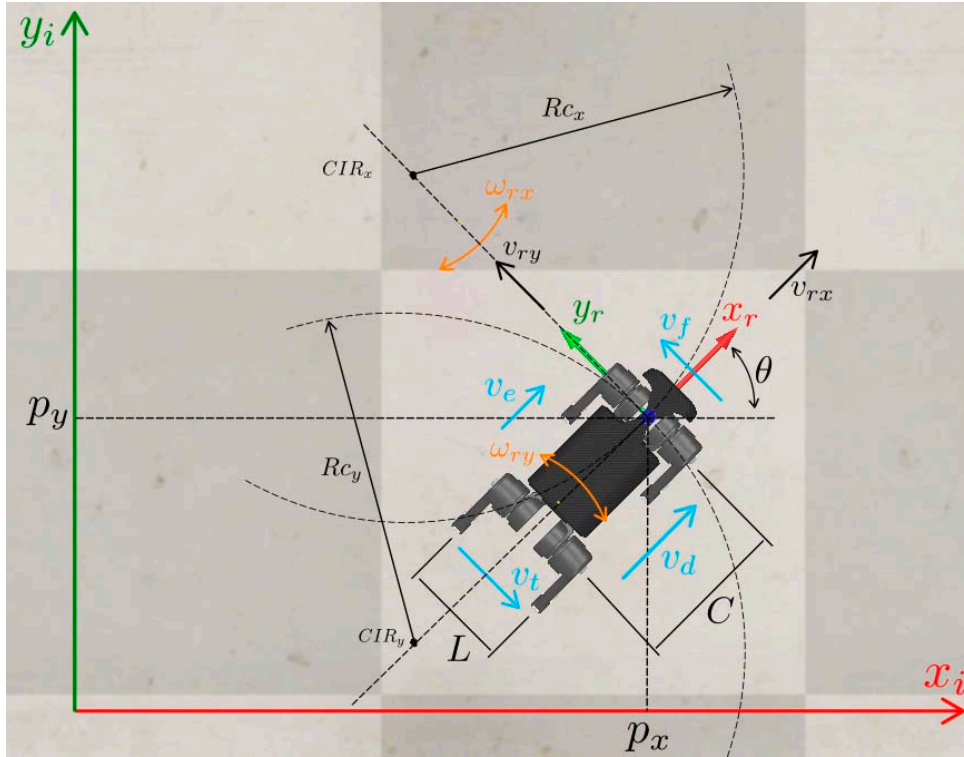


Figura 40 – Diagrama de um robô quadrúpede planar

Com base nesse diagrama da figura 40 e inspirado no modelo de robô diferencial, podemos obter as equações (4.7) e (4.8) para a velocidade  $v_e$  e  $v_d$  para a direção  $x_r$  do robô:

$$v_e = \omega_{rx} \left( Rc_x - \frac{L}{2} \right), \quad (4.7)$$

$$v_d = \omega_{rx} \left( Rc_x + \frac{L}{2} \right). \quad (4.8)$$

Isolando os termos  $\omega_{rx} Rc_x$  e igualando estes termos é possível obter a seguinte relação da velocidade angular  $\omega_{rx}$ :

$$\omega_{rx} = \frac{v_d - v_e}{L}. \quad (4.9)$$

Realizando o mesmo isolamento de variável para  $\omega_{rx}$  nas equações (4.7) e (4.8), é possível obter uma equação para o raio de curvatura  $Rc_x$ :

$$Rc_x = \frac{L (v_e + v_d)}{2 (v_d - v_e)}. \quad (4.10)$$

É conhecido que  $v_{rx} = \omega_{rx} Rc_x$ , substituindo as equações (4.9) e (4.10) nessa equação de  $v_{rx}$  é possível obter:

$$v_{rx} = \frac{v_e + v_d}{2}. \quad (4.11)$$

Para a direção  $y_r$  é possível obter as seguintes equações para  $v_f$  e  $v_t$ :

$$v_f = \omega_{ry} R c_y, \quad (4.12)$$

$$v_t = \omega_{ry} (R c_y - C). \quad (4.13)$$

Isolando os termos  $\omega_{ry} R c_y$  e igualando estes termos é possível obter a seguinte relação da velocidade angular  $\omega_{ry}$ :

$$\omega_{ry} = \frac{(v_f - v_t)}{C}. \quad (4.14)$$

Realizando o mesmo para  $\omega_{ry}$  com as equações (4.12) e (4.13), é encontrada a equação para  $R c_y$ :

$$R c_y = \frac{v_f C}{(v_f - v_t)}. \quad (4.15)$$

Sabendo que  $v_{ry} = \omega_{ry} R c_y$  e substituindo as equações (4.14) e (4.15) nessa equação é possível obter a equação para  $v_{ry}$ :

$$v_{ry} = v_f. \quad (4.16)$$

Para velocidade angular  $\omega_r$  podemos afirmar que  $\omega_r = \omega_{rx} = \omega_{ry}$  por serem velocidades referentes ao mesmo corpo. Com base nesta premissa, é possível obter a soma  $2\omega_r = \omega_{rx} + \omega_{ry}$ . Dessa maneira, isolando  $\omega_r$  encontramos a seguinte relação para a velocidade angular do corpo  $\omega_r$ :

$$\omega_r = \frac{v_d - v_e}{2L} + \frac{v_f - v_t}{2C}. \quad (4.17)$$

Organizando as equações (4.11), (4.16) e (4.17) na forma matricial é obtida a equação (4.18) da cinemática diferencial direta do robô, relacionando as velocidades  $v_d$ ,  $v_e$ ,  $v_f$  e  $v_t$  com as velocidades  $v_{rx}$ ,  $v_{ry}$  e  $\omega_r$  no referencial do robô:

$$\begin{bmatrix} v_{rx} \\ v_{ry} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2L} & -\frac{1}{2L} & \frac{1}{2C} & -\frac{1}{2C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_e \\ v_f \\ v_t \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

A cinemática diferencial inversa é obtida pelo sistema formado pelas equações (4.11), (4.9), (4.16) e (4.14) e sabendo que  $\omega_r = \omega_{rx} = \omega_{ry}$ . Realizando as devidas substituições para o sistema apresentado, são encontradas as seguintes equações para a cinemática diferencial inversa:

$$v_d = v_{rx} + w_{rx} \frac{L}{2}, \quad (4.19)$$

$$v_e = v_{rx} - w_{rx} \frac{L}{2}, \quad (4.20)$$

$$v_f = v_{ry}, \quad (4.21)$$

$$v_t = v_{ry} - w_{ry} C. \quad (4.22)$$

Organizando essas equações na forma matricial é obtida a equação (4.23) para a cinemática inversa, correlacionando as velocidades  $v_{rx}$  e  $v_{ry}$ , e  $w_r$  do robô com as velocidades  $v_d$ ,  $v_e$ ,  $v_f$  e  $v_t$ :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_e \\ v_f \\ v_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{L}{2} \\ 1 & 0 & -\frac{L}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{rx} \\ v_{ry} \\ \omega_r \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

A velocidade de cada perna pode ser obtida pelo módulo das velocidades de cada vértice formados pela largura  $L$  e comprimento  $C$  das pernas do robô. A velocidade do movimento dos pés é transferida para os ombros quando os pés executam passos sem escorregamento. As velocidades das pernas frontal direita  $v_{fd}$ , frontal esquerda  $v_{fe}$ , traseira direita  $v_{td}$  e traseira esquerda  $v_{te}$  são obtidas com as equações (4.24), (4.25), (4.26) e (4.27) respectivamente:

$$v_{fd} = \sqrt{v_f^2 + v_d^2}, \quad (4.24)$$

$$v_{fe} = \sqrt{v_f^2 + v_e^2}, \quad (4.25)$$

$$v_{td} = \sqrt{v_t^2 + v_d^2}, \quad (4.26)$$

$$v_{te} = \sqrt{v_t^2 + v_e^2}. \quad (4.27)$$

O ângulo que indica a direção das velocidades  $v_{fd}$ ,  $v_{fe}$ ,  $v_{td}$  e  $v_{te}$  das pernas no referencial do robô é obtido pelo arco tangente das velocidades de cada vértice da largura e comprimentos das pernas. Essas direções podem ser calculadas com as equações (4.28), (4.29), (4.30) e (4.31) respectivamente:

$$\theta_{fd} = \text{atan2}(v_f, v_d), \quad (4.28)$$

$$\theta_{fe} = \text{atan2}(v_f, v_e), \quad (4.29)$$

$$\theta_{td} = \text{atan2}(v_t, v_d), \quad (4.30)$$

$$\theta_{te} = \text{atan2}(v_t, v_e). \quad (4.31)$$

A velocidade de cada perna é passada para a controle das pernas como apresentado no diagrama de controle da figura 43.

