

PROPOSTA DE ROBÔ QUADRÚPEDE COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE (3DOF) EM CADA PERNA¹

PROPOSAL FOR A QUADRUPED ROBOT WITH THREE DEGREES OF FREEDOM (3DOF) IN EACH LEG

Gabriel Azenha Fachim², Alessandro André Mainardi de Oliveira³ e
Herysson Rodrigues Figueiredo⁴

RESUMO

Este artigo aborda o desenvolvimento de um robô quadrúpede com três graus de liberdade em cada perna, controlado remotamente através de uma aplicação IoT wireless. O trabalho envolve o projeto dos componentes de hardware e software, aderindo à metodologia ágil Kanban. A estrutura mecânica do robô é projetada para se adaptar em diversos tipos de terrenos, enquanto o software de controle utiliza os cálculos da cinemática inversa para permitir a locomoção. A construção deste robô aborda os desafios da robótica móvel, particularmente em ambientes com solo irregular, onde robôs com rodas tradicionais têm desempenho inferior.

Palavras-chave: Robô com pernas, Cinemática Inversa, Robótica móvel, Micropython.

ABSTRACT

This article addresses the development of a quadruped robot with three degrees of freedom on each leg, controlled remotely through a wireless IoT application. The work involves the design of hardware and software components, adhering to the agile Kanban methodology. The robot's mechanical structure is designed to adapt to different types of terrain, while the control software uses inverse kinematics calculations to allow locomotion. The construction of this robot addresses the challenges of mobile robotics, particularly in environments with uneven ground, where traditional wheeled robots underperform.

Keywords: Legged robot, Inverse Kinematics, Mobile robotics, Micropython.

1 Trabalho Final de Graduação do Curso de Ciência da Computação.

2 Acadêmico do Curso de Ciência da Computação - Universidade Franciscana - UFN. E-mail: gabriel.afachim@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8511-4025>

3 Professor dos Cursos da Área de Computação - Universidade Franciscana - UFN. E-mail: alessandro.andre@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8579-2635>

4 Orientador do Trabalho e Professor dos Cursos da Área de Computação - Universidade Franciscana - UFN. E-mail: herysson.figueiredo@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2615-9785>

INTRODUÇÃO

A robótica é a área da ciência que estuda o desenvolvimento e construção do software e *hardware* dos robôs. Com a atual ascensão tecnológica, tornou-se comum o emprego de robôs em diversas tarefas, como pilotagem de veículos e aeronaves, treinamentos e serviços militares, cirurgias, manuseio de materiais de risco, exploração espacial e automação de ambientes de trabalho (DANTAS, 2020). Diversas dessas aplicações, no entanto, necessitam que seus respectivos robôs possuam a capacidade de locomoção, o que deu origem à área da robótica móvel.

Na robótica móvel, é fundamental a definição de um método de locomoção eficiente para a tarefa a ser desempenhada pelo robô. Para aplicações que necessitam eficiência de locomoção em solos planos, a roda é o mecanismo mais comumente escolhido, visto que, quando fabricada utilizando o material adequado, possui capacidade de produzir tração suficiente para permitir locomoção em praticamente qualquer solo plano (ELSHEIKH, 2023).

Contudo, a eficiência da roda diminui consideravelmente quando aplicada em superfícies que possuem grande variação relativa de altura no plano, como, por exemplo, elevações e/ou buracos no terreno. Por esse motivo, foram desenvolvidos diferentes métodos de locomoção robótica, como esteiras e pernas, que garantem às máquinas uma maior adaptação ao terreno (BIRADAR; OLIVIER; DEVANAGAVI, 2022) e, também, o deslocamento vertical do robô, garantindo opções previamente indisponíveis, como a escalada de objetos.

Tamanha autonomia de locomoção, porém, demanda a construção de uma estrutura mecânica mais complexa, bem como o desenvolvimento de um sistema de controle baseado em cálculos de análise cinemática - campo da matemática que analisa os movimentos de um corpo sem considerar as forças responsáveis por tais movimentos (RATHNAM; GODFREY, 2023). Além disso, robôs com múltiplas pernas, comparados com robôs tradicionais, demandam mais energia elétrica, devido à quantidade elevada de atuadores elétricos necessários, sendo comumente utilizados um por junta (ZOULA; ČÍŽEK; FAIGL, 2021).

A capacidade elevada de travessia em terrenos não planos, no entanto, permite a aplicação de robôs com pernas em diversos cenários, como exploração de outros planetas (CORDES; ROEHR; KIRCHNER, 2012) e localização e retirada de minas terrestres (GARCIA; SANZ-MERODIO; GONZALEZ-DE-SANTOS, 2012), além de operações de reconhecimento e resgate em situações de desastres naturais, entre diversos outros exemplos.

Levando em consideração as aplicações e desafios, este trabalho tem como objetivo geral a construção de um robô quadrúpede capaz de locomover-se em diferentes terrenos. Já como objetivo específico, esse deve ser controlado remotamente por um usuário, através de uma aplicação *wireless*.

O trabalho é dividido em várias seções que detalham o desenvolvimento dos projetos e protótipos do robô proposto. A seção subsequente é o Referencial Teórico, em seguida, a seção de materiais e métodos, seguida pela seção de resultados e, por fim, a conclusão e referências.

REFERENCIAL TEÓRICO

Esse trabalho aborda conceitos da área da robótica, principalmente focando na movimentação de robôs com pernas e os cálculos de análise cinemática necessários para o controle de ângulo das juntas, permitindo, dessa forma, a locomoção do robô. Cada perna desse possuirá três juntas, sendo os ângulos entre essas controlados por servomotores, dando ao protótipo 3 graus de liberdade (DOF - *Degrees Of Freedom*), em espaço tridimensional, por perna.

A robótica é definida como a ciência que estuda a construção de robôs, envolvendo diversas áreas e conceitos da engenharia mecânica, elétrica e mecatrônica, para montagem e funcionamento dos dispositivos, e das ciências, para desenvolvimento de softwares de controle (DIAS, 2021).

