

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Nome A. Sobrenome<sup>1</sup>

Nome A. Sobrenome<sup>2</sup>

Nome A. Sobrenome<sup>3</sup>

Orientador: Fulano<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

<sup>2</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

<sup>3</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

<sup>4</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

**FINAL PAPER TITLE IN ENGLISH**

**Resumo:** O resumo deve ser digitado em fonte Times New Roman / Arial tamanho 12, itálico, e dentro desta área. O texto deve ser justificado. O resumo deve conter o objetivo e justificativa do trabalho, sua importância e as principais conclusões. Não deve ultrapassar 250 palavras. Vide NBR 6028

**Palavras-Chaves:** *deve ter no mínimo 3 palavras chaves e no máximo 5 palavras separadas por ponto e vírgula;*

**Abstract:** O resumo deve ser digitado em fonte Times New Roman / Arial tamanho 12, itálico, e dentro desta área. O texto deve ser justificado. O resumo deve conter o objetivo e justificativa do trabalho, sua importância e as principais conclusões. Não deve ultrapassar 250 palavras. Vide NBR 6028

**Keywords:** *deve ter no mínimo 3 palavras chaves e no máximo 5 palavras separadas por ponto e vírgula;*

# 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da robótica, robôs móveis estão, cada vez mais, tomando espaço em setores chave da economia como o comercial, industrial e militar. Os robôs terrestres que se locomovem com pernas tem se mostrado mais eficientes quanto a locomoção em terrenos irregulares, inclinados e escorregadios e quanto à superação de obstáculos (1). Quando comparado com robôs com rodas, robôs quadrúpedes ainda possuem melhor mobilidade e manobrabilidade em ambientes complexos, possibilitando transitar por caminhos não necessariamente contínuos.

O BigDog, desenvolvido pela Boston Dynamics em 2004, foi um dos primeiros robôs quadrúpedes robustos a navegar em superfícies diversas, incluindo trilhas e solos com neve ou lama. Desde então, as atuais soluções disponíveis no mercado apresentam alta maturidade, como por exemplo o Spot, um robô quadrúpede para missões indoor e outdoors, fabricado pela Boston Dynamics. Ele é capaz de alcançar uma velocidade de até 1.6 m/s e se equilibrar dinamicamente em ambientes incertos carregando até 14 kg **Fonte: [bostondynamics.com/products/spot](https://www.bostondynamics.com/products/spot)**. Na mesma linha de robôs cachorros de médio porte, encontra-se o AnyMal, desenvolvido pela AnyRobotics para atuar de forma autônoma em ambientes difíceis. Este equipamento possui 70 cm de altura apresenta um range de payload que comporta simples sensores até complexos braços robóticos **Fonte: [ANYmal A unique quadruped robot conquering harsh environments](#)**

Entre os robôs com pernas, os robôs quadrúpedes vêm ganhando destaque por apresentarem maior estabilidade e uma estrutura mais simples que os bípedes e hexapodes (2). Além disso, conseguem realizar vários tipos de passadas, as quais podem lhe fornecer mais estabilidade, velocidade ou eficiência energética.

O uso de uma plataforma com quatro pernas requer um controle de locomoção

robusto que envolve o controle de equilíbrio da plataforma, o controle das juntas do robô e o planejamento de marchas. A locomoção de robô quadrúpedes é um tema bastante amplo e que pode ser abordado de várias perspectivas, sendo essas as mais comuns e presentes em várias aplicações desse tipo de sistema robótico. Para poder aplicar todos esses conceitos e desenvolver aplicações reais com robôs quadrúpedes, é fundamental estudar a estrutura física, a cinemática, os tipos de passo e os métodos de controle de movimentação desses robôs.

O objetivo deste projeto é desenvolver um sistema robótico do tipo quadrúpede capaz de realizar uma caminhada de forma teleoperada e estável, o que envolve o estudo da cinemática, design mecânico e controle de locomoção deste tipo de robô. Para isso, o modelo do protótipo é simulado de forma a embasar a construção de um protótipo físico. O protótipo físico é de pequeno porte, possui 3 DOFs (graus de liberdade) por perna e é atuado servomotores. Ele possui a habilidade de se locomover de maneira estável em marcha XXX por ambientes planos e irregulares *indoor* e *outdoor*. Além disso, o robô é capaz de superar pequenos obstáculos e transportar cargas de até X kg.

—

- Requisitos devem estar aqui?

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico do projeto Caramelo consiste em uma síntese abordando as características de um robô quadrúpede - quanto ao design, os atuadores e os subsistemas de processamentos que podem ser utilizados. Além disso, é apresentado também sobre o planejamento dos movimentos de marcha e quanto ao controle de locomoção de robôs quadrúpedes, utilizando um modelo cinemático baseado nas considerações de Denavit-Hartenberg.

