

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**JOSÉ AUGUSTO SIMÃO
MARLON DOMINGUES DE OLIVEIRA**

**ROBÔ DIRIGIDO POR CABOS PARA TRABALHO EM
FACHADA DE EDIFÍCIOS**

São Carlos

2024

**JOSÉ AUGUSTO SIMÃO
MARLON DOMINGUES DE OLIVEIRA**

**ROBÔ DIRIGIDO POR CABOS PARA TRABALHO EM
FACHADA DE EDIFÍCIOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marco Henrique Terra

**São Carlos
2024**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

S588r Simão, José Augusto
 Robô dirigido por cabos para trabalho em fachada de
 edifícios / José Augusto Simão, Marlon Domingues de
 Oliveira; orientador Marco Henrique Terra. -- São Carlos,
 2024.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com Ênfase
 em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2024.

 1. Robô controlado por cabos. 2. Robótica.
 3. Manutenção de edifícios. 4. Controle de trajetória.
 5. UWB. 6. ROS. I. Oliveira, Marlon Domingues de.
 II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: José Augusto Simão

Título: "Robô dirigido por cabos para trabalho em fachada de edifícios"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 10 / 02 / 2024,

com NOTA 10 (8,2), pela Comissão
Julgadora:

Prof. Titular Marco Henrique Terra - Orientador SEL/EESC/USP

Prof. Associado Valdir Grassi Junior - SEL/EESC/USP

Prof. Associado Edson Denner Leonel - SET/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Marlon Domingues de Oliveira

Título: "Robô dirigido por cabos para trabalho em fachada de edifícios"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 10 / 12 / 2024

com NOTA Dez (10 , 0), pela Comissão
Julgadora:

Prof. Titular Marco Henrique Terra - Orientador SEL/EESC/USP

Prof. Associado Valdir Grassi Junior - SEL/EESC/USP

Prof. Associado Edson Denner Leonel - SET/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, agradecemos ao nosso orientador, Professor Dr. Marco Henrique Terra, pela atenção e suporte ao longo do desenvolvimento do projeto.

Agradecemos também a todos os professores da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), que, com seu conhecimento e incentivo, foram peças-chave na nossa formação acadêmica e no desenvolvimento do projeto. Sua crença no potencial deste trabalho nos motivou a buscar sempre o melhor resultado.

Estendemos nossos agradecimentos à Universidade de São Paulo (USP), que nos proporcionou os recursos, o ambiente de aprendizado e a infraestrutura necessários para que este projeto fosse possível. Sentimo-nos privilegiados por fazer parte de uma instituição tão renomada e comprometida com a excelência acadêmica.

Àqueles que estiveram ao nosso lado durante essa jornada, amigos, colegas e familiares, expressamos nossa sincera gratidão. Seu apoio, incentivo e compreensão nos momentos difíceis foram essenciais para que pudéssemos nos dedicar com afinco a este trabalho.

Por fim, dedicamos este agradecimento a todos que acreditaram em nós e em nosso projeto, ajudando a transformá-lo em realidade. Este trabalho é fruto do esforço conjunto e da colaboração de uma rede de pessoas que compartilharam conosco este sonho e o tornaram possível.

RESUMO

SIMÃO, J. A. OLIVEIRA M. D. **ROBÔ DIRIGIDO POR CABOS PARA TRABALHO EM FACHADA DE EDIFÍCIOS**. 2024. 64p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Este trabalho apresenta a pesquisa e desenvolvimento de um novo modelo de robô controlado por cabos, com o objetivo de realizar tarefas de manutenção em fachadas de edifícios, como limpeza e pintura de exteriores, promovendo a preservação da estética, segurança e valor das edificações. Ao longo da pesquisa, foram desenvolvidas e avaliadas diferentes arquiteturas de robôs controlados por cabos, considerando sua eficácia para atingir os objetivos propostos, bem como a viabilidade financeira e de engenharia para transformá-las em um produto comercial com potencial de gerar valor como modelo de negócio.

O estudo apresenta o panorama atual do setor de manutenção de fachadas, evidenciando como o mercado tem se tornado mais receptivo a tecnologias avançadas, como a robótica. Foram desenvolvidos e testados protótipos de três arquiteturas de robôs, com análise dos benefícios, limitações e aprendizados obtidos com cada modelo.

Essas experiências culminaram no desenvolvimento de uma arquitetura promissora, especialmente adequada para aplicações de manutenção em fachadas. Detalha-se seu funcionamento e as vantagens que oferece, incluindo um sistema de controle de trajetória baseado na discretização de trajetórias e no uso de controladores PID para o gerenciamento preciso dos motores que controlam o comprimento dos cabos.

Para assegurar o funcionamento eficaz do sistema, foi desenvolvido um sistema de localização baseado na tecnologia UWB. O trabalho explora em profundidade o desenvolvimento, os métodos, os algoritmos testados e o desempenho desse sistema de localização, que se mostrou essencial para a operação do robô. A fim de garantir a comunicação e a coordenação eficaz entre os diferentes dispositivos do robô foi fundamental a integração com o ROS. Com um vasto conjunto de ferramentas, oferece um ambiente propício para testes e adaptações. Se destaca como uma ferramenta essencial para o avanço do projeto, proporcionando maior flexibilidade e eficiência no processo de desenvolvimento.

Palavras-chave: Robô controlado por cabos. robótica. Manutenção de edifícios. Controle de trajetória. UWB. ROS.

ABSTRACT

SIMÃO, J. A. OLIVEIRA M. D. **CABLE-DRIVEN ROBOT FOR WORK ON BUILDING FACADES**. 2024. 64p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

This study presents the research and development of a new cable-driven robot model designed to perform facade maintenance tasks on buildings, such as exterior cleaning and painting, aimed at preserving the aesthetics, safety, and value of structures. Throughout the research, various cable-driven robot architectures were developed and evaluated in terms of their effectiveness in meeting the proposed objectives, as well as their financial and engineering feasibility to become a viable product with business potential.

The study reviews the current landscape of the facade maintenance industry, highlighting how this market has become increasingly receptive to advanced technologies like robotics. Prototypes of three distinct cable-driven robot architectures were developed and tested, with a thorough analysis of the benefits, limitations, and insights gained from each model.

These insights led to the development of a promising architecture particularly suited for building facade maintenance applications. This architecture is described in detail, along with its advantages and operational mechanisms, including a trajectory control system based on trajectory discretization and the use of PID controllers for precise motor control, which manages the cable lengths.

To ensure the system's effective operation, a localization system based on UWB technology was developed. The study provides an in-depth examination of the development, methods, tested algorithms, and performance of this localization system, which proved essential for the robot's operation.

In order to ensure effective communication and coordination between the robot's different devices, the integration with ROS was essential. With its vast set of tools, it provides an environment conducive to testing and adaptation. It stands out as an essential tool for the advancement of the project, offering greater flexibility and efficiency in the development process.

Keywords: Cable-driven robot. robotics. building maintenance. trajectory control. UWB. ROS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alpinistas prediais	20
Figura 2 – Andaime (balancim elétrico)	21
Figura 3 – Plataforma Elevatória	21
Figura 4 – A figura mostra uma ilustração da Arquitetura de Quatro Motores nos Vértices. Nela, cabos conectam uma estrutura central — onde se localiza a ferramenta destinada à manutenção da fachada — aos carretéis automáticos posicionados nos vértices da edificação.	26
Figura 5 – Protótipo do carretel automático: Um motor de passo é conectado a um carretel de metal que armazena e libera a corda conforme necessário. O sensor implementado realiza a medição precisa do comprimento do cabo, assegurando o controle do sistema. Esse protótipo permitiu validar a ideia, destacando os pontos fortes e os desafios da arquitetura proposta	27
Figura 6 – Protótipo da Arquitetura de Cabos Diagonais com Contrapesos, onde os motores responsáveis pela movimentação estão fixos na estrutura central do robô, permitindo que ele escale os cabos que atravessam a fachada do edifício.	27
Figura 7 – Protótipo do robô com Arquitetura de Cabos Diagonais e Contrapesos em operação em um cenário real de construção de edifício. Este protótipo foi construído com peças reaproveitadas de dois carretéis automáticos. O robô conseguiu se movimentar pela fachada, alcançando uma altura considerável, embora tenha ficado limitado às regiões centrais.	28
Figura 8 – Ilustração da Arquitetura de Polias Móveis, mostrando o sistema que mantém uma tensão positiva em todos os segmentos de cabos durante a operação.	29
Figura 9 – Protótipo do robô para a Arquitetura de Polias móveis. É possível ver a organização interna com motores, fontes de alimentação, drivers de controle e um computador central com uma câmera. As polias apresentam guiam o cabo até o mecanismo de tração.	30
Figura 10 – Ilustração da arquitetura tida como a mais promissora em termos de desenvolvimento de um produto para trabalho em fachada de edifícios. Esse modelo conta com um trilho superior, linha de guia para o contrapeso dois carretéis centralizados em um único equipamento em solo.	31
Figura 11 – Tensão mecânica em Newtons nos segmentos de cabos inferiores do robô, onde as forças F_3 (a direita) e F_4 (a esquerda) estão presentes. É possível observar que as maiores tensões mecânicas são encontradas na parte inferior da área de trabalho.	32

Figura 12 – Representação gráfica dos locais onde o robô pode operar sem problemas (em preto) e de regiões em que o torque do motor utilizado não vai ser o suficiente para estabilizar a posição (em branco)	33
Figura 13 – Modelo de trapézio utilizado para estimar a posição do robô tendo como base a informação da largura da fachada e do robô bem como dos comprimentos de cabo L3 e L4 que são ligados aos carretéis.	34
Figura 14 – Resultado da simulação do robô seguindo a trajetória em zig-zag em uma área de 10x30 metros. Destaca-se a região do canto, onde ocorre uma mudança rápida de direção, causando um pequeno desvio em relação à trajetória esperada. No entanto, o robô consegue corrigir rapidamente e retomar a trajetória.	36
Figura 15 – Resultado da simulação referente à trajetória realizada pelo robô em comparação com a trajetória de referência. Observam-se picos de erro nos momentos de mudança abrupta de direção. Contudo, o controlador conseguiu reduzir o erro a níveis muito baixos nos segmentos de linha reta subsequentes. À direita, é destacado o formato desse erro durante duas mudanças de direção consecutivas.	36
Figura 16 – Resultado da simulação da velocidade do robô ao longo da trajetória. Observam-se picos nos momentos de transição, refletindo os ajustes necessários para a correção de posição. À direita, é destacado o comportamento da velocidade durante duas transições consecutivas.	37
Figura 17 – Resultado da simulação mostrando como a frequência de clock, que controla a velocidade dos motores, varia ao longo do tempo para seguir a trajetória de referência. O sinal da frequência indica o sentido de rotação do carretel. À direita, destaca-se o formato complexo da frequência, mesmo para uma trajetória relativamente simples.	38
Figura 18 – Resultado da simulação para a trajetória com a eliminação das mudanças abruptas de movimentação, incluindo uma semicircunferência nos cantos. À direita, observa-se que o erro encontrado durante a transição é muito menor nesta situação quando comparado com a trajetória em zig-zag com cantos de 90 graus.	38
Figura 19 – Resultado da simulação do erro em relação a trajetória de referência para a trajetória suavizada que foi implementada. Dessa forma, os erros de trajetória ainda aumentam nos cantos, todavia, com um erro muito menor e estabilizado. À direita é apresentado o formato desse erro enquanto o robô percorre a semi circunferência do canto.	39

Figura 20 – Resultado da simulação da velocidade do robô ao longo da trajetória suavizada. Nota-se uma estabilização muito maior da velocidade quando comparado à trajetória com ângulos de 90 graus. A estabilização da velocidade é crucial para garantir a precisão do robô.	39
Figura 21 – Resultado da simulação das frequências de clock injetadas nos motores para seguir a trajetória suavizada. Observa-se que as mudanças de frequência acontecem de forma mais suave, o que resulta em menos distorções na velocidade final do robô. À direita, é destacada a frequência de clock dos dois motores durante o percurso de uma semi-circunferência.	40
Figura 22 – Representação da dinâmica do sinal e do processo de contagem do tempo para estimar a distância entre dois dispositivos usando o método TWR. Sabendo o $t_{\text{roundtrip}}$ e t_{reply} contados respectivamente na TAG e na âncora, é possível calcular o ToF e estimar a distância com base na velocidade da luz.	42
Figura 23 – Simulação da posição estimada do TAG parado com os Mínimos Quadrados. É possível identificar um resultado em formato de grade devido à incerteza discreta na estimativa da distância de cada dispositivo. . .	45
Figura 24 – Comparação entre Mínimos Quadrados (verde) e Mínimos Quadrados Ponderados (vermelho) para estimar a posição do TAG em movimento rápido simulado em linha reta. É notável que os Mínimos Quadrados Ponderados estão mais próximos da verdadeira trajetória (azul). . . .	46
Figura 25 – Experimento montado nas dependências da West Virginia University para mover uma TAG (verde) dentro de uma rede de âncoras (azul) para comparar com o sistema Vicon (vermelho). O carro usado é holonômico, permitindo movimentos em qualquer direção sem alterar a orientação da TAG.	49
Figura 26 – Resultados experimentais. Previsão de posição usando Mínimos Quadrados (LS), Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) e Filtro de Kalman (KF) em comparação com o sistema de captura de movimento VICON.	50
Figura 27 – Erro médio móvel para cada método usado e velocidade da TAG ao longo do experimento. A figura mostra o aumento da velocidade ao longo do experimento e como o erro de cada método se comporta. . . .	50
Figura 28 – Desvio padrão ao longo do experimento para cada método. Nota-se que o método KF obteve uma boa melhoria no desvio padrão da estimativa de posição.	51
Figura 29 – (esquerda) Posição para Passo Completo vs. Tempo. (direita) Posição para Microstepping vs. Tempo.	53
Figura 30 – (esquerda) Desvio de Velocidade para Passo Completo. (direita) Desvio de Velocidade para Microstepping.	54

Figura 31 – Representação das conexões entre driver e motor de passo. 54

Figura 32 – Fluxograma de movimento das comunicação por ROS. 56

Figura 33 – Interface do usuário. 58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPI's	Equipamentos de proteção individual
UWB	Ultra-Wideband
DOP	Delution of Precision
IMU	Unidade de medição inercial
TDoA	Time Difference of Arrival
TWR	Two Way Range
ToF	Time of Flight
LS	Minimos Quadrados
WLS	Minimos Quadrados Ponderados
KF	Filtro de Kalman
IoT	Internet das Coisas
ROS	Robot Operating System
DDS	Data Distribution Service
QoS	Quality of Service
PWM	Pulse Width Modulation
LEDC	LED Control
MAC	Media Access Control

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	DESENVOLVIMENTO	23
2.1	Diferentes Arquiteturas do Robô e Suas limitações	24
2.1.1	Arquitetura de Quatro Motores Nos Vértices	25
2.1.2	Arquitetura de Cabos Diagonais e Contrapesos	27
2.1.3	Arquitetura de Polias móveis	29
2.2	Arquitetura Escolhida - Fusão de Ideias	30
2.3	Controle de movimentação	33
2.3.1	Resultados do controlador	35
2.4	Sistema de Localização	40
2.4.1	Medição de Distância Entre os Dispositivos UWB	41
2.4.2	Dados de Aceleração	43
2.4.3	Métodos de Estimação de Posição	44
2.4.3.1	Mínimos Quadrados (LS)	44
2.4.3.2	Mínimos Quadrados Ponderados (WLS)	45
2.4.3.3	Filtro de Kalman (KF)	47
2.4.3.4	Experimento	48
2.4.4	Resultados e Discussão	49
2.5	Dispositivos e periféricos	51
2.5.1	Movimentação	53
2.5.2	Comunicação	55
2.5.3	Inicialização do sistema	57
2.5.4	Adicionais	57
2.5.4.1	Interface	57
2.5.4.2	Botões	58
2.5.4.3	Freio Magnético	58
3	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano acelerado e o aumento da densidade populacional nas grandes cidades têm impulsionado uma expansão expressiva de edifícios altos em todo o mundo. À medida que a demanda por espaços comerciais e residenciais aumenta nas áreas metropolitanas, a construção de arranha-céus e prédios residenciais tornou-se uma tendência global. Esse fenômeno é especialmente notável em cidades como Nova York, Xangai, Dubai e São Paulo, onde o horizonte urbano é dominado por construções imponentes que simbolizam tanto avanços arquitetônicos quanto o desenvolvimento econômico local.