O termo “robot”, traduzido para robô, foi cunhado pelo escritor e dramaturgo tcheco Karel Čapek, em 1920, em uma peça de teatro chamada *R.U.R (Rossum's Universal Robots)*, e deriva da palavra eslava “rabota”, que significa trabalho. Contudo, o conceito antecede a criação do termo, sendo o barco tele-operado, desenvolvido por Nikola Tesla em 1898, considerado, pela definição atual, o primeiro robô moderno (DANTAS, 2020).

Quanto à locomoção, existem diversos dispositivos efetadores que permitem movimento (MATARIC, 2014), incluindo: Rodas, eficientes para movimentar-se em terrenos uniformes; Braços, úteis para balançar, escalar, arrastar-se; Asas e Hélices, possibilitam levantar voo; Nadadeiras, para aplicação submarina; Pernas e esteiras, eficientes para movimentar-se em terrenos não uniformes.

Robôs com pernas são sistemas móveis que utilizam pernas como meio de locomoção. Esse tipo de robô é amplamente utilizado em situações onde é necessário locomover-se em terreno irregular, sendo considerada, inclusive, a implementação no *rover* lunar da missão Apollo (BEKKER, 1963). Um exemplo desse tipo de locomoção aplicado pode ser observado com o robô quadrúpede Spot (BOSTON DYNAMICS, 2020), desenvolvido pela empresa Boston Dynamics, tendo em vista que o seu sistema de controle complexo, baseado em cálculos de análise cinemática, garante ao Spot a habilidade de movimentar-se em diversos tipos de terrenos.

A cinemática é a ciência que trata do movimento sem considerar as forças que o causam. Nela se estuda a posição, velocidade, aceleração e as derivadas de ordem superior das variáveis de posição com relação ao tempo (CRAIG, 2013). Devido a isso, implica-se a aplicação de um sistema de coordenadas como referencial para essas variáveis.

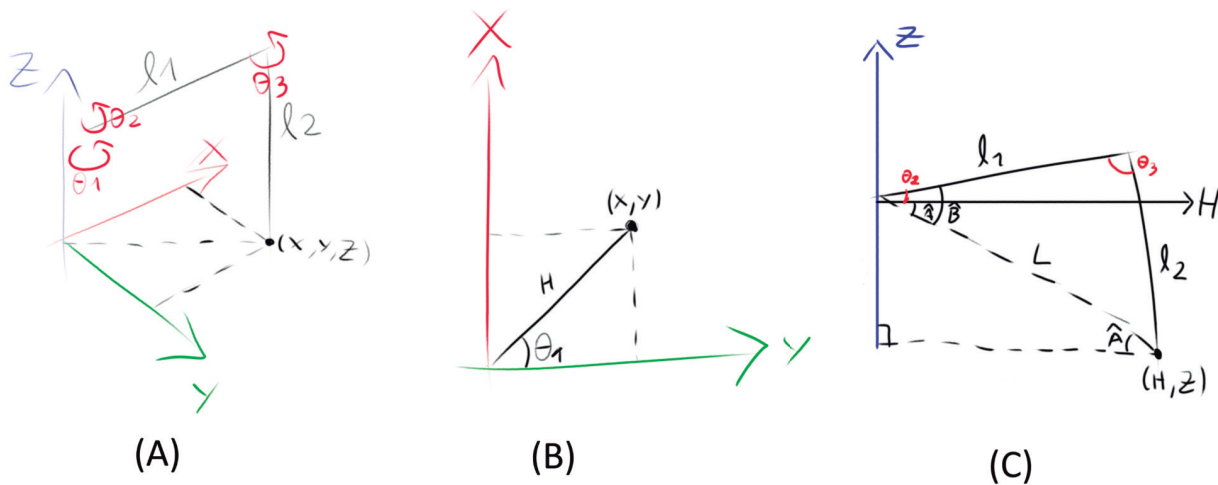
Em sistemas de efetadores robóticos, é utilizado, também, o conceito de cadeia cinemática, conjunto de elos conectados em cadeia através de juntas individualmente controladas. A extremidade

da cadeia é comumente chamada de *end-effector* (efetor final), e sua posição e orientação no espaço podem ser manipuladas através dos cálculos da Cinemática Inversa (*Inverse Kinematics* ou IK), que pode ser calculada utilizando tanto o método algébrico quanto o método geométrico, de acordo com Akula Umamaheswara (RAO; HIMANSHU, 2017).

No método geométrico, a geometria espacial do sistema é decomposta em diversos problemas de geometria plana, permitindo o uso de expressões algébricas para encontrar as possíveis soluções para os ângulos. O resultado é o conjunto dos ângulos que cada junta necessita para que o *end-effector* alcance a posição desejada.

Para resolver a IK do robô proposto, de acordo com Umamaheswara Rao (RAO; HIMANSHU, 2017) e John J. Craig (CRAIG, 2013), deve-se primeiramente definir o formato do manipulador e um sistema de coordenadas para tal. A Figura 1 (A) mostra a representação matemática desse sistema de referência para uma das pernas do robô.

Figura 1 - (A) Sistema de coordenadas de uma perna; (B) Representação matemática da visão superior de uma perna; (C) Representação matemática da visão lateral de uma perna.



Fonte: Construção do Autor.

Após isso, é possível determinar o ângulo da junta θ_1 e o valor de H, demonstrados na Figura 1 (B), através das equações 1 e 2, respectivamente.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{X}{Y} \right) \tag{1}$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{2}$$

O valor de H representa a orientação do manipulador entre os eixos horizontais; isto é, os ângulos das outras juntas serão relativos a H. Dessa forma, deve-se substituir o eixo horizontal da representação matemática por H, como na Figura 1 (C). Assim, na equação 3, torna-se possível calcular o valor de L, que representa a distância do *end-effector* no eixo horizontal.

$$L = \sqrt{Z^2 + H^2} \tag{3}$$

O ângulo θ_3 pode, então, ser calculado diretamente utilizando a lei dos cossenos, como na equação 4.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{(l_1)^2 + (l_2)^2 - (L)^2}{2 \times l_1 \times l_2} \right) \quad (4)$$

Já o ângulo θ_2 deve ser calculado através da soma entre os ângulos B (calculado utilizando novamente a lei dos cossenos) e A (calculado da mesma maneira que θ_1) negativado, como mostrado nas equações 5, 6 e 7.

$$B = \cos^{-1} \left(\frac{(l_1)^2 + (L)^2 - (l_2)^2}{2 \times l_1 \times L} \right) \quad (5)$$

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{H} \right) \quad (6)$$

$$\theta_2 = B + (-A) \quad (7)$$

Vale ressaltar que os valores X, Y e Z representam a posição desejada para o efêtor final no espaço físico e l_1 e l_2 são valores fixos que representam o comprimento de cada segmento da perna. Tendo isso em vista, os valores resultantes das equações 1, 4 e 7 determinam os ângulos necessários em cada junta para posicionar o pé do robô em (X,Y,Z).