## 2.1 Apresentação e conceito geral

O robô quadrúpede é um sistema robótico móvel que se locomove com a ajuda de pernas. Robôs móveis podem ser divididos em três grupos, relacionados aos seus sistemas de locomoção: robôs com rodas, com esteiras e com pernas. Quando comparado aos dois primeiros, o último grupo apresenta diversas particularidades que o confere muitas vantagens quanto a mobilidade, robustez a diferentes terrenos e superação de obstáculos (3). Robôs com rodas e esteiras apresentam boa performance em terrenos planos e conseguem navegar de forma autônoma pelo espaço, desde que haja um caminho contínuo entre os pontos de origem e destino. Robôs com pernas, por outro lado, são capazes de escolher os melhores pontos de suporte no terreno para apoiar seus pés, o que permite uma navegação em caminhos discretos (com obstáculos de grande inclinação e variação de altura) (4). Essa capacidade de se adaptar a terrenos desnivelados amplia bastante as oportunidades de aplicações às quais esse tipo de sistema pode ser designado: industriais, militares, missões de inspeção, resgate, entre várias outras. Por outro lado, essas vantagens vêm às custas de uma maior complexidade de controle e menor estabilidade.

Robôs com pernas também apresentam diversas diferenças entre si, majoritariamente ligadas à quantidade de pernas que possuem. A quantidade de pernas de um robô está diretamente relacionada a sua estabilidade, capacidade de locomoção e eficiência. Os bípedes possuem baixa estabilidade, visto que se apoiam em apenas uma perna para poder andar. Os com múltiplas pernas (mais de quatro) possuem maior estabilidade, afinal conseguem manter pelo menos três (muitas vezes até quatro) pontos de apoio no solo enquanto realizam um passo. No entanto, cada perna representa um conjunto adicional de juntas e atuadores, diminuindo a eficiência do sistema como um todo. Os quadrúpedes conseguem unir vantagens desses dois tipos



SCOUT-II / SPOT / TITAN-XIII

ao apresentar um balanço entre estabilidade e eficiência. Eles possuem uma estabilidade passiva quando estáticos, pois se apoiam em quatro pontos. Além disso, também são capazes de navegar de forma estável em baixas velocidade, movendo uma perna por vez enquanto as outras três permanecem no solo. Isso elimina a redundância presente nos robôs com múltiplas pernas, aumentando sua eficiência (4).

## 2.2 Estrutura e design

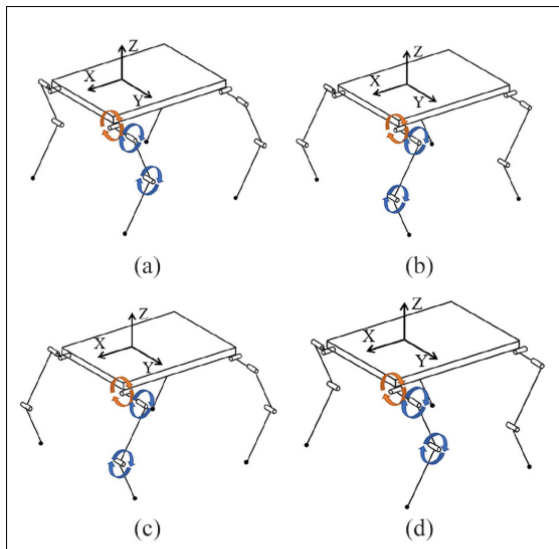
Pelo fato de robôs quadrúpedes terem se tornado um grande foco de pesquisa nos últimos anos, diferentes *designs* já foram pesquisados, variando, por exemplo, estrutura, configuração de pernas e o número de graus de liberdade (GDL) por perna.

Um dos tipos de estrutura que existem é a de tipo mamífero. Dois exemplos de robôs que utilizam essa estrutura estão ilustrados na Figura 2.2.

A estrutura tipo mamífero tem esse nome por conta da sua semelhança com a postura de mamíferos quadrúpedes como cachorros e cavalos. Kitano et al., em (5), analisa dois tipos diferentes de estruturas de robôs quadrúpedes: a do tipo *sprawling* e a do tipo mamífero. Segundo a análise, essa última permite alcançar maiores velocidades, por possuir duas juntas no plano sagital. Além disso, ela também é mais eficiente, pois os atuadores utilizam menos torque para sustentar o robô: sua estrutura mais compacta diminui o braço de alavanca sobre o qual a força peso do robô atua. Essa estrutura também favorece a navegação em ambientes estreitos, onde um robô do tipo *sprawling*, por exemplo, teria dificuldades de acessar.

A estrutura adotada nesse trabalho é a do tipo mamífero. Os robôs quadrúpedes que utilizam essa estrutura também se diferenciam quanto à configuração das pernas. Existem quatro tipos de configuração de pernas e elas estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1: Título da Figura



**Figure 9.** Joint-configuration styles of the quadruped robot: (a) all-elbow configuration, (b) all-knee configuration, (c) outward-pointing configuration, and (d) inward-pointing configuration.

