

JAMIL DE ALMEIDA BALTAZAR

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ROBÓTICA COM SISTEMA DE
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA PARA APLICAÇÃO NA AGRICULTURA DE
PRECISÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: André Luiz de Freitas Coelho

Coorientadores:

Daniel Marçal de Queiroz
Domingos Sárvio Magalhães Valente
Flora Maria de Melo Villar

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B197d
2024
Baltazar, Jamil de Almeida, 1985-
Desenvolvimento de plataforma robótica com sistema de navegação autônoma para aplicação na agricultura de precisão / Jamil de Almeida Baltazar. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (58 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: André Luiz de Freitas Coelho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.

Referências bibliográficas: f. 44-46.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.235>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Agricultura de precisão. 2. Robótica. 3. Satélites artificiais em navegação. I. Coelho, André Luiz de Freitas, 1989-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.3


JAMIL DE ALMEIDA BALTAZAR

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ROBÓTICA COM SISTEMA DE
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA PARA APLICAÇÃO NA AGRICULTURA DE
PRECISÃO**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **JAMIL DE ALMEIDA BALTAZAR**
Data: 17/07/2024 11:33:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jamil de Almeida Baltazar
Autor

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO**
Data: 17/07/2024 15:26:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

André Luiz de Freitas Coelho
Orientador

*Dedico à minha filha Maya, esposa Rebeca,
pais Geraldo e Mileide e avó Maria.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha gratidão aos meus pais Geraldo (Didi) e Mileide, que sempre foram fontes inesgotáveis de amor, incentivo e sabedoria. Dedicção e apoio não faltaram ao longo desta jornada acadêmica e foram fundamentais para o meu sucesso. Sou profundamente grato por tudo que fizeram por mim.

À minha amada esposa Rebeca, minha companheira de vida e parceira nesta trajetória, agradeço por sua compreensão, paciência e constante estímulo. Seu apoio foi essencial para que eu pudesse me concentrar nos estudos e na pesquisa, e compartilhar este momento de conquista contigo é motivo de grande alegria.

À minha preciosa filha Maya, pelo carinho providencial nos momentos em que a exaustão se fazia sentir e a desmotivação tentava se instalar. Suas atitudes afetuosas foram como luzes que iluminaram os caminhos mais sombrios, tornando os desafios mais suportáveis e os dias mais amenos. Sou grato pela sua presença reconfortante ao longo dessa jornada.

À minha querida avó Maria (Vó Miló). Sua dedicação, cuidado, as preciosas leituras e histórias que compartilhou, bem como a educação que gentilmente me proporcionou, foram fundamentais para moldar quem sou desde a minha infância. Agradeço de coração por todo o amor e sabedoria que sempre dedicou a mim.

Aos amigos Carlos Henrique (Balta), Cláudio (Mano) e Juliano (Juju) que auxiliaram na montagem e desmontagem do experimento, agradeço sinceramente pela disposição, colaboração e amizade. Suas participações foram cruciais para o desenvolvimento e sucesso desta pesquisa, e guardarei sempre com carinho as lembranças dos momentos compartilhados durante esse processo.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela formação excepcional proporcionada. As disciplinas e cursos de alto nível fornecidos pelo programa são alicerces essenciais para o desenvolvimento das nossas pesquisas. Agradeço calorosamente aos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola pela constante troca de ideias, suporte mútuo, valiosas dicas e incentivos, que contribuíram significativamente para o avanço do nosso trabalho.

Não posso deixar de expressar minha sincera gratidão ao Professor Sárvio, meu ex-orientador e atual coorientador, por seus conselhos ponderados e orientações precisas. Agradeço também aos demais coorientadores, Professor Daniel e Professora Flora, pela disposição em discutir ideias e colaborar de maneira construtiva. Um reconhecimento especial para meu atual orientador, Professor André, cuja orientação e expertise foram cruciais para a concepção e desenvolvimento deste trabalho. Suas valiosas contribuições, aliadas à sua sabedoria e paciência ao longo da minha jornada acadêmica, foram fundamentais para o sucesso deste projeto.

Agradeço à Diretoria de Projetos e Obras e à Pró-Reitoria de Administração da UFV pelo constante estímulo à capacitação profissional e pelo reconhecimento dedicado aos seus servidores. A valorização dessas iniciativas é fundamental para o desenvolvimento e motivação da equipe, e estou grato por fazer parte de uma instituição que investe no crescimento e no reconhecimento de seus colaboradores.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À CAPES, pela bolsa de estudos, e à FAPEMIG, pelo recurso financeiro concedido ao projeto APQ-03052-17, que viabilizaram a execução desse trabalho, expresso minha profunda gratidão. Os investimentos no desenvolvimento da ciência e da educação é crucial para o avanço do conhecimento e o progresso da sociedade.

Neste momento de conquista, sinto-me privilegiado por contar com o apoio de tantas pessoas incríveis. Cada um de vocês contribuiu de maneira única para o sucesso deste trabalho, e por isso, meu sincero agradecimento. Esta conquista não é apenas minha, mas de todos nós que compartilhamos desta jornada acadêmica. Muito obrigado!

*“O Dedo que se Move escreve e, tendo escrito,
Se vai. E toda Argúcia e Piedade, entretanto,
Não o trarão de volta a mudar meia Linha,
Nem as Palavras podes apagar com Pranto.”*

(Omar Khayyam)

RESUMO

BALTAZAR, Jamil de Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Desenvolvimento de plataforma robótica de baixo custo com sistema de navegação autônoma para aplicação na agricultura de precisão.** Orientador: André Luiz de Freitas Coelho. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz, Domingos Sárvio Magalhães Valente e Flora Maria de Melo Villar.

A Agricultura de Precisão é caracterizada pela otimização do manejo e insumos agrícolas, utilizando sensores, programas de computador e máquinas agrícolas automatizadas. O desenvolvimento de robôs agrícolas autônomos, com tecnologias como Sistema Global de Navegação por Satélite com Cinemática em Tempo Real (GNSS-RTK), enfrenta desafios de custo e integração eficiente de Unidade de Medição Inercial (IMU) para precisão na navegação. A utilização de componentes de baixo custo possibilita fomentar a automação na agricultura de precisão e aumentar a lucratividade na produção agrícola. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma plataforma robótica de baixo custo com navegação autônoma. Para orientação e navegação utilizou-se módulos de GNSS-RTK e sensor de IMU. Desenvolveu-se um algoritmo de navegação baseado em cinemática de veículo diferencial, associado a um controlador Proporcional e Integral (PI) de direção, que, dada uma rota, seguia ponto alvo a ponto alvo até concluir o percurso. Foram avaliadas duas formas de desenvolvimento do mapa da rota planejada: a primeira distribuiu-se os pontos alvo apenas nos vértices da rota planejada, e a segunda os pontos alvo foram alocados a cada três metros. Foram coletados dados de erro lateral por meio do módulo GNSS-RTK e por uma webcam. Com os dados obtidos do GNSS-RTK avaliou-se o desempenho do algoritmo de controle da plataforma robótica em seguir uma rota pré-definida. Com os dados extraídos das imagens foi analisado o erro global do sistema, já que se conhecia a posição real do robô em relação à rota pré-definida. A principal métrica de desempenho avaliado foi o percentual da rota que a plataforma robótica percorreu além de uma faixa de 0,3 m para ambos os lados em relação à rota pré-definida, situação essa que ocorreria virtualmente uma colisão com uma planta de café. Obteve-se os seguintes resultados considerando o melhor e pior resultado dos diferentes ensaios: maior erro lateral: 0,233 m à 1,525 m, média do erro absoluto: 0,007 m à 0,224 m, desvio padrão: 0,019 m à 0,225 m erro quadrático médio:

0,043 m à 0,314 m. Mostrou-se viável a utilização de componentes de baixo custo no desenvolvimento de uma plataforma robótica. O algoritmo desenvolvido controlou o movimento da plataforma em uma plantação de café simulada, destacando-se na navegação retilínea, manobras e retorno ao ponto de origem. Ao comparar duas rotas diferentes, uma com pontos alvo nos vértices e outra a cada 3 metros, a segunda resultou em menores erros laterais. A escolha da estratégia de geração de rota revelou-se crucial para a precisão da navegação autônoma.

Palavras-chave: Robôs Agrícolas. GNSS-RTK. IMU. Componentes de Baixo Custo. Algoritmo de Navegação.

ABSTRACT

BALTAZAR, Jamil de Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Development of a low-cost robotic platform with autonomous navigation system for application in precision agriculture.** Adviser: André Luiz de Freitas Coelho. Co-advisers: Daniel Marçal de Queiroz, Domingos Sárvio Magalhães Valente and Flora Maria de Melo Villar.

Precision Agriculture is characterized by optimizing the management and agricultural inputs, using sensors, computer programs, and automated agricultural machinery. The development of autonomous agricultural robots, employing technologies like Global Navigation Satellite System with Real-Time Kinematics (GNSS-RTK), faces challenges of cost and efficient integration of Inertial Measurement Unit (IMU) for precise navigation. The use of low-cost components enables the promotion of automation in precision agriculture, thereby increasing profitability in agricultural production. The present work aimed to develop a low-cost robotic platform with autonomous navigation. For guidance and navigation, GNSS-RTK modules and an IMU sensor were utilized. A navigation algorithm based on differential vehicle kinematics was developed, associated with a Proportional and Integral (PI) steering controller, which, given a route, followed target point to target point until completing the route. Two ways of developing the map of the planned route were evaluated: the first distributed target points only at the vertices of the planned route, and the second the target points were allocated every three meters. Lateral error data were collected through the GNSS-RTK module and a webcam. Using the GNSS-RTK data, the performance of the robotic platform control algorithm in following a pre-defined route was assessed. Images data were analyzed to determine the overall system error, considering the known real position of the robot in relation to the predefined route. The primary performance metric evaluated was the percentage of the route that the robotic platform traversed beyond a 0.3 m range on both sides of the predefined route, a situation that would virtually result in a collision with a coffee plant. The following results were obtained considering the best and worst results of the different trials: maximum lateral error: 0.233 m to 1.525 m, average absolute error: 0.007 m to 0.224 m, standard deviation: 0.019 m to 0.225 m, mean square error: 0.043 m to 0.314 m. The use of low-cost components in the development of a robotic platform was proven to be viable. The

developed algorithm controlled the platform's movement in a simulated coffee plantation, excelling in straight-line navigation, maneuvers, and return to the starting point. When comparing two different routes, one with target points at the vertices and the other every 3 meters, the second had lower lateral errors. The choice of route generation strategy proved to be crucial for the accuracy of autonomous navigation.

Keywords: Agricultural Robots. GNSS-RTK. IMU. Low-Cost Components. Navigation Algorithm.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAL E MÉTODOS	16
Sistema mecânico, elétrico e eletrônico da plataforma robótica	16
Programa de computador da plataforma robótica	19
Cinemática da plataforma robótica.....	20
Controle da velocidade angular das rodas.....	21
Algoritmo de controle de direção.....	22
Avaliação de desempenho de navegação da plataforma robótica	26
Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir dos dados de posição coletados pelo GNSS-RTK	28
Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir de imagens da rota	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir dos dados de posição coletados pelo GNSS-RTK	33
Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir da posição da plataforma extraída das imagens da rota	38
Comparação entre as análises de desempenho pelos dados do GNSS-RTK e por imagem	40
4. CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE A - Gráficos de rota e erro lateral de todas as repetições	47
APÊNDICE B - Dados de erro lateral do presente trabalho e de outros autores.....	56

1. INTRODUÇÃO

FAO (2023) relatou que o número de pessoas que passam fome no mundo aumentou para 735 milhões em 2022, ou seja, 122 milhões a mais em relação a 2019. Esse aumento foi atribuído a uma combinação de fatores, incluindo a pandemia de COVID-19, conflitos, mudanças climáticas e crises econômicas. Além disso, segundo OECD-FAO (2023) há estimativa de crescimento mundial populacional de 7,9 bilhões de pessoas em 2022 para 8,6 bilhões de pessoas em 2032. Ambos os relatórios destacaram a Agricultura de Precisão (AP) como uma ferramenta importante para garantir a segurança alimentar da população mundial e manter a sustentabilidade da produção agrícola. As operações agrícolas, como preparo do solo, semeadura, aplicação de fertilizantes e corretivos e controle de pragas e doenças, podem estar utilizando mais recursos que o necessário, favorecendo o acúmulo de substâncias químicas tóxicas no solo, na água, nos alimentos e nos animais (LEVOIR *et al.*, 2020).

A AP é uma técnica adotada nos sistemas de produção agrícolas em que informações são utilizadas para um manejo otimizado das lavouras, com o uso de insumos na quantidade ideal, no local correto e no momento adequado (CISTERNAS *et al.*, 2020; PINI *et al.*, 2020). O objetivo de se adotar essa técnica é otimizar a lucratividade do agricultor, considerando a variabilidade espaço-temporal dos atributos que influenciam a produtividade e as incertezas desses sistemas (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010; PAUL *et al.*, 2019). A agricultura de precisão combina o uso de sensores, programas de computador e máquinas agrícolas com diversos níveis de automação. Os sensores são utilizados para monitorar as condições do solo, culturas e do clima (QUEIROZ *et al.*, 2020). Os programas de computador são utilizados para armazenar, processar, analisar e tomar decisões referente às operações agrícolas. Por fim, as máquinas agrícolas, com níveis de automação diversos, são utilizadas para realizar as operações considerando as tomadas de decisões (MOUSAZADEH, 2013). Assim, a AP permite o desenvolvimento sustentável da agricultura, com alimentos de qualidade, em quantidade suficiente para atender a demanda mundial, com uso racional de insumos e garantindo a proteção ambiental (RAHMADIAN; WIDYARTONO, 2020).