## 4.4 Controle planar do corpo

Essa sessão apresenta um controle para o corpo do robô. Este controle considera que o robô pode se mover em  $x$  e  $y$  e modificar sua orientação  $\theta$ , geralmente com a mesma orientação de movimento de uma curva de referência.

O modelo para as velocidades lineares e angulares utilizado para o corpo do robô pode ser simplificado por um modelo de transformação de coordenadas das velocidades do sistema inercial para o corpo do robô apresentado na equação (4.32):

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{rx} \\ v_{ry} \\ \omega_r \end{bmatrix}. \quad (4.32)$$

A equação (4.32) possui não linearidades devido os senos e cossenos. Para linearizar a equação é usada uma linearização por realimentação. Utilizando o vetor  $[v_{rx} \ v_{ry} \ \omega_r]^T$  como vetor de atuação, é possível linearizar o sistema com a equação (4.33).

$$\begin{bmatrix} v_{rx} \\ v_{ry} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ax} \\ u_{ay} \\ u_{aw} \end{bmatrix}. \quad (4.33)$$

Nessa equação, o vetor  $[u_{ax} \ u_{ay} \ u_{aw}]^T$  corresponde a ação de controle auxiliar para as velocidades lineares e angular. A ação de controle auxiliar escolhida para a posição foi um controle proporcional com *feedforward* para tarefas de *tracking* de uma curva. Para orientação foi utilizado um controle proporcional, como apresentado em [Luca e Oriolo, 1994] com as devidas alterações conforme diferenças dos robôs. Os controles auxiliares são apresentados na equação (4.34):

$$\begin{bmatrix} u_{ax} \\ u_{ay} \\ u_{aw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{xd} \\ v_{yd} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{xd} - p_x \\ p_{yd} - p_y \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix}. \quad (4.34)$$

O vetor  $[v_{xd} \ v_{yd} \ 0]^T$  corresponde ao componente do *feedforward* do controlador, na matriz os termos  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_\theta$  são os ganhos proporcionais do controlador. Os termos  $p_{xd} - p_x$ ,  $p_{yd} - p_y$  e  $\theta_d - \theta$  fazem parte do vetor de erro para a posição no plano e orientação. Durante a movimentação, o robô se mantém alinhado com a direção da curva. Para orientar o robô com a direção do movimento, o termo  $\theta_d$  é calculado usando o arco tangente das componentes  $u_{ax}$  e  $u_{ay}$  como em [Luca e Oriolo, 1994]; esta escolha seria semelhante à ação *feedforward* para orientação sendo usada com a presente a equação (4.35):

$$\theta_d = \arctan2(u_{ax}, u_{ay}). \quad (4.35)$$

Linearizando a equação (4.32) com a equação (4.33) e substituindo os controles auxiliares da equação (4.34) na equação linearizada, é encontrada a equação (4.36). Essa equação representa a dinâmica do erro, onde o erro de posição e a velocidade angular tendem a zero com o passar do tempo:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

Com essa metodologia de controle é possível calcular as velocidades lineares e angular desejadas para o corpo do robô por meio da equação (4.33). Utilizando o resultado dessa equação é possível calcular as velocidades das pernas por meio das equações (4.23) a (4.27) que são enviadas para o controle das pernas como referência para a geração de passos.

## 4.5 Visão geral das estratégias de controle

A Figura 41 apresenta uma visão geral da estratégia de controle proposta. Nesse diagrama o controle das pernas fornece o sinal dos torques para os motores do robô A1 com base na velocidade desejadas de cada perna. Estas velocidades são calculadas pelo controle de corpo com base no erro de posição e orientação do corpo do robô comparado com trajetória de referência desejada.

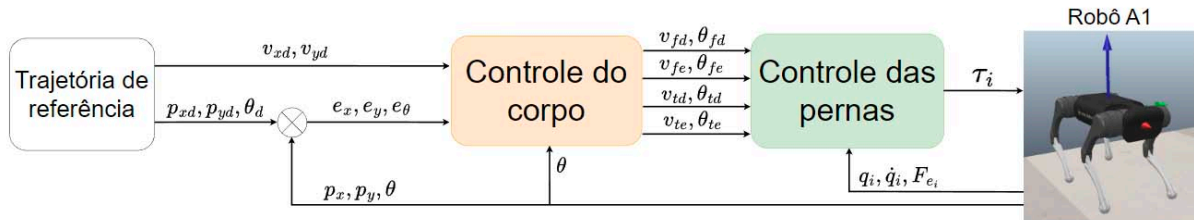


Figura 41 – Diagrama da estratégia de controle proposta.

A figura 42 detalha as interconexões das funções do diagrama de controle das pernas que possui um gerador de marcha utilizando curvas de Bézier e um controle de impedância das pernas.

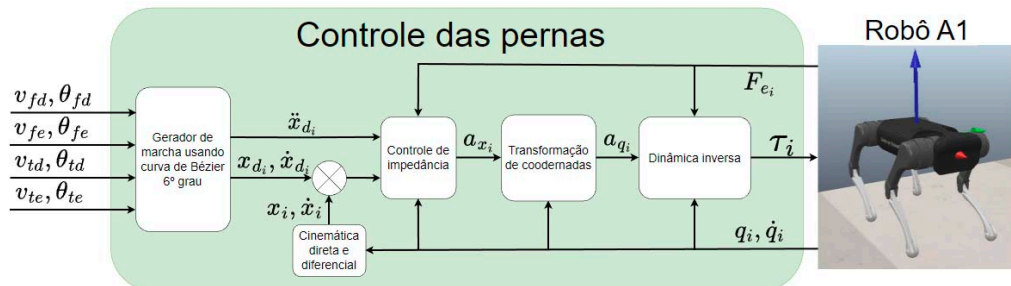


Figura 42 – Diagrama do controle de impedância utilizando curva de Bézier de 6º grau como referência.



Neste diagrama o gerador de marcha recebe a direção de movimento e a velocidade de cada uma das quatro pernas. Por meio dessas informações são calculados os comprimentos e frequência de passo das pernas e com a altura e fase relativa dos passos definidos o padrão de marcha é gerado, sendo este padrão definido para caminhada estática ou trote. Dessa maneira o gerador de marcha encontra uma curva de Bézier de 6º grau e suas derivadas para cada perna  $i$ , com  $i = 1, \dots, 4$ . As curvas de cada perna e suas derivadas são utilizadas como referência da posição, velocidade e aceleração no espaço de trabalho de cada pé. Em seguida, estas referências são passadas para o controle de impedância, seguindo para a transformação de coordenadas apresentada na sessão 3.1.3 e a linearização por realimentação, obtendo no final o torque de controle desejado que é enviado para cada uma das juntas do robô. O controle de impedância das pernas utiliza como realimentação a posição das juntas e as forças externas aplicadas nos pés.

Para o controle de posição do corpo as funções estão interconectadas conforme apresentado no diagrama da figura 43. Nesse diagrama, uma trajetória de referência é passada para o controle do corpo com a posição e velocidade das curvas desejadas. Os erros de posição e orientação são calculados e o controle proporcional com *feedforward* recebe o erro calculado e a velocidade desejada. O controle proporcional envia a ação de controle auxiliar para a linearização por realimentação que fornece as velocidades lineares e angulares desejadas para o corpo do robô. Essas velocidades são combinadas com a cinemática inversa do modelo cinemático planar do corpo do robô, permitindo calcular as velocidades laterais, frontal e traseira do corpo. Estas são utilizadas para calcular as velocidades e direções de movimento de cada perna, que são enviadas como referência para o gerador de marcha.

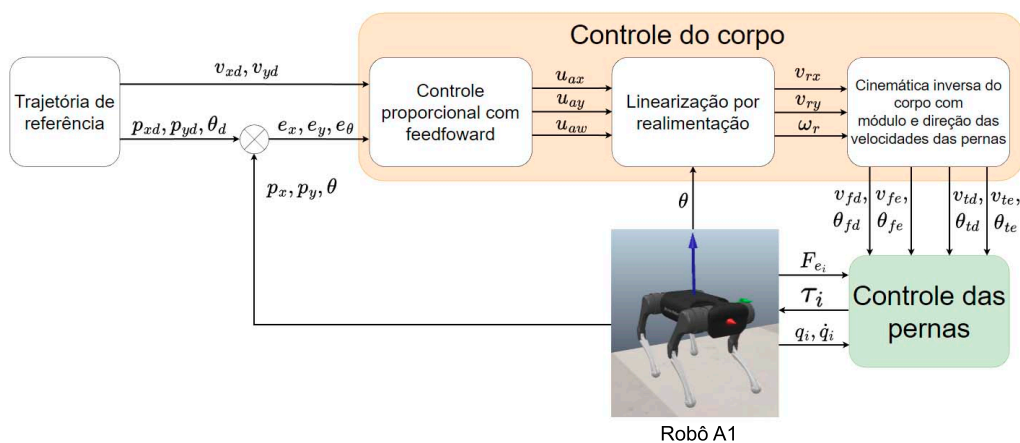


Figura 43 – Diagrama de controle da estratégia completa para a movimentação do robô A1.