Fonte: XXX

Entre elas destacam-se a *full-elbow* e o *elbow-knee*. Robôs como o Spot, MIT Chee-tah e Stanford Pupper utilizam a configuração *full-elbow*, enquanto outros como o ANYmal, StarLETH e BigDog adotam a configuração *elbow-knee*. **Yao et al.** acreditam que a configuração *elbow-knee* possibilita maior estabilidade, mas as características de movimento da configuração *full-elbow* podem ser superiores.

O número de juntas nas pernas, que coincide com a quantidade de GDL do robô, também é um dos aspectos estudados sobre os quadrúpedes. A maioria apresenta 3 GDL por perna, o que é suficiente para que o robô consiga mover seus pés em três dimensões e realize diversos tipos de marchas. A fim de simplificar a estrutura e consequentemente o controle, alguns robôs utilizam apenas 2 GDL por perna, eliminando a junta no corpo que

movimenta a perna no plano frontal. Outros robôs buscam performances mais semelhantes ao andar de animais reais, o que demanda maior flexibilidade de movimento, justificando o acréscimo de uma quarta junta. No entanto, como já mencionado, esse acréscimo aumenta a complexidade do controle e prejudica a eficiência. Essa perda de eficiência se dá porque mais atuadores significa mais consumo de energia e também mais massa.

A massa do robô quadrúpede deve ser a menor possível. Quanto mais leve for o sistema, menos torque será demandado dos motores e maior sua eficiência. Além disso, a distribuição de massa do robô também é um aspecto muito importante. A massa deve ser localizada majoritariamente no corpo, enquanto as pernas devem possuir baixa inércia. Isso permite que elas se movam rapidamente sem alterar, de forma significativa, o centro de gravidade do robô, o que aumenta a estabilidade e requer menos complexidade de controle. Possuir baixa inércia significa possuir baixa massa. Por outro lado, as pernas devem ser resistentes o suficiente para suportar o peso do robô, além de distúrbios causados pelo impacto dos pés com o chão, o que pode demandar um aumento de massa nas pernas. Um balanço entre massa e resistência deve ser buscado ao mesmo tempo em que deve-se buscar diminuir a massa total do sistema (6).

## 2.3 Movimentação por marchas

Robôs quadrúpedes se movimentam conforme uma sequência de movimentos coordenados de suas pernas que compõe uma marcha. Em uma descrição mais detalhada, **Song and Waldron (1989)** afirma que:

“Uma marcha é definida pelo tempo e local de colocação e levantamento de cada pé, coordenado com o movimento do corpo em seus seis graus de liberdade, para mover o corpo de um lugar para outro”.

Planejar a marcha de forma robusta

é fundamental para garantir que um robô com pernas caminhe de forma eficiente e estável, especialmente em terrenos irregulares (7). Para isso, é necessário levar em consideração as etapas da marcha e, por consequência, seu tipo.

Marchas são divididas em duas etapas: *stance* e *swing*. Durante a fase *stance*, as pernas estão no solo e impulsionam o robô para frente. Na etapa de *swing*, as pernas são erguidas para deslocar o pé até o próximo ponto de apoio. É importante ressaltar que as fases de *stance* e *swing* não ocorrem em todas as pernas ao mesmo tempo. A depender do tipo de marcha, algumas pernas podem estar em *swing* enquanto outras estarão em *stance*.

O trot é um tipo de marcha muito utilizado por robôs quadrúpedes devido a sua simplicidade e eficiência. Este tipo de marcha é periódico e simétrico. Marchas periódicas são caracterizadas pelo fato de que os mesmos movimentos se sempre se repetem no mesmo instante dentro de um ciclo de locomoção (8). Já a simetria é uma característica de marchas que movimentam um par de pernas em conjunto, saindo e voltando para o solo de forma sincronizada. No trot, as pernas diagonais se movimentam em pares e quando um par está na etapa de *swing* o outro está na etapa de *stance*. Outra característica da marcha trot é que ela pode ser contínua ou descontínua. Uma marcha contínua mantém o corpo do robô em movimento constantemente, enquanto a descontínua submete o corpo a um movimento intermitente (8). Portanto, quando a marcha trot é contínua, as pernas em *stance*, além de sustentar o robô, deslocam o corpo da direção do movimento, o que exige maior capacidade de controle. Em contrapartida, quando ela é descontínua o corpo fica estático esperando as pernas em *swing* terminarem seu movimento para, então, ser deslocado quando as quatro pernas já estão no solo.

## 2.4 Controle de locomoção

Todo o controle de locomoção do robô é realizado pelo planejador de marchas. Ele é o responsável por enviar os comandos para que as pernas se movam para os locais certos no momento certo. Logo, o planejador irá apenas ditar o ponto no espaço no qual cada pé do robô deve estar, em relação a um eixo de referência, cabendo ao sistema de controle executar o movimento. A seguir, serão discutidos dois itens fundamentais do sistema de controle de um robô quadrúpede: o modelo cinemático e as estratégias de controle.