No Brasil, o estado de São Paulo é um exemplo marcante dessa verticalização. A cidade de São Paulo possui cerca de 28 mil edifícios com mais de 20 metros de altura (TOLEDO, 2023), muitos dos quais servem tanto a propósitos comerciais quanto residenciais. Com o passar do tempo, esses prédios inevitavelmente requerem manutenção para garantir sua preservação e valor. Assim como o interior de um edifício necessita de cuidados contínuos, como limpeza, pintura e reparos, a fachada também demanda manutenção regular. Esses cuidados protegem a estrutura contra os efeitos das intempéries, como chuva, vento e luz solar, prevenindo o desgaste prematuro e assegurando o valor estético e comercial do imóvel.

O mercado de manutenção de fachadas, impulsionado por essa necessidade constante, tornou-se uma indústria próspera e globalmente valorizada em bilhões de dólares, atendendo tanto à preservação funcional quanto ao apelo estético das edificações. Diferentes métodos de manutenção, como andaimes, plataformas elevatórias, alpinismo industrial e robôs especializados, são utilizados de acordo com as necessidades específicas de cada prédio, considerando altura, acessibilidade e orçamento disponível.

Para prédios de até 40 metros, os andaimes são uma solução tradicional, segura e bastante utilizada, especialmente em projetos de manutenção que demandam maior tempo de trabalho em uma mesma área, como reparos estruturais ou pintura. Esse método oferece uma plataforma estável e contínua para que os profissionais possam trabalhar com ferramentas e materiais de forma prática. No entanto, o uso de andaimes implica uma logística complexa: é necessário montar e desmontar a estrutura no local da obra, o que pode demandar dias ou até semanas, dependendo da dimensão do prédio. Além disso, o aluguel e a manutenção dos andaimes, juntamente com a mão de obra de montagem, representam um custo significativo. Em projetos de grande escala, esses custos podem se tornar proibitivos, e, apesar de serem relativamente seguros, os andaimes ainda expõem os trabalhadores a riscos de altura.

Em prédios mais altos ou com uma arquitetura que dificulta o uso de andaimes, o

Figura 1 – Alpinistas prediais



FONTE: TG SERVICES (2022).

alpinismo industrial como representado na Figura 1 se destaca como uma técnica eficaz e flexível. Alpinistas industriais utilizam cordas e equipamentos de segurança específicos, que lhes permitem alcançar locais de difícil acesso com mais agilidade do que os andaimes. Esta técnica é ideal para serviços pontuais ou quando a instalação de estruturas fixas não é viável. Entretanto, o trabalho é fisicamente exigente e pode ser exaustivo, pois os trabalhadores precisam escalar e descer repetidas vezes ao longo do dia. Essa constante movimentação não apenas exige mais tempo para completar o serviço, mas também aumenta a exposição dos profissionais ao risco de acidentes e quedas, exigindo, portanto, profissionais altamente treinados e aptos a lidar com situações adversas em alturas extremas. Embora eficaz, o alpinismo industrial é considerado de alto risco e requer a observância rigorosa de normas de segurança, bem como o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) adequados, o que impacta o custo e o tempo de execução.

O andaime móvel, também conhecido como balancim elétrico como mostrado na Figura 2, é uma alternativa popular para trabalhos de fachada. Essa plataforma é suspensa por cabos e movimenta-se verticalmente com o auxílio de um sistema elétrico, permitindo que os trabalhadores subam e desçam ao longo da superfície do edifício conforme necessário. Esse método oferece uma solução prática e segura, permitindo que os trabalhadores realizem suas atividades em uma faixa vertical da fachada com estabilidade e acesso a ferramentas e materiais. No entanto, o balancim elétrico apresenta alguns desafios pois trata-se de um estrutura robusta e pesada, além disso, como o sistema opera apenas em uma linha vertical, quando o trabalho em uma área específica é concluído, é necessário deslocar e reinstalar o balancim em outra posição da fachada, o que exige tempo e esforço significativo da equipe.

Outra alternativa que é comum de ser empregada na manutenção de fachadas é o uso de plataformas elevatórias, Figura 3, como cestas aéreas e plataformas articuladas.

Figura 2 – Andaime (balancim elétrico)



FONTE: Massa Cinzenta (2023).

Figura 3 – Plataforma Elevatória



FONTE: Mills (2024).

Essas máquinas permitem que os trabalhadores acessem diferentes alturas com rapidez e segurança, sendo uma solução eficaz para serviços em alturas variáveis, especialmente em edifícios de média altura. Elas são projetadas para se movimentar verticalmente e, em alguns casos, horizontalmente, o que facilita o trabalho em diferentes seções da fachada sem necessidade de desmontagem e remontagem, como ocorre com os andaimes. No entanto, as plataformas elevatórias apresentam limitações em termos de mobilidade, especialmente em áreas confinadas ou de difícil acesso, onde o equipamento pode não conseguir manobrar com facilidade. Além disso, o uso de plataformas elevatórias demanda a contratação de operadores certificados e experientes, elevando o custo da operação. O investimento inicial para adquirir ou alugar esses equipamentos é substancial, e a manutenção da plataforma

também representa um custo recorrente, tornando essa opção mais cara em comparação com outros métodos para projetos de grande escala.

Esses métodos, apesar de eficazes, apresentam desafios e limitações que incentivam o desenvolvimento de novas tecnologias. A robótica aplicada à manutenção de fachadas surge como uma resposta promissora para esses problemas. Robôs controlados por cabos, por exemplo, oferecem uma alternativa inovadora que combina a segurança do trabalho remoto com a eficiência e o baixo custo a longo prazo. Esses sistemas não exigem a montagem de grandes e complexas estruturas físicas, minimizam o tempo de operação e reduzem drasticamente a exposição dos trabalhadores a condições de risco além de garantir replicabilidade e padronização da prestação do serviço.

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de novas arquiteturas para robôs controlados por cabos, com o intuito de substituir os métodos tradicionais de manutenção em fachadas de edifícios. Utilizando modelagens matemáticas, simulações e experimentos práticos, o objetivo é identificar uma arquitetura de robô que não apenas atenda de forma eficaz aos requisitos específicos da aplicação, mas que também se destaque sob os aspectos de engenharia e viabilidade financeira. A proposta busca criar um produto que possa ser desenvolvido e implementado em larga escala, proporcionando valor prático e significativo no mercado de manutenção predial. Essa abordagem visa não apenas otimizar os processos de manutenção, mas também contribuir para a segurança dos trabalhadores e a sustentabilidade econômica das operações, tornando-se uma solução inovadora e atrativa no setor.

2 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste trabalho sempre teve como objetivo transformar a pesquisa em um produto viável e aplicável ao cenário real de trabalho em fachadas de edifícios. Para isso, foi fundamental considerar tanto os aspectos financeiros quanto os construtivos, de forma a viabilizar o projeto dentro da realidade de uma startup com recursos limitados e capacidade de manufatura modesta.

O custo para desenvolver o projeto é um dos principais fatores, o que levou à proposta e análise de diversas arquiteturas de robôs. Cada arquitetura apresenta características próprias que a tornam mais ou menos adequada para o contexto de trabalho em fachadas. Entre os principais aspectos analisados na concepção dessas arquiteturas estão a complexidade de engenharia, o custo de produção, a área de trabalho coberta e a estabilidade do robô.

Esses itens são interdependentes. Por exemplo, um robô maior e mais robusto exige motores mais potentes e componentes mais caros, o que impacta diretamente o custo final. Da mesma forma, se o controle de posição do robô depender de sensores avançados e caros, a viabilidade econômica pode ser comprometida. Por isso, a pesquisa focou em desenvolver uma solução criativa e engenhosa, que busca atender às demandas práticas do problema e resulta em uma arquitetura promissora, fácil de construir e com custo acessível.

Essa abordagem torna possível a produção e aplicação dessa tecnologia em um contexto de startup, abrindo portas para uso comercial real e possibilitando que uma equipe com recursos financeiros limitados consiga implementar a tecnologia no mercado.

Com isso em mente, o desenvolvimento desse robô pode ser dividido em duas etapas principais. A primeira é criar um mecanismo que permita a movimentação precisa e estável ao longo da fachada, sendo este o diferencial fundamental do projeto. Se for possível estabilizar um objeto em um plano paralelo à fachada de um edifício de maneira precisa, segura, econômica e de fácil operação, a segunda etapa – o trabalho efetivo do robô – torna-se mais viável do ponto de vista da engenharia.

A segunda etapa envolve a realização do trabalho propriamente dito na fachada. Para isso, o robô deve ser projetado com uma estrutura modular, que permite a troca de ferramentas para diferentes tipos de serviços, como limpeza, pintura, reboco, entre outros. Esse design multifuncional permitirá que o robô se adapte facilmente para diferentes aplicações, bastando instalar a ferramenta adequada na plataforma móvel que percorre a área de trabalho. Com robôs sendo amplamente utilizados para limpeza e pintura em setores como a indústria automotiva, garantir a estabilização de uma plataforma móvel ao longo da fachada cria uma oportunidade de adaptar essas tecnologias para o contexto de

fachadas de edifícios.

Portanto, o foco central da pesquisa foi o desenvolvimento do sistema de movimentação e estabilização, que é o verdadeiro diferencial dessa proposta. Esse sistema permite manter um objeto estável ao longo de um plano vertical, alinhado com a gravidade. Embora o desenvolvimento tenha sido direcionado para aplicações em fachadas, essa tecnologia pode ser adaptada para uma série de outras finalidades, ampliando seu potencial de uso.

2.1 Diferentes Arquiteturas do Robô e Suas limitações

Na busca por uma arquitetura de robô ideal para aplicação em fachadas de edifícios, iniciou-se um longo processo de desenvolvimento e raciocínio para elaborar um método que permitisse ao robô alcançar todos os pontos de interesse de maneira eficiente, mantendo precisão e resistência contra os distúrbios ambientais inevitáveis. O robô, posicionado na parede externa da construção, está constantemente exposto a fatores climáticos, como o vento, que pode causar oscilações no mecanismo, levando-o ao risco de colisão indesejada com a superfície — um efeito que deve ser evitado a todo custo. Além disso, vibrações na estrutura da fachada dificultam a precisão do trabalho, prejudicando a qualidade do serviço.

Quando a aplicação é voltada para a limpeza, a precisão requerida não é tão rigorosa; contudo, ao tratar-se de pintura, o cuidado deve ser muito maior. Deposições incorretas de tinta podem danificar áreas como janelas e varandas, exigindo reparos adicionais que consomem tempo e dinheiro, comprometendo a viabilidade econômica da proposta.

Para atender a esses desafios, a estrutura central do robô foi concebida para operar ao longo de um plano que é paralelo à direção da gravidade, exigindo um sistema de controle — seja ativo ou passivo — que garanta a estabilidade frente a possíveis deslocamentos causados por ventos ou vibrações. Caso o robô se afaste ou se aproxime da fachada devido a esses fatores, um sistema de correção deve automaticamente levá-lo de volta à posição de equilíbrio dentro desse plano de trabalho, minimizando interferências e mantendo a distância adequada da superfície.

Uma abordagem inteligente para alcançar essa estabilidade é o uso de um sistema de controle mecânico passivo. Diferente de um controle ativo, que exige comandos específicos para corrigir o movimento, o controle passivo tira proveito das leis da física e do design estrutural do robô. Assim, a própria configuração física do robô naturalmente o leva para uma posição de equilíbrio em um plano paralelo à gravidade e, consequentemente, à fachada do edifício. Isso simplifica o sistema, reduz a necessidade de sensores e atuadores complexos e contribui para a economia e a robustez do projeto, ao mesmo tempo em que assegura a eficácia na operação em ambiente real.

Esse sistema passivo proporciona uma solução de controle simples e eficaz, sendo

um diferencial significativo no desenvolvimento do robô, que pode operar com segurança e eficiência, resistindo aos distúrbios sem precisar de mecanismos complexos de correção ativa, tornando a tecnologia mais viável.

Junto a isso, cada ponto do plano de trabalho do robô exige uma quantidade específica de cabos, que varia conforme a posição do robô e a estrutura fixa montada para sua operação, onde os cabos estarão ancorados. Dessa forma, é essencial desenvolver um método que permita ajustar dinamicamente o comprimento dos cabos, adicionando ou retirando comprimento conforme necessário para seguir a trajetória desejada. Esse mecanismo precisa garantir a fluidez dos movimentos e a estabilidade do robô, respondendo prontamente a qualquer mudança de posição sem comprometer a precisão.

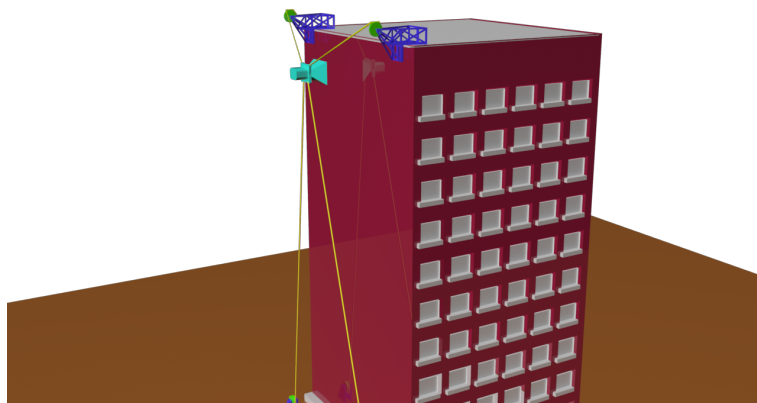
Outro aspecto crucial no desenvolvimento dessa tecnologia é garantir a facilidade de aplicação em cenários reais. A arquitetura ideal de robô controlado por cabos para a limpeza e pintura de fachadas deve ter um processo de instalação simples, rápido e que não exija modificações dispendiosas ou esteticamente prejudiciais na estrutura do edifício. O objetivo é que a instalação dessa tecnologia seja tão prática quanto o método de alpinismo industrial em termos de agilidade para iniciar a operação e tão produtiva quanto uma plataforma elevatória em termos de eficiência de trabalho.

A seguir são explorados três modelos especulativos de robôs para essa aplicação, onde foi feito o desenvolvimento de protótipos para testes de conceito dessas ideias. Suas características e particularidades são apresentadas destacando os principais aprendizados obtidos ao longo do desenvolvimento do produto. Esses insights foram fundamentais para a formulação da arquitetura final, que busca combinar eficiência operacional com simplicidade de instalação e controle, trazendo uma solução inovadora e prática para o trabalho em fachadas de edifícios.