No contexto de uso de máquinas agrícolas automatizadas, o desenvolvimento de robôs autônomos agrícolas é um dos recentes avanços na AP,

buscando aumentar a qualidade e eficiência das operações agrícolas (KARUNATHILAKE *et al.*, 2023; LI, MING *et al.*, 2009). As tecnologias que estão sendo desenvolvidas incluem sistemas de navegação de alta precisão de posição, direção automática, autopropulsão e maior autonomia energética. Máquinas agrícolas com essas tecnologias embarcadas podem ser utilizadas na aplicação localizada de fertilizantes, plantio, monitoramento das condições do solo, monitoramento do crescimento da planta, e diversas outras operações típicas da AP (CISTERNAS *et al.*, 2020; SISHODIA; RAY; SINGH, 2020)

A precisão do posicionamento e da orientação do robô autônomo agrícola é de crucial importância para as operações que ele irá realizar (GENTILINI *et al.*, 2021; RAHMADIAN; WIDYARTONO, 2020). As tecnologias de posicionamento mais utilizadas em máquinas agrícolas são os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) (PINI *et al.*, 2020). Dentro do GNSS, o sistema RTK (*Real Time Kinematic* ou Posicionamento Cinemático em Tempo Real) é a tecnologia mais utilizada para o posicionamento de precisão (PINI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2021). O GNSS - RTK utiliza um segundo receptor, denominado *base*, instalado em um ponto com coordenadas conhecidas, que se comunica com o receptor utilizado para a localização, denominado *rover*. Os dados do receptor *base* são utilizados para corrigir os sinais do receptor *rover* e fornecer o posicionamento com precisão de nível submétrico (DOS SANTOS *et al.*, 2019; GAN-MOR; CLARK; UPCHURCH, 2007; NØRREMARK *et al.*, 2012).

Porém, os sistemas de posicionamento que utilizam GNSS-RTK têm limitações como o alto custo de implementação no ambiente agrícola e a eventual perda de comunicação dos módulos *base* e *rover* entre si e com os satélites do GNSS durante a operação em campo (DONG; HEINEMANN; KASPER, 2011). No Brasil, esse alto custo de implementação pode tornar inviável a utilização do GNSS-RTK em veículos autônomos agrícolas, principalmente aquelas que atenderiam agricultores com menor capacidade de investimento. A redução dos custos de aquisição é um passo fundamental no processo de desenvolvimento e disseminação da tecnologia de veículos autônomos em operações agrícolas. A utilização de componentes de baixo custo, como módulos GNSS-RTK, módulos de rádio frequência, placas de desenvolvimento Arduino, Beaglebone Black, Raspberry Pi e Jetson Nano, que apresentam valores de mercado abaixo daqueles dos sistemas tradicionais, deverão

permitir o desenvolvimento de tecnologias com custo acessível (BECHAR; VIGNEAULT, 2016; TAKASU; YASUDA, 2009).

Em relação ao problema de perda de comunicação do GNSS-RTK com os satélites, o Brasil, possui grande parte do território situado no equador geomagnético, ficando mais suscetível aos intensos efeitos da cintilação ionosférica, as quais, em situações críticas, pode provocar a perda do sinal de posicionamento (MENDES DA ROCHA *et al.*, 2017). Uma das formas de aumentar a confiança e robustez do sistema de posicionamento do veículo autônomo durante a operação em campo é a utilização do GNSS-RTK combinada com uma Unidade de Medida Inercial (IMU) (HSU *et al.*, 2022). A IMU utiliza acelerômetros triaxiais, giroscópios triaxiais e magnetômetros triaxiais, que medem aceleração translacional, aceleração rotacional e a direção do norte magnético do planeta, fornecendo também, por meio de cálculos, a posição relativa e a velocidade.

Sensores IMU de alta precisão do tipo FOG (*Fiber Optic Gyroscope*) tem custo de aquisição elevados. Uma opção de IMU com menor custo são os sensores do tipo MEMS (*microelectromechanical systems*). Os MEMS tiveram o custo e o tamanho reduzidos com o surgimento de novas tecnologias de integração de semicondutores, porém com a contrapartida da perda de precisão (LI, MING *et al.*, 2009; MOUSAZADEH, 2013). Um sensor IMU tipo MEMS pode custar a centésima parte de um sensor tipo FOG. O cálculo da posição relativa e da velocidade da plataforma por meio de IMU é um processo de soma integral que, com o passar do tempo, diverge rapidamente do valor real devido ao acúmulo de erros inerentes ao sensor inercial, principalmente naqueles do tipo MEMS (HSU *et al.*, 2022; LI, YONG; EFATMANESHNIK; DEMPSTER, 2012).

Os dados obtidos com o módulo GNSS podem auxiliar a IMU nas estimativas e compensação dos erros de forma a suprimir a divergência na navegação por IMU, assim como a assistência da IMU reduz a dependência da navegação do veículo ao GNSS em momentos de interferência ou ausência do sinal nos receptores (HSU *et al.*, 2022; LI, YONG; EFATMANESHNIK; DEMPSTER, 2012; MENDES DA ROCHA *et al.*, 2017). Como os sinais de satélite GNSS são vulneráveis a obstruções, o que resulta em erros de navegação de curto prazo, a integração de vários dados, por meio da fusão de sensores, é uma abordagem eficaz para garantir soluções de

navegação de alta precisão e confiabilidade. Veículos autônomos utilizados na agricultura têm utilizado orientação espacial automática por meio da integração de GNSS e IMU (HSU *et al.*, 2022; LI, YONG; EFATMANESHNIK; DEMPSTER, 2012; ZHANG *et al.*, 2021).

Um dos desafios do desenvolvimento de uma plataforma robótica é a obtenção de um algoritmo eficiente que realize a integração entre a IMU e o GNSS-RTK, beneficiando-se do sistema de navegação relativa da IMU e do desempenho do posicionamento absoluto do GNSS-RTK para fornecer dados de navegação precisos. O algoritmo deve ser capaz de utilizar os dados da IMU para complementar os dados de navegação do GNSS do veículo autônomo assim como deverá utilizar os dados do GNSS-RTK para corrigir o acúmulo de erros do IMU (HSU *et al.*, 2022). Outro desafio é a busca por soluções que reduzam os custos de construção e de operação de robôs agrícolas autônomos, um pré-requisito para que a tecnologia se torne acessível aos agricultores com menor capacidade de investimento. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma plataforma robótica de baixo custo com navegação autônoma para uso em agricultura de precisão, avaliar a eficiência do algoritmo de controle de direção e avaliar os erros globais da navegação em relação à rota planejada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil. O trabalho foi executado em três etapas. Na primeira o sistema mecânico da plataforma robótica foi confeccionado e o sistema elétrico e eletrônico montado. Na segunda etapa foi desenvolvido o programa de computador para obtenção da posição e orientação da plataforma robótica, controle de direção e controle da velocidade angular das rodas, necessário para a navegação autônoma sobre uma rota pré-estabelecida. Na terceira etapa avaliou-se o desempenho da navegação autônoma da plataforma robótica.

Sistema mecânico, elétrico e eletrônico da plataforma robótica

O sistema mecânico da plataforma foi confeccionado contendo um chassi metálico com largura de 1,2 m, comprimento de 0,7 m e vão livre 0,6 m (Figura 1). A tração desse chassi se deu por duas rodas, ambas instaladas na parte dianteira da plataforma, com pneus 0,5 x 0,045 m (diâmetro externo x largura da banda de rodagem), com transmissão por correntes e acionadas por 2 motores elétricos independentes, alimentados com 24 Vcc, velocidade angular máxima 5,759 rad/s e torque máximo de 35 N.m. A velocidade angular dos motores foi reduzida em uma razão de 1:3,714 utilizando um pinhão de 14 dentes com um coroa de 52 dentes. A parte traseira da plataforma foi sustentada por uma roda de giro livre de 0,06 m de diâmetro. O sistema elétrico e eletrônico da plataforma robótica foi alimentado por duas baterias de 12 V de 18 A.h cada, ligadas em série, formando um sistema de 24 V com 18 A.h de capacidade de energia. O conjunto de baterias foi conectado em um controlador de carga que por sua vez pode ser alimentado tanto por uma fonte AC/DC de 24 V externa quanto por um painel fotovoltaico, a depender da necessidade de autonomia energética da plataforma.

Os dois motores acoplados às rodas foram controlados de forma independente, utilizando módulos tipo ponte-H BTS7960 43A, que por sua vez foram conectados à duas placas de desenvolvimento Arduino UNO R3. No eixo de cada motor foi instalado um sensor *encoder* incremental com resolução de 100 pulsos por revolução em cada um dos dois canais, totalizando 400 mudanças de estado por revolução. Os sinais elétricos pulsados gerados pelos *encoder* foram lidos pelas

respectivas placas Arduino e utilizados para calcular a velocidade angular real dos motores.

Figura 1 - Sistema mecânico, elétrico e eletrônico da plataforma robótica desenvolvida.

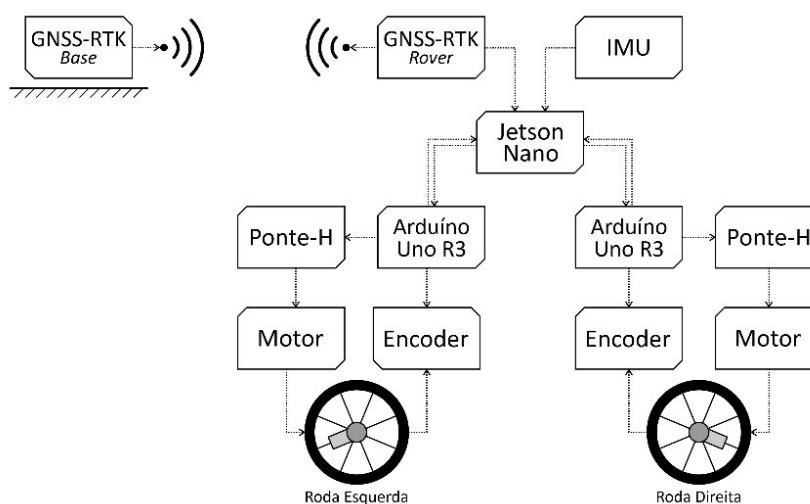


Fonte: Autor

As duas placas Arduino UNO R3 foram conectadas a um computador de placa única Nvidia Jetson Nano, com processador Quad-core ARM Cortex-A57 de 1.43 GHz, processador gráfico Maxwell™ com 128 núcleos e memória RAM 4 GB 64-bit LPDDR4. Esse computador, com sistema operacional Linux Ubuntu 18.04 LTS, foi responsável pelo processamento central de dados da plataforma robótica. Como Interface Homem-Máquina (IHM) para monitoramento e execução de comandos foi utilizado um monitor LCD de 19", um teclado e um mouse, todos conectados ao computador de placa única Nvidia Jetson Nano. Nesse computador estavam conectados, ainda, um módulo de GNSS-RTK EMLID modelo *Reach*, configurado como *rover*, e um sensor IMU modelo BNO055. Um segundo módulo GNSS-RTK EMLID modelo *Reach* foi configurado como *base*, sendo que a comunicação entre eles se deu por *WiFi* (Figura 2). A plataforma robótica foi configurada para utilizar dados do GNSS-RTK apenas nos dois modos de maior precisão: *fix* e *float*,

interrompendo seu movimento na ausência desses tipos de sinais. Em modo *fix*, os módulos de GNSS-RTK possuem uma estimativa de erro inferior a 5 cm, enquanto que no modo *float*, a estimativa de erro é de 1 m (ABDELHAFID *et al.*, 2022; VALENTE *et al.*, 2020).

Figura 2 - Sistema elétrico e eletrônico da plataforma robótica.



Fonte: Autor

Tabela 1. Componentes do sistema mecânico, elétrico e eletrônico, com suas quantidades, especificações e custos unitários.

Qtd.	Nome do Componente	Descrição	Custo unit. (US\$)	Custo total (US\$)
1	Nvidia Jetson Nano	Processador Quad-core ARM Cortex-A57 de 1.43 GHz, processador gráfico Maxwell™ com 128 núcleos e memória RAM 4 GB 64-bit LPDDR4	US\$ 179,00	US\$ 179,00
1	IMU Adafruit BNO 055	Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout - BNO055 - STEMMA QT / Qwiic	US\$ 29,95	US\$ 29,95
1	Roteador WiFi - AC1750	TP-Link AC1750 Smart WiFi Router (Archer A7) -Dual Band Gigabit Wireless Internet Router for Home	US\$ 55,62	US\$ 55,62
2	Módulo GNSS-RTK - EMLID Reach	Multi-band RTK GNSS module for precise navigation and UAV mapping	US\$ 890,00	US\$ 1.780,00
2	Encoder rotativo 100 pulsos	Taiss/AB 2 Phase Incremental Rotary Encoder 100P/R DC 5-24v Wide Voltage Power Supply 6mm Shaft 100P/R	US\$ 18,99	US\$ 37,98
2	Motor DC com redução	Motor DC, 24 V, 35 N.m, 55 RPM	US\$ 69,99	US\$ 139,98

2	Rodas e Pneus	2 Pc 20" Flat Free Tires PU Non-inflated Tire Wheels, 20x1,75 Inch Tire with 3/4 Ball Bearing, 2.44" Centered Hub for Wheelbarrow, Carts, Garden Trailers	US\$ 61,99	US\$ 123,98
1	Roda de giro livre 2"	2 inch Swivel Caster Wheels Without Brake and No Noise Wheels, Heavy Duty Casters Total Capacity 600lbs	US\$ 4,00	US\$ 4,00
2	Bateria 12 V - 20 Ah	Sealed Lead Acid (SLA) Battery 12V 20AH Rechargeable	US\$ 43,50	US\$ 87,00
2	Arduíno UNO R3	Arduino Uno R3 Board Original - Microcontroller Atmega 328P	US\$ 27,60	US\$ 55,20
1	Webcam	Webcam Lenovo 300 FHD com resolução 1920 x 1080 pixel e ângulo de visão 95°	US\$ 34,90	US\$ 34,90
1	Chassi metálico	-	US\$ 100,00	US\$ 100,00
1	Outros	Itens variados: cabos, parafusos, correntes, pinhão, coroa, etc.	US\$ 65,10	US\$ 65,10
Total				US\$ 2.692,71

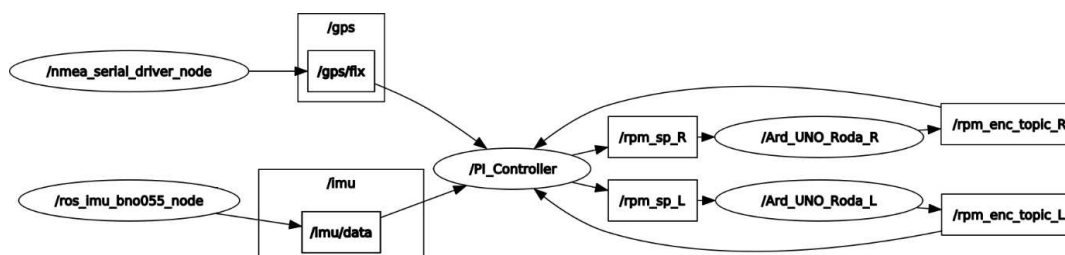
* Preços obtidos em 20 de janeiro de 2024.