# Capítulo 5

## Resultados e análise da simulação

Este capítulo descreve a implementação da estratégia de controle proposta num ambiente virtual desenvolvido utilizando o CoppeliaSim integrado com o Matlab, e apresenta as simulações realizadas e os resultados obtidos. Foram realizados conjuntos de simulações para analisar a metodologia de controle proposta. As primeiras simulações realizadas foram do controle das pernas, para verificar se as pernas seguiam as trajetórias desejadas obtidas com o gerador de marcha. O segundo conjunto de simulações foram do controle das pernas com o robô no chão para testar locomoção e controle do robô com os padrões de marcha de caminha estática e trote. O terceiro conjunto de simulações foram do controle das pernas com o controle do corpo fornecendo como trajetória de referência a curva Lemniscata de Bernoulli. Os vídeos das simulações realizadas estão disponíveis online<sup>1</sup>.

### 5.1 Implementação da simulação no CoppeliaSim integrado com Matlab

A metodologia de controle proposta, apresenta no capítulo anterior, foi validada por simulação. A implementação de um robô quadrúpede virtual e as simulações de locomoção foram realizadas utilizando o software CoppeliaSim, comunicando com o Matlab por meio da sua API *Legacy remote*. Os modelos matemáticos apresentados foram utilizados como base na implementação de funções no Matlab para os cálculos necessários para o controle das pernas, gerador de marcha e controle do corpo.

O modelo do robô A1 foi implementado na simulação utilizando o arquivo URDF fornecido pela empresa Unitree. Este arquivo foi carregado no CoppeliaSim e configurado para receber os torques de controle da API *Legacy remote* e enviar os dados necessários para o controle das pernas e do corpo.

---

<sup>1</sup> [https://github.com/GabrielDGP/Controle\\_movimento\\_roboto\\_quadrupe.git](https://github.com/GabrielDGP/Controle_movimento_roboto_quadrupe.git)

Antes de cada cálculo da ação de controle, são lidos por meio da API do Coppeliasim a posição, velocidade e torques das juntas de cada perna, assim como as forças aplicadas nos pés do robô e a posição e orientação do corpo. As variáveis de posição e velocidade das juntas são usadas para calcular a posição e velocidade da ponta do pé com as equações da cinemática direta e diferencial. Desta maneira é possível calcular o erro de posição e velocidade no espaço de trabalho do robô. Os dados do sensor de força nos pés do robô foram filtrados no Coppeliasim por um filtro de média móvel do próprio sensor virtual configurado com 1000 amostras, e no Matlab foi utilizado um filtro passa baixa de Butterworth com frequência de corte de  $1.9Hz$  e frequência de amostragem de  $4000 Hz$ . Esse filtro ajudou a reduzir os ruídos de alta frequência do sensor virtual de força.

Realizado as leituras necessárias por meio da API os cálculos da ação de controle de torque são realizados e enviados para o robô simulado também por meio da API. Para o controle das pernas os ganhos  $M_d$ ,  $B_d$  e  $K_d$  foram ajustados para a perna ter o efeito massa-mola-amortecedor quando é aplicada a força na ponta dos pés e seguir a trajetória da curva de Bézier. Os ganhos que obtiveram o melhor resposta com o este efeito foram  $M_d = 0.5 I_{3 \times 3}$ ,  $B_d = 2000 I_{3 \times 3}$  e  $K_d = 100000 I_{3 \times 3}$ . Para o controle do corpo os ganhos foram ajustados para seguir a trajetória de referência. Os ganhos proporcionais que tiveram melhor resultado foram de  $k_x = k_y = 0.8$  e  $k_\theta = 1.2$ .

As simulações são realizadas usando o motor de física Vórtex. O Vortex é um motor de física comercial de código fechado que produz simulações de física de alta fidelidade. O Vortex oferece parâmetros reais de propriedades físicas, tornando este motor físico realista e preciso. Este motor de física é usado em aplicações industriais e pesquisa de alto desempenho e precisão [Coppelia Robotics, 2023]. Ele simula a dinâmica de corpos rígidos, detecção de colisão, determinação de contato e reações dinâmicas. Estas interações dinâmicas estão envolvidas na locomoção de um robô com pernas, principalmente na interação dos pés com o solo, e devido à precisão e realismo do Vortex nesse tipo de simulação ele foi utilizado.

## 5.2 Controle das pernas seguindo curvas de Bézier

As primeiras simulações realizadas tiveram como objetivo verificar se o controle proposto para as pernas do robô é capaz de seguir as curvas de Bézier utilizadas como referência. Com o robô suspenso, a primeira simulação considera velocidades das pernas na direção frontal, utilizando os parâmetros apresentados na seção 4.2, para verificar se o controle das pernas consegue seguir a trajetória definida pela curva de Bézier resultante. A segunda simulação foi realizada com os mesmo parâmetros para a curva de Bézier, porem fornecendo velocidades na direção lateral para verificar se as pernas também executam os movimentos desejados.

Os resultados das duas simulações são ilustrados na figura 44, comparando a trajetória da curva de Bézier  $B(u)$  com a posição final alcançada pelos pés do robô.

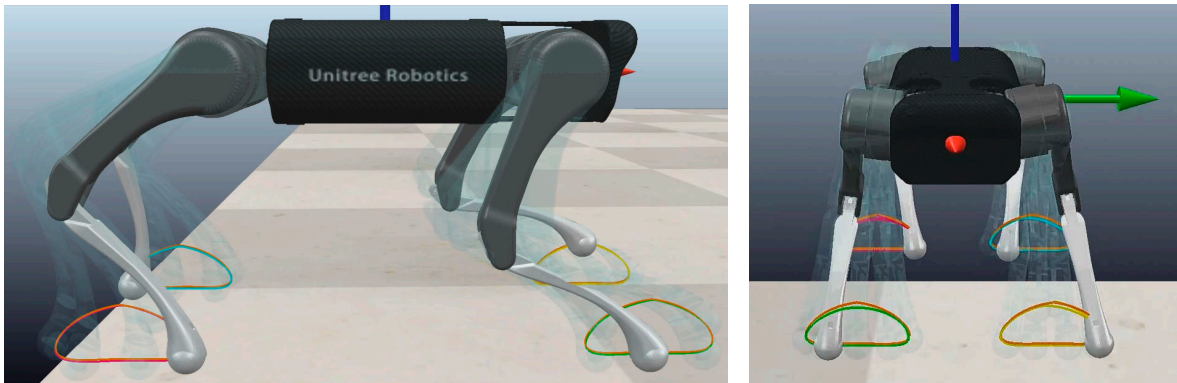


Figura 44 – Trajetórias de referência definidas por curvas de Bézier para movimentos frontal e lateral, junto com as trajetórias realizadas pelos pés do robô. Curvas de Bézier utilizadas como referência destacadas na cor laranja.

Analisando as duas simulações é possível verificar que o controle das pernas consegue seguir as trajetórias de referência da curva de Bézier em laranja, apresentando pequenos erros entre a curva de referência e a curva realizada pela ponta dos pés. Utilizando o controle, as pernas conseguiram executar os movimentos dando para direção frontal quanto lateral do robô, com a curva de Bézier de referência possuindo parâmetros de comprimento e altura de passo de  $100\text{ mm}$  e  $60\text{ mm}$  respectivamente.

### 5.3 Controle coordenado das pernas executando padrões de marcha

As simulações realizadas na sequência permitiram avaliar o controle das pernas sincronizadas durante a locomoção, com o robô apoiado no chão, com os mesmos ganhos ajustados e mesma velocidade frontal quando robô estava suspenso executando os movimentos para a direção frontal. Foram testados o padrão de marcha de caminhada estática e trote.

As simulações permitiram verificar as ações de controle (torques) enviadas para as pernas do robô (figura 45). O torque nas juntas responde a saídas de controle principalmente na presença de forças aplicadas na ponta do pé, sendo notável os ciclos de suporte e balanço dos pés no gráfico apresentado. Os valores dos torques ficaram menores que o torque máximo de  $33.5\text{ N.m}$  dos motores do robô A1.