2.1.1 Arquitetura de Quatro Motores Nos Vértices

Esse modelo é uma arquitetura intuitiva para robôs controlados por cabos e segue um conceito amplamente estudado. O sistema é baseado em uma configuração modular, onde carretéis automáticos são fixados nos quatro vértices da fachada do edifício, com os cabos desses carretéis conectados a uma estrutura central. Ao controlar o comprimento dos quatro cabos, é possível manipular a posição do módulo central de forma precisa e eficiente.

Figura 4 – A figura mostra uma ilustração da Arquitetura de Quatro Motores nos Vértices. Nela, cabos conectam uma estrutura central — onde se localiza a ferramenta destinada à manutenção da fachada — aos carretéis automáticos posicionados nos vértices da edificação.



Uma característica relevante desse modelo é a presença de quatro motores, um em cada carretel, o que oferece redundância ao sistema, pois teoricamente seriam necessários apenas dois atuadores para movimentos em duas dimensões. No entanto, os quatro motores trabalham em conjunto para garantir a estabilidade. Os carretéis fixados nos vértices superiores suportam a maior parte do peso do robô devido à gravidade, enquanto os inferiores têm uma função estabilizadora, restringindo o movimento perpendicular à fachada. Isso proporciona um controle mecânico passivo, ajudando a mitigar oscilações e estabilizar o robô. Como resultado, os motores nos vértices inferiores podem ser de menor torque.

Entre os desafios dessa arquitetura está a sincronização dos módulos independentes, que precisam comunicar-se de forma eficiente para garantir um movimento fluido e preciso do robô. Essa comunicação pode ser um obstáculo, especialmente em sistemas sem fio, pois qualquer atraso ou falha pode comprometer a precisão do controle. Além disso, a instalação dessa estrutura no ambiente real é complexa, pois exige fixação robusta nos vértices superior e inferior da fachada, o que pode demandar perfurações e parafusos que dificultam e aumentam o tempo de instalação.

Outro ponto crítico é o torque exigido dos motores dos carretéis superiores, principalmente quando o robô está próximo ao topo do edifício. Nesse ponto, o comprimento do cabo enrolado no carretel aumenta, elevando o diâmetro do carretel e, consequentemente, o torque necessário, além disso, na parte superior os ângulos dos cabos não são favoráveis e a força necessária para a estabilização é muito grande. Esse aumento de torque pode limitar o alcance do robô nas regiões próximas ao topo, criando uma área não operável devido às limitações dos motores.

O diâmetro variável do carretel é outra característica indesejável, pois altera o

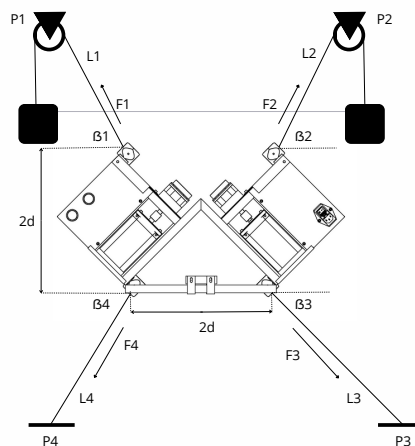
deslocamento do cabo a cada rotação do motor. Assim, para medir o comprimento de cabo ajustado, é necessário um sistema de instrumentação preciso. No protótipo desenvolvido, essa necessidade foi atendida com um sensor que mede o deslocamento do cabo, garantindo a precisão no controle. Esse sensor inclui um encoder para monitorar o movimento do cabo e uma célula de carga baseada em strain gauge, que mede a tensão na corda, adicionando uma camada de segurança e precisão ao sistema.

Figura 5 – Protótipo do carretel automático: Um motor de passo é conectado a um carretel de metal que armazena e libera a corda conforme necessário. O sensor implementado realiza a medição precisa do comprimento do cabo, assegurando o controle do sistema. Esse protótipo permitiu validar a ideia, destacando os pontos fortes e os desafios da arquitetura proposta



2.1.2 Arquitetura de Cabos Diagonais e Contrapesos

Figura 6 – Protótipo da Arquitetura de Cabos Diagonais com Contrapesos, onde os motores responsáveis pela movimentação estão fixos na estrutura central do robô, permitindo que ele escale os cabos que atravessam a fachada do edifício.



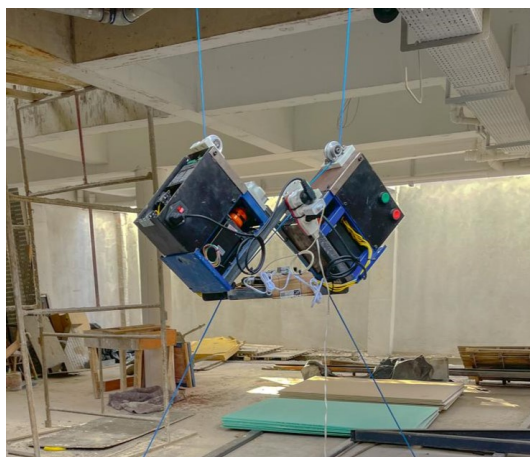
Para reduzir a quantidade de motores e simplificar a comunicação entre os diferentes módulos do sistema, desenvolveu-se uma arquitetura inovadora para robôs controlados

por cabos. A chamada “Arquitetura de Cabos Diagonais e Contrapesos”, ilustrada na Figura 6, utiliza apenas dois motores montados diretamente no robô, que é sustentado e movimentado por dois cabos cruzados na área de trabalho. Em cada cabo, uma extremidade é fixada ao solo, enquanto a outra passa por uma polia e conecta-se a um contrapeso.

Estes contrapesos tensionam os cabos, criando uma força que atua para manter o robô elevado. Os contrapesos precisam estar livres para se mover, pois são eles que, conforme o movimento do robô, fornecem ou retiram cabo do sistema. A posição do robô é controlada ajustando o comprimento dos seguimentos entre as duas extremidades fixas no solo e o robô tornando possível a movimentação no plano de operação apenas com os dois motores.

Essa arquitetura oferece vantagens significativas. A centralização dos componentes eletrônicos e elétricos no próprio robô simplifica a comunicação interna, e a movimentação requer apenas dois motores, facilitando a manutenção e diminuindo o consumo de energia. Além disso, o torque exigido dos motores é reduzido, pois eles precisam apenas compensar a diferença de força entre as seções superior e inferior dos cabos. Essa característica permite o uso de motores menores e mais baratos, desde que a relação entre o peso dos contrapesos e o do robô seja favorável.

Figura 7 – Protótipo do robô com Arquitetura de Cabos Diagonais e Contrapesos em operação em um cenário real de construção de edifício. Este protótipo foi construído com peças reaproveitadas de dois carretéis automáticos. O robô conseguiu se movimentar pela fachada, alcançando uma altura considerável, embora tenha ficado limitado às regiões centrais.



Apesar dessas vantagens, essa arquitetura tem uma limitação crítica: a área de atuação do robô é restrita. Com contrapesos de massas iguais, a área de operação é limitada a uma região central da fachada e se estreita conforme o robô se eleva. Isso significa que ele não consegue alcançar as regiões laterais mais altas da fachada, onde o trabalho seria necessário. Essa restrição inviabiliza o uso da arquitetura para cobertura total da fachada,

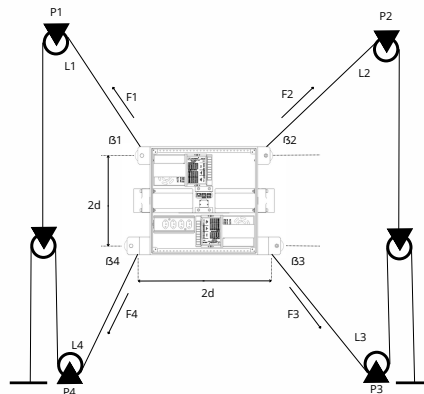
comprometendo a aplicação como produto funcional e bem-sucedido.

Para mitigar essa limitação, uma solução potencial seria implementar um sistema de transferência de carga entre os contrapesos durante a operação, permitindo que o robô alcance áreas mais amplas. No entanto, isso traria complexidade adicional, aumentando o custo e a dificuldade de instalação, o que contraria o propósito do projeto: criar um robô eficiente e engenhoso, mas também econômico, simples e de fácil aplicação prática.

2.1.3 Arquitetura de Polias móveis

O problema de limitação da área de atuação na Arquitetura de Cabos Diagonais e Contrapesos é intrinsecamente relacionado à isostática, devido ao fato de que cabos apenas suportam tração. Ou seja, em posições onde há uma compressão seria necessária para manter o robô estático, essa área torna-se, na prática, inacessível e instável para o robô. Com esse desafio em mente, iniciou-se uma fase de ideação para desenvolver um método que mantivesse todos os cabos tensionados, ampliando assim a área de trabalho do robô.

Figura 8 – Ilustração da Arquitetura de Polias Móveis, mostrando o sistema que mantém uma tensão positiva em todos os segmentos de cabos durante a operação.



Uma solução engenhosa encontrada para esse problema foi o desenvolvimento de uma arquitetura com polias móveis, dispensando o uso de contrapesos. Nesse modelo, o próprio peso do robô é responsável por tracionar todos os segmentos de cabo. Assim como na Arquitetura de Cabos Diagonais e Contrapesos, são utilizados dois cabos, mas, neste caso, eles não cruzam a diagonal da área de trabalho. Um cabo é conectado ao lado esquerdo do robô e outro ao lado direito. Cada cabo segue o seguinte trajeto: uma extremidade é fixa ao solo, passa por uma polia móvel, depois por uma polia fixa no chão, conectando-se ao mecanismo de tração do robô; em seguida, o cabo vai até uma polia fixa no vértice superior do prédio, e por fim retorna à polia móvel pela qual já havia passado. Esse arranjo cria uma relação entre as forças dos segmentos superior e inferior, onde a força no segmento inferior é metade da tensão no segmento superior. Assim, a tensão

mecânica é positiva em todos os pontos, e o motor precisa apenas superar a diferença de tensão entre os dois segmentos para gerar movimento.

Nesta arquitetura, a posição do robô é determinada pela interseção de duas elipses, formadas a partir da quantidade de cabo no sistema (representando a soma das diagonais superior e inferior de cada lado) e da posição das polias fixas. Ao acionar o motor, a quantidade de cabo nos segmentos superior ou inferior é ajustada, alterando o comprimento dos cabos que ligam as polias fixas ao robô. Variando esse valor, é possível modificar o tamanho da elipse formada, e, ao fazer isso em ambos os lados, duas equações elípticas se formam, cujos pontos de interseção representariam a posição do robô.

Apesar das inovações dessa arquitetura, ela também apresenta um desafio considerável. Das duas soluções possíveis para os pontos de interseção das elipses, apenas o ponto inferior é viável na prática, o que limita a área de atuação dessa configuração. Devido à orientação do plano de operação com relação à gravidade, o ponto de interseção inferior permite que os cabos se tensionem e estabilizem o robô. No ponto de interseção superior, no entanto, a gravidade age de forma a afrouxar os cabos, limitando a altura máxima que o robô pode alcançar à metade da altura total da fachada.

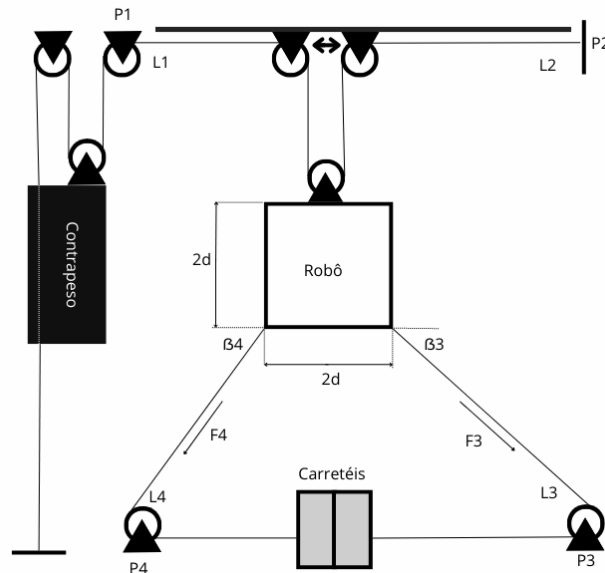
Figura 9 – Protótipo do robô para a Arquitetura de Polias móveis. É possível ver a organização interna com moteres, fontes de alimentação, drivers de controle e um computador central com uma câmera. As polias presentes guiam o cabo até o mecanismo de tração.



2.2 Arquitetura Escolhida - Fusão de Ideias

A experiência adquirida no desenvolvimento de diferentes tipos de robôs controlados por cabos proporcionou conhecimentos e insights extremamente valiosos para a criação de uma arquitetura adequada ao trabalho em fachadas de edifícios. Em especial, os três modelos de robôs apresentados anteriormente foram fundamentais para moldar a arquitetura escolhida como a mais apropriada para essa aplicação.

Figura 10 – Ilustração da arquitetura tida como a mais promissora em termos de desenvolvimento de um produto para trabalho em fachada de edifícios. Esse modelo conta com um trilho superior, linha de guia para o contrapeso dois carretéis centralizados em um único equipamento em solo.



Esse modelo de robô opera com um contrapeso posicionado na parte superior do edifício, funcionando de forma semelhante a uma polia móvel que tensiona um circuito de cabos. Esse circuito de cabos, por sua vez, corre sobre um trilho que também se conecta ao robô, como se fosse outra polia móvel, mantendo-se sempre alinhado com a gravidade devido ao trilho fixado na parte superior. Assim, com um contrapeso de maior massa em relação ao robô, cria-se uma tendência de movimento para cima. No entanto, dois segmentos de cabo, conectados ao robô e aos vértices inferiores do prédio, são ligados a um carretel que controla a posição do robô ao ajustar o comprimento dos respectivos cabos.

Essa configuração reduz consideravelmente o esforço sobre os motores, pois, se bem projetado, o peso do robô e do contrapeso se equilibram, facilitando a movimentação. Além disso, quanto mais alto o robô estiver, menor será a força necessária do motor, pois os ângulos dos cabos são mais favoráveis, e com menos cabos no carretel, o diâmetro do mesmo é menor, o que reduz o torque transferido para o eixo do motor.

Nesse modelo, há três controles totalmente mecânicos e passivos muito interessantes. O primeiro, já discutido anteriormente, é a estabilização do robô contra distúrbios e vibrações, minimizando os movimentos transversais em relação ao plano de trabalho por meio dos cabos tensionados. Além disso, para que o segmento de cabo superior se mantenha alinhado com a gravidade, a posição de uma polia precisa se mover ao longo do trilho, e isso ocorre de forma passiva e puramente mecânica. Caso o robô e a polia no trilho não estejam na mesma direção, surge uma força que move a polia ao longo do trilho para alinhar ambos. E por fim, para evitar que o contrapeso balance de forma descontrolada o

mesmo cabo que é tensionado pela ação do robô e do contrapeso é utilizado como guia de movimentação do contrapeso evitando que grandes balanços ocorram.