Programa de computador da plataforma robótica

O programa de computador embarcado na plataforma robótica foi desenvolvido utilizando o *framework* ROS (*Robotic Operation System*), em sua versão *Melodic*. O núcleo do ROS foi executado na Nvidia Jetson Nano, que por sua vez comunicou com duas placas Arduino UNO R3, programadas na plataforma *Arduíno IDE* com a biblioteca *rosserial*, com o módulo de GNSS-RTK *Rover* e com o sensor IMU. O programa de computador, com base no ROS, foi organizado em nós, tópicos e serviços. Cada placa Arduino UNO R3 (`/Ard_UNO_RODA_R` e `/Ard_UNO_RODA_L`), o módulo *rover* do GNSS-RTK (`/nmea_serial_driver_node`), o sensor IMU (`/ros_imu_bno055_node`) e a Jetson Nano (`/PI_Controller`), foram definidos como nós. O nó `/nmea_serial_driver_node` publicava a posição da plataforma robótica, em coordenada UTM e datum WGS 84 no tópico `/gps/fix`. O nó `/ros_imu_bno055_node` publicava a orientação da plataforma com origem no ponto cardeal Leste no tópico `/imu/data`. Os nós `/Ard_UNO_RODA_R` e `/Ard_UNO_RODA_L` assinavam as velocidades demandadas em cada roda nos tópicos `/rpm_sp_R` e `/rpm_sp_L` e publicavam as velocidades angulares das rodas nos respectivos tópicos `/rpm_enc_topic_R` e `/rpm_enc_topic_L`. Por sua vez, o nó `/PI_Controller` assinava os tópicos `/gps/fix`, `/imu/data`, `/rpm_enc_topic_R` e `/rpm_enc_topic_L` e utilizava os dados recebidos para calcular as velocidades angulares necessária em cada roda para se

chegar ao ponto alvo, e em seguida publicava esses dados das velocidades demandadas nos tópicos `/rpm_sp_R` e `/rpm_sp_L` (Figura 3).

Figura 3 - Organização dos nós e tópicos para o programa desenvolvido para a plataforma robótica usando o framework ROS.



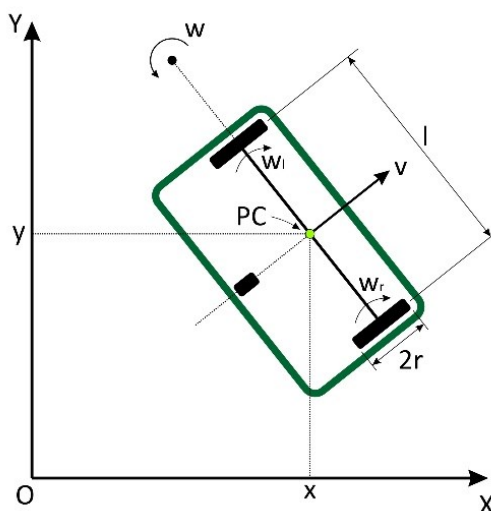
Elipses representam os nós, retângulos representam os tópicos e setas representam o fluxo de informações: a informação pode sair de um nó (publicador) e ser publicada em um tópico, assim como a informação pode sair de um tópico e ser recebida por um nó (assinante).

Fonte: Autor

Cinemática da plataforma robótica

A plataforma robótica desenvolvida foi do tipo diferencial, cujo movimento tem como base o acionamento independente de suas duas rodas (Figura 4). O deslocamento de rotação e translação do chassi foi executado variando a velocidade angular das rodas. Esse tipo de robô tem a característica de ser de fácil programação e altamente controlável.

Figura 4 - Cinemática de plataforma robótica tipo diferencial.



x e y é a posição cartesiana, v é velocidade linear de deslocamento, w_l e w_r são as velocidades angulares das rodas esquerda e direita respectivamente, r é o raio da roda, l é a distância entre rodas,

w é a velocidade angular de giro da plataforma robótica e PC é o ponto de controle da plataforma robótica, localizado no ponto médio do eixo virtual que liga o centro das duas rodas.

Fonte: Autor

Para se deslocar ao ponto alvo, o programa de computador da plataforma robótica demandou conhecer a velocidade linear de deslocamento e a velocidade angular de giro. A velocidade linear de deslocamento foi definida como fixa em 0,28 m/s. A velocidade angular de giro foi calculada pelo próprio programa de computador, sendo os detalhes apresentados em *Algoritmo de Controle de Direção*. Com ambos os dados, calculou-se a velocidade angular da roda esquerda e da roda direita que satisfazem as velocidades linear e angular requeridas, conforme Equações (1) e (2), respectivamente, para o ponto de controle localizado no ponto médio do eixo virtual que liga o centro das duas rodas.

$$w_l = \frac{v - w \cdot \frac{l}{2}}{r} \quad (1)$$

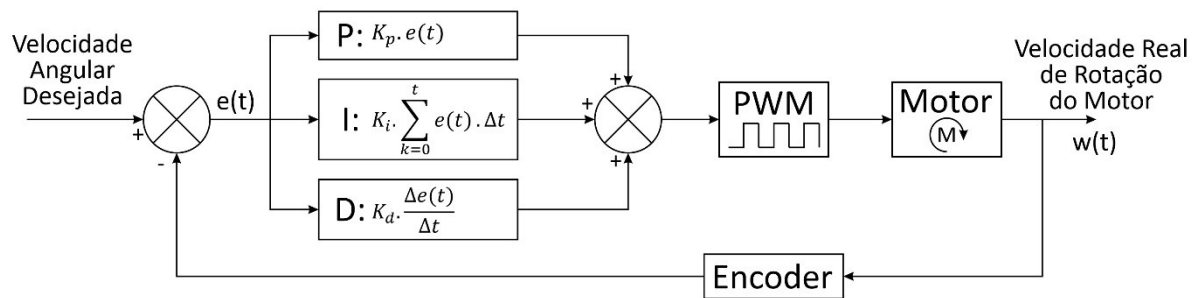
$$w_r = \frac{v + w \cdot \frac{l}{2}}{r} \quad (2)$$

em que w_l e w_r são as velocidades angulares das rodas esquerda e direita, respectivamente, em rad/s, v é a velocidade linear da plataforma robótica ($v = 0,28$ m/s), w é a velocidade angular de giro da plataforma, em rad/s, l é a distância entre rodas ($l = 1,05$ m) e r é o raio da roda ($r = 0,2454$ m).

Controle da velocidade angular das rodas

Para o deslocamento da plataforma robótica até o ponto de destino, foi necessário controlar as velocidades angulares das rodas de forma eficiente, à medida que o algoritmo de controle de direção calculava tais velocidades. Para isso, no programa de computador executado na placa Arduino UNO R3, foi implementado um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) (Figura 5). O controlador PID atuou sobre o motor elétrico variando sua tensão média de alimentação utilizando PWM (*pulse-width modulation*), ocasionando a alteração na velocidade angular.

Figura 5 - Controlador PID da velocidade angular das rodas esquerda e direita da plataforma robótica.



Fonte: Autor

$$v(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \sum_{k=0}^t e(t) \cdot \Delta t + K_d \cdot \frac{\Delta e(t)}{\Delta t} \quad (3)$$

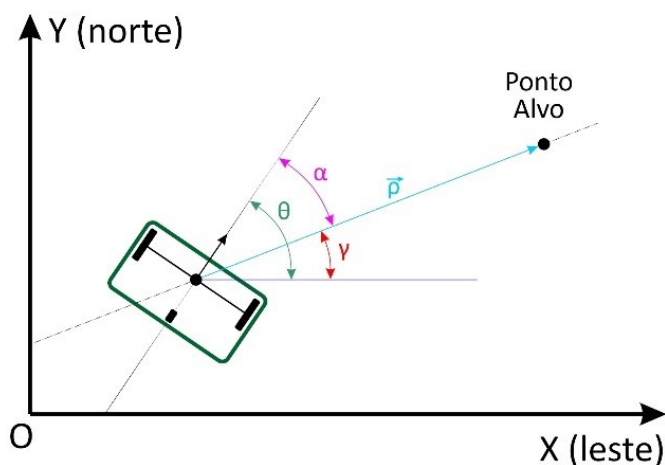
em que $w(t)$ é a velocidade angular real na saída da função PID, $e(t)$ é o erro entre a velocidade angular real e desejada, $\Delta e(t)$ é a variação do erro no intervalo de amostragem, Δt é o tempo de amostragem do sistema e K_p , K_i e K_d são os ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador PID, respectivamente.

Inicialmente, os parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador PID foram obtidos pelo método de Ziegler-Nichols. Por tentativa e erro, fez-se o ajuste fino dos parâmetros. Os valores 10, 20 e 0,1 obtidos para K_p , K_i e K_d , respectivamente, foram aplicados nos controladores de ambas as rodas.

Algoritmo de controle de direção

A rota a ser executada pela plataforma robótica, partindo da sua posição inicial, foi definida a partir de conjunto de pontos georreferenciados utilizando coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) e datum WGS84. A referência de orientação da plataforma robótica foi no sentido positivo do eixo x, equivalente ao ponto cardinal Leste. A posição absoluta (coordenada x e y, Figura 4) foi obtida por meio do módulo GNSS-RTK. Já a orientação absoluta (ângulo θ , Figura 6) foi obtida pela IMU. Para completar a rota estabelecida, a plataforma robótica precisou executar combinação de movimentos de rotação e translação de forma a alcançar todos os pontos destinos contidos no mapa de rota (Figura 6).

Figura 6: Parâmetros utilizados no controle de direção polar da plataforma robótica para alcance do ponto desejado (ponto alvo).

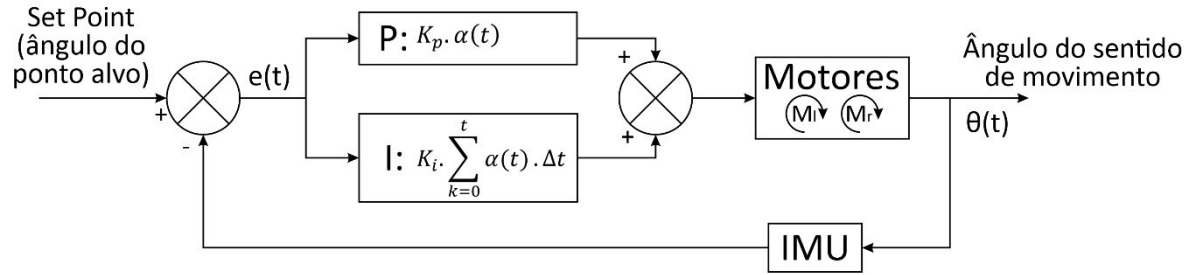


\vec{p} é o vetor que liga a localização atual ao ponto alvo, $|\vec{p}|$ é a distância entre a localização atual e o ponto alvo (m), γ é o ângulo do vetor \vec{p} em relação ao eixo X (leste), θ é o ângulo da direção de deslocamento do robô em relação ao eixo X (leste) e $\alpha = \gamma - \theta$, que é o erro de orientação ao ponto alvo.

Fonte: Autor

Para o controle de direção da plataforma robótica foi utilizado um controlador PI (Proporcional e Integral), que atuou minimizando o erro do ângulo α (Figura 7). Para se obter os parâmetros K_p e K_i do controlador PI, foi desenvolvido um modelo virtual da plataforma robótica, usando o programa de computador MATLAB da MathWorks®, e com os dados obtidos na simulação foi aplicado o método de Ziegler-Nichols (HERNANDA; ROSA; FUADI, 2022). A partir de então, foi utilizado tentativa e erro para uma sintonia fina dos parâmetros. Os valores 0,9 e 0,01 obtidos para K_p e K_i , respectivamente, foram aplicados no controlador de direção. Sempre que ocorria mudança do ponto alvo ou qualquer perturbação na orientação da plataforma robótica, o controle de direção atuava para aproximar α de zero, permitindo que a plataforma robótica se deslocasse em linha reta em direção ao próximo ponto alvo.

Figura 7 - Controlador PI para controle da direção da plataforma robótica.



Fonte: Autor

$$\theta(t) = K_p \cdot \alpha(t) + K_i \cdot \sum_{k=0}^t \alpha(t) \cdot \Delta t \quad (4)$$

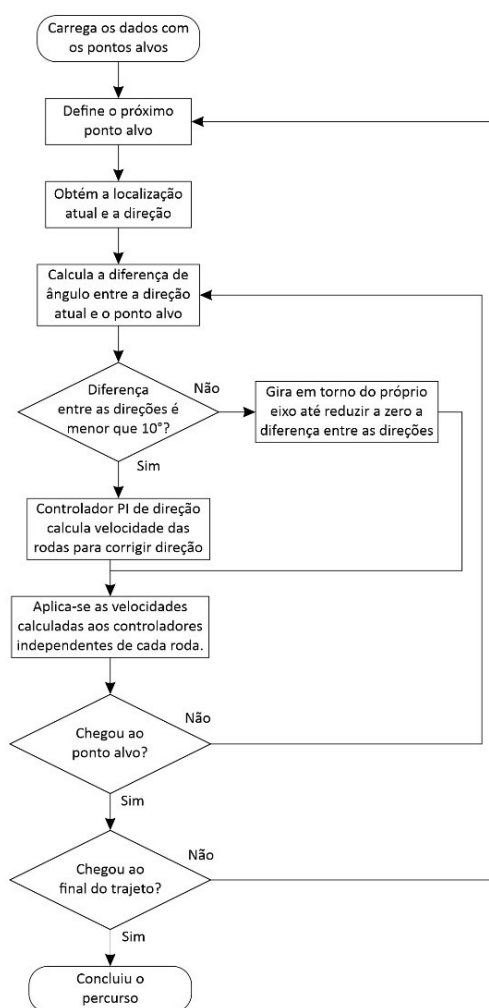
em que $\theta(t)$ é o ângulo do sentido de movimento na saída da função PI, $\alpha(t)$ é o erro entre o ângulo do ponto alvo, o ângulo do sentido de movimento e Δt é o tempo de amostragem do sistema e K_p e K_i são os ganhos proporcional e integral do controlador PI, respectivamente.