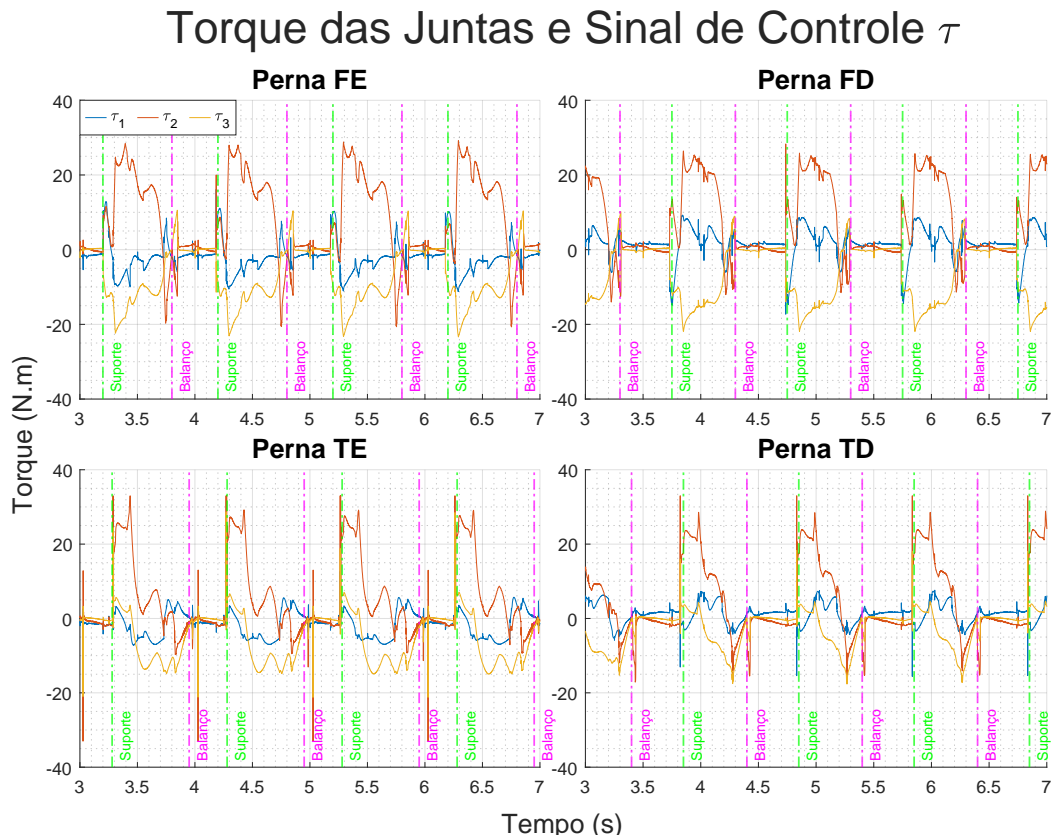


Figura 45 – Saída de controle  $\tau$  e torque aplicado na simulação  $T_{q_i}$  às juntas da perna durante a execução de 4 passos em caminhada estática.

É possível verificar também o erro de posição no espaço de trabalho do pé do robô devido à complacência da perna a forças externas aplicada pelos passos na fase de suporte. Isso pode ser verificado principalmente no erro maior na direção  $Z$  nas fases de suporte, chegando a  $46\text{ mm}$  na perna traseira esquerda (Figura 46). Na fase de balanço o erro tende a zero. Alterando os ganhos  $M_d$ ,  $B_d$  e  $K_d$ , é possível regular a impedância mecânica, a inércia aparente, o amortecimento e a rigidez da perna, alterando também a reação de controle nos motores conforme a força aplicada na ponta do pé do robô.

O padrão cíclico dos passos também é presente quando é visualizada a força resultante nos pés (figura 47). É possível notar que a norma da força dos pés (norma  $F_e$ ) tem valor próximo do peso do robô. O robô A1 possui uma massa de  $12,7\text{ kg}$  o que resulta em um peso de cerca de  $31,14\text{ N}$  por pé, no caso de uma sustentação uniforme.

### Erro de Posição dos Pés

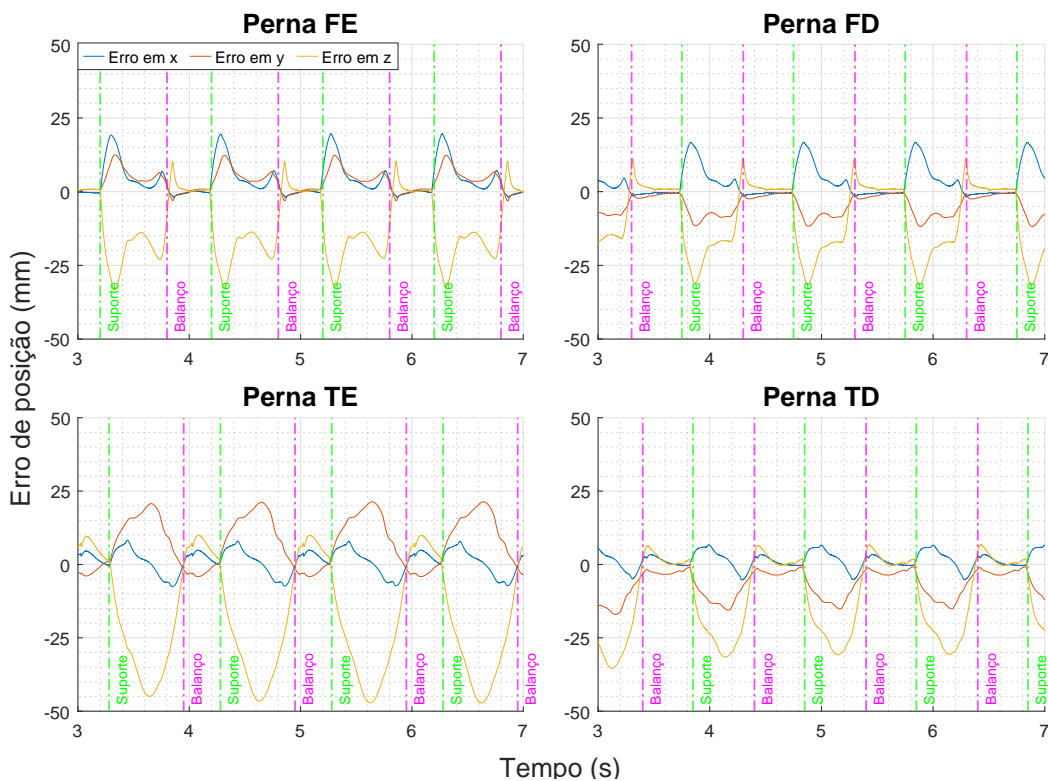


Figura 46 – Erro de posição no espaço de trabalho do pé durante a execução de 4 passos em caminhada estática.

### Forças nos pés

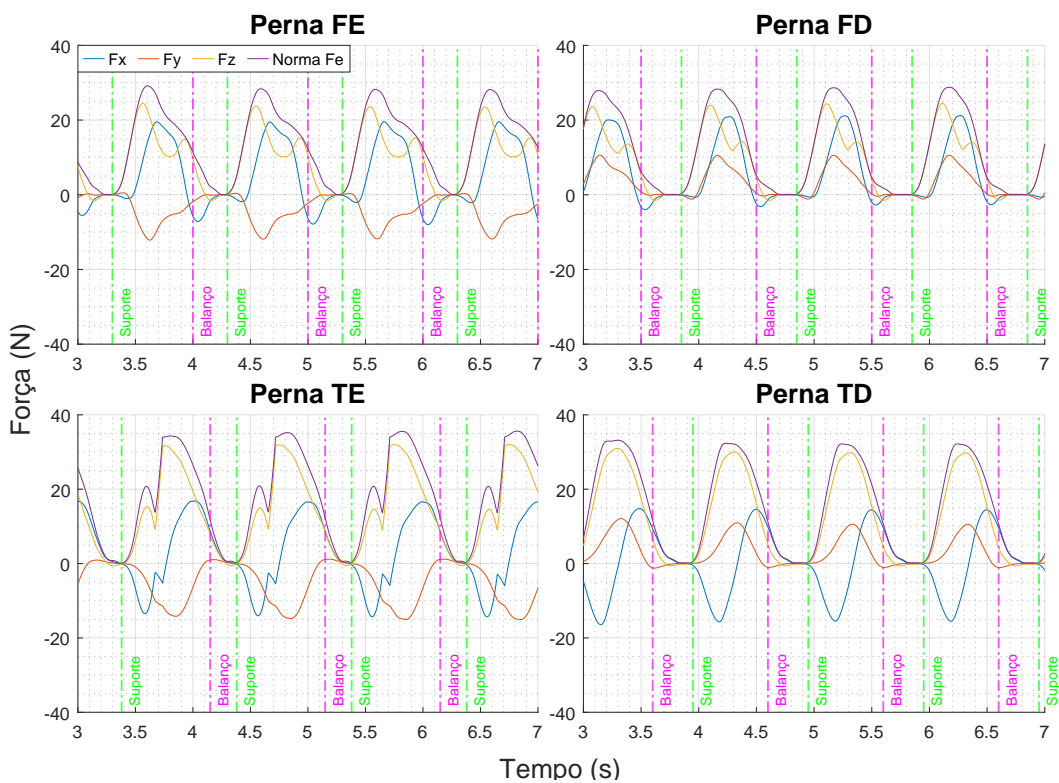
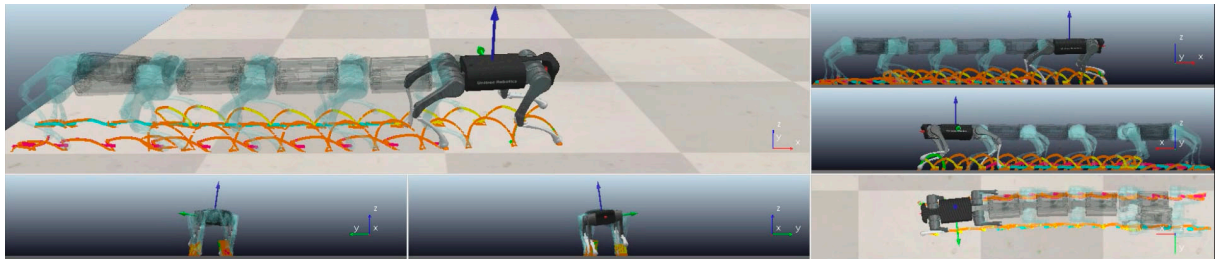