Um aspecto essencial neste desenvolvimento é determinar a tensão nos cabos inferiores da estrutura em cada ponto da área de trabalho, de forma que os componentes dos carretéis possam ser adequadamente projetados. Analisando a Figura 12, o sistema de equações de equilíbrio estático do problema pode ser formulado como:

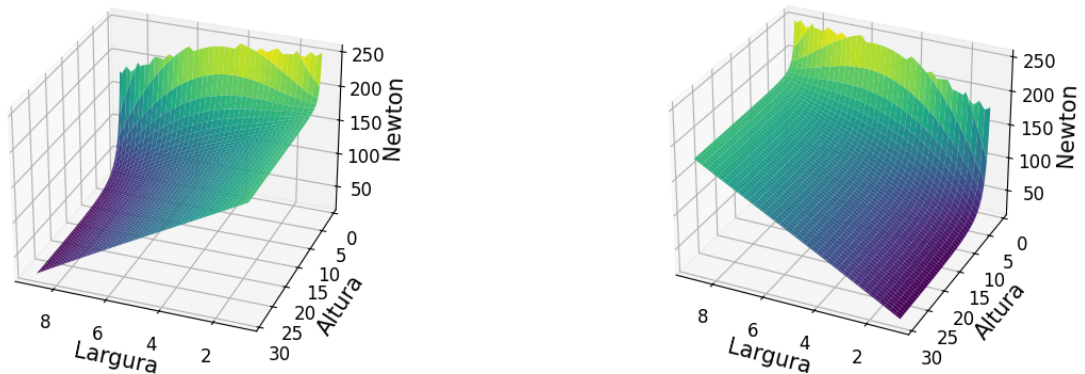
$$\begin{cases} F_3 \cdot \cos(\beta_3) - F_4 \cdot \cos(\beta_4) = -M \cdot a_x, \\ F_1 + F_2 - F_3 \cdot \sin(\beta_3) - F_4 \cdot \sin(\beta_4) = M(g - a_y), \\ F_1 = F_2, \\ F_2 = \frac{m \cdot g}{2}. \end{cases}$$

Onde M representa a massa do robô no centro, e m a massa do contrapeso conectado ao cabo superior. Assim, para determinar as forças F_3 e F_4 , que correspondem às tensões nos segmentos de cabo inferiores do robô, a seguinte manipulação algébrica pode ser realizada:

$$\begin{pmatrix} F_3 \\ F_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta_3) & -\cos(\beta_4) \\ \sin(\beta_3) & -\sin(\beta_4) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -M \cdot a_x \\ M(g - a_y) - 2 * m * g \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

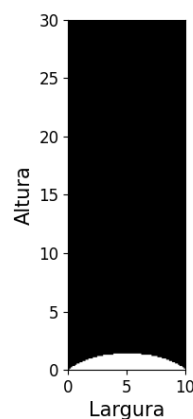
Considerando o peso do robô como sendo 20 kg e o peso do contrapeso como 40 kg, o módulo das forças F_3 e F_4 ao longo da área de uma fachada de 10 metros de largura de 30 metros de altura as forças estão apresentadas na Figura 11

Figura 11 – Tensão mecânica em Newtons nos segmentos de cabos inferiores do robô, onde as forças F_3 (a direita) e F_4 (a esquerda) estão presentes. É possível observar que as maiores tensões mecânicas são encontradas na parte inferior da área de trabalho.



Observa-se que, apesar do robô e do contrapeso serem relativamente pesados, as forças nos segmentos de cabo inferiores são relativamente baixas. No entanto, como essas forças são aplicadas tangencialmente em cada um dos carretéis, elas geram um torque que o motor precisa ser capaz de superar. Considerando que o carretel tenha um raio de 5 cm e que seja utilizado um motor de passo com torque de $130 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$, é possível analisar as regiões da área de trabalho onde esse motor seria capaz de movimentar o robô.

Figura 12 – Representação gráfica dos locais onde o robô pode operar sem problemas (em preto) e de regiões em que o torque do motor utilizado não vai ser o suficiente para estabilizar a posição (em branco)



A região preta representa as áreas onde o robô consegue operar dentro dessas configurações, pois todas as tensões são positivas e o conjunto motor-carretel é capaz de suportar o torque necessário. No entanto, surge uma pequena região branca na parte inferior, onde o torque necessário excede a capacidade do motor selecionado. Para essa aplicação, isso não representa um grande problema, já que o serviço pode ser realizado de maneira fácil em regiões próximas ao solo. Além disso, a eliminação dessa restrição é simples: basta aumentar o torque dos motores dos carretéis.

2.3 Controle de movimentação

Nesse modelo, ainda que se deseje realizar movimentos em linhas retas dentro da área de trabalho do robô, a movimentação dos motores não é linear. A atuação dos motores depende não só da posição atual do robô na trajetória, mas também da posição dos vértices do edifício, pois a posição do robô pode ser simplificada como a interseção de duas semicircunferências centradas nos vértices inferiores, com o comprimento de cada segmento de cabo inferior funcionando como o raio dessas circunferências.

No entanto, como se trata de uma área de trabalho bastante ampla e os requisitos de velocidade do robô não são elevados, é possível realizar uma discretização da trajetória, o que simplifica muito a operação. Assim, para que o robô siga uma trajetória desejada é

preciso descrever isso ao longo do tempo, o que por si só já contém informações sobre a velocidade esperada de movimentação.

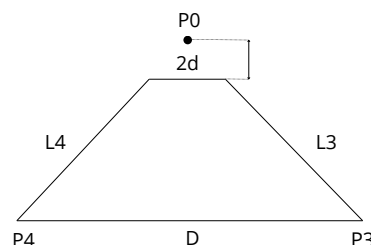
Após essa definição, a trajetória é discretizada em uma série de pontos igualmente espaçados no tempo, e o seguinte procedimento é adotado: o robô calcula o comprimento atual dos cabos, uma vez que sua posição é conhecida. Em seguida, ele determina o comprimento necessário dos cabos inferiores para se mover ao próximo ponto de sua trajetória. Com essa informação, é gerado um sinal de erro de comprimento dos cabos para o lado direito e esquerdo. Esse sinal de erro é então usado em dois controladores PI, que geram as frequências de clock para acionar os motores correspondentes.

Dessa forma, com discretizações suficientemente pequenas, o robô segue uma trajetória muito próxima da esperada, com controle preciso de velocidade. A utilização de motores de passo para controlar a rotação dos carretéis facilita bastante o controle dos motores.

Para fechar a malha de controle, é necessário um sistema de localização que forneça em tempo real a posição do robô ao longo da fachada. Com essa informação, o tamanho atual dos cabos pode ser estimado. No entanto, para fins de simulação, esse sistema ainda não está disponível. Sendo assim, a posição do robô ao longo do tempo pode ser estimada levando em consideração a atuação dos motores. Sabendo o raio da engrenagem de tração, junto com o sinal de frequência injetado no motor, é possível estimar um delta referente à adição ou subtração de cabo no sistema.

Dessa forma, a posição do robô pode ser representada pelo trapézio ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Modelo de trapézio utilizado para estimar a posição do robô tendo como base a informação da largura da fachada e do robô bem como dos comprimentos de cabo L3 e L4 que são ligados aos carretéis.



Com esse modelo, a posição estimada do robô, com base no comprimento do cabo ao longo da simulação, é obtida a partir da Equação 2.2, derivada da geometria do trapézio:

$$\begin{cases} X &= \frac{L^3 + D^2 - L^4}{2D} + d \\ Y &= \sqrt{L^3 - \left(\frac{L^3 + D^2 - L^4}{2D}\right)^2} + d \end{cases} \quad (2.2)$$

2.3.1 Resultados do controlador

Considerando a dinâmica do sistema e a lógica de controle adotada um algoritmo na linguagem de programação Python foi desenvolvido com a finalidade de simular a movimentação do robô. Além disso, dado a natureza da aplicação do robô, que opera em uma fachada de edifício, a trajetória em forma de zig-zag se mostra apropriada para o movimento eficiente do robô ao longo da estrutura, tanto durante a subida quanto a descida da edificação. A trajetória de zig-zag foi cuidadosamente parametrizada para que o robô se movimente de maneira controlada, com uma velocidade constante de 10 cm/segundo, em uma edificação com dimensões de 10 metros de largura e 30 metros de altura.

A criação dessa simulação considerou uma série de parâmetros essenciais que influenciam o comportamento do robô e o desempenho da trajetória. Entre esses dados, destaca-se o peso do robô, que é de 20 kg, e o peso do contrapeso, que é de 40 kg. Além disso, o raio do carretel foi definido como 5 cm, o que impacta diretamente na capacidade de manuseio do cabo, um componente crucial para o movimento do robô.

O controlador utilizado no sistema opera a uma frequência de 100 Hz, o que garante uma resposta rápida e eficiente durante a execução do movimento. A discretização da trajetória, por sua vez, ocorre a uma taxa de 10 Hz, permitindo que os comandos sejam ajustados adequadamente ao longo da trajetória. Um aspecto técnico importante é que o drive do motor de passo está configurado para realizar uma revolução completa a cada 6400 pulsos, proporcionando um controle preciso sobre o movimento do motor.

A velocidade máxima do motor foi estabelecida como sendo revolução por segundo, levando-se em consideração as limitações de hardware. O controlador adota um algoritmo proporcional-integral (PI), com os ganhos ajustados em 15000 para ambos, visando garantir um desempenho otimizado na execução do movimento, minimizando os erros e melhorando a estabilidade durante o trajeto.

Esses dados são fundamentais para a simulação precisa do movimento do robô, permitindo que o sistema seja modelado e testado de forma realista antes da implementação prática na fachada do edifício.

A partir da Figura 14 é possível ver que aparentemente o robô é capaz de seguir a trajetória sem grandes problemas. A Figura 15 apresenta o erro de distância entre a trajetória feita pelo robô e pelo caminho desejado.

Figura 14 – Resultado da simulação do robô seguindo a trajetória em zig-zag em uma área de 10x30 metros. Destaca-se a região do canto, onde ocorre uma mudança rápida de direção, causando um pequeno desvio em relação à trajetória esperada. No entanto, o robô consegue corrigir rapidamente e retomar a trajetória.

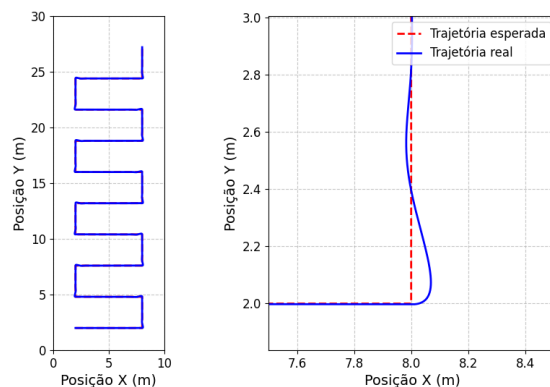


Figura 15 – Resultado da simulação referente à trajetória realizada pelo robô em comparação com a trajetória de referência. Observam-se picos de erro nos momentos de mudança abrupta de direção. Contudo, o controlador conseguiu reduzir o erro a níveis muito baixos nos segmentos de linha reta subsequentes. À direita, é destacado o formato desse erro durante duas mudanças de direção consecutivas.

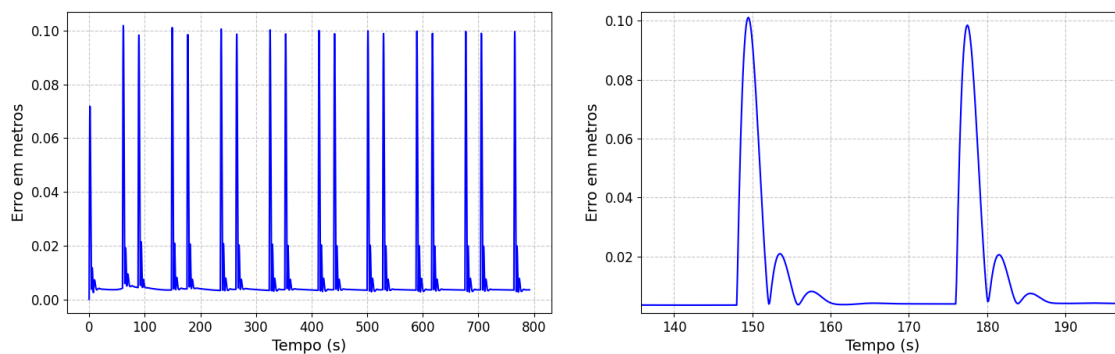
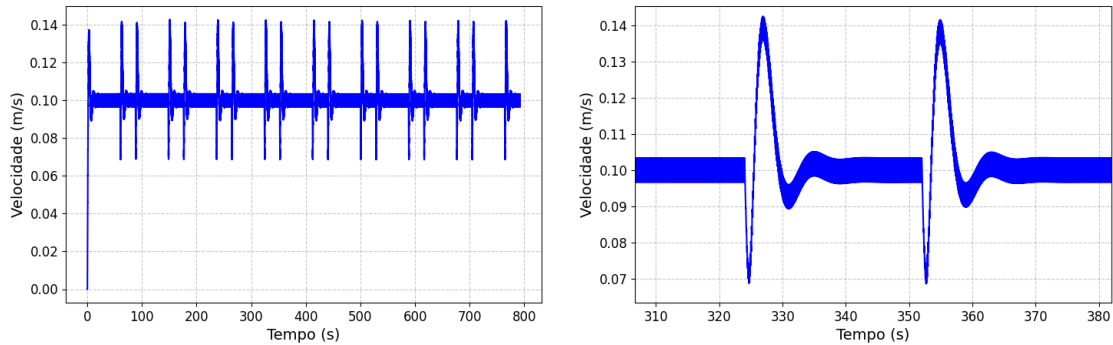


Figura 16 – Resultado da simulação da velocidade do robô ao longo da trajetória. Observam-se picos nos momentos de transição, refletindo os ajustes necessários para a correção de posição. À direita, é destacado o comportamento da velocidade durante duas transições consecutivas.



Visivelmente no momento de mudança de direção o erro tem um crescimento considerável o que já era esperado pois se trata realmente de uma mudança muito brusca. Todavia, o controlador consegue recuperar a posição para níveis de erro muito bons. Além disso, um fator de grande relevância é analisar a velocidade com que esse trajeto está sendo feito pelo robô. A Figura 16 apresenta a velocidade estimada ao longo do trajeto de subida da fachada. É observável que a velocidade é centrada em 0.1 metros por segundo, assim como descrito na trajetória esperada. Entretanto, devido ao erro de posição surge nos cantos os controladores aumentam a velocidade dos motores a fim de minimizar esse erro.

Um sinal interessante de se avaliar também é a frequência do sinal clock injetado nos motores ao longo da simulação, como apresentado na Figura 17. Aqui é possível notar que, apesar da trajetória relativamente simples e com velocidade constante, o controle dos motores apresenta uma característica bastante complexa.

Para resolver o problema da variação abrupta nos cantos da trajetória em zig-zag, há algumas soluções de fácil implementação. Uma delas é criar uma curva de aceleração e desaceleração ao longo dos trechos retos, de modo que a mudança de direção aconteça de forma mais suave. Entretanto, a nível de simulação, foi decidido manter a velocidade constante, mas realizar a trajetória com uma semi-circunferência no final do trajeto, o que também evita a mudança abrupta. O resultado da trajetória com essa nova proposta é apresentado na Figura 18.

Novamente, o robô seguiu a referência sem grandes problemas. Entretanto, para melhor visualização, a Figura 19 do erro demonstra a melhoria significativa que foi alcançada nas transições. De forma similar, a velocidade apresentada na Figura 20 também apresentou maior estabilização.

Figura 17 – Resultado da simulação mostrando como a frequência de clock, que controla a velocidade dos motores, varia ao longo do tempo para seguir a trajetória de referência. O sinal da frequência indica o sentido de rotação do carretel. À direita, destaca-se o formato complexo da frequência, mesmo para uma trajetória relativamente simples.