O ângulo θ (Figura 6) foi fornecido pela IMU, inicialmente calibrado com o seu ângulo zero voltado para leste. Em testes preliminares, observou-se que a IMU de baixo custo não mantinha tal calibração durante a execução da rota planejada. Um algoritmo desenvolvido foi responsável pela fraca integração GNSS/IMU, utilizando essa integração apenas para realizar uma recalibração contínua da IMU com informações vindas do módulo GNSS-RTK. A lógica desse algoritmo foi: se a plataforma movimentou em linha reta por 1 metro e se está a mais de 1 metro do ponto alvo, então utiliza posição atual e a posição obtida há 1 metros atrás (obtidos com o GNSS-RTK) para cálculo do ângulo de orientação da plataforma θ e executa a correção do ângulo θ fornecido pela IMU

Outro algoritmo de controle foi implementado com objetivo de minimizar eventuais oscilações bruscas na resposta do controlador PI, como aquelas que aconteceriam em mudanças de direção da plataforma robótica durante a execução da rota planejada. Nesse algoritmo a lógica implementada foi de que se α for maior do que 10° ou menor que -10° , a plataforma robótica girava em torno de seu próprio eixo até aproximar α de zero. Nessa situação, uma das rodas gira em um sentido e a outra em sentido contrário com mesma velocidade angular, resultando em velocidade de

deslocamento nula. Na condição de pequenos ângulos de giro o controlador PI atuou, possibilitando a plataforma robótica realizar deslocamentos retilíneos ou com curvatura suave. Nessa condição em que o controlador PI não estava agindo, a velocidade angular das rodas era pré-definida no programa de computador, e solicitada ao controlador PID das rodas. Já quando o controlador PI atuava, era calculado valores de velocidade angular da plataforma robótica utilizando as Equações (1) e (2). Por fim, considerou-se que a plataforma robótica chegava ao ponto alvo quando \vec{p} (Figura 6) era menor que 0,5 m. Ao passar por todos os pontos alvo estabelecidos na rota planejada, foi implementado no programa de computador que a plataforma deveria retornar para o ponto de partida (fluxograma do programa de computador na Figura 8)

Figura 8 - Fluxograma do programa de computador desenvolvido para a plataforma robótica.



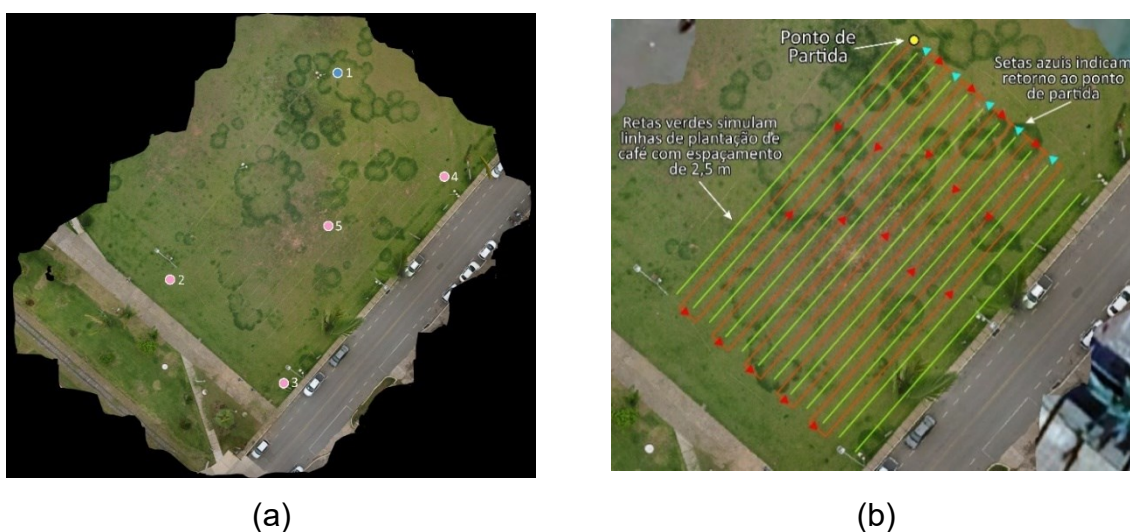
Fonte: Autor.

Avaliação de desempenho de navegação da plataforma robótica

Para a avaliação de desempenho de navegação da plataforma robótica em uma rota pré-definida, foi necessário, inicialmente, confeccionar o mapa da rota. Um mapa de rota nada mais é do que uma sequência de pontos alvo a serem percorridos, livre de colisões, em que o programa de computador com os algoritmos descritos opera em *loop* navegando de ponto a ponto (HERNANDA; ROSA; FUADI, 2022).

Utilizou-se uma área plana retangular, com aproximadamente 1600 m², contendo grama batatais (*Paspalum notatum*). Fitas de sinalização zebraada foram fixadas no solo, simulando 12 linhas de uma lavoura de café com espaçamento entre linhas de 2,5 m e 40 m de comprimento cada. Dos 11 espaçamentos formados entre as linhas, utilizou-se 10. O mapeamento da área foi feito utilizando 92 fotos aéreas tiradas por um Drone Mavic Air 2 a 20 m de altitude em relação ao solo. A partir dessas fotos aéreas montou-se uma foto ortomosaico do local. Para o georreferenciamento da foto foram coletados 5 pontos geográficos dentro da área de testes utilizando o módulo de GNSS-RTK da plataforma robótica (Figura 9.a). O ponto 1 (marcação azul) foi feito sem o módulo *base* do GNSS-RTK por ausência de ponto de referência. A coordenada do ponto 1 foi obtida após 30 minutos de média à taxa de 5 Hz de aquisição de dados. Os pontos 2 a 5 já foram obtidos utilizando o módulo *base* juntamente com o módulo *rover* com média de 10 minutos em modo *fix* (maior precisão) à taxa de 5 Hz. Durante a execução dos testes com a plataforma robótica, a módulo GNSS-RTK *base* foi mantido no ponto 1. A partir da foto ortomosaico, o programa QGIS 3.32.2 foi utilizado para traçar a rota a ser percorrida pela plataforma robótica (Figura 9.b).

Figura 9 - Área utilizada na avaliação de desempenho de navegação da plataforma robótica. (a) ortomosaico, (b) rota utilizada.



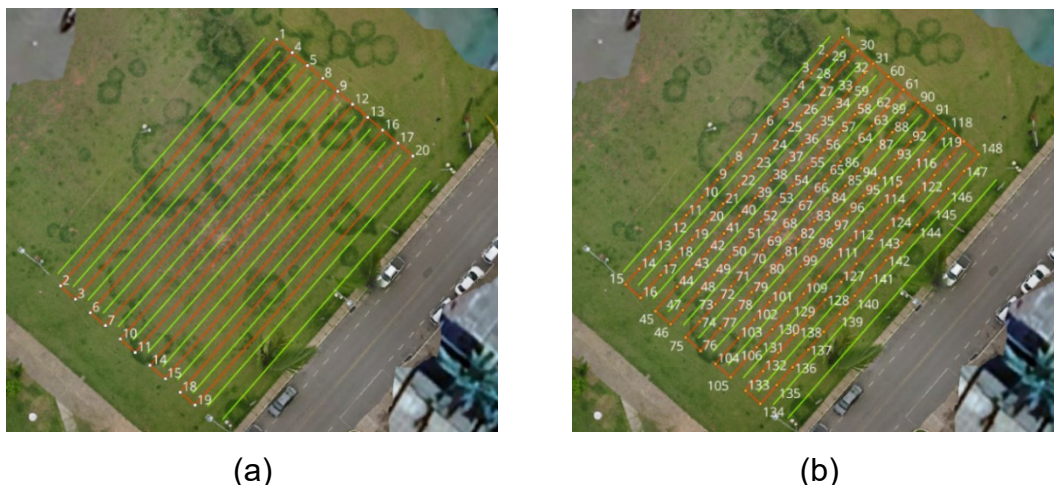
Fonte: Autor

A avaliação de desempenho de navegação foi realizada considerando duas formas de alocação dos pontos alvo que definem a rota a ser executada. Na primeira, a ser denominada “Teste 1”, utilizou-se como pontos alvo apenas os pontos localizados nos vértices da rota, totalizando 21 pontos (Figura 10.a). Na segunda, denominada “Teste 2”, os pontos alvo foram distribuídos a cada 3 metros ao longo das linhas da rota planejada, totalizando 149 pontos (Figura 10.b). A plataforma robótica executou cada uma das rotas 9 vezes, totalizando 18 repetições.

Tabela 2. Data e horário da execução de cada tipo de rota desenvolvida pela plataforma robótica.

Ordem de Execução	ID	Instante da Execução	Tipo de Rota
1ª	1	09/11/2023 12:28:04	3 m
2ª	2	09/11/2023 12:52:45	3 m
3ª	3	09/11/2023 13:50:16	3 m
4ª	1	09/11/2023 21:12:57	Vert.
5ª	2	10/11/2023 09:56:00	Vert.
6ª	3	10/11/2023 10:34:23	Vert.
7ª	4	10/11/2023 11:18:39	3 m
8ª	5	10/11/2023 13:14:44	3 m
9ª	6	10/11/2023 14:43:37	3 m
10ª	4	10/11/2023 16:02:07	Vert.
11ª	5	10/11/2023 17:30:36	Vert.
12ª	6	10/11/2023 18:10:41	Vert.
13ª	7	10/11/2023 19:41:19	3m
14ª	8	11/11/2023 11:13:55	3m
15ª	9	11/11/2023 11:59:06	3m
16ª	7	11/11/2023 12:35:51	Vert.
17ª	8	11/11/2023 13:12:07	Vert.
18ª	9	11/11/2023 13:49:56	Vert.

Figura 10. Rota utilizada para avaliação de desempenho da plataforma. (a) pontos alvo alocados nos vértices da rota (Teste 1). (b) pontos alvo alocados ao longo das linhas da rota a cada 3 m (Teste 2).



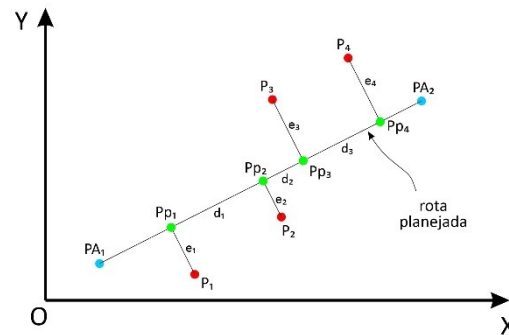
Fonte: Autor

Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir dos dados de posição coletados pelo GNSS-RTK

No programa de computador da plataforma robótica foi implementado um armazenador das diversas variáveis utilizados no algoritmo de controle de direção. Dados de posição atual, orientação atual, coordenadas do ponto alvo atual, distância e ângulo do ponto alvo atual, velocidade angular demandada em cada roda e velocidade angular real das rodas esquerda e direita, foram gravados, na forma de linha, em arquivo de texto em formato CSV (*comma-separated values*), a cada mudança da posição atual da plataforma (aproximadamente 1 dado a cada 0,2 s ou 5 Hz).

A avaliação de desempenho de navegação consistiu no cálculo e análise do desvio lateral (a ser denominado erro lateral) da plataforma robótica em relação ao segmento da rota planejada. Para isso, seguindo o exemplo da Figura 11, calculou-se a equação da reta do segmento da rota $PA_1 - PA_2$. Para cada ponto P_i percorrido, calculou-se a equação da reta perpendicular à reta $PA_1 - PA_2$ que também passa pelo Ponto P_i . Com as duas equações da reta, encontrou-se o ponto de interseção P_{pi} , que é a projeção do ponto percorrido P_i na reta ortogonal $PA_1 - PA_2$. O erro lateral e_i correspondeu à distância entre P_i e P_{pi} .

Figura 11 - Cálculo do erro lateral da plataforma robótica em relação à linha da rota planejada.



PA_1 é o último ponto alvo que foi atingido; PA_2 é o próximo ponto alvo que está sendo seguido; P_1 , P_2 , P_3 e P_4 são pontos percorridos pela plataforma robótica; Pp_1 , Pp_2 , Pp_3 e Pp_4 são as respectivas projeções dos pontos P_1 , P_2 , P_3 e P_4 na rota planejada formada pela reta PA_1 - PA_2 ; d_1 , d_2 e d_3 são as respectivas distâncias entre Pp_1 e Pp_2 , Pp_2 e Pp_3 e Pp_3 e Pp_4 ; e e_1 , e_2 , e_3 e e_4 é o erro lateral, que é a distância entre o ponto percorridos e sua projeção na rota planejada.