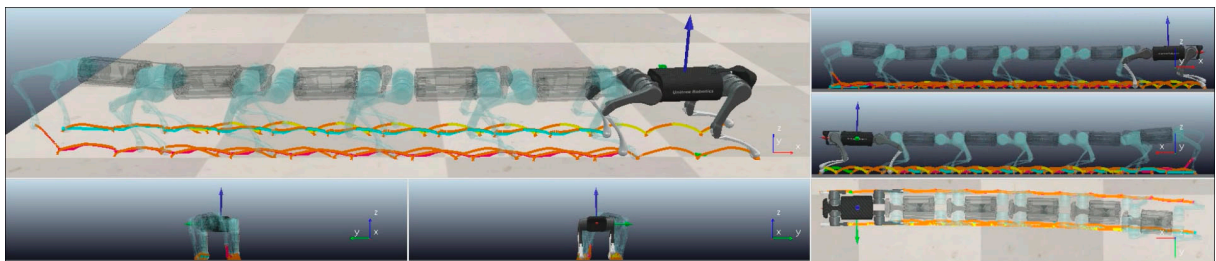
Figura 47 – Forças Externas no pé do Robô ( $F_e$ ) durante a execução de 4 passos em caminhada estática.



Os gráficos apresentados ilustram o padrão de marcha de caminhada estática. Porém foram realizadas simulações também para trote, que obtiveram resultados semelhantes. A figura 48 apresentam os movimentos das pernas durante os padrões de marcha de caminhada estática e trote.



(a) Caminhada estática



(b) Trote

Figura 48 – Representação do movimento dos padrões de marcha.

Segundo Alexander [1984], a velocidade média de locomoção com pernas, considerando passadas bem sucedidas e constantes, pode ser estimada pela multiplicação da frequência do passo pelo seu comprimento. Desta maneira nestas simulações o robô poderia se mover com uma velocidade de  $0.1 \text{ m/s}$  ( $0.36 \text{ km/h}$ ); porém é perceptível visualmente nos resultados da simulação que a caminhada estática não obteve passos iniciais bem sucedidos como no trote. A curva de Bézier é calculada com o referencial nos ombros do robô, devido a isso os passos visualizados na simulação diferem da figura 44, pois o referencial do ombro move com o corpo, que durante a marcha muda sua posição e orientação. Outro fator é o rastreamento da trajetória da curva de Bézier ser obtido somente na fase de balanço, devido à ausência da força nos pés. Apesar do rastreamento não ser obtido na fase de suporte, o movimento do pé segue a direção da trajetória da curva de Bézier que, na ausência de escorregamento no ponto de apoio, move o corpo do robô na direção oposta. A trajetória do tronco do robô não segue uma linha reta devido à transição das passadas do padrão de marcha, como em animais quadrúpedes. Esta oscilação do torso pode ser minimizada utilizando outras abordagens de controle.

## 5.4 Controle do corpo

O terceiro conjunto de simulações realizadas foi o controle das pernas com o controle do corpo. Foi fornecido como trajetória de referência uma curva Lemniscata de Bernoulli com comprimento de 5 m, e uma velocidade angular de parametrização da curva de  $10^\circ/s$ . Essa curva foi escolhida pois o robô executa curvas para direita e esquerda, possibilitado testar se o controle consegue executar estes movimentos.

Durante as simulações, foram verificados os padrões de marcha de caminhada estática e trote. A figura 49 representa a curva de referência em amarelo e a trajetória executada pelo robô em roxo, ilustrando também os dois padrões de marcha implementados e a visão superior da simulação. O controle de posição do corpo conseguiu fazer com que o ponto utilizado como sistema de coordenadas de referência do robô seguisse a trajetória da Lemniscata, tanto com o padrão de locomoção de caminhada estática quanto de trote. No começo da simulação, tanto na caminhada estática quanto no trote, o robô realizou um giro de  $180^\circ$  buscando o ponto amarelo que representa a posição atual da Lemniscata. Em seguida, quando o ponto do centro das pernas encontra o ponto amarelo, ele segue a trajetória de referência, tendo o erro de posição minimizado com o tempo.

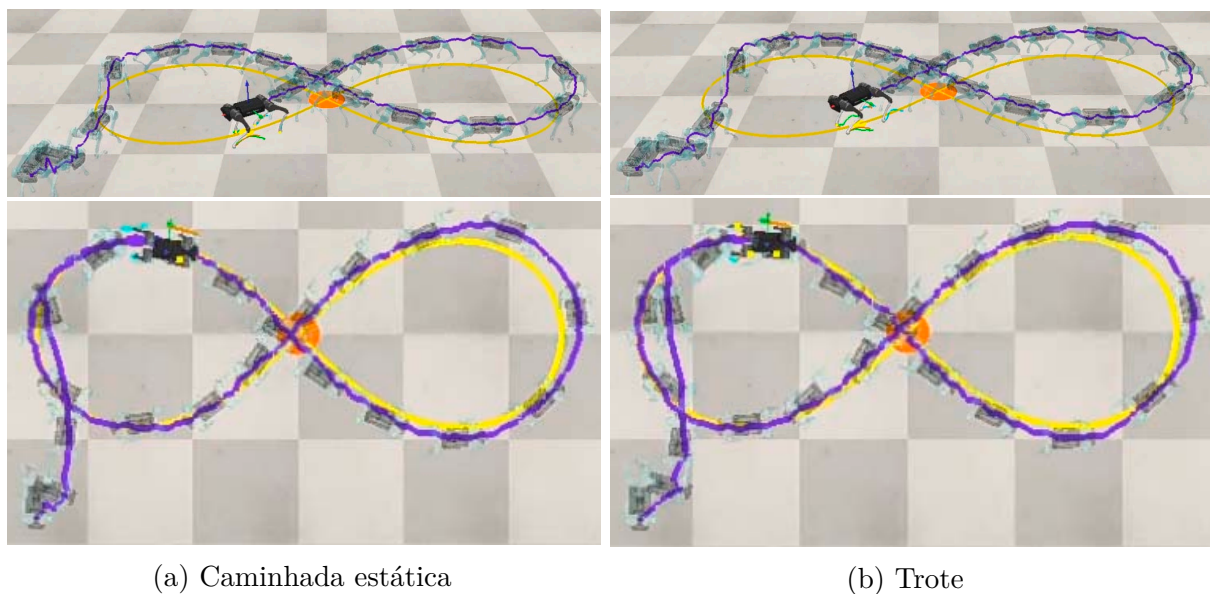


Figura 49 – Simulações do controle corpo do robô utilizando como trajetória de referência uma curva Lemniscata de Bernoulli, executando padrões de marcha de caminhada estática e trote.

No início das simulações, é possível observar um erro referente a posição inicial do robô com respeito a curva de referência. Os efeitos desse erro são observados até o final da execução do primeiro segmento curvo. Apesar do erro inicial, no decorrer da simulação o robô segue a curva Lemniscata sem dificuldades num padrão cíclico, reduzindo este erro de posição. A velocidade de locomoção durante as simulações foi de aproximadamente  $0.19 \text{ m/s}$  ( $0.68 \text{ km/h}$ ) e o tempo simulado foi de 46 segundos.

# Capítulo 6

## Conclusões e trabalhos futuros

Esta dissertação apresentou o controle de 4 perna de um robô quadrúpede, utilizando curvas de Bézier para gerar dois padrões de marcha para os pés do robô, enviadas para o controle de impedância como uma referência de movimento de passos, integrados a um controle de posição do corpo do robô com um modelo cinemático planar.

O controle de impedância foi implementado com o modelo dinâmico de cada perna calculado utilizando o método de Euler-Lagrange. Os ganhos do controle de impedância foram definidos buscando a melhor resposta para seguir a trajetória da curva de Bézier de referência e ter o efeito de massa-mola-amortecedor desejado.

Os padrões de marcha de caminhada estática e trote foram implementados utilizando curvas de Bézier de 6º grau que puderam gerar trajetórias sincronizadas para os passos, permitindo a movimentação do robô inclusive com passos laterais.