### 2.4.1 Modelo cinemático

O modelo cinemático de um robô quadrúpede descreve a relação entre a posição de um pé em três dimensões com a rotação de cada junta da sua respectiva perna. Como todas as pernas do robô são iguais, é necessário formular as relações de uma perna e replicá-la quatro vezes, acrescentando as devidas translações e rotações, para se ter o modelo cinemático de todo o robô.

O modelo cinemático de um corpo articulado pode ser usado para resolver dois problemas: cinemática direta e cinemática inversa. Na cinemática direta, a posição de um pé é dada em função dos ângulos das juntas, enquanto que a cinemática inversa busca encontrar o ângulo das juntas que correspondem a uma posição do pé do espaço tridimensional. Esses dois problemas são complementares, sendo a saída de um a entrada do outro e vice-versa. A partir da cinemática inversa, o robô consegue determinar quanto deve rotacionar seus atuadores para mover o pé alguma distância nas direções  $(x, y, z)$ . Com a cinemática direta, é possível saber se o pé de fato chegou na posição em que ele deveria estar. Portanto, ambos são muito importantes para o controle de locomoção do robô.

## 2.4.2 Estratégias de controle

A locomoção de robôs quadrúpede, em geral, segue uma sequência de passos. Raibert propôs em (9) um método de controle baseado em três etapas: controle de salto, controle de velocidade e controle de postura do corpo. Essa estratégia de controle foi utilizada para controlar robôs com uma, duas e quatro pernas (o motivo de se ter um controle de salto é que robôs com apenas uma perna só podem ser locomover saltando). Sua premissa básica era a de que apenas uma perna estaria em *stance* ou em *swing* por vez. A fim de satisfazer essa premissa para robôs com mais de duas pernas, foi proposto o conceito de pernas virtuais. Isto é, um conjunto de pernas deve realizar igual comportamento quando em *swing* e *stance* e as fases de *swing* e *stance* de cada conjunto devem ser alternadas. Esse conceito foi utilizado para embasar o uso de marchas simétricas e periódicas como o *trot*.

Essa estratégia de controle em três etapas foi responsável por locomover robôs com pernas rígidas (apenas 2 GDL por perna, sendo uma junta rotativa e outra prismática) de maneira simples, porém esses robôs apenas operavam no terreno plano e controlado do laboratório. A fim de possibilitar a operação de robôs com pernas em terrenos desnivelados e de difícil mobilidade, Raibert *et. al.* propôs um outro sistema de controle no seu trabalho sobre o BigDog (10). O BigDog é um robô quadrúpede com 4 GDL por perna movido por atuadores hidráulicos. Essa maior flexibilidade de movimentação das pernas permite controlar a locomoção do robô sem que este precise saltar, sendo possível, então, dividir o controle de locomoção em duas etapas principais: controle de *stance* e controle de *swing*. Como o nome sugere, o controlador de *stance* é o responsável por controlar o comportamento das pernas na fase de *stance*, enquanto o controlador de *swing* é o responsável por controlar as pernas em *swing*. Vale lembrar que durante a marcha, algumas pernas estão na etapa de *swing* enquanto outras estão na etapa de

*stance*, o que significa que esses controladores ora assumem o comando de um par de pernas, ora do outro (essa troca não necessariamente se dá em pares, porém isso é válido para marchas simétricas como o *trot*). Quem define o momento em que cada controlador assume o controle de uma determinada perna é o planejador de marchas.

O modo como cada perna se comporta durante as etapas de *stance* e *swing* pode variar em diversos aspectos, mais ainda é possível elencar semelhanças gerais. No início da etapa de *swing*, calcula-se o local do próximo ponto de apoio dos pés com base na velocidade desejada para o robô e uma trajetória de passo até esse ponto. Essa trajetória pode ter o formato de uma curva senoidal (11), triangular (12), de Bezier (13), cicloidal (2) (14), entre outras. Uma consideração comum é a de que as trajetórias das pernas em cada etapa são independentes, ou seja, assumem que as outras pernas e o corpo se comportam de forma ideal. Sendo assim, é necessário controlar a força com que o pé toca o solo, pois este é um ponto chave para a estabilidade do robô (11). Nesse sentido, a trajetória cicloidal ganha destaque por conta de sua primeira derivada nula no momento em que toca o solo. Já na fase de *stance*, as pernas devem manter o robô em equilíbrio além de deslocar o corpo na direção desejada de locomoção. Para isso, alguns autores utilizam trajetórias para os pés com um formato pré-determinado, assim como na fase de *swing*, não necessariamente repetindo o mesmo formato de curva (11) (14). Além disso, controladores de equilíbrio também podem ser implementados. Esses controladores visam estabilizar os ângulos de *pitch* e *roll* do robô (2) (13) (12) (15) ou até ainda outros graus de liberdade (16) (1) (17). Esses controladores podem controlar diretamente a angulação do corpo do robô (com o auxílio de um sensor inercial) e/ou a força de contato com o solo em cada perna, por exemplo.