Muitos dos resultados dos cálculos da IK, porém, não podem ser utilizados, pois esses ignoram as possíveis colisões entre partes da cadeia. Dessa maneira, torna-se importante considerar a posição da estrutura física durante a execução do algoritmo de IK.

Adicionalmente, alguns artigos que foram relevantes, de alguma maneira, na concepção deste trabalho, seguido da contribuição dos mesmos. Os trabalhos de Rahul Rathnam (RATHNAM; GODFREY, 2023) e Daniel Kusmenko (KUSMENKO; SCHMIDT, 2020) auxiliaram na descoberta de métodos de resolver a IK, enquanto o artigo de Martin Zoula (ZOULA; ČÍŽEK; FAIGL, 2021) apresentou aspectos estruturais importantes para a construção do robô.

O trabalho de Rahul Rathnam foca na análise da cinemática inversa (IK) de robôs, que, ao contrário da cinemática direta, oferece várias soluções possíveis para posicionar um ponto no espaço. Para melhorar a precisão, foram aplicados modelos de `\textit{Machine Learning}`, como redes neurais, árvores de decisão e florestas aleatórias, treinados com dados de equações de cinemática direta. O estudo comparou métodos existentes de IK em sistemas com 7 e 8 graus de liberdade (DOF) em 2D e 3D, mostrando que o método FABRIK foi o mais eficiente em 2D, enquanto em 3D todos os métodos apresentaram limitações de precisão. O artigo é relevante por identificar e comparar algoritmos consolidados de IK, destacando sua eficiência em diferentes cenários.

O trabalho de Martin Zoula detalha a construção do *Hexapod Ant Robot* (HAnTR), um robô hexápode com seis pernas, cada uma com 4 graus de liberdade (DOF), projetado para navegação eficiente em terrenos irregulares. O design mecânico e os algoritmos de controle permitem ao HAnTR manter a estabilidade em diversos tipos de superfícies, inclusive inclinadas. Desenvolvido com base em projetos similares, o HAnTR busca melhorar velocidade, confiabilidade e resistência,

conseguindo se mover por mais de uma hora com carga de 85% de seu peso e atingir 87% de sua velocidade nominal. Apesar de sua superioridade, o HAntR ainda apresenta limitações nos atuadores. O estudo oferece informações valiosas sobre a construção e o aprimoramento de robôs hexápodes.

No artigo de Daniel Kusmenko, é apresentada uma abordagem analítica para resolver a cinemática inversa de um braço robótico com 5 DOF, comparando sua precisão e tempo de execução com métodos numéricos. A solução analítica demonstrou ser mais precisa e rápida, devido à menor demanda de processamento e à capacidade de ser aplicada a cadeias cinemáticas de diferentes comprimentos. Testes com Matlab e um microcontrolador mostraram que essa abordagem supera a numérica em cenários com soluções únicas. A generalização dos cálculos facilita sua aplicação em diversos efetuadores robóticos, como pernas. Esse estudo forneceu a base para o desenvolvimento de um robô quadrúpede, destacando a necessidade de uma metodologia ágil para o gerenciamento do projeto.

A impressão 3D é um método de fabricação aditiva, onde é feito o uso de um software CAD para modelagem 3D de um objeto, em conjunto com uma máquina *Computer Numerical Control* (CNC) capaz de interpretar as instruções de um arquivo *gcode*, nesse caso, uma impressora 3D. Um dos principais tipos dessa CNC, chamado de *Fused Deposition Modelling* (FDM), conduz filamentos de plástico através de uma extrusora, também chamada de *hotend*, aquecida até aproximadamente a temperatura de fusão do material, derretendo-o e depositando-o em camadas, construindo o formato desejado (NGO et al., 2018).

Atualmente, a tecnologia de impressão 3D tornou-se economicamente acessível, tanto pela disponibilidade de softwares CAD e tutoriais para seu uso quanto pelo surgimento de diversas linhas de impressoras domésticas de baixo custo.

Dentre os materiais utilizados na impressão 3D FDM, foi escolhido para este trabalho o filamento Ácido Polilático (PLA) que será utilizado para constituir a estrutura do robô devido à sua alta resistência mecânica. O projeto levará em consideração a montagem dos servomotores nas pernas do robô, assim como a inclusão das baterias e da unidade central de processamento, um Raspberry Pi Pico W, no interior da estrutura.

Raspberry Pi é uma fundação europeia fabricante de microcomputadores, que portam o mesmo nome (RASPBERRY PI, 2024a). Em 2021 a empresa lançou uma linha de dispositivos, intitulada Pico, voltada especificamente para projetos de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT). O Raspberry Pi Pico e seu sucessor, o Raspberry Pi Pico W, lançado em 2022, são plataformas de desenvolvimento e prototipagem eletrônica e possuem 40 pinos, sendo 26 *General Purpose Input/Output* (GPIOs) programáveis e o restante alimentação (RASPBERRY PI, 2024b). Para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhido o modelo Pico W, devido à capacidade de conexão *wireless* e à integração nativa com a linguagem de programação MicroPython.

MicroPython é uma implementação da linguagem de programação de alto nível, Python (PYTHON, 2024). Os códigos feitos em Python não são destinados a rodar em microcontroladores,

tendo em vista que é uma linguagem interpretada, e, conseqüentemente, requer grandes quantidades de recursos computacionais, muitas vezes não disponíveis em microcontroladores (AMPOMAH; MENSAH; GILBERT, 2017).