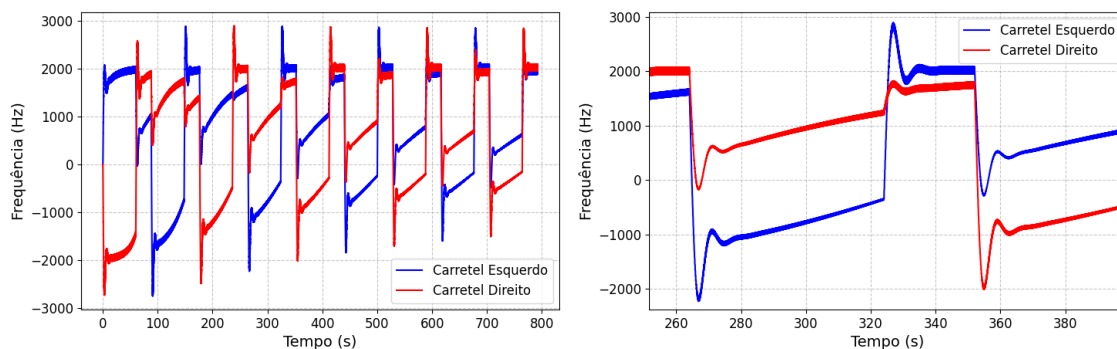


Figura 18 – Resultado da simulação para a trajetória com a eliminação das mudanças abruptas de movimentação, incluindo uma semicircunferência nos cantos. À direita, observa-se que o erro encontrado durante a transição é muito menor nesta situação quando comparado com a trajetória em zig-zag com cantos de 90 graus.

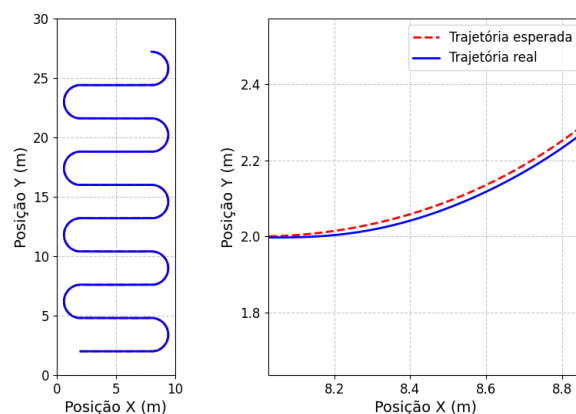


Figura 19 – Resultado da simulação do erro em relação a trajetória de referência para a trajetória suavizada que foi implementada. Dessa forma, os erro de trajetória ainda aumenta nos cantos, todavia, com um erro muito menor e estabilizado. A direita é apresentado o forma desse erro enquanto o robô percorre a semi circunferência do canto.

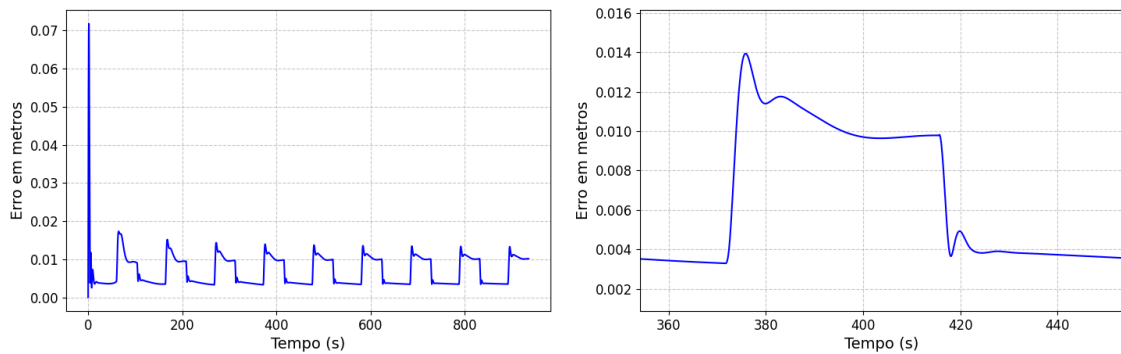
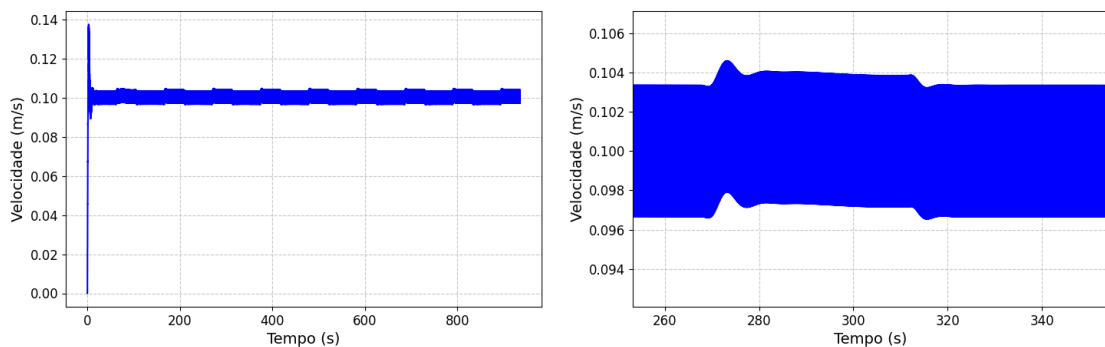


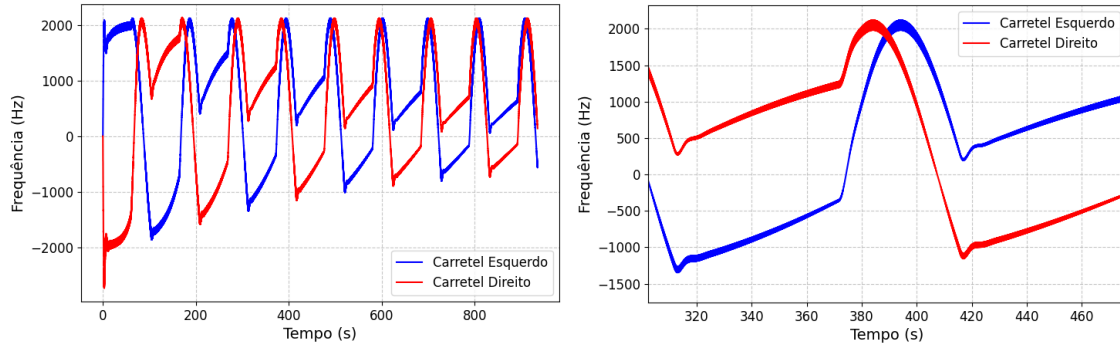
Figura 20 – Resultado da simulação da velocidade do robô ao longo da trajetória suavizada. Nota-se uma estabilização muito maior da velocidade quando comparado à trajetória com ângulos de 90 graus. A estabilização da velocidade é crucial para garantir a precisão do robô.



E por fim, o sinal de frequência ao longo do tempo para a trajetória com semi-circunferências é apresentado na Figura 21.

Todavia, essa simulação não leva em consideração distúrbios do sistema nem a elasticidade da corda. Como já foi observado, a tensão nos cabos varia, o que causará uma pequena mudança no comprimento dos cabos. Apesar disso, a lógica de controle permanece válida, pois se baseia nos erros entre a posição atual e a desejada. Além disso, o cabo pode ser modelado de forma a incluir sua variação e, assim, melhorar o controle, uma vez que já é conhecida a tensão mecânica do cabo em cada ponto.

Figura 21 – Resultado da simulação das frequências de clock injetadas nos motores para seguir a trajetória suavizada. Observa-se que as mudanças de frequência acontecem de forma mais suave, o que resulta em menos distorções na velocidade final do robô. À direita, é destacada a frequência de clock dos dois motores durante o percurso de uma semi-circunferência.



2.4 Sistema de Localização

Com o crescente desenvolvimento de aplicativos móveis e a demanda por precisão de localização em ambientes internos, o uso da tecnologia Ultra-Wideband (UWB) tem se destacado como uma solução promissora para a criação de sistemas de localização. Em relação a essa tecnologia, espera-se que seu hardware possa se tornar ainda mais barato no futuro e ter aplicações em larga escala (VOLPI *et al.*, 2023), pois atualmente já é possível obter medições de distância entre dispositivos com precisão de alguns centímetros (7 - 50 cm) com baixo consumo de energia, longo alcance (> 200 m) e a capacidade de superar alguns desafios comuns encontrados por outros sistemas de localização.

Por exemplo, a aplicação do GPS em ambientes internos é muito afetada pelas barreiras físicas do ambiente (KJÆRGAARD *et al.*, 2010), tornando-o inadequado para propósitos que exigem um nível de precisão na ordem de centímetros. Mesmo em ambientes externos, o GPS é sensível ao arranjo geométrico dos satélites que compõem o sistema no espaço, afetando a precisão da estimativa da posição do objeto em terra, especialmente a precisão da estimativa da altitude do objeto. Embora o mesmo efeito, conhecido como dilution of precision (DOP) (TAHSIN *et al.*, 2015), também possa acontecer com a rede gerada por dispositivos UWB, em geral, há um controle muito maior sobre o arranjo dos dispositivos que compõem a rede. Além disso, mesmo comparando o sistema UWB com métodos mais utilizados para ambientes internos como Bluetooth, WiFi e RFID, essa tecnologia apresenta grandes vantagens em relação ao alcance e à precisão, que são as duas principais características da maioria das aplicações de localização.

Neste trabalho, aplicamos a tecnologia UWB para localizar um robô controlado por cabos projetado para operar no exterior de edifícios. Dado que o robô precisa ser capaz de operar em lugares como uma metrópole que tem muitos edifícios altos e em uma orientação

vertical, o GPS não é uma boa opção porque o ambiente afetará o sinal com barreiras e a estimativa de altitude não é tão precisa. No entanto, uma rede local de dispositivos UWB pode ser facilmente instalada e, com apenas as medições de distância, a posição da TAG já pode ser estimada com boa precisão aplicando o método dos mínimos quadrados. Mas, toda medição está sujeita a erros e o sensor UWB não é diferente, então para aumentar a precisão e robustez deste sistema de localização, dados de um acelerômetro contido na placa DWM1001C-DEV foram usados para executar a fusão sensorial com os dados de distância UWB por meio de um filtro Kalman que é uma excelente opção para lidar com a natureza probabilística das incertezas decorrentes de ambos os sensores. Uma limitação devido ao hardware desse trabalho é o fato de que o sensor de movimento é apenas um acelerômetro de três eixos e por isso o robô deve sempre manter a mesma orientação, o que para a aplicação em questão não é um problema muito sério. No entanto, a mesma abordagem pode ser adotada substituindo o acelerômetro de 3 eixos por uma unidade de medição inercial (IMU) mais sofisticada, removendo assim a limitação de manter a orientação do objeto a ser localizado.

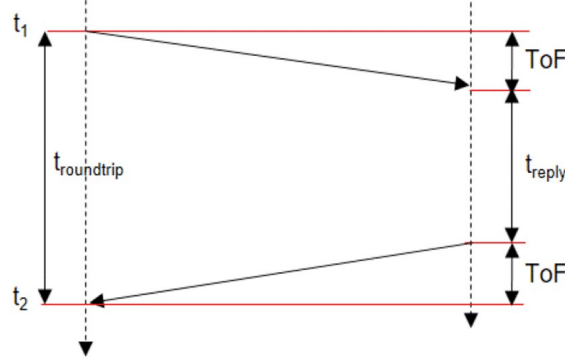
Nesta ocasião, foi utilizado o dispositivo DWM1001C UWB uma placa de desenvolvimento projetado pela empresa Qorvo. Nesta seção, são apresentados aspectos importantes do rádio, incluindo o tipo de dados coletados e a relação entre o hardware do sistema e os aspectos físicos que governam a tecnologia. Este entendimento é muito relevante para uma compreensão dos métodos aplicados neste trabalho e as limitações do sistema.

2.4.1 Medição de Distância Entre os Dispositivos UWB

O princípio de funcionamento de um dispositivo UWB para localização é a presença de uma antena conectada a um circuito eletrônico que pode operar em altas frequências, permitindo contar o tempo em passos muito pequenos. Isso é essencial porque, embora os dados de interesse sejam a distância, o dispositivo UWB está medindo o tempo. Sabendo que as ondas eletromagnéticas viajam a uma velocidade constante na atmosfera, com uma medição de tempo é possível calcular uma distância entre dispositivos (HENRY, 2023).

Existem dois métodos principais diferentes para estimar a posição de um dispositivo UWB móvel (KOLAKOWSKI; DJAJA-JOSKO, 2016): diferença de tempo de chegada, do inglês *Time Difference of Arrival* (TDoA) e alcance bidirecional, também do inglês *Two Way Range* (TWR). O método TDoA é muito semelhante ao GPS. Múltiplos pontos de referência, chamados âncoras, são implantados em um local e sincronizados no tempo. Dispositivos móveis (TAG) enviam um sinal, e quando uma âncora receber o sinal, ela o carimba com um horário. Este método tem a vantagem de que apenas um pulso é necessário para se comunicar com todas as âncoras, resultando em menor consumo de energia e uma densidade de dispositivos muito alta, embora a sincronização necessária possa ser difícil de fornecer.

Figura 22 – Representação da dinâmica do sinal e do processo de contagem do tempo para estimar a distância entre dois dispositivos usando o método TWR. Sabendo o $t_{\text{roundtrip}}$ e t_{reply} contados respectivamente na TAG e na âncora, é possível calcular o ToF e estimar a distância com base na velocidade da luz.



O método TWR depende da comunicação bidirecional entre dois dispositivos. À medida que se comunicam, os dispositivos também medem o tempo de voo (ToF) do sinal de rádio UWB entre eles. Idealmente, é possível derivar a distância real entre os dois dispositivos multiplicando o tempo de ida e volta do sinal pela velocidade da luz, c , e então dividindo por 2, conforme a seguinte equação:

$$distance = \frac{c(t_2 - t_1 - t_{reply})}{2}, \quad (2.3)$$

onde t_1 é o momento em que a TAG iniciou a comunicação, t_2 é o momento em que a TAG recebeu uma resposta de uma âncora, e t_{reply} é o tempo que levou para a âncora receber e enviar a resposta, como mostrado na Figura 22. Como a velocidade da luz é extremamente alta, qualquer erro nas medições de tempo resulta em grandes erros. Além disso, as antenas usadas para enviar e receber informações adicionam um atraso devido à sua impedância. Esse efeito pode ser resolvido adicionando um tempo que deve ser calibrado para cada dispositivo a fim de obter melhor precisão.

Neste trabalho, o método utilizado é o TWR. Na prática, um dispositivo inicializador, a TAG, envia uma mensagem com um endereço específico e começa a contar o tempo. Depois disso, o dispositivo com o endereço correspondente recebe esse sinal e o envia de volta para o dispositivo inicializador, incorporando informações sobre quanto tempo levou para manipular os dados. Dessa forma, a TAG pode calcular facilmente o ToF subtraindo o tempo total contado pela TAG e os dados contidos na mensagem recebida, levando também em conta o atraso das antenas.

É importante notar que a precisão dessa medição está diretamente relacionada à frequência de operação para amostrar o sinal recebido, resultando assim em dados discretos. Mesmo em dispositivos estáticos, o sensor UWB pode medir diferentes distâncias. No entanto, empiricamente, foi observado que, para um dispositivo estático, o desvio padrão é

algo próximo de 7 centímetros e, com a calibração correta, o erro médio pode ser quase zero.