## 2.5 Projeto do robô

### 2.5.1 Cinemática Inversa

A obtenção da Cinemática Inversa foi feita de forma analítica, e é descrita no Memorial de Cálculo. As variáveis  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  expressam a posição angular de cada uma das juntas de uma perna do robô, calculadas com auxílio das equações 1 a 6, a partir da posição  $(x, y, z)$  desejável para sua pata e dos comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ .

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) - \arctan\left(\frac{L_1}{a}\right) \quad (1)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{a}{z}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1-A^2}}{A}\right) \quad (2)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sqrt{1-B^2}}{B}\right) \quad (3)$$

$$a = \sqrt{x^2 + y^2 - L_1^2} \quad (4)$$

$$A = \frac{a^2 + z^2 + L_2^2 - L_3^2}{2L_2\sqrt{a^2 + z^2}} \quad (5)$$

$$B = \frac{a^2 + z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \quad (6)$$

Essas equações são úteis para o cálculo da posição de uma única perna, mas são insuficientes para realizar a cinemática do corpo do robô. Para isso, o *base\_link* é utilizado como referência, e uma matriz  $T_m$  (eq. 7) é utilizada para realizar a cinemática do corpo, a partir das translações  $(x_c, y_c, z_c)$  e rotações  $(\alpha, \beta, \gamma)$  desejadas, sendo possível controlar cada um dos 6 graus de liberdade. Para isso, as transformações  $T_{FR}$ ,  $T_{FL}$ ,  $T_{BL}$  e  $T_{BR}$  de cada um dos ombros em relação ao *base\_link* são necessárias.

$$T_m = \begin{bmatrix} & R_{xyz} & x_c \\ & & y_c \\ & & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

O cálculo das angulações de cada perna então é feito utilizando como entrada os valores  $(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik})$  resultantes de cada uma das transformações, conforme a equação 9. O mesmo cálculo é feito para as demais pernas, utilizando  $T_{FL}$ ,  $T_{BL}$  e  $T_{BR}$ .

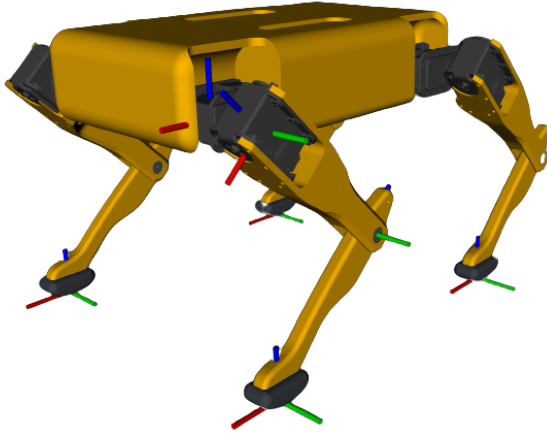
$$\begin{bmatrix} x_{ik} \\ y_{ik} \\ z_{ik} \\ 1 \end{bmatrix} = (T_m \cdot T_{FR})^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Desta forma, a Cinemática Inversa é capaz de computar as angulações  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  de cada uma das pernas a partir da posição  $(x, y, z)$  das patas em relação ao link central do robô e às translações  $(x_c, y_c, z_c)$  e rotações  $(\alpha, \beta, \gamma)$  desejadas para o corpo. Entretanto, em muitos casos é mais conveniente realizar o cálculo dos ângulos passando como entrada as posições  $(x, y, z)$  das patas em relação à sua posição *default*, ou seja, a posição do seu link quando o robô está em seu estado de repouso (figura 2). Para isso, é possível realizar, previamente ao cálculo das angulações, mais uma transformação, desta vez do *base\_link* para cada uma das posições *default* das patas (equação 10).

$$\begin{bmatrix} x_{ik} \\ y_{ik} \\ z_{ik} \\ 1 \end{bmatrix} = (T_m \cdot T_{FR})^{-1} \cdot (F_{FR} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}) \quad (10)$$



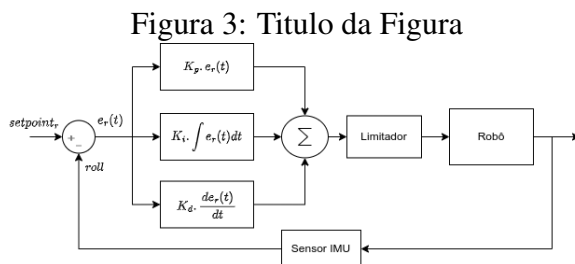
Figura 2: Titulo da Figura



Fonte: XXX

## 2.5.2 Controle de Rotação

Para realizar o controle de rotação do corpo, foram utilizados dois controladores PID, sendo um responsável por controlar a rotação em  $X$  do robô (*roll*, figura 3) e o outro a rotação em  $Y$  (*pitch*), idêntico ao primeiro. Os controladores atuam de forma paralela e independente, de forma que é possível controlar simultaneamente a rotação do corpo em ambos os eixos.