O controle do corpo foi implementado utilizando um modelo cinemático planar desenvolvido a partir de um robô móvel com rodas e arquitetura diferencial. Nesse modelo planar foi retirada a restrição não-holonômica na direção  $y_r$ , permitindo que o robô executasse velocidades nessa direção. Esse controle foi utilizado para o robô seguir uma trajetória de referência para o corpo, com o corpo alinhado na direção do movimento.

Toda a estratégia de controle apresentada foi validada em ambiente de simulação utilizando o software de simulação CoppeliaSim integrado com o Matlab. O modelo do robô A1 utilizado em simulação foi implementado por meio do seu arquivo URDF fornecido pela fabricante, e configurado para o controle de torque nas suas juntas. A simulação no CoppeliaSim utilizou o motor de física Vortex devido à precisão e realismo das suas simulações para dinâmica de corpo rígido, detecção de colisão, determinação de contato e reações dinâmicas.

O controle de impedância funcionou como o esperado sendo complacente às forças aplicadas nos pés do robô visando amortecer as passadas. Isso é verificado no erro de posição em  $z$  maior nas fases de suporte do robô. Porém em uma aplicação real no robô A1 será necessário algum método de estimação das forças dos pés usando os sensores de corrente dos motores, pois o robô A1 não possui sensores de força nos pés como simulado, somente um sensor de toque.

A curva de Bézier se mostrou uma boa ferramenta matemática para traçar trajetórias que podem ser alteradas facilmente mudando a posição dos pontos de controle, sendo esta característica muito útil para mudar o padrão de locomoção do gerador de marchas quando necessário. As simulações no CoopeliaSim utilizando o motor de física Vortex obtiveram resultados de força e torque próximos a estimativas reais. Isso é uma constatação do realismo do motor de física Vortex, que pode ser uma ferramenta poderosa para estudos e desenvolvimento de controle de robôs, assim como planejamento e simulação de atividades, que podem ser executadas por robôs móveis e manipuladores.

O controle planar do corpo funcionou como proposto, conseguindo seguir uma trajetória utilizada como referência descrita por uma curva Lemniscata de Bernoulli. Apesar do sucesso da simulação deste controle planar do corpo, é necessário destacar as suas limitações. O modelo levantando é planar, desta maneira dependendo da aplicação em terrenos acidentados, pode ser necessário utilizar um modelo mais completo que considere os movimentos no espaço, ou um modelo dinâmico completo. O modelo cinemático utilizado e controle proposto não consideram distúrbios de forças aplicadas diretamente no corpo do robô. Dessa maneira, se uma força aplicada ao corpo não for amortecida pelo controle de impedância dos pés do robô, pode ser necessário que este realize um movimento lateral de compensação, o que poderia acarretar no tombamento do robô. Porém, se a força apenas deslocar o robô e a referência de posição não for perdida, este controlador continua a minimizar o erro de posição. Este controle também possui limites de velocidade, comparado com outras abordagens de controle, pois o sincronismo das pernas pode mudar com velocidades maiores, e o fator de ocupação de 0.8 não atenderia a velocidades altas, sendo necessário modificá-lo. Para velocidades até  $0.36 \text{ m/s}$  ( $1,29 \text{ km/h}$ ) na direção  $x_r$  do robô o controle proposto não teve problemas.

## 6.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros é proposto investigar outras curvas de Bézier para definir trajetórias fechadas como *B-splines*, possibilitando a obtenção de curvas fechadas e suaves para as gerações dos passos. Também pode ser estudada a utilização das curvas de Bézier na implementação de um controle do robô para desviar de objetos.

Um trabalho interessante é desenvolver um método de estimação das forças dos pés. Uma possível abordagem é utilizar o modelo dinâmico das pernas ou do corpo do robô junto com as informações dos sensores de corrente e posição dos motores. Outra abordagem seria desenvolver e instrumentar um sensor de força nos pés do robô.

Mais uma proposta de trabalho é desenvolver um gerador de marchas que mude os parâmetros com o aumento da velocidade corpo do robô, como os parâmetros de sincronia das passadas de fase relativa e o fator de ocupação, implementando padrões de marcha de corrida que pode permitir o robô se mover com maiores velocidades.

Um trabalho desafiador é desenvolver um planejador de padrões de locomoção para a movimentação em terrenos irregulares, utilizando câmeras ou sensores a laser para mapear o solo e por meio deste mapa planejar os passos a serem executados evitando regiões instáveis em ambientes não estruturados.

Também podem ser realizadas trabalhos com o objetivo de obter provas mais complexas de estabilidade utilizando Lyapunov ou modificar o controle proposto nessa dissertação, investigando outros modelos cinemáticos ou dinâmicos que considerem o deslocamento no espaço e forças de distúrbio no corpo do robô.

O objetivo final da pesquisa consiste em implementar e validar toda a estratégia em um robô quadrúpede real, permitindo que o mesmo se locomova de maneira eficiente nos diferentes ambientes onde o dispositivo robótico necessite executar uma tarefa.

# Referências

- A. Aeini, M. Pourassad, M. R. Haghjoo, e M. Taghizadeh. Trotting Gait Planning and Modeling of a Quadruped Robot. In *2022 8th Int. Conf. on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*. IEEE, Mar. 2022.
- R. M. Alexander. The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals. *The Int. Journal of Robotics Research*, 3(2):49–59, June 1984.
- ANYbotics. Meet ANYmal, your new inspector. Disponível em: <https://www.anybotics.com/anymal-autonomous-legged-robot/>. Acesso em: 23 de Janeiro 2023, 2023.
- D. Belter, J. Bednarek, H.-C. Lin, G. Xin, e M. Mistry. Single-shot Foothold Selection and Constraint Evaluation for Quadruped Locomotion. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, May 2019.
- T. Boaventura, C. Semini, J. Buchli, M. Frigerio, M. Focchi, e D. G. Caldwell. Dynamic torque control of a hydraulic quadruped robot. In *2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. IEEE, May 2012.
- Boston Dynamics. Boston dynamics website. Disponível em: <https://www.bostondynamics.com>. Acesso em: 23 de Janeiro 2023, 2023.
- Brasil Mineral. Robô ANYmal atua na manutenção de Tubarão. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/robo-anymal-atua-na-manutencao-de-tubarao>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2022.
- Bruno Villas Bôas. Robôs ganham espaço em fábricas e no campo assumindo tarefas de risco. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/robos-ganham-espaco-em-fabricas-e-no-campo-assumindo-tarefas-de-risco/>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2021.
- J. Buchli, M. Kalakrishnan, M. Mistry, P. Pastor, e S. Schaal. Compliant quadruped locomotion over rough terrain. In *2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Oct. 2009.



- J. Carius, R. Ranftl, V. Koltun, e M. Hutter. Trajectory Optimization for Legged Robots With Slipping Motions. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3):3013–3020, July 2019.
- M. Chignoli, D. Kim, E. Stanger-Jones, e S. Kim. The MIT Humanoid Robot: Design, Motion Planning, and Control For Acrobatic Behaviors, 2021.
- Coppelia Robotics. Dynamics. Disponível em: <https://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/dynamicsModule.htm>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2023.
- N. Dini e V. J. Majd. An MPC-based two-dimensional push recovery of a quadruped robot in trotting gait using its reduced virtual model. *Mechanism and Machine Theory*, 146:103737, Apr. 2020.
- Diário do Comércio. Vale investe em robôs para retirar empregados de situação de risco e aumentar a segurança das operações. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2021.
- EESC-USP. Mostra de Robótica da EESC apresentará novidades em robôs para a agricultura, medicina e outras finalidades. Disponível em: [https://eesc.usp.br/noticias/posts\\_s.php?guid=28792&termid=not\\_gerais](https://eesc.usp.br/noticias/posts_s.php?guid=28792&termid=not_gerais). Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2022.
- Evan Ackerman. DARPA SubT Finals: Meet the Teams. Disponível em: [https://spectrum.ieee.org/darpa-subterranean-challenge?utm\\_campaign=post-teaser&utm\\_content=lz6rgp3w](https://spectrum.ieee.org/darpa-subterranean-challenge?utm_campaign=post-teaser&utm_content=lz6rgp3w). Acesso em: 23 de Janeiro 2023, 2021.
- P. Fankhauser e M. Hutter. ANYmal: A Unique Quadruped Robot Conquering Harsh Environments. 2018.
- P. Fankhauser, C. D. Bellicoso, C. Gehring, R. Dubé, A. Gawel, e M. Hutter. Free gait—An architecture for the versatile control of legged robots. In *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pages 1052–1058. IEEE, 2016.
- G. Farin. *Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide*. Elsevier, 2014.
- G. Feng, H. Zhang, Z. Li, X. B. Peng, B. Basireddy, L. Yue, Z. Song, L. Yang, Y. Liu, K. Sreenath, e S. Levine. GenLoco: Generalized Locomotion Controllers for Quadrupedal Robots, 2022.
- Flavia Marinho. Revap, a terceira maior refinaria do Brasil, recebe o mais novo aliado da Petrobras: ‘ANYmal’, o primeiro robô quadrúpede do mercado vai atuar