Fonte: Autor

Para cada uma das 18 rotas executadas (9 para Teste 1 e 9 para Teste 2), foi calculado o erro lateral para todas as linhas de dados contidos no arquivo gerado pelo programa de computador para aquela rota. A partir do conjunto de erros laterais para uma rota desenvolvida, calculou-se a média do erro absoluto (MAE) (Equação 5), o desvio padrão (DP) do erro (Equação 6) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 7). Apesar do intervalo de tempo de amostragem da posição da plataforma robótica ser homogêneo, a distância entre os pontos de amostragem não é. Sendo assim, para se calcular as métricas de erro, considerou-se a média ponderada, sendo que os pesos foram as distâncias entre os pontos da projeção do ponto percorrido na reta da rota planejada.

$$MAE = \frac{\sum_{n=1}^N |e_n| \cdot d_n}{\sum_{n=1}^N d_n} \quad (5)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (e_n - \bar{e})^2 \cdot d_n}{\sum_{n=1}^N d_n}} \quad (6)$$

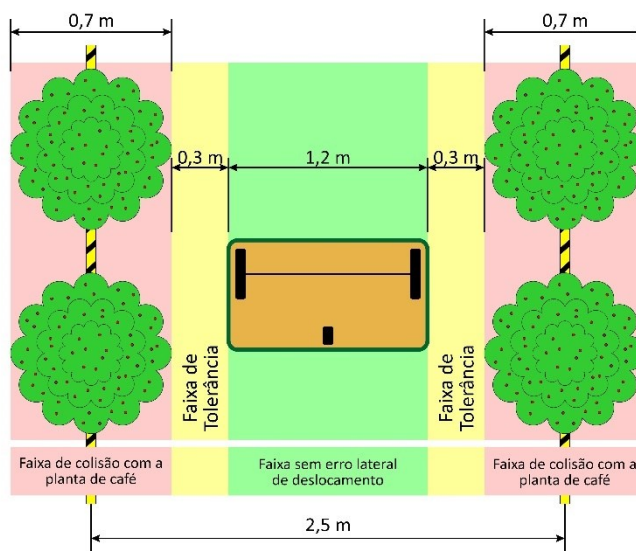
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N e_n^2 \cdot d_n}{\sum_{n=1}^N d_n}} \quad (7)$$

em que N é o número total de pontos percorridos, e_n é o erro lateral, ou seja, distância ortogonal entre o ponto percorrido e a reta da rota, d_n é a distância entre a projeção

do ponto percorrido atual na reta da rota e seu equivalente anterior, \bar{e} é a média ponderada dos erros laterais.

Mediu-se, ainda, o percentual da rota percorrida que a plataforma robótica colidiria com as plantas de café. O espaçamento entre linhas considerado foi 2,5 m e a plataforma com largura 1,2 m. Considerando que a planta tem diâmetro de dossel 0,7 m, existiria uma tolerância de deslocamento lateral de 0,3 m para cada um dos lados. Situações em que o erro lateral superou essa tolerância significariam uma possível colisão (Figura 12).

Figura 12 - Demonstração da área de colisão da plataforma robótica com a planta de café.



Fonte: Autor

Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir de imagens da rota

A análise de desempenho de navegação a partir dos dados de posição, obtidos pelo GNSS-RTK, permitiu avaliar, exclusivamente, o desempenho do algoritmo de navegação e controle de direção da plataforma robótica durante a execução de uma rota pré-determinada. A fim de realizar a análise de desempenho considerando, além do algoritmo, a influência do erro do GNSS-RTK na determinação da posição e orientação da plataforma robótica, uma segunda análise de desempenho foi realizada utilizando imagens capturadas durante a execução da rota. Para isso uma *webcam*, Lenovo 300 FHD com resolução 1920 x 1080 pixel e ângulo de visão 95°, foi

acoplada na plataforma robótica de forma a capturar imagens ortogonais ao solo. Para simplificação, uma imagem foi coletada a cada 20 dados de posição obtidos pelo GNSS-RTK, resultando em intervalos de aquisição de aproximadamente 4,0 s (0,25 Hz). Um programa de computador em linguagem Python, usando a biblioteca OpenCV, foi desenvolvido para o processamento semiautomático das imagens, obtendo-se a distância entre a roda direita da plataforma robótica e o centro da linha da cultura (fita zebraada, Figura 13). Para se obter a resolução espacial da imagem, número de pixels por centímetro, foi capturada e processada imagens que continham uma régua graduada, com resolução 0,05 m, posicionada entre a roda e a faixa zebraada (Figura 14). Os dados de distância obtidos a partir das imagens foram sincronizados com os dados gerados e armazenados pelo programa de computador da plataforma robótica.

Figura 13 - Obtenção da distância, por imagem, entre a roda direita da plataforma robótica e o centro da linha da cultura (representada pela fita zebraada).



Fonte: Autor

Figura 14 - Escala graduada com resolução 0,05 m utilizada para obter a resolução espacial (número de pixels por centímetro) da imagem



Fonte: Autor

Os dados de posicionamento da plataforma robótica, obtido pelo GNSS-RTK, tiveram como referência a posição da antena, que estava localizada sobre o Ponto de Controle, ou seja, na metade da distância entre as duas rodas da plataforma robótica. Já os dados extraídos das imagens tiveram como referência a roda direita.

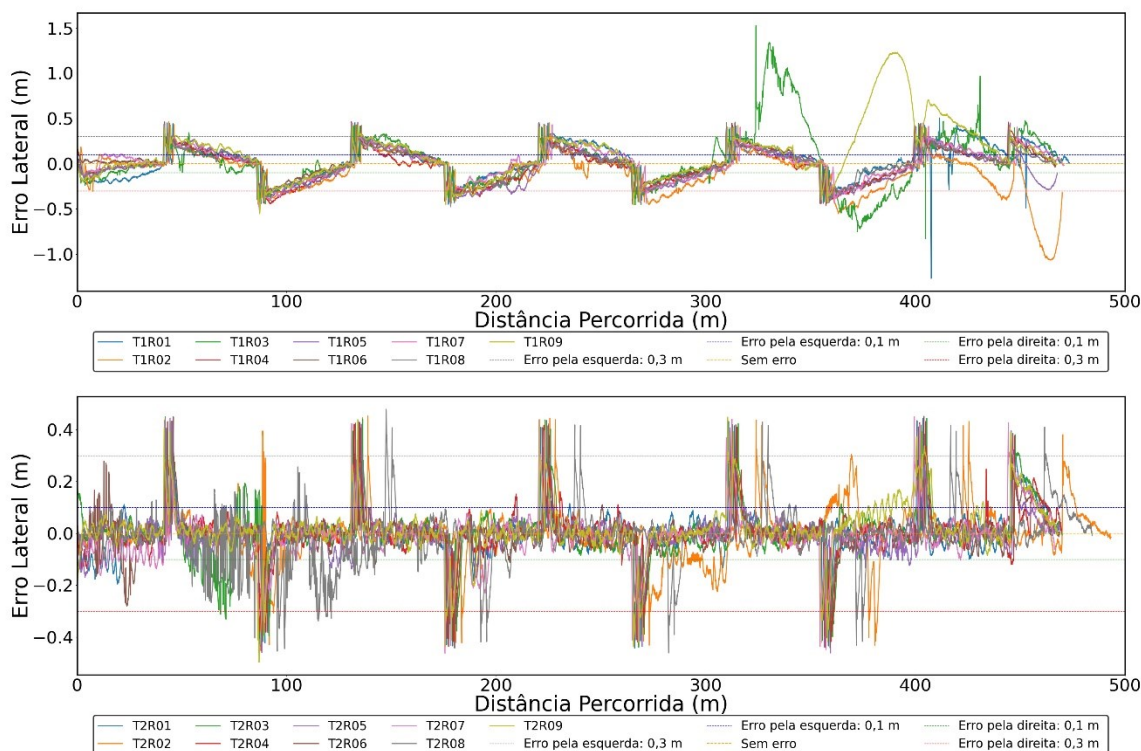
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A plataforma robótica foi desenvolvida com custo de US\$ 2.692,71 (R\$ 13.277,75 - cotação de 20/01/2024). Assim, torna-se viável a utilização desse tipo de equipamento, com custos de montagem que são inferiores aos equipamentos importados, como por exemplo a plataforma robótica Jackal J100 Basic da Clearpath, o Solix Ag Robotics da Solinftec e o The Amiga da Farm-NG, com custos de aquisição de 5 a 7 vezes o valor dispensado nesse trabalho. O custo realizado é justificado pelo uso de componentes de baixo custo e uso de programas de código aberto que dispensam a aquisição de licenças.

Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir dos dados de posição coletados pelo GNSS-RTK

Inicialmente, plotou-se todos os dados de deslocamento por erro lateral em apenas dois gráficos, agrupando-se os dados de acordo com o mapa de rota utilizado, o Teste 1 com pontos alvo nos vértices da rota planejada e Teste 2 com pontos alvo distribuídos a cada 3 m ao longo da rota planejada.

Figura 16 - Dados de erro lateral por distância percorrida de todas as repetições realizadas agrupadas pelo tipo de mapa de rota utilizado.



Fonte: Autor

Na Tabela 3 são apresentadas as métricas que permitiram mensurar o quanto a plataforma robótica desviou da rota pré-estabelecida. Nas 18 rotas executadas foram percorridos 8.480,6 m, dos quais em 634,8 m (7,49 %) a plataforma ultrapassou a faixa limite dos 0,3 m para cada lado. Para os dois tipos de mapas de rotas (Teste 1 - pontos alvo nos vértices da rota planejada e Teste 2 - pontos alvo a cada 3 m ao longo da rota planejada), foram destacados o melhor e o pior desempenho. O critério adotado foi o percentual de deslocamento que ultrapassou o limite de tolerância estabelecido de 0,3 m para cada lado, em casos em que não foi possível utilizar esse critério, utilizou-se o RMSE.

Tabela 3 - Métricas de erro lateral calculadas a partir dos dados de posição coletados pelo GNSS-RTK durante a execução das rotas analisadas.

Repetição		Maior Erro Lateral (m)	MAE (m)	DP (m)	RMSE (m)	Parcela da rota além de 0,3 m para cada lado (m)	Percentual da rota além de 0,3 m para cada lado (m)
Teste 1 - Rota com Pontos nos Vértices	1	1,269	0,157	0,104	0,188	37,75	7,97%
	2	1,064	0,178	0,181	0,254	90,07	19,16%
	3	1,525	0,224	0,212	0,309	104,32	22,18%
	4	0,464	0,146	0,111	0,183	48,30	10,35%
	5	0,458	0,165	0,107	0,197	56,31	12,04%
	6	0,462	0,134	0,099	0,167	23,98	5,13%
	7	0,512	0,141	0,098	0,172	28,52	6,05%
	8	0,477	0,137	0,098	0,168	31,51	6,74%
	9	1,230	0,220	0,225	0,314	86,94	18,59%
Teste 2 - Rota com Pontos a cada 3 m	1	0,443	0,060	0,084	0,103	14,92	3,19%
	2	0,453	0,067	0,084	0,107	12,96	2,63%
	3	0,449	0,062	0,084	0,105	14,07	2,99%
	4	0,452	0,054	0,079	0,096	14,17	3,02%
	5	0,461	0,053	0,074	0,091	10,84	2,31%
	6	0,451	0,056	0,082	0,099	12,04	2,57%
	7	0,462	0,062	0,085	0,105	14,28	3,06%
	8	0,478	0,068	0,089	0,112	16,98	3,50%
	9	0,497	0,061	0,087	0,107	16,85	3,60%

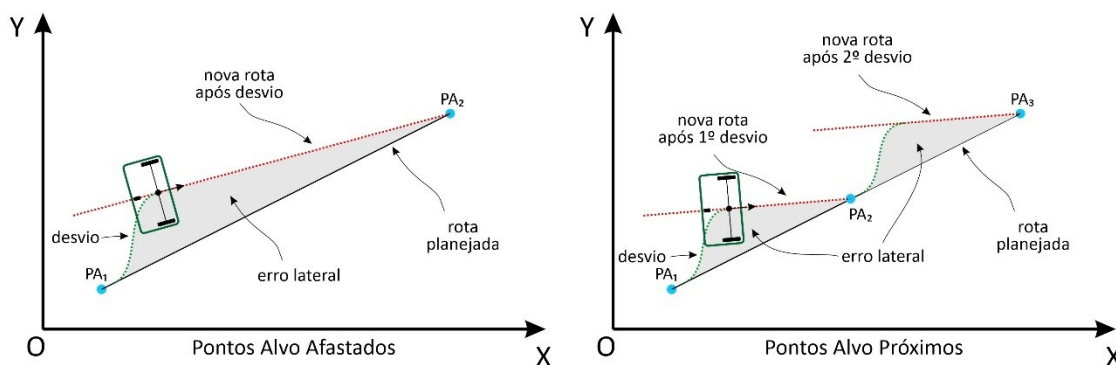
Legenda de Cores: Melhor Pior

Observou-se que a estratégia de alocar pontos alvo a cada 3 m (Teste 2) para a formação da rota planejada resultou em menor erro lateral da plataforma robótica. Tal observação é confirmada pelos valores superiores para maior erro lateral, erro médio absoluto, desvio padrão e raiz do erro quadrático médio das repetições

com a estratégia de mapa com pontos nos vértices (Teste 1). Destaca-se que a repetição com pior desempenho do Teste 2 teve performance superior à repetição com melhor desempenho do Teste 1.

Os menores erros laterais observados no Teste 2 devem-se, essencialmente, ao melhor desempenho do algoritmo quando os pontos alvo que compõe a rota planejada estão próximos entre si. O algoritmo atuava com o objetivo de deslocar a plataforma robótica até um determinado ponto alvo, sendo assim, alinhava sua orientação a esse ponto, ou seja, o algoritmo minimizava α a partir do cálculo e aplicação das velocidades angulares necessárias nas rodas para isso. Como consequência do deslocamento linear, minimizava-se o módulo do vetor $|\vec{\rho}|$, que representava a distância entre a plataforma robótica e o ponto alvo. Mesmo nos casos em que ocorria desvio da rota planejada, ou por oscilação nos sinais de posição e orientação da plataforma robótica, ou por variações na velocidade angular real, ou por patinagem das rodas, o algoritmo de controle de direção continuava atuando na minimização de α , ou seja, o algoritmo desenvolvido tinha como objetivo principal a minimização de α , não sendo prioridade minimizar diretamente o erro lateral. Dessa forma, para tirar proveito dessa característica, observou-se que utilizar rotas compostas por pontos alvos mais próximos um dos outros favoreciam maiores ocorrências de retorno da plataforma à rota desejada, reduzindo as métricas de erro lateral analisadas (Figura 17).

Figura 17 - Influência no erro lateral da distância de distribuição dos pontos alvos que compõe a rota em relação a um segmento da rota planejada desejada.