2.4.2 Dados de Aceleração

A placa do DWM1001C contém um acelerômetro triaxial que pode ser utilizado para auxiliar em sua localização. Trabalhar com um acelerômetro pode ser uma tarefa difícil devido à quantidade de ruído presente na medição. Em geral, para fins de localização, os dados de aceleração são usados para estimar velocidade e posição, o que requer integração. Nesse processo, o ruído também é integrado, causando um erro cumulativo. Outra preocupação importante em relação ao uso do acelerômetro é que sua orientação precisa estar bem alinhada com o quadro móvel; caso contrário, mesmo um sensor sem ruído resulta em erros na estimativa de posição e velocidade.

O acelerômetro contido no dispositivo usado é o LIS2DH12, um acelerômetro linear de três eixos que possui escalas de full scale selecionáveis pelo usuário de $\pm 2g/4g/8g/16g$ com 12 bits de resolução. Sabendo que a aplicação de um robô acionado por cabo não tem uma aceleração superior a $2g$, a escala selecionada para este projeto foi $\pm 2g$, proporcionando uma resolução de $0.0095 \frac{m}{s^2}$. Além disso, a estimativa empírica da variância dos dados de aceleração desse sensor foi de $0.0475 \frac{m}{s^2}$.

Para resolver o problema da orientação, a aceleração enviada pelo sensor foi medida em diferentes orientações cujos resultados desejados são conhecidos. Com esses dados, é possível calcular uma matriz de rotação para alinhar o acelerômetro com o quadro do sistema. Realizando três aquisições de dados, onde em cada uma delas um dos eixos da placa está alinhado à gravidade, é possível configurar o seguinte sistema para obter a matriz de rotação:

$$M = \begin{bmatrix} ax_x & ay_x & az_x \\ ax_y & ay_y & az_y \\ ax_z & ay_z & az_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} g & 0 & 0 \\ 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & g \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

onde ax_x representa o valor da aceleração x medido quando o eixo x da placa coincide com a orientação da gravidade. Da mesma forma, ay_z representa a aceleração y medida quando o eixo z da placa está alinhado com a gravidade, e assim por diante.

Ainda sobre os dados do acelerômetro, primeiro, o LIS2DH12 salva as informações em um buffer interno e, em seguida, envia essas informações através de sua interface serial. É importante notar que, embora os dados enviados pelo sensor estejam muito próximos do presente, ainda há um pequeno atraso entre sua medição e envio. Neste trabalho, o acelerômetro funciona a 400 hz e seu buffer salva 32 valores antes de enviar via serial.

2.4.3 Métodos de Estimação de Posição

Esta seção apresenta três maneiras diferentes de resolver o problema de localização com base nos dados de distância dos sensores UWB considerado uma rede de dispositivos fixos com posições conhecidas no espaço e apenas um dispositivo móvel cuja posição deseja-se estimar.

2.4.3.1 Mínimos Quadrados (LS)

Sabendo a distância entre o dispositivo alvo e três ou mais âncoras, pode-se resolver o problema de localização aplicando o método dos mínimos quadrados (LI *et al.*, 2023). Este é um método que encontra uma solução que minimiza o erro na observação do sistema, neste caso, os dados de distância. Antes de aplicar o método dos mínimos quadrados, é necessário escrever o problema em termos de um sistema linear.

Dada uma âncora e um alcance de sua posição, pode-se escrever uma equação de uma esfera, onde o centro da esfera é a posição conhecida de uma âncora e o raio da esfera é a distância entre essa âncora específica e o dispositivo alvo:

$$(x_{an} - x_t)^2 + (y_{an} - y_t)^2 + (z_{an} - z_t)^2 = r_n^2, \quad (2.5)$$

onde o subíndice an representa as coordenadas da âncora número n , onde n é ordenado de forma que, quanto menor o valor, mais recentes são os dados. Assim, a âncora número zero é a que enviou os dados mais recentes. O subíndice t representa a coordenada do TAG, e r_n representa a distância entre a âncora número n e o TAG.

Com pelo menos três equações com diferentes âncoras, o sistema é solucionável. No entanto, como a equação da esfera não é linear, é necessário manipular esta equação para escrevê-la em formato matricial. O método de linearização escolhido usa os dados de uma âncora para linearizar todas as outras equações. Assim, nossa abordagem precisa de pelo menos quatro âncoras para resolver o problema. O sistema pode ser escrito da seguinte forma:

$$Z = H \cdot X, \quad (2.6)$$

onde:

$$Z = \begin{bmatrix} r_1^2 - x_{a1}^2 - y_{a1}^2 - z_{a1}^2 + x_{a0}^2 + y_{a0}^2 + z_{a0}^2 - r_0^2 \\ r_2^2 - x_{a2}^2 - y_{a2}^2 - z_{a2}^2 + x_{a0}^2 + y_{a0}^2 + z_{a0}^2 - r_0^2 \\ \vdots \\ r_n^2 - x_{an}^2 - y_{an}^2 - z_{an}^2 + x_{a0}^2 + y_{a0}^2 + z_{a0}^2 - r_0^2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$H = 2 \times \begin{bmatrix} (x_{a0} - x_{a1}) & (y_{a0} - y_{a1}) & (z_{a0} - y_{a1}) \\ (x_{a0} - x_{a2}) & (y_{a0} - y_{a2}) & (z_{a0} - y_{a2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_{a0} - x_{an}) & (y_{a0} - y_{an}) & (z_{a0} - y_{an}) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

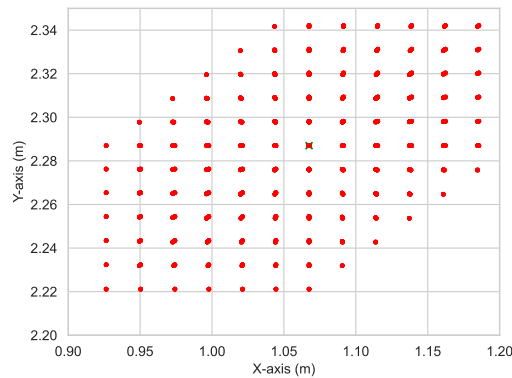
$$X = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Este sistema pode ser superdeterminado. Se mais de quatro âncoras estiverem operando ao mesmo tempo, é necessário usar a pseudo-inversa de H para obter a solução do problema:

$$X = (H^T H)^{-1} H^T Z. \quad (2.10)$$

Uma característica importante de resolver este problema de localização usando apenas o método dos mínimos quadrados é que a velocidade do objeto que está se movendo não é levada em conta. Em outras palavras, a solução é feita apenas com os dados de distância de cada uma das âncoras, que podem ter um erro em suas medições. Além disso, como as medições de distância são discretas devido à relação entre o clock do sistema e a velocidade da luz ao medir a posição de um objeto estacionário a partir das quatro âncoras, o sistema pode apresentar um resultado em formato de grade, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Simulação da posição estimada do TAG parado com os Mínimos Quadrados. É possível identificar um resultado em formato de grade devido à incerteza discreta na estimativa da distância de cada dispositivo.



2.4.3.2 Mínimos Quadrados Ponderados (WLS)

O TAG se comunica individualmente com cada âncora quando o método TWR é usado. Portanto, as distâncias medidas entre o TAG e as âncoras estão relacionadas

à mesma posição no espaço se o TAG não estiver se movendo. Se o TAG estiver se movendo, as distâncias medidas são relativas às diferentes posições do TAG no momento da comunicação. Esse efeito é mais importante quando o tempo entre as medições é maior ou com a TAG se movimentando muito rapidamente. Para minimizar os erros causados por esse efeito, pode-se criar um mínimo quadrado ponderado (DAIM; LEE, 2019) para tornar os dados mais recentes mais confiáveis, de modo que a estimativa final esteja mais próxima dos dados mais recentes.

Uma matriz de pesos é construída com base na diferença de tempo entre o tempo atual e o tempo em que os dados foram recebidos de cada âncora, de modo que os dados mais recentes tenham maior peso. Neste trabalho, os pesos foram calculados como o inverso da diferença de tempo mais um termo, k , que controla a sensibilidade dos pesos:

$$X = (H^T W H)^{-1} H^T W Z, \quad (2.11)$$

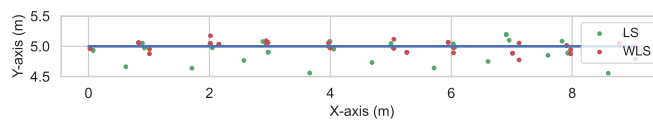
onde:

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{(t_0 - t_1) + k} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{(t_0 - t_2) + k} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{(t_0 - t_n) + k} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Observe que, quanto maior k , menor a diferença nos pesos. Ou seja, a ponderação é tão mais sensível quanto menor é o valor de k e chega ao máximo de sensibilidade com k igual a zero.

A Figura 24 mostra os resultados de uma simulação que realiza a comparação entre mínimos quadrados padrão e mínimos quadrados ponderados ao estimar a posição de um TAG se movendo em linha reta. Em ambos os casos, a estimativa foi baseada em dados de apenas quatro âncoras com o mesmo arranjo retangular e com uma taxa de aquisição baixa em comparação à velocidade do TAG. É notável que, com a aplicação da matriz de peso, a resposta se aproxima da trajetória real (linha azul).

Figura 24 – Comparação entre Mínimos Quadrados (verde) e Mínimos Quadrados Ponderados (vermelho) para estimar a posição do TAG em movimento rápido simulado em linha reta. É notável que os Mínimos Quadrados Ponderados estão mais próximos da verdadeira trajetória (azul).



2.4.3.3 Filtro de Kalman (KF)

O Filtro de Kalman é uma ferramenta poderosa para lidar com a natureza probabilística das medições de sensores em diversas aplicações, como navegação (VENKATA; SURESH; RAMANA, 2021), sistemas de controle e processamento de sinais. Esse método prova-se excelente para melhorar a estabilidade e a confiabilidade do sistema, abordando as incertezas associadas às medições de sensores.

A premissa fundamental do Filtro de Kalman envolve duas etapas essenciais: previsão e correção. Na etapa de previsão, o filtro utiliza o modelo dinâmico do sistema para prever a estimativa do estado e sua incerteza associada. Isso envolve calcular o estado previsto, $\hat{x}$, e sua covariância, P , com base na matriz de transição de estado do sistema, F , na entrada de controle, U , e na estimativa de estado anterior:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k U_k \quad (2.13)$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (2.14)$$

onde Q é a covariância do ruído do processo.

Subsequentemente, na etapa de correção, o Filtro de Kalman integra novas medições de sensores para refinar a estimativa do estado previsto. O Ganho de Kalman, K , é crucial nesta etapa, representando o equilíbrio entre os pesos atribuídos à previsão e às atualizações das medições. A estimativa do estado e a covariância atualizadas são então calculadas, incorporando tanto as percepções do modelo dinâmico quanto as medições reais, z :

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.15)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (2.16)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (2.17)$$

Para este trabalho, o estado é a posição tridimensional e a velocidade da TAG. Os dados de aceleração são inseridos como entrada após serem rotacionados para corrigir sua orientação no sistema, onde a matriz B converte essas informações em termos de velocidade e posição ao integrar a aceleração. O estado, a matriz F , B e U são construídos conforme a seguir, sabendo que dt é o período da frequência de amostragem do acelerômetro, que neste caso é de 400Hz:

$$X = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ Vx_t \\ Vy_t \\ Vz_t \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{dt^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} \\ dt & 0 & 0 \\ 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & dt \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$U = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \times M \quad (2.21)$$

A matriz Q é baseada na variância do acelerômetro e na matriz B , pois uma incerteza integrada gera uma incerteza ainda maior:

$$Q = B \times \begin{bmatrix} \sigma_{ax}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{ay}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{az}^2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Para a etapa de correção, as mesmas matrizes construídas para aplicar o método dos mínimos quadrados serão usadas para calcular o vetor de erro, onde o Z e H já foram apresentados nas Equações 2.7 e 2.8.

O processo de previsão ocorre sempre que os dados do acelerômetro são recebidos, e a etapa de correção ocorre sempre que os dados de distância são recebidos. Portanto, como o acelerômetro opera em uma frequência maior que as medições de distância UWB, a etapa de previsão é mais frequente do que a de correção.

2.4.3.4 Experimento

Para validar o sistema proposto, um experimento foi desenvolvido para simular o robô controlado por cabos com a finalidade de estimar a sua posição. Para isso, uma rede foi montada com 8 sensores UWB estacionários atuando como âncoras dentro de uma sala que contém uma infraestrutura de rastreamento de movimento VICON. Um dispositivo móvel foi instalado no topo de um carrinho que pode se mover em qualquer direção sem girar. O sensor instalado no carrinho móvel está conectado a um computador via comunicação serial. O dispositivo UWB envia dados de aceleração e distância, que o

computador salva para processamento futuro. A Figura 25 mostra uma foto do arranjo experimental.

Figura 25 – Experimento montado nas dependências da West Virginia University para mover uma TAG (verde) dentro de uma rede de âncoras (azul) para comparar com o sistema Vicon (vermelho). O carro usado é holonômico, permitindo movimentos em qualquer direção sem alterar a orientação da TAG.



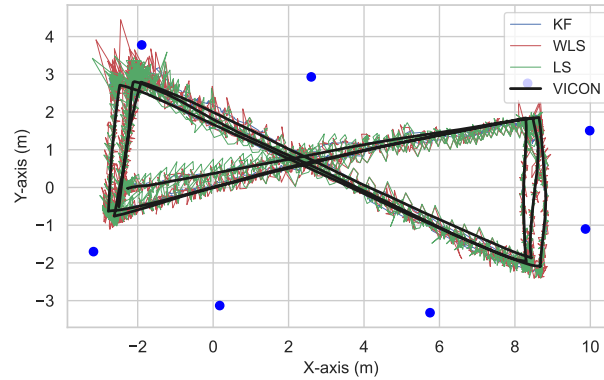
Além disso, vale a pena mencionar que a matriz de rotação do acelerômetro foi construída a partir de dados obtidos do topo do carro experimental. Em outras palavras, a TAG foi posicionada em três orientações diferentes no topo do carro, seguindo o procedimento apresentado na Seção 2.4.2.

Como o robô proposto funciona apenas em um plano, todas as âncoras foram montadas na mesma altura para estarem alinhadas com o carrinho. Além disso, o algoritmo de localização foi modificado para estimar a posição em apenas duas dimensões. Dessa forma, uma pessoa moveu o carrinho pela região onde os sensores operam, garantindo que o carrinho não fosse girado para não desorientar os dados do acelerômetro. Durante o experimento, um caminho foi feito passando pelas diagonais da região operacional e retornando à posição inicial. No entanto, cada caminho foi feito a uma velocidade cada vez maior, começando de uma posição estacionária.