Fonte: XXX

O Sensor IMU é responsável por realizar as medições de rotação do robô, realimentando o sistema. As saídas dos controles são enviadas para a cinemática do corpo, e o limitador existe para evitar que sejam enviados valores que extrapolam os limites do robô.

## 3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto, foi criada uma metodologia própria a ser seguida, composta por quatro fases sequenciais, conforme ilustrado na figura 4 e detalhado a seguir. **Colocar como apêndice?**

### 3.1 Fundamentação

A primeira fase da metodologia tem como objetivo buscar referências que possam embasar o estudo e servir de padrão para o design e desenvolvimento do projeto.

Durante essa fase de Fundamentação, o primeiro a ser feito são pesquisas bibliográficas, com o intuito de selecionar artigos úteis e correlatos ao projeto. **Para isso, foi utilizado o Método Bili.**

A partir dessas pesquisas, é possível realizar um Estudo do Estado da Arte, selecionando, a partir de um **Benchmarking** realizado com robôs quadrúpedes, projetos que possam servir de referência para o desenvolvimento, definindo os **conceitos, funcionalidades e design** que o projeto deverá ter.

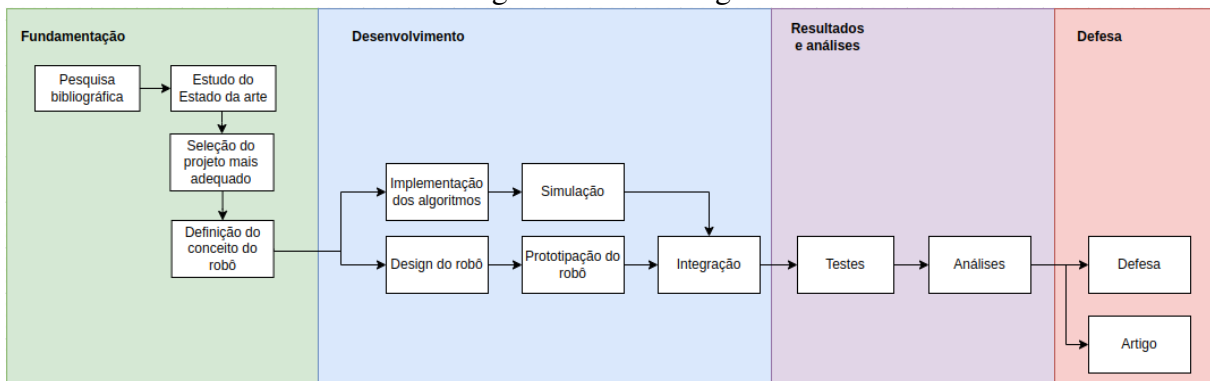
### 3.2 Desenvolvimento

Durante esta etapa da metodologia, ocorre o desenvolvimento do robô propriamente dito. Inicialmente, duas etapas ocorrem de forma paralela, sendo elas a implementação e simulação dos algoritmos (em ambiente computacional) e a definição e prototipação do design do robô.

Durante a implementação de algoritmos e simulação, são inicialmente elaborados o diagrama de blocos do sistema e a arquitetura de software do controlador, de forma a padronizar e documentar o desenvolvimento do projeto. A partir disso, os algoritmos de cinemática e controle podem ser implementados e testados em simulação. Para auxiliar e possibilitar o desenvolvimento do projeto, algumas



Figura 4: Metodologia



Fonte: Proprio autor

ferramentas e *Softwares* serão utilizados. O ROS - Robot Operating System é um conjunto de bibliotecas e ferramentas de *software Open Source* que auxiliam no desenvolvimento de aplicações robóticas. O ROS Humble, nativo para Ubuntu 22.04, será utilizado, por possuir boa documentação e comunidade ativa, além de possuir pacotes muito úteis para o desenvolvimento do robô.

Em paralelo com o desenvolvimento de software, a prototipação e construção do robô é realizada, através da elaboração dos desenhos mecânicos e projetos eletroeletrônicos. Esta etapa inclui também a impressão 3D das partes mecânicas projetadas, teste dos atuadores e sensores e configuração e comunicação entre o processador e os servomotores Dynamixel **modelo?** que serão utilizados, culminando na montagem física do protótipo funcional. Os Softwares OnShape e XXXX serão utilizados para o desenvolvimento do CAD do robô e para seu projeto elétrico, respectivamente.

Após essas etapas, é possível realizar a integração dos algoritmos no protótipo físico, de forma a validar o desenvolvimento realizado em ambiente computacional em um robô no mundo real.