No entanto, MicroPython é um compilador de códigos Python, ou seja, um software que transforma um código escrito em linguagem de máquina previamente à execução. Tornando possível, dessa maneira, o uso de códigos Python em sistemas que possuem apenas 256kB de memória cache e 16kB de memória RAM (GEORGE ROBOTICS LIMITED, 2024).

Tendo em vista a flexibilidade, agilidade e alta escalabilidade de softwares Python, a compatibilidade nativa de MicroPython com os microcontroladores integrados às placas Raspberry Pi Pico W e a possibilidade de programação de uma aplicação IoT *wireless*, essa linguagem foi escolhida para o desenvolvimento do trabalho.

Aplicações IoT são softwares que integram vários dispositivos interconectados através de rede, seja *wireless* ou cabeada. Existem diversos protocolos de comunicação, incluindo o *Bluetooth* e o *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) (SANTOS, 2023).

Visando o controle do robô proposto, neste trabalho será projetada uma aplicação IoT *wireless* simples, utilizando HTML, bem como JS e HTTP para interpretar e enviar ao Raspberry os inputs do usuário. A partir disso, o microcontrolador deve realizar e aplicar os cálculos necessários para permitir, dessa maneira, a locomoção do robô.

METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho foi escolhida a metodologia ágil Kanban que nasceu na Toyota, em 1960, como uma prática da engenharia industrial, e consistia em um quadro disposto em um local acessível da fábrica, onde os funcionários escolhiam tarefas, alternando o estado dessas entre “não feito”, “fazendo” e “feito”, conforme o andamento do projeto. Recentemente, essa metodologia foi adaptada para o desenvolvimento de software ágil por David Anderson (ANDERSON; CARMICHAEL, 2016).

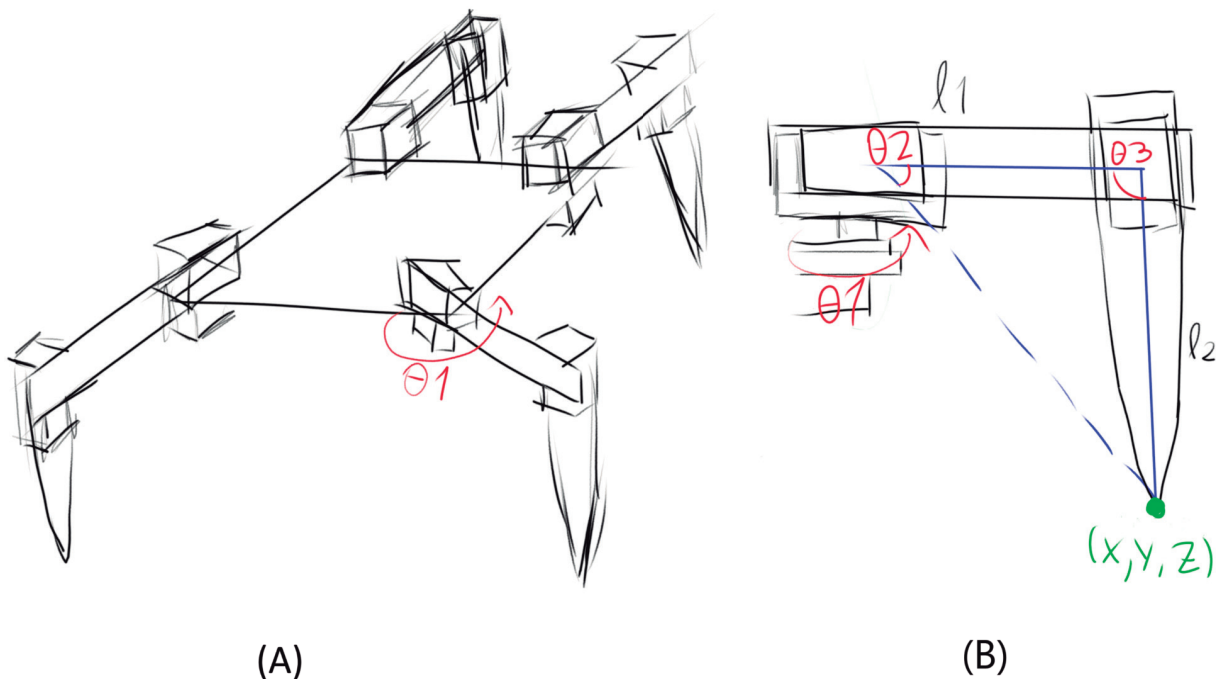
A partir da definição do método ágil, foi idealizado um modelo geral do trabalho, isto é, um esboço inicial contendo a demonstração simplificada do projeto. A Figura 2 (A) mostra um esboço das pernas do robô quadrúpede. O desenho indica a disposição das quatro pernas em relação ao corpo do robô. As pernas estão dispostas de forma simétrica em torno do corpo central, com o ângulo de rotação θ_1 evidenciado.

Já a Figura 2 (B) demonstra o funcionamento de uma única perna, onde l_1 e l_2 representam o comprimento de cada segmento da perna. Além disso, os ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 que representam as juntas, controladas por atuadores elétricos. Essas juntas formam uma cadeia cinemática, cujo efor final, nesse caso, o ponto da perna que faz contato com a superfície, é representado pelo ponto (X,Y,Z).

Tendo em vista que em uma perna existem três juntas com ângulos livres, ou seja, cuja rotação relativa independe das juntas anteriores, pode ser afirmado que cada perna do robô possui 3DOF.

A construção desse modelo geral permitiu uma visualização mais clara do funcionamento do projeto, o que foi crucial para identificar e entender melhor os componentes e interações do sistema. Essa visualização facilitou a etapa de levantamento de requisitos ao permitir a identificação de necessidades específicas de hardware e software, bem como a antecipação de possíveis desafios e limitações técnicas. Com esta visão do modelo, foi possível detalhar as funcionalidades e características desejadas ao levantar os requisitos.