- de forma autônoma em refinarias e plataformas de petróleo. Disponível em: <https://clickpetroleogas.com.br/>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2022.
- C. Gehring, S. Coros, M. Hutter, M. Bloesch, M. A. Hoepflinger, e R. Siegwart. Control of dynamic gaits for a quadrupedal robot. In *2013 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. IEEE, May 2013.
- R. Grandia, F. Farshidian, R. Ranftl, e M. Hutter. Feedback MPC for Torque-Controlled Legged Robots, 2019.
- M. Hildebrand. Chapter 3. walking and running. In *Functional Vertebrate Morphology*, pages 38–57. Harvard University Press, Dec. 1985.
- T. Horvat, K. Melo, e A. J. Ijspeert. Model predictive control based framework for CoM control of a quadruped robot. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Sept. 2017.
- W. Hou, L. Ma, J. Wang, e J. Zhao. Walking Decision of Hydraulic Quadruped Robot in Complex Environment. In *2020 Chinese Control And Decision Conf. (CCDC)*. IEEE, Aug. 2020.
- M. Hutter, C. D. Remy, M. A. Hoepflinger, e R. Siegwart. Efficient and versatile locomotion with highly compliant legs. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(2):449–458, 2012.
- M. Hutter, C. Gehring, A. Lauber, F. Gunther, C. D. Bellicoso, V. Tsounis, P. Fankhauser, R. Diethelm, S. Bachmann, M. Blösch, et al. Anymal-toward legged robots for harsh environments. *Advanced Robotics*, 31(17):918–931, 2017.
- B. Jin, C. Sun, A. Zhang, N. Ding, J. Lin, G. Deng, Z. Zhu, e Z. Sun. Joint Torque Estimation toward Dynamic and Compliant Control for Gear-Driven Torque Sensorless Quadruped Robot. In *2019 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Nov. 2019.
- D. Kang, F. De Vincenti, e S. Coros. Nonlinear Model Predictive Control for Quadrupedal Locomotion Using Second-Order Sensitivity Analysis. 6th Workshop on legged robots – 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022.
- K. Kiguchi, Y. Kusumoto, K. Watanabe, K. Izumi, e T. Fukuda. Energy-optimal gait analysis of quadruped robots. *Artificial Life and Robotics*, 6(3):120–125, Sept. 2002.
- D. Kim, J. Di Carlo, B. Katz, G. Bledt, e S. Kim. Highly Dynamic Quadruped Locomotion via Whole-Body Impulse Control and Model Predictive Control. arXiv, 2019.

- H. Kolvenbach, D. Wisth, R. Buchanan, G. Valsecchi, R. Grandia, M. Fallon, e M. Hutter. Towards autonomous inspection of concrete deterioration in sewers with legged robots. *Journal of Field Robotics*, 37(8):1314–1327, May 2020.
- H. Kolvenbach, P. Arm, G. Valsecchi, N. Rudin, e M. Hutter. Towards legged robots for planetary exploration. In *ICRA Workshop on Legged Robots*, 2022.
- J. R. Koza, F. H. Bennett, D. Andre, e M. A. Keane. Automated design of both the topology and sizing of analog electrical circuits using genetic programming. In *Artificial Intelligence in Design '96*, pages 151–170. Springer Netherlands, 1996.
- J. Lee, J. Hwangbo, L. Wellhausen, V. Koltun, e M. Hutter. Learning quadrupedal locomotion over challenging terrain. *Science Robotics*, 5(47), Oct. 2020.
- M. Liu, D. Qu, F. Xu, F. Zou, P. Di, e C. Tang. Quadrupedal robots whole-body motion control based on centroidal momentum dynamics. *Applied Sciences*, 9(7):1335, Mar. 2019.
- A. D. Luca e G. Oriolo. Local incremental planning for nonholonomic mobile robots. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Comput. Soc. Press, 1994.
- Luiz Gustavo Pacete. Não é só o Rock in Rio: Vale e Petrobras já usam cão robô. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbes-tech/2022/09/empresa-mineira-traz-ao-brasil-robo-cao-igual-ao-do-rock-in-rio/>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2022.
- S. Ma, T. Tomiyama, e H. Wada. Omnidirectional static walking of a quadruped robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(2):152–161, Apr. 2005.
- T. Miki, J. Lee, J. Hwangbo, L. Wellhausen, V. Koltun, e M. Hutter. Learning robust perceptive locomotion for quadrupedal robots in the wild. *Science Robotics*, 7(62), Jan. 2022.
- J. Norby, Y. Yang, A. Tajbakhsh, J. Ren, J. K. Yim, A. Stutt, Q. Yu, N. Flowers, e A. M. Johnson. Quad-SDK: Full stack software framework for agile quadrupedal locomotion. In *ICRA Workshop on Legged Robots*, 2022.
- O Especialista. Cão-robô consegue emprego de segurança na Vale. Disponível em: <https://oespecialista.com.br/cao-robo-consegue-emprego-de-seguranca-na-vale/>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2021.
- A. Pandala, V. R. Kamidi, e K. A. Hamed. Decentralized control schemes for stable quadrupedal locomotion: A decomposition approach from centralized controllers. In *2020 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Oct. 2020.

- J. Park e J. H. Park. Impedance control of quadruped robot and its impedance characteristic modulation for trotting on irregular terrain. In *2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Oct. 2012.
- G. D. G. Pedro e G. M. Freitas. Controle complacente de passo para um robô quadrupede utilizando curvas de Bézier. In *Proceedings do XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. SBA Sociedade Brasileira de Automática, 2021.
- G. D. G. Pedro e G. M. Freitas. Controle dinâmico de marcha e passo para um robô quadrupede utilizando curvas de Bézier. In *Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2022*. sbabra, Nov. 2022.
- R7. Refinaria da Petrobras faz primeiro teste com "robô cachorro". Disponível em: <https://noticias.r7.com/economia/refinaria-da-petrobras-faz-primeiro-teste-com-robo-cachorro-16122022>. Acesso em: 24 de Janeiro 2023, 2022.
- M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, e R. Playter. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):10822–10825, 2008.
- N. Rathod, A. Bratta, M. Focchi, M. Zanon, O. Villarreal, C. Semini, e A. Bemporad. Model predictive control with environment adaptation for legged locomotion. *IEEE Access*, 9:145710–145727, 2021.
- C. Semini, V. Barasuol, T. Boaventura, M. Frigerio, M. Focchi, D. G. Caldwell, e J. Buchli. Towards versatile legged robots through active impedance control. *The International Journal of Robotics Research*, 34(7):1003–1020, 2015.
- S. Seok, A. Wang, M. Y. Chuah, D. Otten, J. Lang, e S. Kim. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3307–3312. IEEE, 2013.
- R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, e D. Scaramuzza. *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press, 2011.
- M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, et al. *Robot modeling and control*. 2006.
- Team CERBERUS. Team cerberus wins the darpa subterranean challenge! Disponível em: <https://www.subt-cerberus.org>. Acesso em: 23 de Janeiro 2023, 2021.
- S. Teng e M. Ghaffari. A Lie Algebraic Model Predictive Control for Legged Robot Control: Implementation and Stability Analysis. In *6th Workshop on legged robots – 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2022.
- D. J. Todd. *Walking machines: an introduction to legged robots*. Springer US, 1985.

- Unitree. Unitree website. Disponível em: <https://www.unitree.com/en/>. Acesso em: 23 de Janeiro 2023, 2023.
- O. Villarreal, V. Barasuol, P. M. Wensing, D. G. Caldwell, e C. Semini. MPC-based controller with terrain insight for dynamic legged locomotion. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, May 2020.
- Y. Wang, M. Ramezani, e M. Fallon. Actively mapping industrial structures with information gain-based planning on a quadruped robot. In *2020 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, May 2020.
- A. W. Winkler, F. Farshidian, D. Pardo, M. Neunert, e J. Buchli. Fast Trajectory Optimization for Legged Robots Using Vertex-Based ZMP Constraints. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(4):2201–2208, Oct. 2017.
- A. W. Winkler, C. D. Bellicoso, M. Hutter, e J. Buchli. Gait and trajectory optimization for legged systems through phase-based end-effector parameterization. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1560–1567, July 2018.
- L. Zhang, S. Ma, e K. Inoue. Several insights into omnidirectional static walking of a quadruped robot on a slope. In *2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Oct. 2006.