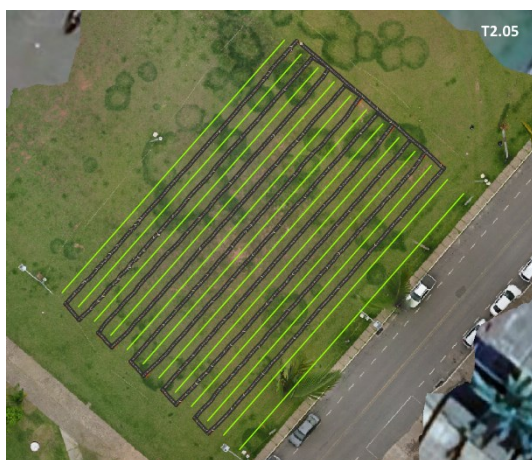


Fonte: Autor

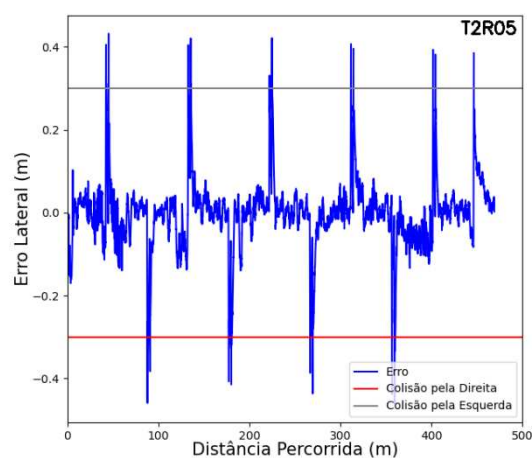
Para melhor discussão sobre o desempenho da plataforma robótica nas rotas executadas, com maiores e menores percentuais de erro lateral destacados na

Tabela 3, plotou-se a rota executada sobre a rota desejada (Figuras 18.a e 19.a). Permitiu-se, assim, analisar em quais locais da rota os maiores e menores erros laterais ocorreram. Plotou-se ainda a evolução do erro lateral ao longo da rota, destacando a tolerância do deslocamento lateral para que não ocorra uma colisão virtual com as plantas simuladas de café (Figuras 18.b e 19.b).

Figura 18 - Melhor desempenho: Teste 2 (Repetição 05) em que a plataforma seguiu a rota formada por pontos a cada 3 m. (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



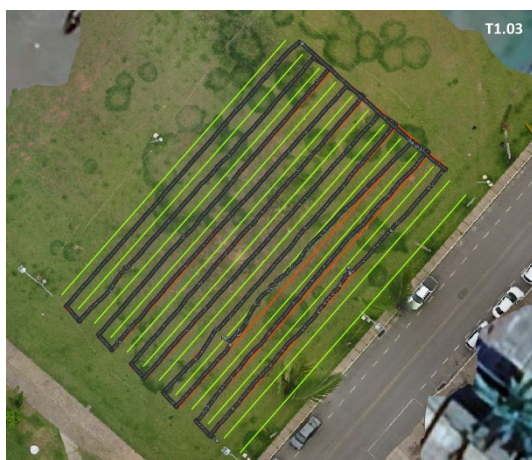
(a)



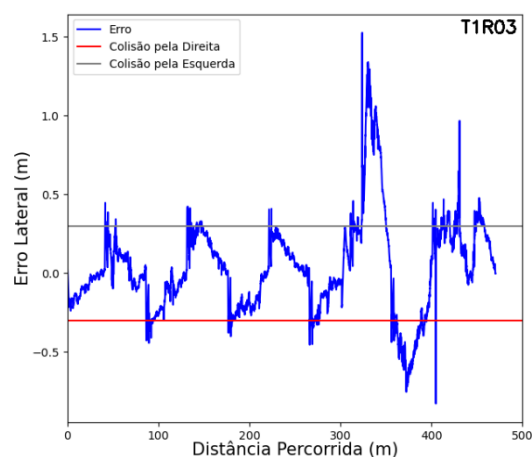
(b)

Fonte: Autor

Figura 19 - Pior desempenho: Teste 1 (Repetição 03) em que a plataforma seguiu a rota formada por pontos nos vértices. (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



(a)



(b)

Fonte: Autor

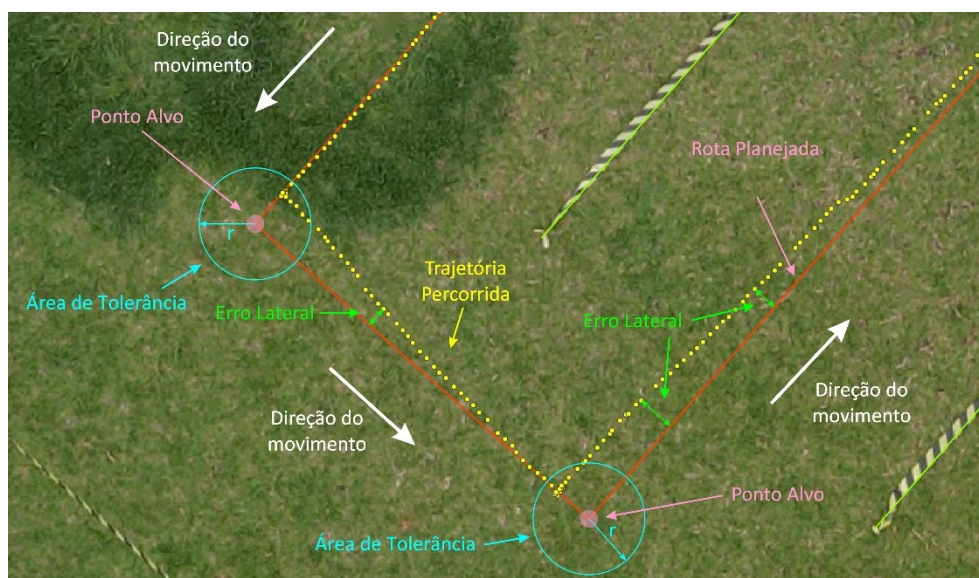
Nos Testes 1 e 2, mesmo nas repetições com pior desempenho, a plataforma tendeu a se deslocar paralelamente às linhas da cultura, realizou as manobras nas extremidades das linhas e retornou ao ponto de início (Figura 18.a e 19.a). Considerando apenas o Teste 2, ao se deslocar nas entrelinhas, não ocorreu desvio lateral com magnitude maior que 1,25 m, ou seja, maior que metade da largura do espaçamento entre as linhas, o que indicaria sobreposição à linha da cultura virtual. Porém, mesmo considerando o Teste 1, houve desvio lateral com magnitude maior que 1,25 m em apenas duas das nove repetições do Teste 1, sendo a maior parte nas regiões de manobra. De antemão, tal comportamento indica que a plataforma robótica desenvolvida tem potencial para ser utilizada no monitoramento de atributos das plantas e/ou do solo ou em operações agrícolas, desde que a magnitude de erro lateral observado não influencie na obtenção dos dados de interesse. De acordo com PINI et al. (2020) os limites do erro lateral desejáveis são 0,1 a 0,3 m para pulverização, distribuição de fertilizantes e colheita. E de até 0,025 m para direção automática e controle para operações de precisão como plantio, capina e distribuição de fertilizantes em linha.

Nos gráficos de evolução do erro lateral ao longo da rota (Figura 18.b a 19.b), observou-se picos e vales que se repetem, aproximadamente, a cada 40 m. Tais picos e vales indicam magnitudes de erro lateral superiores ao valor médio, ocorrendo no lado esquerdo e direito da plataforma robótica, respectivamente. Visto que cada linha demarcada tinha comprimento 40 m, as posições (eixo x) de ocorrência periódica de picos e vales, coincidiram com os momentos em que a plataforma robótica finalizou o deslocamento em uma entrelinha, manobrou e iniciou o deslocamento na entrelinha adjacentes. Assim, pode-se afirmar que os maiores erros laterais (Tabela 3) ocorreram, sempre, nas extremidades das linhas da cultura. Tal afirmação reforça a aplicabilidade da plataforma robótica desenvolvida para monitoramento agrícola para fins de Agricultura de Precisão, visto que desvios laterais na rota durante manobras não prejudicam a coleta de dados pelos sensores utilizados.

As magnitudes de erro lateral observadas nos picos e vales (Figura 18.b e 19.b) estão associadas ao fato de ter sido considerado no algoritmo desenvolvido uma circunferência de tolerância de raio 0,5 m ao redor de cada ponto alvo, sendo expressa no algoritmo como uma tolerância da distância $|\vec{p}|$ (Figura 6) de 0,5 m para que o

algoritmo considere que chegou no ponto alvo. A tolerância é necessária devido às oscilações na determinação de posição da plataforma robótica pelo GNSS-RTK. Pode ocorrer de $|\vec{p}|$ nunca ser nulo, fazendo com que o algoritmo não considere o fim do percurso naquele segmento de rota (HERNANDA; ROSA; FUADI, 2022). Sendo assim, nas extremidades das linhas de cultura, a plataforma robótica não chegava, exatamente, ao ponto alvo. Faltando 0,5 m para o referido ponto, o algoritmo considerava que chegava ao ponto alvo e mudava para o próximo ponto alvo, localizado na entrelinha adjacente, fazendo com que a plataforma girasse aproximadamente 90° (Figura 20). Para reduzir os picos e vales dos erros laterais apresentados, deve-se reduzir o valor da tolerância. No entanto, deve-se garantir que esse valor seja superior às oscilações da posição obtida com o GNSS-RTK.

Figura 20 - Influência da tolerância de detecção de chegada ao ponto alvo no erro lateral durante o deslocamento da plataforma robótica no segmento de rota referente à mudança de entrelinha.



Fonte: Autor

Análise do desempenho da navegação da plataforma robótica a partir da posição da plataforma extraída das imagens da rota

Na Tabela 4 são apresentadas as métricas relacionadas ao erro lateral da plataforma robótica, ao deslocar na rota pré-estabelecida. Foram processadas apenas imagens que continham a faixa zebra (indicando o centro da linha de cultura à direita da roda). Assim, não foi possível medir o erro lateral nas regiões em que a

plataforma robótica estava saindo de uma entrelinha e entrando na adjacente (região de manobra). Logo, os erros apresentados na Tabela 4 não incluem os erros laterais ocorridos próximos aos pontos alvo nos vértices da região de manobra. O erro lateral obtido pelas imagens representou o erro lateral global da plataforma robótica ao longo da rota. Isso é, inclui, além do erro do algoritmo de navegação, erros relacionados ao módulo GNSS-RTK, velocidade angular real das rodas, patinagem das rodas, entre outros.

O melhor desempenho continuou sendo o do Teste 2 e o pior desempenho o do Teste 1, utilizando como critério o percentual de deslocamento fora da faixa de tolerâncias e o RMSE. Esse resultado corrobora com aqueles obtidos ao analisar os dados de posição coletados pelo GNSS-RTK, indicando que rotas com ponto alvo próximos reduziram o erro lateral da plataforma robótica.

Tabela 4 - Métricas de erro lateral calculadas a partir dos dados de posição extraídos das imagens obtidas durante a execução das rotas analisadas.

Repetição	Maior Erro Lateral (m)	MAE (m)	DP (m)	RMSE (m)	Parcela da rota além de 0,3 m para cada lado (m)	Percentual da rota além de 0,3 m para cada lado (m)	
Teste 1 - Rota com Pontos nos Vértices	1	0,341	0,156	0,083	0,177	17,35	3,84%
	2	0,559	0,008	0,045	0,046	3,96	0,88%
	3	0,608	0,010	0,052	0,054	5,32	1,19%
	4	0,472	0,193	0,117	0,226	89,01	19,98%
	5	0,511	0,209	0,117	0,239	91,82	20,57%
	6	0,411	0,184	0,104	0,211	52,39	11,76%
	7	-	-	-	-	-	-
	8	0,383	0,172	0,101	0,200	59,26	13,29%
	9	0,417	0,183	0,101	0,209	41,59	9,31%
Teste 2 - Rota com Pontos a cada 3 m	1	-	-	-	-	-	-
	2	0,243	0,082	0,060	0,101	0,00	0,00%
	3	0,252	0,081	0,065	0,104	0,00	0,00%
	4	0,233	0,101	0,019	0,119	0,00	0,00%
	5	0,317	0,105	0,077	0,130	1,12	0,25%
	6	0,285	0,109	0,074	0,132	0,00	0,00%
	7	0,364	0,100	0,070	0,122	3,28	0,74%
	8	0,291	0,088	0,071	0,113	0,00	0,00%
	9	0,267	0,093	0,068	0,115	0,00	0,00%

Legenda de Cores:

Melhor entre os empatados

Melhores

Pior

Obs.: Não ocorreu captura de imagens para a repetição 7 do Teste 1 e repetição 1 do teste 2.

Comparação entre as análises de desempenho pelos dados do GNSS-RTK e por imagem

O programa de computador armazenou informações de posição do GNSS-RTK a cada 0,2 s, enquanto imagens da posição foram coletadas a cada 4,0 s. Além disso, não houve processamento das imagens capturadas nas regiões de manobra. Assim, para uma comparação justa, na Tabela 5 é apresentado as métricas de erro lateral usando apenas os dados de posição do GNSS-RTK que possuem imagens no mesmo instante da coleta. O melhor e pior desempenho foram destacados também utilizando a métrica do percentual de deslocamento que ultrapassou o limite de tolerância de 0,3 m para cada lado. As rotas do Teste 2 continuaram a apresentar desempenho superior.

Tabela 5 - Métricas de erro lateral calculadas apenas a partir dos dados de posição coletados pelo GNSS-RTK e que estão sincronizados com as imagens obtidas durante execução das rotas analisadas.