Figura 2 - (A) Esboço do *layout* das pernas do robô; (B) Esboço do funcionamento de uma perna do robô.



Fonte: Construção do Autor.

As especificações requisitadas pelo cliente podem ser divididas, de acordo com Ian Sommerville (SOMMERVILLE, 2018), entre dois grupos: Requisitos Funcionais (RF), especificações das funções que um sistema deve ser capaz de realizar; e Requisitos Não Funcionais (RNF), restrições e características aplicadas ao sistema como um todo. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi feito um levantamento de requisitos, assumindo o autor como cliente, cujo resultado pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado do levantamento de requisitos do robô quadrúpede.

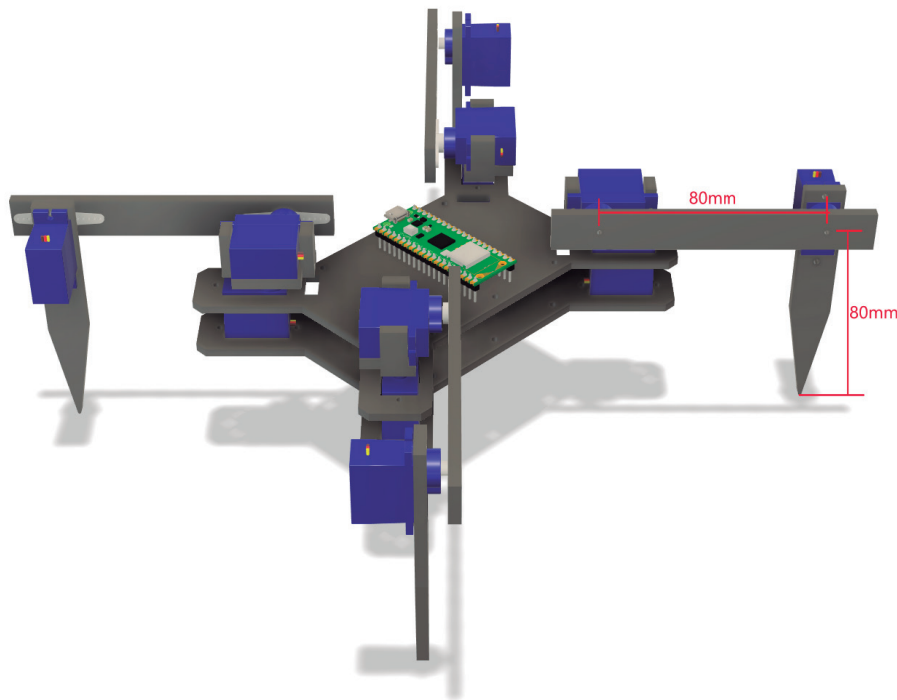
Código	Descrição
RF01	Resolver a IK para os ângulos de uma perna com 3DOF
RF02	Sincronizar movimento de múltiplas pernas
RF03	Sustentar o próprio peso
RF04	Movimentar-se em todas as direções
RF05	Rotacionar em relação ao próprio centro
RF06	Comunicar-se com sistema web de controle
RF07	Realizar calibração de alcance máximo das pernas
RF08	Salvar <i>log</i> de calibração
RF09	Ser controlado por aplicação web
RF10	Salvar <i>log</i> de movimentação
RNF01	Possuir quatro pernas
RNF02	Cada perna deve possuir 3 DOF
RNF03	O controlador deve ser um Raspberry Pi Pico W
RNF04	O robô deve ser controlado por rede
RNF05	O controlador deve ser programado em MicroPython
RNF06	A estrutura do robô deve ser impressa em 3D
RNF07	O tempo de resposta dos comandos deve ser mínimo

Fonte: Construção do Autor.

Após a etapa de levantamento de requisitos e planejamento, onde o *backlog* foi construído, organizado e priorizado, dá-se início à construção dos projetos e protótipos. Esta fase envolve a elaboração detalhada dos projetos e o desenvolvimento de protótipos que permitam validar e testar os conceitos definidos.

RESULTADOS

A Figura 3 mostra o projeto estrutural do robô evidenciando as posições dos atuadores, bem como a posição do Raspberry relativa ao corpo do robô. Cada perna é composta por três atuadores, neste caso, servomotores. Esses motores permitem o controle do ângulo de cada segmento da perna por meio de sinais elétricos, sendo responsáveis pelo movimento preciso dos segmentos conectados. Os comprimentos dos segmentos l_1 e l_2 , representados na Figura 2 (B), foram ajustados de maneira que $l_1 \approx l_2$, sendo, nesse caso, 80 milímetros cada.

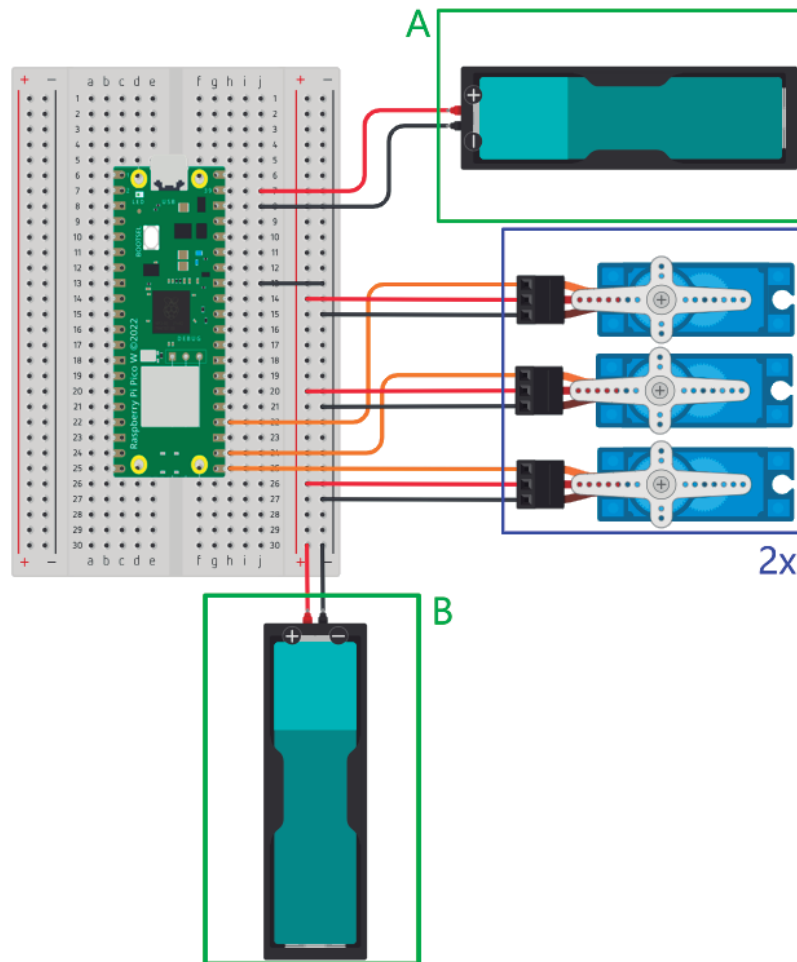
Figura 3 - Modelagem 3D do robô quadrúpede.