# Apêndice A

## Modelo dinâmico das pernas

Neste apêndice é apresentado o modelo dinâmico das pernas necessário para a linearização por realimentação do controle de impedância, obtido utilizando as equações de Euler-Lagrange. Dois modelos dinâmicos foram calculados, um para as pernas do lado direito e outro para as pernas do lado esquerdo. O esquemático apresentado na figura 50 foi usado para calcular o modelo dinâmico. Nesse esquemático  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  são os comprimentos dos elos 1, 2 e 3. As massas dos elos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  são  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$  respectivamente. Para esta dissertação foram utilizadas as posições das massas  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$  como  $L_{m1} = L_1/2$ ,  $L_{m2} = L_2/2$  e  $L_{m3} = L_3/2$ . As posições angulares das juntas são dadas por  $q_1$ ,  $q_2$  e  $q_3$ . A força externa aplicada na ponta do pé é dada por  $F_e$ . Por meio deste esquemático e usando a convenção de Denavit-Hartenberg para as pernas do lado direito e esquerdo, foram encontrados os parâmetros de Denavit-Hartenberg organizados na tabela 1.

Tabela 1 – Tabela dos parâmetros de Denavit-Hartenberg das pernas direita e esquerda

Elo	$\theta_i$	$d$	$a$	$\alpha$	<i>offset</i>
Perna direita					
1	$-90^\circ$	0	0	$-90^\circ$	0
2	$q_1$	0	0	$90^\circ$	$90^\circ$
3	$q_2$	$L_1$	$L_2$	0	0
4	$q_3$	0	$L_3$	0	0
Perna esquerda					
1	$-90^\circ$	0	0	$-90^\circ$	0
2	$q_1$	0	0	$90^\circ$	$90^\circ$
3	$q_2$	$-L_1$	$L_2$	0	0
4	$q_3$	0	$L_3$	0	0

Na tabela apresentada a única diferença das pernas direita para as esquerda é o deslocamento do elo  $L_1$ , que na perna esquerda é no sentido negativo. Essa tabela foi utilizada para o cálculo das matrizes de transformação homogênea dos sistemas de coordenadas  $O_0$  até  $O_4$ .



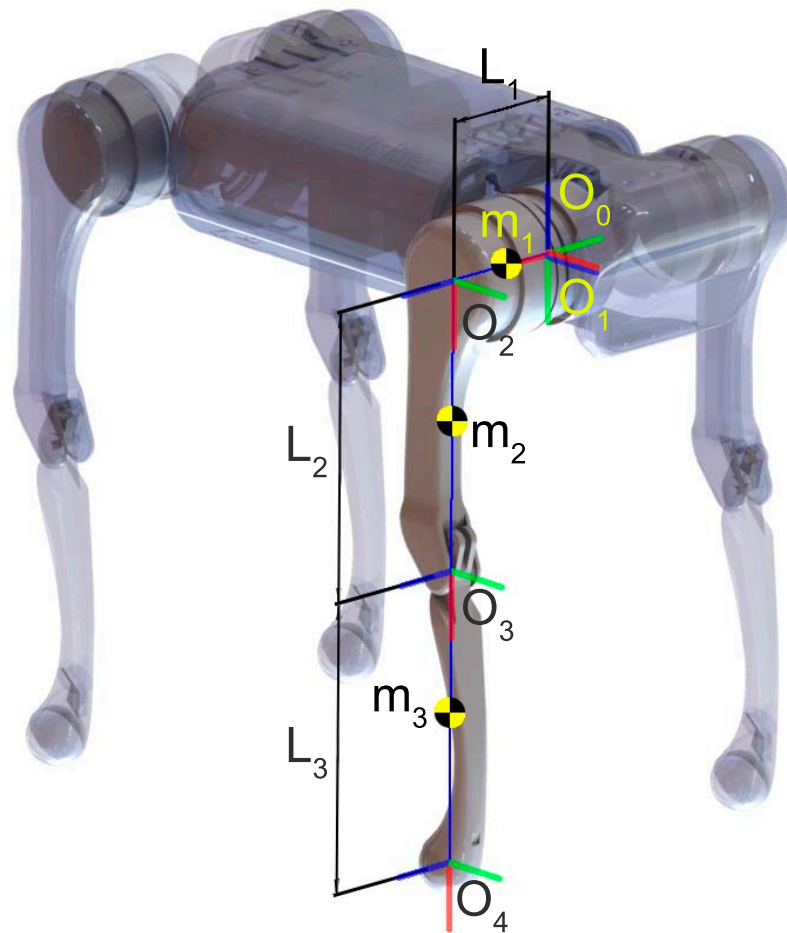


Figura 50 – Esquemático das juntas, centro de massa e sistemas de coordenadas de uma perna do robô A1.

Por meio do esquemático apresentando e da convenção da Denavit-Hartenberg também foram calculadas as matrizes jacobianas das pernas direita e esquerda, incluindo das massas  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , e da ponta do pé. As jacobianas das massas são utilizadas para o cálculo do modelo dinâmico das pernas utilizando as equações de Euler-Lagrange, e a jacobiana do pé é usada para relacionar as forças aplicadas na ponta do pé por meio do princípio do trabalho virtual e para a transformação de variáveis que relaciona o espaço de trabalho com o espaço das juntas. As matrizes jacobianas dos pés das pernas do lado direito ( $J_d$ ) e do lado esquerdo ( $J_e$ ) são apresentadas a seguir:

$$J_d = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_4 + L_2 \cos(q_2) & \sigma_4 \\ \sigma_1 & -\sin(q_1) \sigma_3 & -L_3 \sin(q_2 + q_3) \sin(q_1) \\ \sigma_2 & \cos(q_1) \sigma_3 & L_3 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_1) \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(q_1) & -\cos(q_1) \\ 0 & -\sin(q_1) & -\sin(q_1) \end{bmatrix}, \quad (\text{A.1})$$

onde:

$$\sigma_1 = L_1 \sin(q_1) + L_2 \cos(q_1) \cos(q_2) + L_3 \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - L_3 \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3),$$

$$\sigma_2 = L_2 \cos(q_2) \sin(q_1) - L_1 \cos(q_1) + L_3 \cos(q_2) \cos(q_3) \sin(q_1) - L_3 \sin(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3),$$

$$\sigma_3 = L_3 \sin(q_2 + q_3) + L_2 \sin(q_2),$$

$$\sigma_4 = L_3 \cos(q_2 + q_3), \text{ e:}$$

$$J_e = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_4 + L_2 \cos(q_2) & \sigma_4 \\ \sigma_1 & -\sin(q_1) \sigma_3 & -L_{m3} \sin(q_2 + q_3) \sin(q_1) \\ \sigma_2 & \cos(q_1) \sigma_3 & L_{m3} \sin(q_2 + q_3) \cos(q_1) \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(q_1) & -\cos(q_1) \\ 0 & -\sin(q_1) & -\sin(q_1) \end{bmatrix}, \quad (\text{A.2})$$

onde:

$$\sigma_1 = L_2 \cos(q_1) \cos(q_2) - L_1 \sin(q_1) + L_{m3} \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - L_{m3} \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3),$$

$$\sigma_2 = L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_2) \sin(q_1) + L_{m3} \cos(q_2) \cos(q_3) \sin(q_1) - L_{m3} \sin(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3),$$

$$\sigma_3 = L_{m3} \sin(q_2 + q_3) + L_2 \sin(q_2),$$

$$\sigma_4 = L_{m3} \cos(q_2 + q_3).$$

Por meio das matrizes jacobiana das massas foi calculada a energia cinética da perna seguindo a metodologia de Euler-Lagrange. As forças de coriolis foram calculadas usando os símbolos de Christoffel. Dessa maneira foi encontrada a equação dinâmica não linear (3.3) de cada uma das pernas utilizada no controle de impedância.

As massas, tensores de inércia e comprimentos dos elos utilizados nos cálculos são os da perna do robô A1 da Unitree apresentados na Tabela 2. Cabe também destacar que o robô A1 da Unitree possui 12 motores nas juntas com o torque máximo de 33.5  $N.m$ . Os limites das juntas das pernas do robô A1 são apresentados na tabela 3.

Tabela 2 – Valores utilizados no modelo dinâmico da perna do robô.

$m_1$	0.696 $kg$	$m_3$	0.226 $kg$
$I_{m1xx}$	0.0006738 $kg.m^2$	$I_{m3xx}$	0.0181 $kg.m^2$
$I_{m1yy}$	0.001161 $kg.m^2$	$I_{m3yy}$	0.0001549 $kg.m^2$
$I_{m1zz}$	0.0007944 $kg.m^2$	$I_{m3zz}$	0.01816 $kg.m^2$
$m_2$	1.013 $kg$	$L_1$	0.085 $m$
$I_{m2xx}$	0.005486 $kg.m^2$	$L_2$	0.2 $m$
$I_{m2yy}$	0.001322 $kg.m^2$	$L_3$	0.2 $m$
$I_{m2zz}$	0.005073 $kg.m^2$	$g$	9.81 $m/s^2$

Tabela 3 – Limites das juntas do robô A1

Juntas	Min ( $^\circ$ )	Max ( $^\circ$ )
1	-46	46
2	-240	60
3	6	155