Repetição	Maior Erro Lateral (m)	Erro Médio Absoluto (m)	Desvio Padrão (m)	Erro quadrático médio (m)	Parcela da rota além de 0,3 m para cada lado (m)	Percentual da rota além de 0,3 m para cada lado (m)	
Teste 1 Rota com Pontos nos Vértices	1	0,414	0,134	0,090	0,162	18,35	4,06%
	2	0,500	0,007	0,042	0,043	2,51	0,56%
	3	0,711	0,009	0,051	0,052	4,10	0,92%
	4	0,403	0,128	0,105	0,166	36,37	8,17%
	5	0,366	0,151	0,100	0,181	46,18	10,34%
	6	0,381	0,123	0,090	0,153	15,31	3,44%
	7	-	-	-	-	-	-
	8	0,419	0,131	0,091	0,159	24,59	5,52%
	9	0,544	0,142	0,087	0,167	10,80	2,42%
Teste 2 -Rota com Pontos a cada 3 m	1	-	-	-	-	-	-
	2	0,367	0,054	0,066	0,085	5,04	1,07%
	3	0,366	0,046	0,060	0,076	3,78	0,84%
	4	0,443	0,040	0,054	0,067	2,94	0,65%
	5	0,331	0,040	0,055	0,068	4,64	1,03%
	6	0,431	0,040	0,059	0,071	3,38	0,75%
	7	0,334	0,042	0,061	0,074	4,58	1,03%
	8	0,460	0,050	0,072	0,088	7,64	1,65%
	9	0,496	0,039	0,059	0,070	4,54	1,02%

Legenda de Cores: Melhor Pior

Obs.: Não ocorreu captura de imagens para a repetição 7 do Teste 1 e repetição 1 do teste 2.

Na Tabela 6 é apresentado um resumo das Tabelas 3, 4 e 5. Nessa tabela contém as métricas RMSE e percentual de deslocamento fora da faixa de tolerância de 0,3 m para cada lado, calculados utilizando os dados do GNSS-RTK (coletados a cada 0,2 s) (Tabela 3), dados de posição extraídos das imagens (coletadas a cada 4 s) (Tabela 4) e dados do GNSS-RTK, reamostrados para os instantes em que se houve captura de imagem da posição da plataforma robótica (a cada 4 s) (Tabela 5). Para os três tipos de dados, observou-se que de forma geral, o desempenho da plataforma robótica utilizando rotas com ponto alvo a cada 3,0 m (Teste 2) foi superior e mais consistente em relação ao uso de rotas com pontos alvo nos vértices (Teste 1).

Tabela 6 - Resumo das Tabelas 3, 4 e 5, contendo as métricas RMSE e percentual de deslocamento fora da faixa de tolerância de 0,3 m para cada lado.

Repetição		Tabela 3 - Dados do GNSS-RTK		Tabela 4 - Dados extraídos das imagens		Tabela 5 - Dados do GNSS-RTK sincronizados com as imagens	
		RMSE (m)	Percentual da rota além de 0,3 m para cada lado (m)	RMSE (m)	Percentual da rota além de 0,3 m para cada lado (m)	RMSE (m)	Percentual da rota além de 0,3 m para cada lado (m)
Teste 1 - Rota com Pontos nos Vértices	1	0,188	7,97%	0,177	3,84%	0,162	4,06%
	2	0,254	19,16%	0,046	0,88%	0,043	0,56%
	3	0,309	22,18%	0,054	1,19%	0,052	0,92%
	4	0,183	10,35%	0,226	19,98%	0,166	8,17%
	5	0,197	12,04%	0,239	20,57%	0,181	10,34%
	6	0,167	5,13%	0,211	11,76%	0,153	3,44%
	7	0,172	6,05%	-	-	-	-
	8	0,168	6,74%	0,200	13,29%	0,159	5,52%
	9	0,314	18,59%	0,209	9,31%	0,167	2,42%
Teste 2 - Rota com Pontos a cada 3 m	1	0,103	3,19%	-	-	-	-
	2	0,107	2,63%	0,101	0,00%	0,101	1,07%
	3	0,105	2,99%	0,104	0,00%	0,104	0,84%
	4	0,096	3,02%	0,119	0,00%	0,119	0,65%
	5	0,091	2,31%	0,130	0,25%	0,130	1,03%
	6	0,099	2,57%	0,132	0,00%	0,132	0,75%
	7	0,105	3,06%	0,122	0,74%	0,122	1,03%
	8	0,112	3,50%	0,113	0,00%	0,113	1,65%
	9	0,107	3,60%	0,115	0,00%	0,115	1,02%

Legenda de Cores: Melhor ou Melhor entre os empatados Melhores Pior

Observou-se que, por não estarem incluídos os dados dos erros laterais das regiões de manobras, o RMSE e percentual fora da faixa de tolerância foi reduzido, comparando as colunas referentes à Tabelas 3 e 5. Esse comportamento corrobora com a observação de que a maior influência de erro lateral foi a tolerância de detecção de chegada ao ponto alvo (Figura 20).

Ao comparar as Tabelas 4 e 5, observou-se que as métricas RMSE e percentual fora da faixa de tolerância foram superiores para os dados extraídos das imagens. Enquanto os erros laterais apresentados na Tabela 5 são influenciados apenas pelo desempenho do algoritmo de navegação, os erros laterais da Tabela 4 também são influenciados por outros erros. Além dos erros do algoritmo, tem-se os erros de posicionamento do módulo GNSS-RTK, oscilações de velocidade angular, patinagem das rodas, entre outros.

Independente do algoritmo ou da precisão dos sensores utilizados, erros laterais foram observados e mensurados em pesquisas que envolveram a análise de desempenho de veículos (terrestres ou aéreo) com navegação autônoma durante a execução de uma dada rota (Apêndice B). É de se esperar que veículos equipados com algoritmos mais robustos e/ou sensores com maior precisão tendam a apresentar menores erros laterais, como PINI et al. (2020) com média de 0,064 m e desvio padrão de 0,013 m e REITBAUER; SCHMIED (2021) com média de 0,032 m e desvio padrão de 0,02 m. Por outro lado, o custo de aquisição do veículo com tal tecnologia tende a ser maior. Especialmente, para veículos autônomos para agricultura de precisão destinados à agricultores com menor capacidade de investimento, pode ser necessário considerar maiores erros laterais como aceitáveis usando sensores de baixo custo. Nesse contexto, pesquisas vêm obtendo êxito no desenvolvimento de veículos autônomos com algoritmos que utilizam dados de vários sensores de baixo custo, principalmente câmeras, IMUs, módulos GNSS-RTK e *encoders*, para melhorar a precisão na determinação da posição e orientação (ABDELHAFID *et al.*, 2022; LEVOIR *et al.*, 2020; YAN *et al.*, 2022).

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho uma plataforma robótica de baixo custo com navegação autônoma foi desenvolvida com US\$ 2.692,71. A utilização de componentes de baixo-custo e linguagem de programação, bibliotecas e similares de código aberto não foram obstáculos para desenvolvimento da plataforma robótica. Além disso, torna-se viável

uma maior difusão da tecnologia de automação de processos dentro da agricultura de precisão.

O algoritmo desenvolvido apresentou desempenho satisfatório no controle do deslocamento da plataforma nas entrelinhas de uma lavoura de café, tanto na navegação retilínea, na execução de manobras e no retorno ao ponto de origem. Ao comparar dois tipos de rotas, uma formada com pontos alvo localizado nos vértices da rota e outra com pontos alvo a cada 3 metros, a segunda rota planejada resultou em menores erros laterais. A estratégia adotada na geração do mapa da rota a ser executada teve uma importância fundamental na precisão da navegação autônoma da plataforma robótica.

Durante a execução das 18 repetições, aquelas que apresentaram o melhor ao pior desempenho tiveram maior erro lateral variando de 0,233 m à 1,525 m, média do erro absoluto de 0,007 m à 0,224 m, desvio padrão de 0,019 m à 0,225 m e erro quadrático médio de 0,043 m à 0,314 m. A rota com melhor desempenho utilizou pontos alvo a cada 3 m, enquanto o pior desempenho ocorreu quando os pontos alvo estavam localizados nos vértices.

O maior influenciador do erro lateral foi o parâmetro do algoritmo relacionado à tolerância da distância entre a plataforma robótica e o ponto alvo, que define a chegada ao ponto alvo. O valor adotado de 0,5 m, fez com que a plataforma robótica mudasse para o próximo ponto alvo antes de efetivamente chegar ao ponto alvo atual.

REFERÊNCIAS

- ABDELHAFID, El Farnane *et al.* Localization based on DGPS for Autonomous Robots in Precision Agriculture. 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. 9781665422093.
- BECHAR, Avital; VIGNEAULT, Clément. *Agricultural robots for field operations: Concepts and components*. **Biosystems Engineering**. Academic Press, 1 set. 2016
- BELL, Thomas. **Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS**. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2000.
- CISTERNAS, Isabel *et al.* *Systematic literature review of implementations of precision agriculture*. **Computers and Electronics in Agriculture**. Elsevier B.V, 1 set. 2020
- DOS SANTOS, Adão Felipe *et al.* Use of real-time extend GNSS for planting and inverting peanuts. **Precision Agriculture** v. 20, n. 4, p. 840-856, 2019.
- FAO. IFAD, UNICEF, WFP and WHO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023**. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023**. FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO, 12 jul. 2023.
- GAN-MOR, Samuel; CLARK, Rex L.; UPCHURCH, Bruce L. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. **Computers and Electronics in Agriculture** v. 59, n. 1-2, p. 31-38, 2007.
- GEBBERS, Robin; ADAMCHUK, Viacheslav I. Precision agriculture and food security. **Science** v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.
- GENTILINI, Lorenzo *et al.* Trajectory Planning ROS Service for an Autonomous Agricultural Robot. 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. p. 384-389.
- HERNANDA, Tirta Yudha; ROSA, Muhammad Ridho; FUADI, Azam Zamhuri. Mobile Robot-Ackerman Steering Navigation and Control Using Localization based on Kalman Filter and PID Controller. 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. p.154-159.
- HSU, Li-Ta *et al.* An Algorithm to Assist the Robust Filter for Tightly Coupled RTK/INS Navigation System, 2022.
- KARUNATHILAKE, E. M.B.M. *et al.* *The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture*. **Agriculture (Switzerland)**. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 ago. 2023
- LEVOIR, Samuel J. *et al.* High-Accuracy Adaptive Low-Cost Location Sensing Subsystems for Autonomous Rover in Precision Agriculture. **IEEE Open Journal of Industry Applications** v. 1, p. 74-94, 2020.
- LI, Ming *et al.* Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** v. 2, n. 3, p. 1-16, 2009.

LI, Yong; EFATMANESHNIK, Mahmoud; DEMPSTER, Andrew G. Attitude determination by integration of MEMS inertial sensors and GPS for autonomous agriculture applications. **GPS Solutions** v. 16, n. 1, p. 41-52, 2012.

MENDES DA ROCHA, Rodrigo Santos *et al.* Avaliação do efeito da cintilação ionosférica e de diferentes intervalos de tempo de coleta de dados no posicionamento por ponto preciso na sua forma on-line. **Revista Brasileira de Geomática** v. 5, n. 2, p. 251-276, 2017.

MOUSAZADEH, Hossein. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. **Journal of Terramechanics** v. 50, n. 3, p. 211-232, 2013.

NØRREMARK, M. *et al.* Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area. **Precision Agriculture** v. 13, n. 2, p. 149-162, 2012.

OECD; FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032**. OECD, 2023.

PAUL, Carsten *et al.* *Rebound effects in agricultural land and soil management: Review and analytical framework*. **Journal of Cleaner Production**. Elsevier Ltd., 1 ago. 2019

PINI, Marco *et al.* Experimental Testbed and Methodology for the Assessment of RTK GNSS Receivers Used in Precision Agriculture. **IEEE Access** v. 8, p. 14690-14703, 2020.

QUEIROZ, Daniel Marçal De *et al.* Sensors Applied to Digital Agriculture: A Review. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA** v. 51, n. 5, 2020.

RAHMADIAN, Reza; WIDYARTONO, Mahendra. Autonomous Robotic in Agriculture: A Review. 2020, 2020. p.1–6.

REITBAUER, Eva; SCHMIED, Christoph. Bridging GNSS Outages with IMU and Odometry: A Case Study for Agricultural Vehicles. **Sensors** v. 21, n. 13, p. 4467, 29 jun. 2021.

SISHODIA, Rajendra P.; RAY, Ram L.; SINGH, Sudhir K. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. **Remote Sensing** v. 12, n. 19, p. 1-31, 1 out. 2020.

TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. **International Symposium on GPS/GNSS - International Convention Center Jeju, Korea** p. 4-6, 2009.

VALENTE, Domingos Sárvio Magalhães *et al.* Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems. **Computers and Electronics in Agriculture** v. 168, 1 jan. 2020.

WANG, Hao *et al.* A Low-cost Tractor Navigation System with Changing Speed Adaptability. 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. p.96-102.

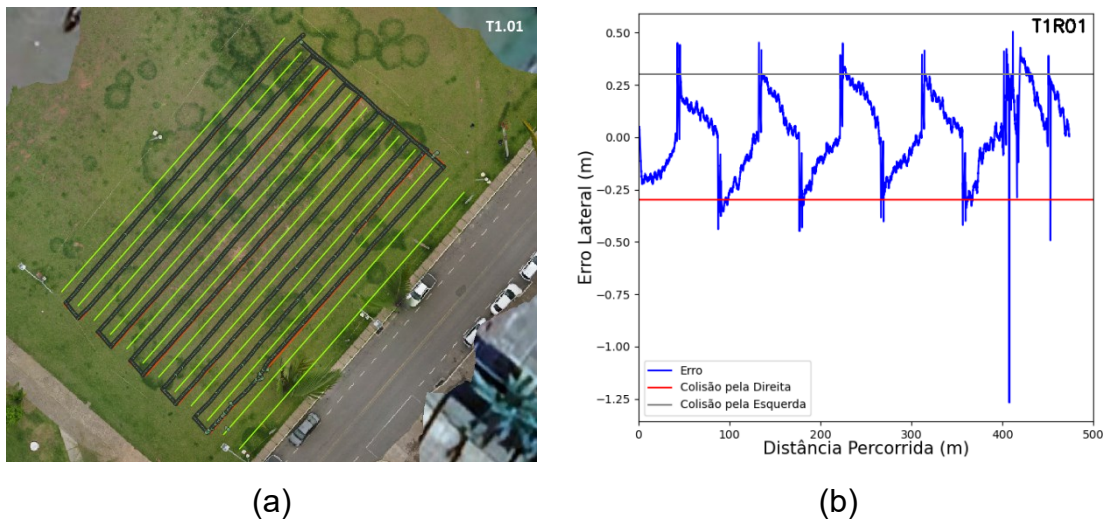
XIANG, Yin; NOGUCHI, Noboru. Development and evaluation of a general-purpose electric off-road robot based on agricultural navigation. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** v. 7, n. 5, p. 14-21, 2014.