Fonte: Construção do Autor.

A Figura 4 demonstra o circuito elétrico responsável pelo funcionamento de um par de pernas do robô. Destacado em azul está um dos dois conjuntos de atuadores responsáveis pelo controle dos ângulos das juntas. Além disso, a figura exibe duas baterias, destacadas em verde e intituladas A e B. A bateria A está conectada na porta de alimentação externa, *V_{SYS}*, do Raspberry, sendo responsável pela alimentação do controlador e deve possuir uma voltagem entre 1.8 volts (V) e 5.5V. Já a bateria B, com uma voltagem entre 5V e 7.2V, é responsável exclusivamente pela alimentação dos motores de duas pernas do robô.

Os diagramas Unified Modeling Language (UML) são ferramentas utilizadas para a construção de projetos de software, a fim de apresentar as visões de um dado sistema de maneira facilitada. A aplicação de metodologias ágeis, como o Kanban, normalmente possui uma diminuição na quantidade de artefatos gerados, por isso este trabalho contempla apenas a representação de domínio (PRESSMAN; MAXIM, 2021).

Figura 4 - Representação da eletrônica do robô.

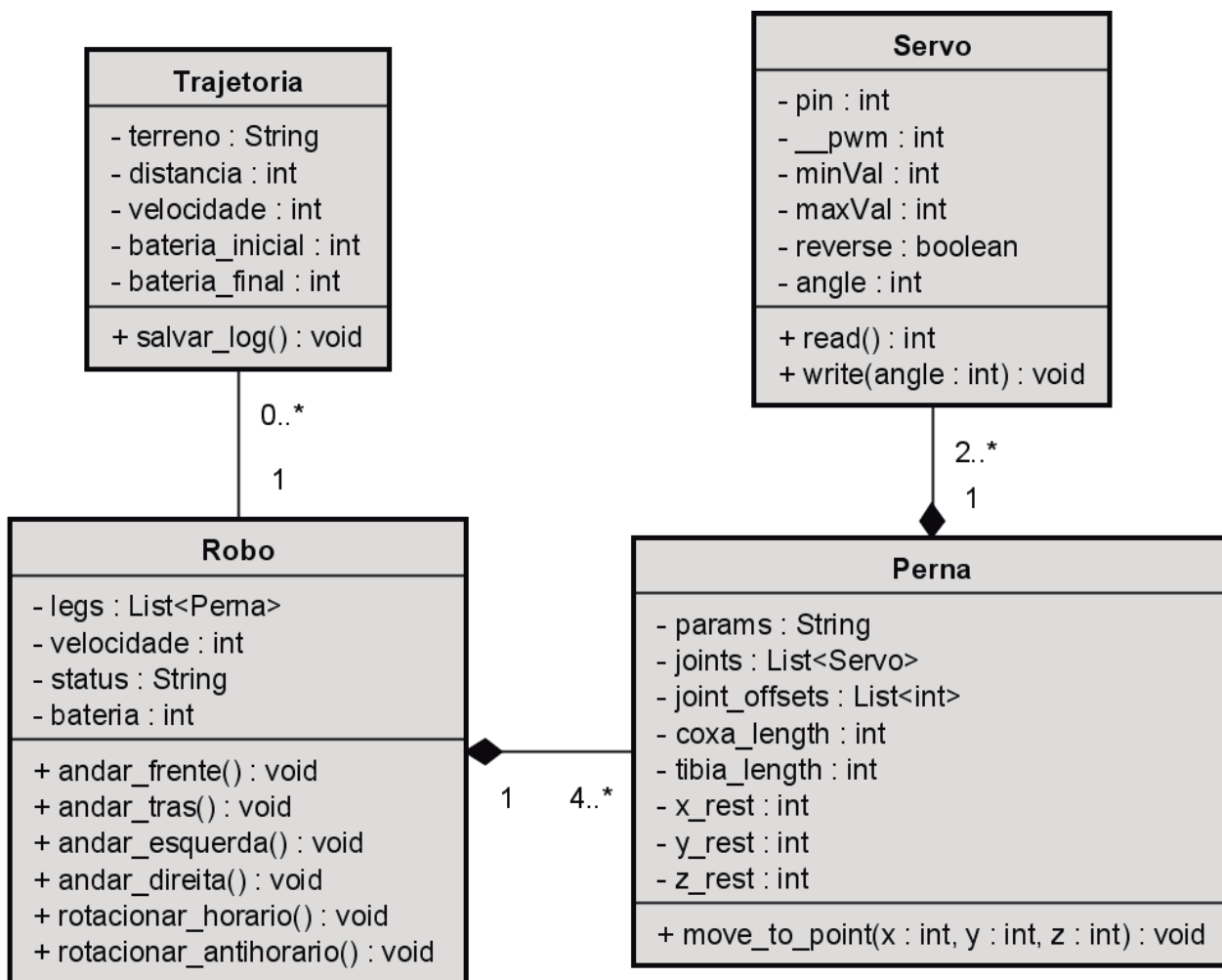


Fonte: Construção do Autor.