### 3.3 Resultados e Análises

A etapa de resultados e análises tem como objetivo inicial realizar testes a fim de coletar dados para a análise de performance dos algoritmos implementados no robô. Durante essa etapa, será feita também uma análise comparativa entre os resultados obtidos em ambiente de simulação e no mundo real. **Detalhamento de quais testes serão feitos?**

### 3.4 Defesa

Esta é a última etapa da metodologia, que consiste na finalização e revisão do artigo e na apresentação de defesa do trabalho perante a banca avaliadora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa de resultados e análises tem como objetivo realizar testes e coletar dados para a análise de performance dos algoritmos implementados no robô. Durante essa etapa, será analisada a performance do robô no mundo real de forma estatística, por meio de três testes. O primeiro consiste em observar a capacidade do protótipo em mover o pé por uma dada trajetória. No segundo teste é analisado se o robô atende a uma velocidade solicitada, utilizando dois terrenos diferentes e observando a oscilação de estabilidade do corpo

ao longo da trajetória. Por fim, foi analisado a performance do Caramelo caminhando por terrenos inclinados e sua capacidade de ultrapassar pequenos obstáculos.

#### 4.1 Cinemática Inversa

A partir das equações obtidas para a Cinemática Inversa do robô, o sistema é capaz não só de realizar a cinemática de cada uma das pernas individualmente, como também do seu corpo em todos os 6 graus de liberdade (translações em  $x, y, z$  e rotações em  $roll, pitch, yaw$ ). A figura 5 ilustra o movimento do corpo do robô em cada um desses graus de liberdade.



Figura 5: Titulo da Figura

Fonte: XXX

#### 4.2 Controle de Rotação

Os gráficos da figura 6 ilustram o comportamento do sistema à variação dos *setpoints* de orientação em  $X$  (gráfico superior) e em  $Y$  (gráfico inferior) para o corpo do robô, a partir da aplicação de diversos degraus (em azul). Nota-se que o protótipo é capaz de se adaptar rapidamente aos novos valores desejados de orientação, simultaneamente em ambos os eixos.

#### 4.3 Análise de trajetória

Durante este experimento, o corpo do protótipo está estático e suspenso por um suporte, sendo solicitado que uma de suas patas

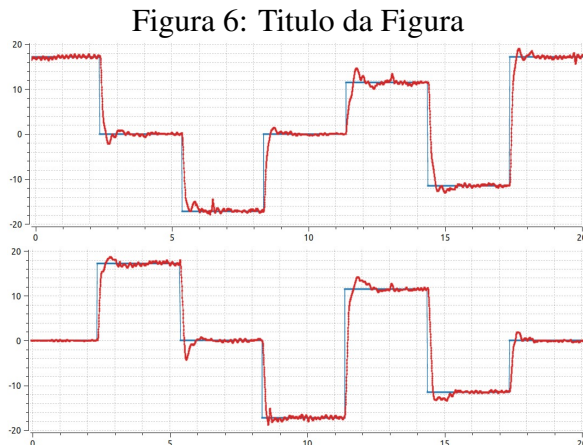


Figura 6: Titulo da Figura

Fonte: XXX

realize duas trajetórias calculadas pelo algoritmo proposto. Para geração das trajetórias foi considerado um período de  $0.5s$ , altura do passo de  $0.05m$  e resolução de 25 pontos com distribuição homogênea, com deslocamentos em  $(x, y)$  de  $(0.05, 0.03)$  e  $(0.03, 0.05)$  respectivamente, sendo realizados 30 testes para cada caso.

O objetivo aqui é analisar o tempo real de execução da trajetória, as coordenadas finais  $(x_f, y_f)$  da pata e a altura máxima  $z_{max}$  atingida durante o passo, comparando-os com os valores desejados para cada um desses parâmetros. A tabela 1 traz as médias encontradas para cada um desses parâmetros durante a realização dos testes.

Tabela 1: Titulo da Tabela

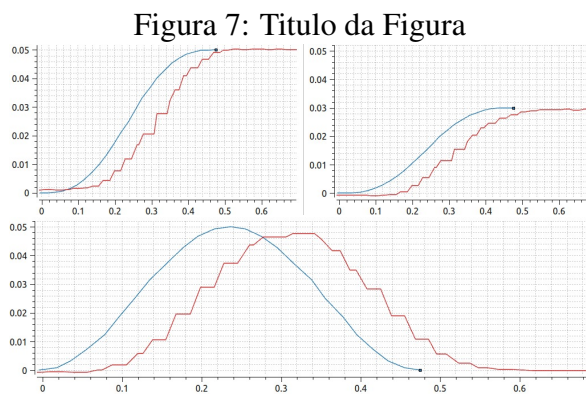
	$tempo(s)$	$x_{final}(m)$	$y_{final}(m)$	$z_{max}(m)$
Exp. 1	0.559457	0.050349	0.029247	0.047585
Exp. 2	0.556770	0.030240	0.049132	0.046562

Fonte: Autoria própria

Inicialmente, foram realizados dois testes de T Student para amostras independentes, o primeiro relacionando o tempo de execução da trajetória nos experimentos 1 e 2, e o segundo relacionando a altura máxima alcançada, com o intuito de verificar se os resultados se alteram para diferentes valores  $(x, y)$  desejados. O resultado da análise de T Student traz um  $t$  de aproximadamente 1.087, em se tratando de tempo, e de 1.0658 para

a altura máxima alcançada durante o passo. Para uma confiabilidade de 95% e um total de 58 graus de liberdade, o valor crítico  $t_c$  encontrado é de 2.00. Como ambos os valores encontrados estão dentro do intervalo de confiança ( $-t_c < t < t_c$ ), isso mostra que não há uma diferença significativa entre as médias em cada experimento, o que significa que diferentes comandos de trajetórias em  $(x, y)$  não interferem nos resultados de tempo e altura máxima do passo.