2.4.4 Resultados e Discussão

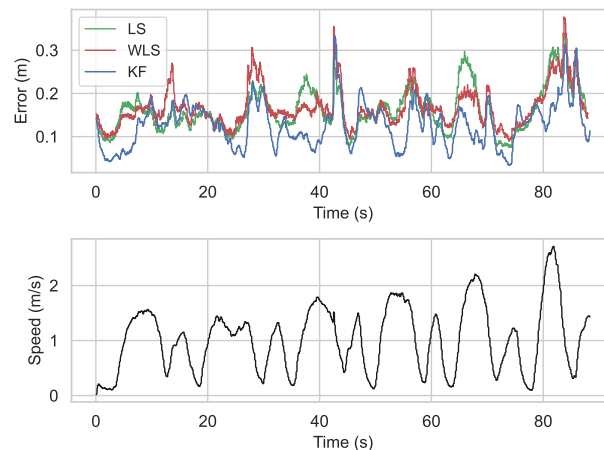
Com base nos dados coletados no experimento prático, os algoritmos dos três métodos discutidos anteriormente (LS, WLS e KF) foram aplicados. Todos os métodos resultaram em resultados satisfatórios, conseguindo seguir toda a trajetória do dispositivo móvel e mantendo um baixo nível de erro em relação às medições do VICON. A estimativa de cada método ao longo da trajetória do sensor é mostrada na Figura 26.

Figura 26 – Resultados experimentais. Previsão de posição usando Mínimos Quadrados (LS), Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) e Filtro de Kalman (KF) em comparação com o sistema de captura de movimento VICON.



A Figura 27 apresenta a média móvel do erro para cada um dos métodos desenvolvidos, com uma janela de 30 medições de distância, que configura uma janela de menos de 1 segundo considerando que a frequência média de aquisição de dados é de 40Hz. Os três métodos desenvolvidos permaneceram, na maior parte do tempo, com erro médio móvel inferior a 20 centímetros, mesmo com a TAG em movimento. Essa é uma boa precisão para várias aplicações em ambientes internos.

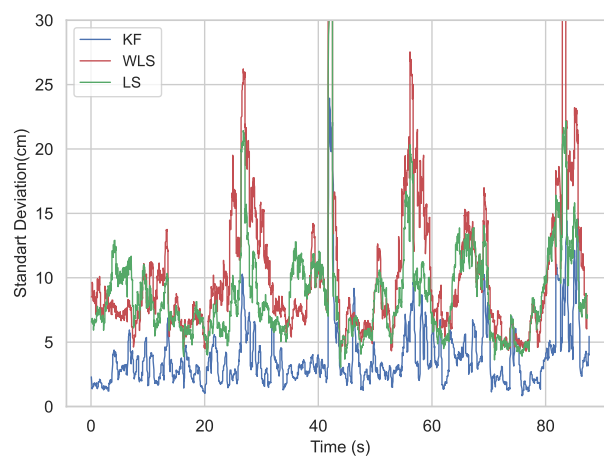
Figura 27 – Erro médio móvel para cada método usado e velocidade da TAG ao longo do experimento. A figura mostra o aumento da velocidade ao longo do experimento e como o erro de cada método se comporta.



A Figura 27 também mostra o valor da velocidade da TAG, o que permite inferir algumas informações relevantes sobre a aplicação de cada um dos métodos. É possível notar que o método WLS tem desempenho melhor que o LS em velocidades mais altas,

o que é esperado, pois a matriz de pesos aplicada neste método prioriza a medição de distância mais recente. No entanto, em velocidades mais baixas, o método LS apresenta desempenho ligeiramente melhor em comparação com o WLS, pois o WLS é mais sujeito a erros intrínsecos de medição de distância devido à maior relevância dos dados mais recentes. O método KF, como esperado, apresentou o melhor resultado, atingindo níveis de precisão abaixo de 5 centímetros em baixas velocidades e acelerações moderadas.

Figura 28 – Desvio padrão ao longo do experimento para cada método. Nota-se que o método KF obteve uma boa melhoria no desvio padrão da estimativa de posição.



Outra característica importante sobre a aplicação dos diferentes métodos é o desvio padrão da estimativa de posição, que é um indicativo da confiança na estimativa. A Figura 28 mostra o desvio padrão ao longo do experimento para cada um dos métodos. Nota-se que o KF apresenta o menor resultado de desvio padrão, seguido pelo LS e WLS, o que faz sentido devido à característica de priorização de medições do WLS.

Finalmente, o erro médio ao longo do experimento foi de 12,7 cm, 16,7 cm e 16 cm para KF, WLS e LS, respectivamente. Além disso, o desvio padrão ao longo do experimento foi de 7,96 cm, 12,92 cm e 11,09 cm, respectivamente.

2.5 Dispositivos e periféricos

Durante o desenvolvimento desses sistemas robóticos é exigido a integração de várias etapas ao longo da operação como por exemplo, sensoriamento, processamento e execução. Esses três pilares são essenciais para que um robô seja capaz de interagir com seu ambiente e realizar tarefas de maneira eficiente. Para isso, é necessário utilizar sistemas e equipamentos adequados que desempenhem funções específicas, como a coleta de dados, o controle de atuadores e a comunicação entre diferentes partes do sistema. Sendo assim,

ao longo do desenvolvimento do projeto alguns equipamentos e sistemas foram escolhidos para serem utilizados. A seguir alguns deles são comentados.

A ESP32 é um microcontrolador versátil e de baixo custo que combina recursos de comunicação sem fio, como Wi-Fi e Bluetooth, com alto desempenho para tarefas de controle e sensoramento. Ele é altamente utilizado em projetos de Internet das Coisas também conhecido como *Internet of Things* (IoT). Em análises a ESP32 se destaca pela sua performance, baixo custo e operação em tempo real devido ao sistema FreeRTOS (MAIER; SHARP; VAGAPOV, 2017). No projeto foi ideal utilizá-lo para fazer o controle do motor e a leitura de sensores.

O Raspberry Pi é uma série de computadores de placa única (*Single-Board Computers* - SBC) desenvolvidos pela Fundação Raspberry Pi, amplamente reconhecidos por sua versatilidade e custo acessível. Originalmente projetado para promover o ensino de informática, ele rapidamente se tornou uma ferramenta essencial em áreas como robótica devido à sua capacidade de processamento, conectividade integrada e compatibilidade com sensores e atuadores.

Na robótica, o Raspberry Pi é amplamente utilizado como uma unidade central de controle, permitindo o processamento de dados, execução de algoritmos complexos, como visão computacional e controle autônomo, além de integração com sistemas operacionais robustos. Seu tamanho compacto e suporte a linguagens de programação como Python e C++ tornam-no ideal tanto para protótipos quanto para implementações finais em robôs móveis, manipuladores e sistemas autônomos. A Raspberry Pi no projeto é responsável por fazer o processamento de informações sendo um dispositivo central de tomada de decisões e exibição de imagens.

O Linux é um sistema operacional de código aberto amplamente adotado em diversas áreas da computação devido à sua flexibilidade, segurança e robustez. No campo da robótica, o Linux se destaca como a plataforma preferida devido à sua capacidade de integrar facilmente diversos tipos de hardware e software, além de ser altamente personalizável. Entre as várias distribuições do Linux, o Ubuntu se tornou uma das mais populares no desenvolvimento de sistemas robóticos, principalmente devido à sua interface amigável, ampla documentação e suporte da comunidade além de ter uma grande integração com o Robot Operating System (ROS).

O ROS, uma middleware de código aberto amplamente utilizada na robótica, foi desenvolvido para facilitar o desenvolvimento de robôs complexos, fornecendo uma ampla gama de bibliotecas e ferramentas para controle de movimento, percepção, simulação e comunicação entre dispositivos. O ROS também vem recebendo uma evolução, denominado ROS2 (BONCI *et al.*, 2023), essa evolução por ser de código aberto ainda em constante desenvolvimento apresenta alguns desafios, mas, apresenta ter uma base sólida e ser muito promissor, adota o Data Distribution Service (DDS), que oferece maior eficiência,

confiabilidade, baixa latência, escalabilidade e suporte a sistemas em tempo real. O DDS também elimina pontos únicos de falha na comunicação e melhora o processamento em tempo real. Também oferece Quality of Service (QoS), permitindo configurações de fluxo de dados para garantir a entrega confiável e pontual das mensagens. Suporte nativo a execução multi-threaded, aproveitando melhor processadores modernos de múltiplos núcleos. Sendo assim, foi o modo utilizado para fazer a transmissão de dados entre dispositivos no projeto.

2.5.1 Movimentação

Os motores de passo desempenham um papel fundamental na automação e na robótica devido à sua alta precisão e facilidade de controle em comparação com motores DC e AC. A capacidade de se mover em incrementos discretos torna esses motores ideais para aplicações que exigem controle preciso de posição, como em sistemas de movimentação de robôs.

Complementarmente, o driver de motor é um componente essencial para o gerenciamento de sinais de controle, proteção contra sobrecarga e controle de corrente. Ele permite configurar limites de corrente para proteger o sistema e possibilita a modulação de microstepping, que resulta em um movimento mais suave e preciso do motor. Essa modulação aumenta a resolução do movimento, como mostrado nas Figuras 29 e 30, reduzindo significativamente o ruído e permitindo que o motor execute incrementos menores e mais suaves, o que melhora o desempenho do sistema, especialmente em aplicações que demandam alta precisão em baixas velocidades.

Figura 29 – (esquerda) Posição para Passo Completo vs. Tempo. (direita) Posição para Microstepping vs. Tempo.

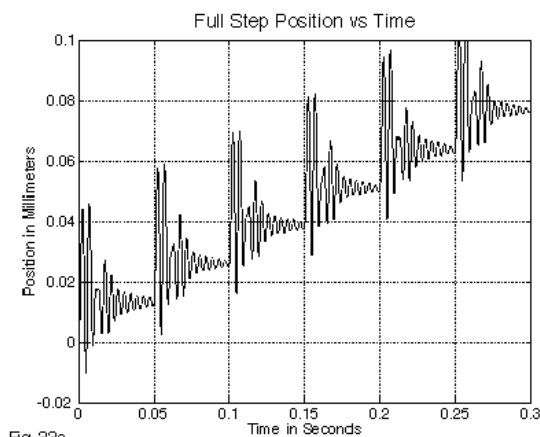


Fig. 33a

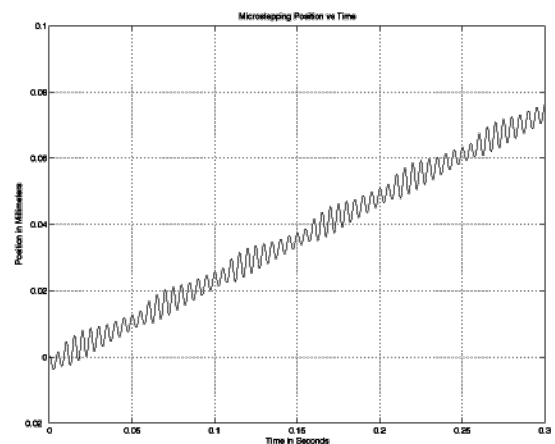
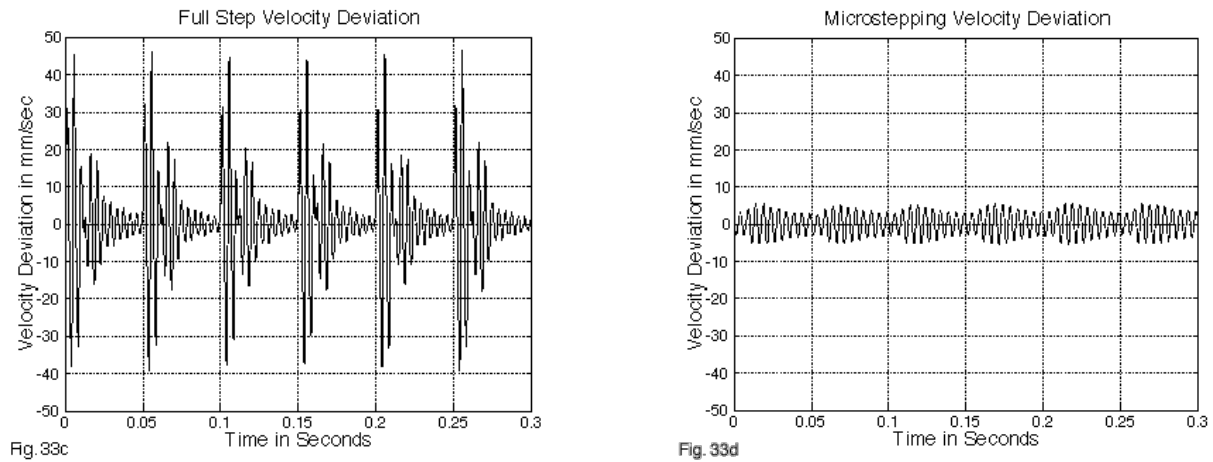


Fig. 33b

FONTE: Dover Motion (2020).

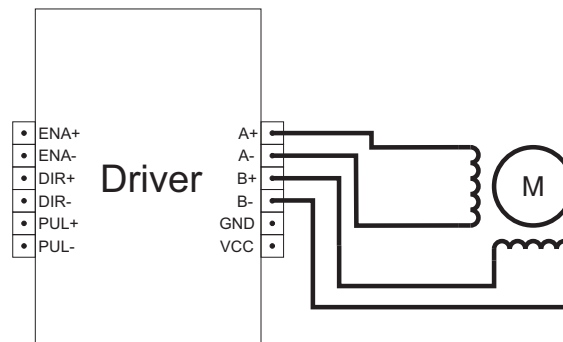
Figura 30 – (esquerda) Desvio de Velocidade para Passo Completo. (direita) Desvio de Velocidade para Microstepping.



FONTE: Dover Motion (2020).

O driver do motor é composto por duas seções principais: a seção de potência, que inclui a fonte de alimentação, o aterramento e os quatro sinais de pulsos do motor (A+, A-, B+, B-), ligados ao motor conforme a Figura 31; e a seção de sinais, que contém os sinais de enable, direção e pulso. Esses sinais de entrada são digitais: o sinal enable controla a ativação do driver, o sinal de direção define o sentido de rotação, e o sinal de pulso comanda os movimentos do motor.

Figura 31 – Representação das conexões entre driver e motor de passo.



O controle dos motores de passo é realizado através de um sinal de clock com frequência variável, que define a velocidade de rotação. Cada pulso corresponde a um incremento angular do rotor, conforme o número de passos por rotação especificado pelo motor. Para gerar esse sinal, o periférico LED Control (LEDC) da ESP32, originalmente projetado para controle de iluminação, é utilizado para configurar a Modulação por Largura de Pulso (PWM). Essa funcionalidade permite o ajuste fino de frequências e ciclos de trabalho (*Duty Cycle*), possibilitando controle preciso da velocidade e do movimento do motor.

Para o projeto, utilizou-se o motor NEMA 34 com torque de $130 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$. Esse motor possui quatro conjuntos de bobinas, permitindo conexões em série ou paralelo. Neste caso, optou-se por uma ligação em paralelo para maximizar o torque, embora isso tenha reduzido a velocidade final do motor. Essa escolha foi alinhada à proposta inicial do projeto, utilizando um motor mais econômico que atendesse os requisitos de torque.

O driver de controle utilizado foi o modelo DM556, que suporta correntes de até 5,6 A e tensões de alimentação entre 20 e 50 V, esse driver interpreta sinais de bordas de subida, sendo assim, para o sinal de clock que regula a velocidade, o ciclo de trabalho é configurado em 50% durante o movimento e 0% quando o motor está parado. Além disso, Foi empregada uma fonte chaveada de 48 V e 10 A para alimentar o sistema elétrico dos protótipos.