A Figura 5 mostra o diagrama de domínio do software de controle do robô, contendo quatro classes. As classes do sistema são organizadas da seguinte forma: a classe Trajetoria armazena informações sobre o percurso do robô, incluindo atributos como “terreno”, “velocidade” e “bateria_inicial”, além de um método para salvar os dados de cada trajetória. A classe Robo controla o robô como um todo, com métodos de movimentação (como “andar_frente” e “rotacionar_horario”) e atributos que determinam seu estado, incluindo uma lista de objetos Perna que compõem suas pernas. A classe Perna contém atributos para realizar os cálculos de cinemática inversa (IK) e possui o método “move_to_point” para movimentação, além de uma lista de objetos Servo que controlam a movimentação individual das pernas. Por fim, a classe Servo é responsável por controlar os ângulos dos atuadores elétricos, incluindo atributos para o GPIO de controle e personalização do atuador.

Dessa maneira, a partir do diagrama na Figura 5, é possível representar de maneira visual o software de controle de um robô quadrúpede que possui 3 DOF por perna e armazena os dados de suas trajetórias. Para permitir que o usuário controle remotamente o robô, surge a necessidade de construir uma interface de controle.

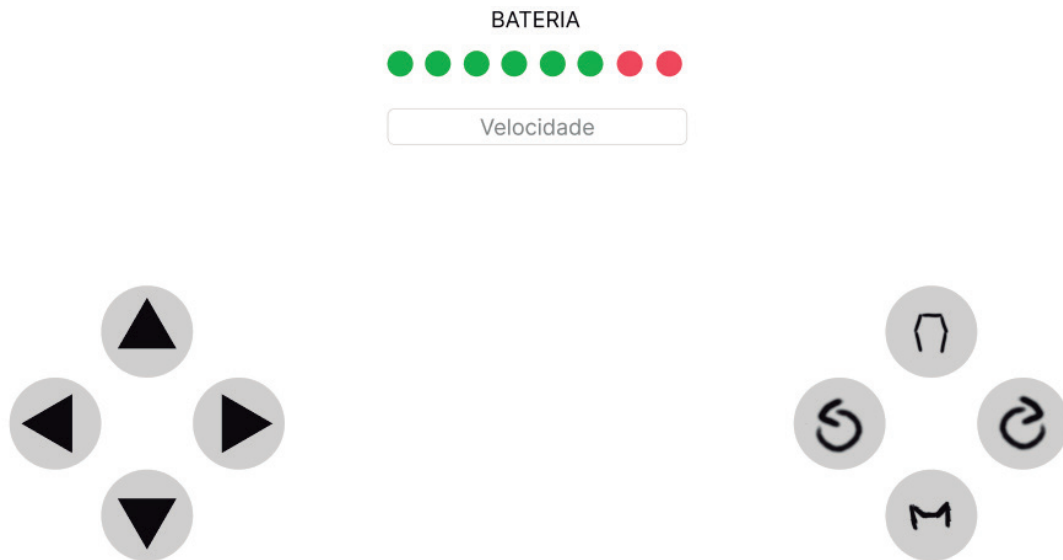
Figura 5 - Diagrama de domínio do software do robô.



Fonte: Construção do Autor.

Como o robô deve ser controlado por *wireless*, através de uma aplicação IoT, mostrou-se necessário montar um protótipo da interface de usuário para o software de controle, exibido na Figura 6. A interface rudimentar apresenta um medidor de bateria, representado por círculos verdes e vermelhos, e um campo de entrada de dados para definição da velocidade do robô, além de dois conjuntos de setas direcionais, à esquerda para controlar a direção de movimento e à direita para controlar a direção de rotação. Após isso pôde ser iniciada a construção de um protótipo físico do robô, buscando avaliar a viabilidade do desenvolvimento, bem como funcionalidades e informações que podem ser adicionadas à interface.

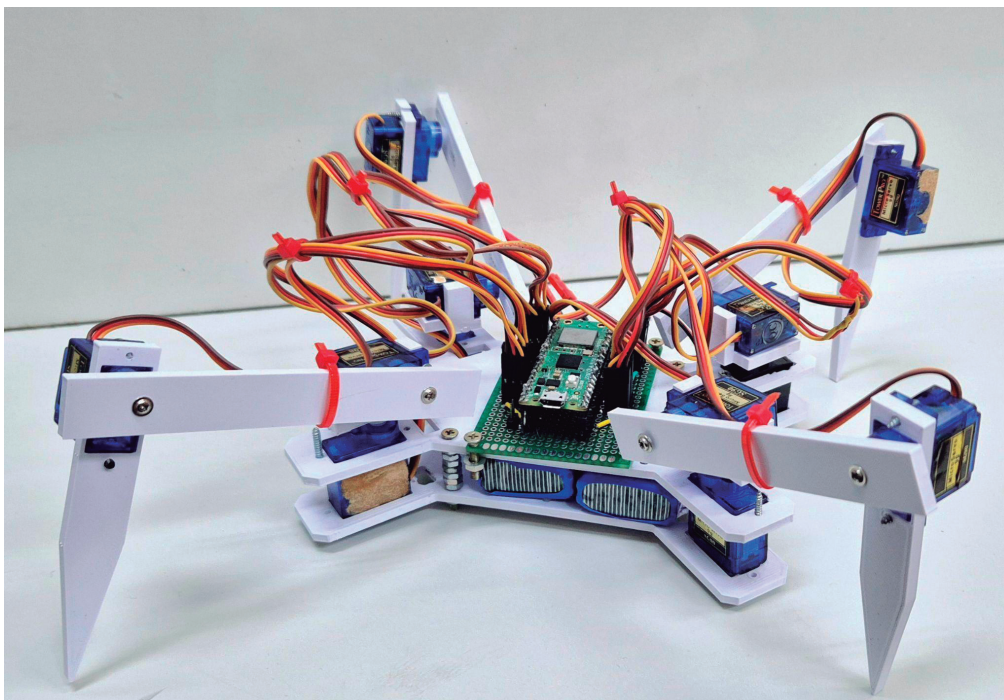
Figura 6 - Protótipo de interface de usuário para o software de controle do robô.