Os gráficos da figura 7 representam um dos testes realizados para o primeiro caso ( $x = 0.05m, y = 0.03m$ ), sendo os gráficos superiores esquerdo e direito correspondentes à trajetória em  $x$  e  $y$  respectivamente, e o gráfico inferior correspondente à trajetória em  $z$  (altura do passo). Nota-se que, como esperado pela análise da tabela 1, há um atraso na execução da trajetória (neste caso específico de aproximadamente  $54ms$ ) e a altura máxima alcançada é levemente inferior à desejada (alcançando neste caso um valor próximo a  $0.0476m$ ).



Fonte: XXX

#### 4.4 Controle de velocidade

Para o teste do controle de velocidade, foi enviado um comando de velocidade linear, na direção  $x$ , e medido o tempo que o robô levou para alcançar 1,5 m, dessa forma, obteve-se a velocidade média do robô. Neste experimento parte dos testes aconteceram utilizando

o controle de estabilidade proposto e a outra parte sem, a fim de analisar a contribuição deste método no equilíbrio do robô ao desempenhar uma trajetória. Os testes ocorreram com os mesmos parâmetros de passo do teste anterior, e em dois terrenos distintos, um terreno regular, feito de concreto e outro irregular, composto por pequenas pedras, como demonstra a imagem W.

APRESENTAR TABELA E CONSIDERAÇÕES

#### 4.5 Teste 3

Além dos testes realizados em terreno plano e irregular, o protótipo também foi submetido a

### 5 CONCLUSÃO

Neste documento foram descritas as normas que deverão ser observadas por todos os autores para publicação dos artigos. Observadas estas normas, o artigo deve ser enviado através do link a ser definido e informado posteriormente.

#### Referências

- 1 ZHANG, X. et al. The quadruped robot locomotion based on force control. **Proceedings of the 2015 27th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2015**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 5440–5445, 2015.
- 2 SHI, Y. et al. Structural design, simulation and experiment of quadruped robot. **Applied Sciences (Switzerland)**, MDPI, v. 11, 2021.
- 3 BISWAL, P.; MOHANTY, P. K. **Development of quadruped walking robots: A review**. [S.l.]: Elsevier, 2021. 2017-2031 p.
- 4 YAO, L.; YU, H.; LU, Z. Design and driving model for the quadruped robot: An

elucidating draft. **Advances in Mechanical Engineering**, SAGE Publications Inc., v. 13, 2021.

5 KITANO, S. et al. Titan-xiii: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. **ROBOMECH Journal**, Springer International Publishing, v. 3, p. 1–16, 2016.

6 ZHONG, Y. et al. **Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review**. [S.l.]: SAGE Publications Inc., 2019.

7 ZHANG, S. et al. A free gait generation method for quadruped robots over rough terrains containing forbidden areas. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Korean Society of Mechanical Engineers, v. 29, p. 3983–3993, 2015.

8 SANTOS, P. G. D.; GARCIA, E.; ESTREMER, J. **Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots**. [S.l.]: Springer, 2006. v. 1.

9 RAIBERT, M. **Legged robots that balance**. [S.l.]: MIT Press, 1986. 235 p. ISBN 9780262181174.

10 RAIBERT, M. et al. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 41, n. 2, p. 10822–10825, 2008.

11 JUMANTORO, E.; ALASIRY, A. H.; HERMAWAN, H. Stability optimization on quadruped robot using trajectory algorithm. **Proceedings IES-ETA 2017 - International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 2017-Decem, p. 93–98, 2017.

12 STANFORD Quadruped. <https://github.com/stanfordroboticsclub/StanfordQuadruped>. Acesso: 24 de nov de 2022.

13 DIY hobby servos quadruped robot. <https://hackaday.io/project/171456-diy-hobby-servos-quadruped-robot>. Acesso: 24 de nov de 2022.

14 LIU, D. et al. Stable walking control of parallel wheel-foot robot based on zmp theory. **Chinese Control Conference, CCC**, IEEE Computer Society, p. 6620–6625, 2017.

15 NOTSPOT robot simulation. [https://github.com/lnotspotl/notspot\\_sim\\_cpp](https://github.com/lnotspotl/notspot_sim_cpp). Acesso: 24 de nov de 2022.

16 CHEN, G. et al. Virtual model control for quadruped robots. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 8, p. 140736–140751, 2020.

17 ZHANG, G. et al. Torso motion control and toe trajectory generation of a trotting quadruped robot based on virtual model control. **Advanced Robotics**, Robotics Society of Japan, v. 30, p. 284–297, 2016.