2.5.2 Comunicação

A comunicação entre as diferentes placas foi inicialmente realizada utilizando o protocolo ESP-NOW, uma solução sem fio que permite a comunicação direta entre múltiplos dispositivos ESP32 sem a necessidade de uma rede Wi-Fi. Para estabelecer a comunicação, é necessário conhecer o endereço *Media Access Control* (MAC) de cada ESP32 envolvido, a fim de direcionar corretamente as mensagens para o dispositivo específico. Isso implica na necessidade de uma configuração individual para cada ESP32, o que, embora seja uma solução simples e rápida, pode tornar-se trabalhoso dificultando em cenários que exigem integração com dispositivos diferentes ou quando há necessidade de alterar os dispositivos de comunicação. Além disso, em comparação com outros protocolos como Wi-Fi e Bluetooth, o ESP-NOW é mais adequado para transmissões de longa distância com volume reduzido de dados (ERIDANI; ROCHIM; CESARA, 2021). Ademais, em testes realizados foi verificado uma maior dificuldade de sincronizar os movimentos e muitas falhas de sinais.

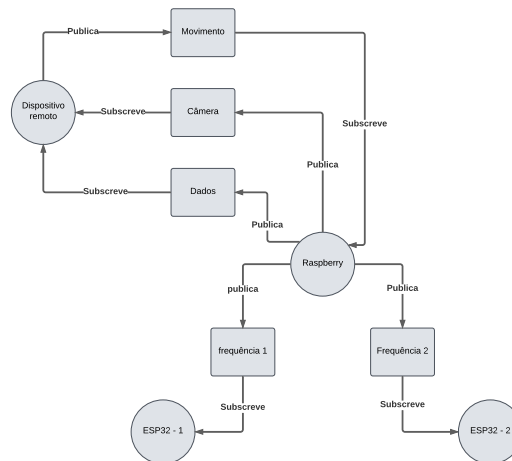
Outra abordagem para a troca de dados foi a utilização do ROS, que facilita a integração entre diferentes dispositivos, permitindo uma troca de dados mais flexível e escalável. No sistema proposto, a comunicação é estruturada em torno de três nós: o dispositivo remoto, que pode ou não estar conectado, o dispositivo central (neste caso, a Raspberry Pi), e o dispositivo dos motores, que depende da quantidade de motores a serem controlados.

O Micro-ROS surge como uma solução crucial para integrar microcontroladores ao ecossistema do ROS, considerando as limitações típicas desses dispositivos em termos de capacidade computacional, memória e energia. Diferente da versão tradicional do ROS, que exige plataformas de maior desempenho, o Micro-ROS é projetado para funcionar em sistemas embarcados com recursos restritos, oferecendo uma implementação mais leve e eficiente. A principal inovação do Micro-ROS é a sua capacidade de permitir que

microcontroladores publiquem e subscrevam tópicos ROS, o que amplia a comunicação e interação entre componentes de sistemas robóticos distribuídos.

Esses microcontroladores, ao utilizarem o Micro-ROS, podem se conectar a um computador por meio de interfaces como USB ou redes Wi-Fi, facilitando a comunicação em tempo real e a troca de dados entre dispositivos com diferentes níveis de recursos. Ao analisar viabilidade do uso do micro-ROS em diferentes microcontroladores, incluindo o ESP32, destaca sua flexibilidade e portabilidade em sistemas baseados em ROS2 (ERIDANI; ROCHIM; CESARA, 2021). No caso do ESP32, a comunicação foi realizada via Wi-Fi, explorando sua camada de transporte nativa e conectando-se diretamente ao micro-ROS Agent para publicar e assinar mensagens. Os testes evidenciaram variações de latência entre as plataformas devido às diferentes camadas de transporte utilizadas (UART, USB e Wi-Fi), com o ESP32 apresentando desempenho consistente dentro das limitações das ferramentas de análise disponíveis. Apesar de desafios na medição precisa dos atrasos de transmissão e recepção, o uso do ESP32 demonstrou o potencial do micro-ROS para integrar microcontroladores em sistemas robóticos, contribuindo para modularidade e redução de custos.

Figura 32 – Fluxograma de movimento das comunicação por ROS.



Pode-se observar no fluxograma apresentado na Figura 32 que as ESP32 são os dispositivos responsáveis por comandar os motores. Elas recebem, da Raspberry, dispositivo central, os valores referentes à velocidade e direção que os motores devem operar e com isso produzem os sinais que chegam ao driver dos motores.

Além disso, a Raspberry publica os dados provenientes de sensores, como as medições de distância do sistema de localização baseado em UWB, dados da IMU e da câmera. Também é de responsabilidade da Raspberry o recebimento das informações de movimentação enviadas por um dispositivo remoto, como um controle conectado ao

sistema ROS, permitindo que um operador controle a operação do robô em solo.

2.5.3 Inicialização do sistema

Para garantir uma inicialização automatizada e eficiente do robô, é essencial que, ao ser ligado, o sistema execute automaticamente os scripts necessários para o seu funcionamento, sem a necessidade de intervenção manual. O `systemd` desempenha um papel fundamental nesse processo, pois é o principal gerenciador de inicialização e serviço em sistemas baseados no Linux, como o Ubuntu. Ao configurar o `systemd`, é possível criar unidades de serviço que garantem a execução dos scripts e a ativação dos processos essenciais no momento da inicialização do sistema operacional. Isso não só simplifica a gestão de tarefas automatizadas, mas também proporciona maior confiabilidade e consistência na execução de programas críticos para o robô. Além disso, o `systemd` oferece mecanismos para monitorar a saúde dos processos em execução, permitindo que falhas sejam detectadas e corrigidas automaticamente, caso necessário. Por meio dessa configuração, o robô pode iniciar de maneira autônoma e sem erros, executando todos os serviços essenciais para sua operação, como a comunicação entre os diferentes dispositivos e o controle dos motores, diretamente após o boot do sistema.

As extensões `.sh` e `.service` são essenciais para automatizar a inicialização do robô com o `systemd`. Os scripts `.sh` executam comandos no sistema, configurando dispositivos, parâmetros e programas necessários para o funcionamento do robô. Já os arquivos `.service`, que são unidades do `systemd`, definem como e quando esses scripts devem ser executados durante o processo de inicialização. Eles especificam o caminho do script, as dependências entre serviços e as opções de controle de falhas, garantindo uma inicialização ordenada e sem a necessidade de intervenção manual. Dessa forma, a utilização de `.sh` e `.service` proporciona uma gestão eficiente e autônoma dos processos essenciais para o robô.

2.5.4 Adicionais

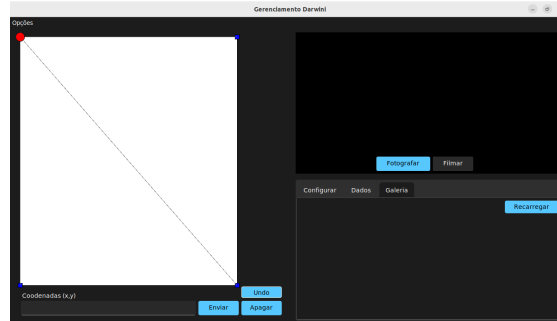
Recursos adicionais como fatores de aprimoramento que potencializam a robustez do sistema, melhoram a interação do usuário e mitigam riscos potenciais. Nesta seção, são abordados os aspectos e recursos complementares que, quando implementados, podem agregar valor ao sistema, aumentando sua confiabilidade e eficiência, e proporcionando uma solução mais segura e eficaz para os usuários.

2.5.4.1 Interface

Para garantir que o sistema tenha uma boa integração com o usuário é necessário ter ao menos uma interface com que ele possa observar e interagir. Pensando nisso, é criado primeiramente uma tela na qual é possível mostra uma previsão de posicionamento da máquina em relação ao prédio conforme os dados de posicionamento do robô (esquerda na

figura 33). O ponto vermelho se trata da posição real do robô embaixo é possível selecionar uma coordenada desejada para que o robô vá até esta posição.

Figura 33 – Interface do usuário.



Uma outra forma de monitorar é através de uma câmera posicionada no robô (posicionado do lado superior direito na Figura 33), assim será também possível tirar fotos e gravar vídeos de interesse. No lado inferior direito da Figura 33 uma aba de galeria que mostra os arquivos capturados além de ter uma aba para visualizar dados de sensores e mudar a configuração de exibição.

2.5.4.2 Botões

A presença de botões no robô desempenha um papel crucial tanto na operação cotidiana quanto em situações de emergência. No que diz respeito à movimentação, botões físicos permitem ao operador realizar comandos diretos e rápidos, como iniciar, interromper ou ajustar a trajetória do robô, oferecendo uma interface simples e eficiente para o controle em tempo real. Além disso, em cenários críticos, a inclusão de botões de emergência é fundamental para garantir a segurança do sistema e do ambiente ao redor. Esses botões permitem a parada imediata das operações do robô em situações de risco, prevenindo danos ao equipamento, a pessoas ou a outros sistemas. Assim, a integração de botões para controle e emergência é essencial para assegurar tanto a usabilidade quanto a segurança em robôs.

No desenvolvimento dos protótipos do robô, os botões foram implementados com botoeiras conectadas diretamente nos pinos de leitura digital ESP32. Por exemplo, no protótipo da Figura 7, cada conjunto de motor, fonte e drive possui dois botões que acionam o motor em sentidos diferentes permitindo também que no momento de instalação e passagem dos cabos tenha-se o controle dos motores de maneira fácil através dos botões.

2.5.4.3 Freio Magnético

O eixo de um motor de passo, quando não alimentado, tende a girar livremente, o que pode causar movimentos indesejados ou até mesmo resultar na queda do robô em

situações de falha de alimentação. Para evitar esse problema, foi desenvolvida uma solução baseada na propriedade de ímã permanente dos motores de passo, implementando um freio magnético.

Quando o eixo do motor gira, ocorre uma variação de fluxo magnético nas bobinas internas, induzindo uma tensão elétrica em seus terminais. Se as bobinas estiverem em circuito aberto, não haverá circulação de corrente nos enrolamentos. No entanto, ao curto-circuitar as bobinas, cria-se um caminho de baixa impedância que permite a circulação de uma corrente significativa induzida pela variação do fluxo magnético. Essa corrente, por sua vez, gera um campo magnético que se opõe à rotação do motor, funcionando efetivamente como um freio magnético.

Com base nesse princípio, foi projetado um circuito no protótipo utilizando relés. Nesse circuito, as bobinas do motor permanecem normalmente curto-circuitadas, garantindo que o eixo do motor fique travado mesmo na ausência de alimentação elétrica. Quando o sistema é energizado, os relés são ativados, conectando as bobinas ao driver do motor, permitindo sua operação normal, conforme descrito anteriormente.

3 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou o projeto de um robô controlado por cabos para a execução de serviços em fachadas de edifícios, oferecendo uma solução inovadora para um setor que tradicionalmente depende de métodos manuais e arriscados. A pesquisa explorou diferentes arquiteturas de robôs, culminando em uma configuração promissora que combina eficiência operacional, segurança e simplicidade de instalação. Ao integrar contrapesos e polias, a arquitetura proposta reduz o esforço do motor e otimiza o desempenho do sistema.

A trajetória do robô foi um dos desafios centrais, e as simulações realizadas demonstraram boa estabilidade, especialmente quando as mudanças de direção são suavizadas. Embora as simulações não tenham considerado distúrbios no sistema nem a elasticidade dos cabos, a lógica de controle permanece robusta, baseando nos erros entre a posição real e a desejada e os erros obtidos são considerados pequenos para padrões civis.

Também foi explorada a utilização do UWB para estimar o posicionamento, realizando o teste com diferentes métodos. Três métodos diferentes - Mínimos Quadrados (LS), Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) e Filtro de Kalman (KF)- foram testados, os três demonstraram bom desempenho na estimativa da posição do dispositivo móvel, com erros controlados em comparação com o sistema VICON. O destaque foi o KF, que apresentou o menor desvio padrão, evidenciando maior precisão e estabilidade. Em relação aos outros métodos, o WLS teve desempenho superior ao LS em altas velocidades, enquanto o LS mostrou leve vantagem em baixas velocidades.

Em relação aos sistemas de hardware e software para funcionamento do robô. Destaca-se a utilização do sistema ROS, possibilitando a integração entre a Raspberry Pi e o microcontrolador ESP32, além disso, devido sua flexibilidade é facilmente adaptável para futuras modificações e adição de equipamentos. A ESP32 se destacou pela estabilidade no controle do motor, com boa resposta e sem falhas. Também foram explorados sistemas de adaptação como utilização de botões, travamento magnético e interface de interação ao usuário.

Algumas limitações, como a elasticidade dos cabos e a necessidade de um sistema de localização robusto em ambientes reais, abrem caminho para futuras melhorias. Futuros trabalhos poderiam focar na integração completa dos sistemas, incluindo os equipamentos necessários para a execução do serviço na fachada e como ser adaptada para diferentes formatos de edifícios, bem como a análise das possíveis interferências no sistema.

REFERÊNCIAS

BONCI, A. *et al.* Robot operating system 2 (ros2)-based frameworks for increasing robot autonomy: A survey. **Applied Sciences**, v. 13, n. 23, 2023. ISSN 2076-3417. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/23/12796>.

DAIM, T.; LEE, R. M. A. A weighted least squares consideration for ir-uwband based device-free object positioning estimation for indoor environment. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 15, p. 894, 08 2019.

DOVER MOTION. **Microstepping An important variation on conventional stepping motor drives is that of microstepping**. 2020. Disponível em: <https://dovermotion.com/resources/motion-control-handbook/microstepping/>.

ERIDANI, D.; ROCHIM, A. F.; CESARA, F. N. Comparative performance study of esp-now, wi-fi, bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance. *In: 2021 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 322–328.

HENRY, J. Ranging and positioning with uwband. *In: _____*. [S.l.: s.n.], 2023. ISBN 978-1-83768-547-9.

KJÆRGAARD, M. B. *et al.* Indoor positioning using gps revisited. *In: FLORÉEN, P.; KRÜGER, A.; SPASOJEVIC, M. (ed.). Pervasive Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 38–56. ISBN 978-3-642-12654-3.

KOLAKOWSKI, M.; DJAJA-JOSKO, V. Tdoa-twr based positioning algorithm for uwband localization system. *In: .* [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.

LI, C. *et al.* Research on uwband indoor 3d positioning algorithm based on the least squares method. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2492, p. 012034, 05 2023.

MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. Comparative analysis and practical implementation of the esp32 microcontroller module for the internet of things. *In: 2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 143–148.

MASSA CINZENTA. **Balancim na construção civil: veja como usá-lo com segurança**. 2023. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/balancim-na-construcao-civil-veja-como-usa-lo-com-seguranca/>.

MILLS. **Operação de plataformas elevatórias em obras**. 2024. Disponível em: <https://www.tgservices.com.br/o-que-e-alpinismo-predial-e-para-que-serve/>.

TAHSIN, M. *et al.* Analysis of dop and its preciseness in gnss position estimation. *In: 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

TG SERVICES. **O que é alpinismo predial e para que serve?** 2022. Disponível em: <https://www.tgservices.com.br/o-que-e-alpinismo-predial-e-para-que-serve/>.

TOLEDO, R. **Saiba quais são os prédios mais altos da capital.** 2023. Disponível em: <https://expresso.estadao.com.br/sao-paulo/2023/05/04/saiba-quais-sao-os-predios-mais-altos-da-capital/>.

VENKATA, B.; SURESH, K.; RAMANA, P. **Indoor Tracking by Adding IMU and UWB using Unscented Kalman Filter.** 2021.

VOLPI, A. *et al.* Low-cost uwb based real-time locating system: Development, lab test, industrial implementation and economic assessment. **Sensors**, v. 23, n. 3, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/3/1124>.