Fonte: Construção do Autor.

A partir do modelo geral (Figura 2), modelo 3D (Figura 3) e projeto eletrônico (Figura 4), foi elaborado um protótipo visando identificar a viabilidade da construção a partir do projeto estrutural proposto. Para a construção do protótipo, disposto na Figura 7, o modelo 3D do robô foi impresso com filamento PLA branco, em uma impressora Creality Ender3, e foram montados os atuadores elétricos. Além disso, em uma placa soldável, disposta ao centro da plataforma superior, foram conectados o Raspberry, atuadores e baterias, seguindo o protótipo eletrônico.

Figura 7- Protótipo físico do robô quadrúpede.



Fonte: Construção do Autor.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi explorada a aplicação dos cálculos de cinemática inversa para a locomoção de um robô quadrúpede com três graus de liberdade (DOF) por perna. Começando com uma revisão detalhada dos métodos de locomoção robótica, destacando a escolha das pernas como o dispositivo efetor ideal para terrenos irregulares. Foi, então, desenvolvido um modelo geral do robô, detalhando a estrutura física e os componentes eletrônicos, incluindo servomotores e a placa de desenvolvimento Raspberry Pi Pico W, programada com MicroPython.

A modelagem das peças do robô foi realizada utilizando um software CAD, com a escolha do material PLA para garantir resistência. Além disso, a metodologia ágil Kanban foi escolhida para o gerenciamento do projeto, o que facilitou a organização e priorização dos requisitos, bem como a construção de projetos e protótipos de maneira iterativa e incremental.

Os resultados demonstraram a viabilidade da abordagem proposta, com o desenvolvimento bem-sucedido de protótipos que validaram os conceitos teóricos e permitiram ajustes contínuos. As fases de prototipagem e testes foram cruciais para identificar e resolver desafios técnicos, assegurando que todas as especificações e requisitos fossem atendidos.

Na continuação deste trabalho, será utilizado o robô construído como plataforma para a aplicação dos cálculos da cinemática inversa, bem como da interface de controle, buscando a locomoção deste por diversos terrenos.

REFERÊNCIAS

AMPOMAH, Ernest; MENSAH, Ezekiel; GILBERT, Abilimi. Qualitative Assessment of Compiled, Interpreted and Hybrid Programming Languages. **Communications on Applied Electronics**, v. 7, p. 8-13, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5120/cae2017652685>. Acesso em: 11 out. 2024.

ANDERSON, David J.; CARMICHAEL, Andy. **Essential Kanban Condensed**. Kanban University Press, 2016.

BEKKER, M. G. Mechanics of Locomotion and Lunar Surface Vehicle Concepts. **SAE Transactions**, v. 72, p. 549-569, 1963. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/44562978>. Acesso em: 11 out. 2024.

BIRADAR, Rajashekhar C.; YANN OLIVIER, A. Kouame; DEVANAGAVI, Geeta D. **Conceptual design of a quadruped wheel-legged robot for an autonomous terrestrial locomotion**. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICAIECC54045.2022.9716642>. Acesso em: 11 out. 2024.

BOSTON DYNAMICS. **Spot® - The Agile Mobile Robot**. 2020. Disponível em: <https://bostondynamics.com/products/spot/>. Acesso em: 3 abr. 2024.

CORDES, Florian; ROEHR, Thomas M.; KIRCHNER, Frank. RIMRES. **A Modular Reconfigurable Heterogeneous Multi-Robot Exploration System**. 2012. Disponível em: https://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2012/Papers/Session%20A/02A_02_Cordes.pdf. Acesso em: 11 out. 2024.

CRAIG, John J. **Robótica**. Pearson, 2013.

DANTAS, Scheila Leal. **História da robótica na educação**. Contentus, 2020.

DIAS, Thayse Zerger Gonçalves. **Cinesiologia, biomecânica e robótica**. Contentus, 2021.

ELSHEIKH, Mogeab A. Design of a special rigid wheel for traversing loose soil. **Scientific Reports**, v. 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27312-6>. Acesso em: 11 out. 2024.

GARCIA, E.; SANZ-MERODIO, D.; GONZALEZ-DE-SANTOS, P. **Analyzing energy-efficient configurations in hexapod robots for demining applications**. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/01439911211227926>. Acesso em: 11 out. 2024.

GEORGE ROBOTICS LIMITED. **MicroPython**. Disponível em: <https://micropython.org/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

KUSMENKO, Daniel; SCHMIDT, Karsten. **Development of an analytical inverse kinematics for a 5 DOF manipulator**. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/REM49740.2020.9313880>. Acesso em: 11 out. 2024.

MATARIC, Maja. **Introdução à robótica**. Blucher, 2014.

NGO, Tuan D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172-196, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>. Acesso em: 11 out. 2024.

PRESSMAN, Roger S.; MAXIM, Bruce R. **Engenharia de Software: uma abordagem profissional**. AMGH, 2021.

PYTHON. **About**. Disponível em: <https://www.python.org/about/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

RATHNAM, Rahul; GODFREY, Wilfred. **Data driven approach for inverse kinematics in 2D and 3D**. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CICT59886.2023.10455509>. Acesso em: 11 out. 2024.

RAO, Akula Umamaheswara; HIMANSHU, Arora. **A Review of Methods Used for Kinematic Modeling of A Manipulator**. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351357733_A_Review_of_Methods_Used_for_Kinematic_Modeling_of_A_Manipulator. Acesso em: 11 out. 2024.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi Pico and Pico W**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html>. Acesso em: 25 abr. 2024.

RASPBERRY PI. **We are Raspberry Pi. We make computers**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/about/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

SANTOS, Altair Martins dos. **Arduino: do básico à internet das coisas**. Brasport, 2023.

SOMMERVILLE, Ian. **Engenharia de software**. Pearson, 2018.

ZOULA, Martin; ČÍŽEK, Petr; FAIGL, Jan. **Design, construction, and rough-terrain locomotion control of novel hexapod walking robot with four degrees of freedom per leg**. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053492>. Acesso em: 11 out. 2024.