YAN, Yaxuan *et al.* Real-Time Localization and Mapping Utilizing Multi-Sensor Fusion and Visual-IMU-Wheel Odometry for Agricultural Robots in Unstructured, Dynamic and GPS-Denied Greenhouse Environments. **Agronomy** v. 12, n. 8, 1 ago. 2022.

ZHANG, Quan *et al.* Evaluating the navigation performance of multi-information integration based on low-end inertial sensors for precision agriculture. **Precision Agriculture** v. 22, n. 3, p. 627-646, 2021.

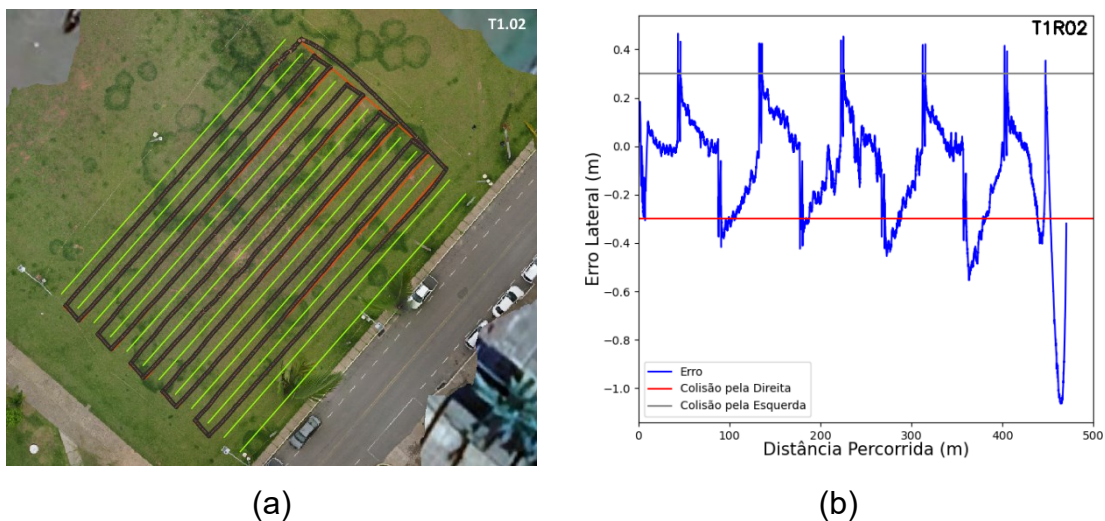
APÊNDICE A - Gráficos de rota e erro lateral de todas as repetições

Figura 21 - Teste 1 - Repetição 01: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



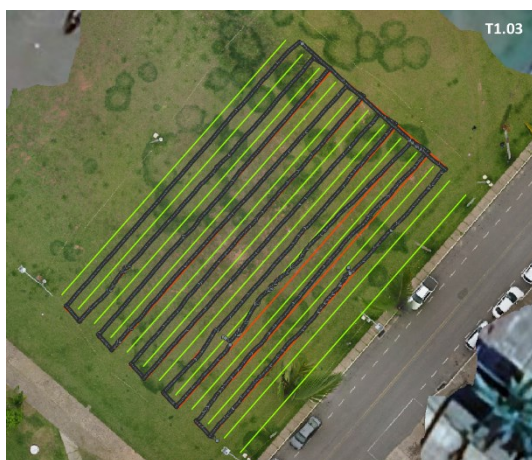
Fonte: Autor

Figura 22 - Teste 1 - Repetição 02: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



Fonte: Autor

Figura 23 - Teste 1 - Repetição 03: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



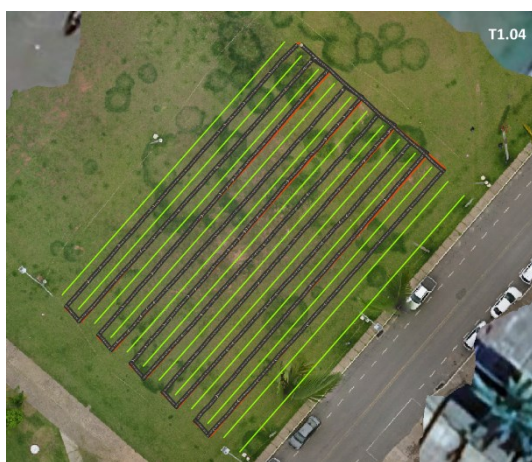
(a)



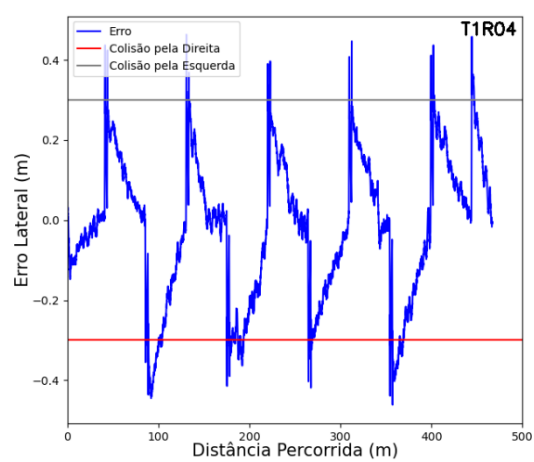
(b)

Fonte: Autor

Figura 24 - Teste 1 - Repetição 04: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



(a)



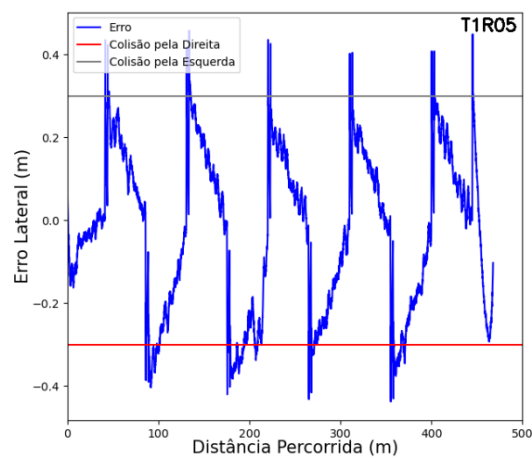
(b)

Fonte: Autor

Figura 25 - Teste 1 - Repetição 05: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



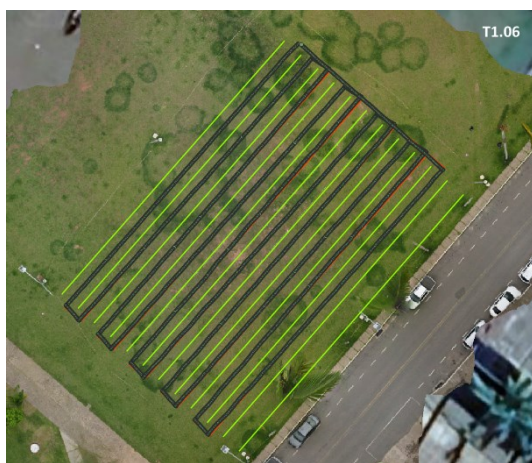
(a)



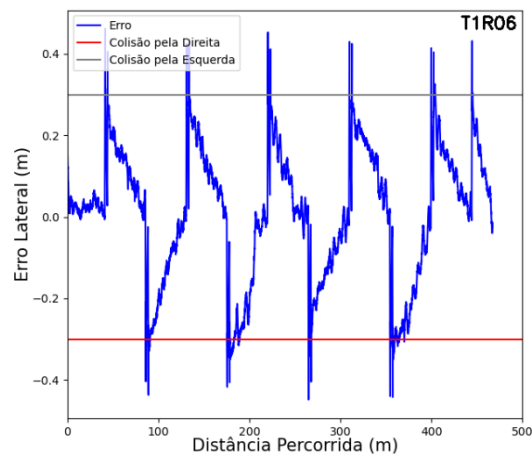
(b)

Fonte: Autor

Figura 26 - Teste 1 - Repetição 06: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



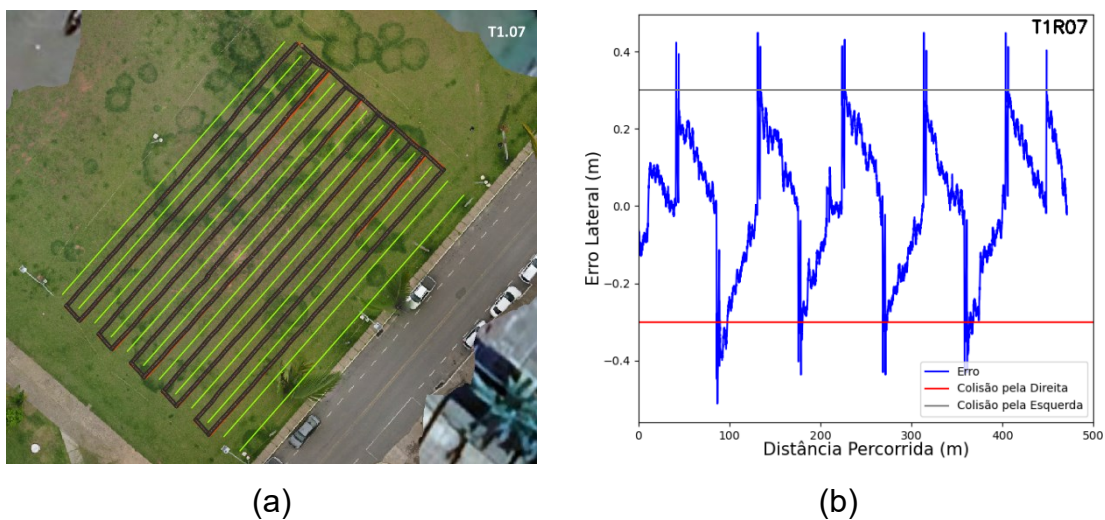
(a)



(b)

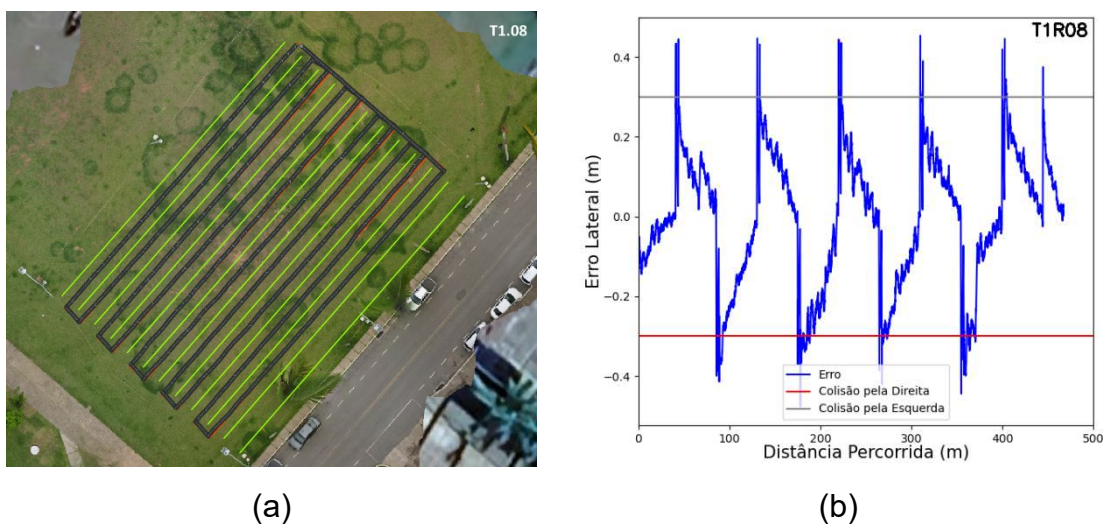
Fonte: Autor

Figura 27 - Teste 1 - Repetição 07: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



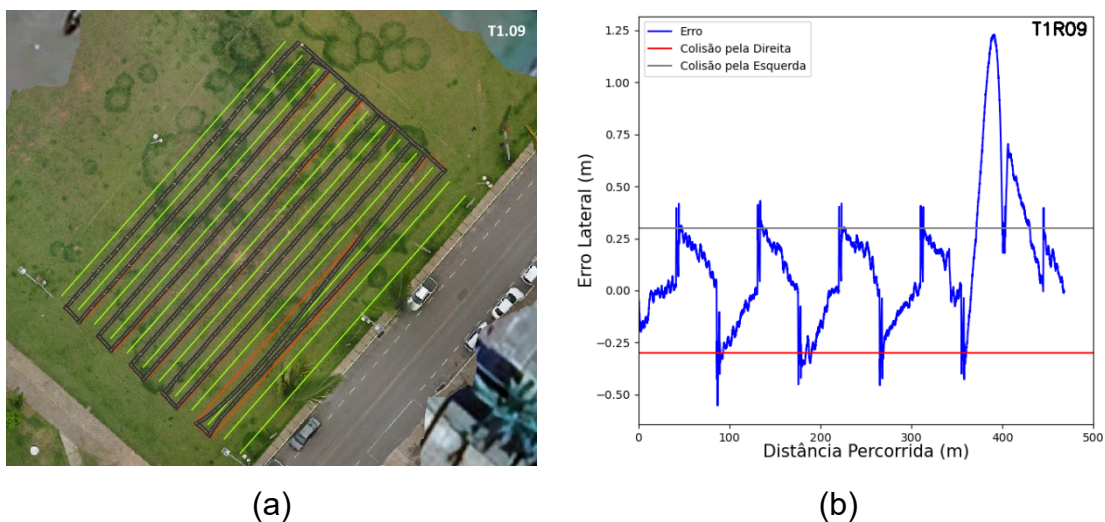
Fonte: Autor

Figura 28 - Teste 1 - Repetição 08: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



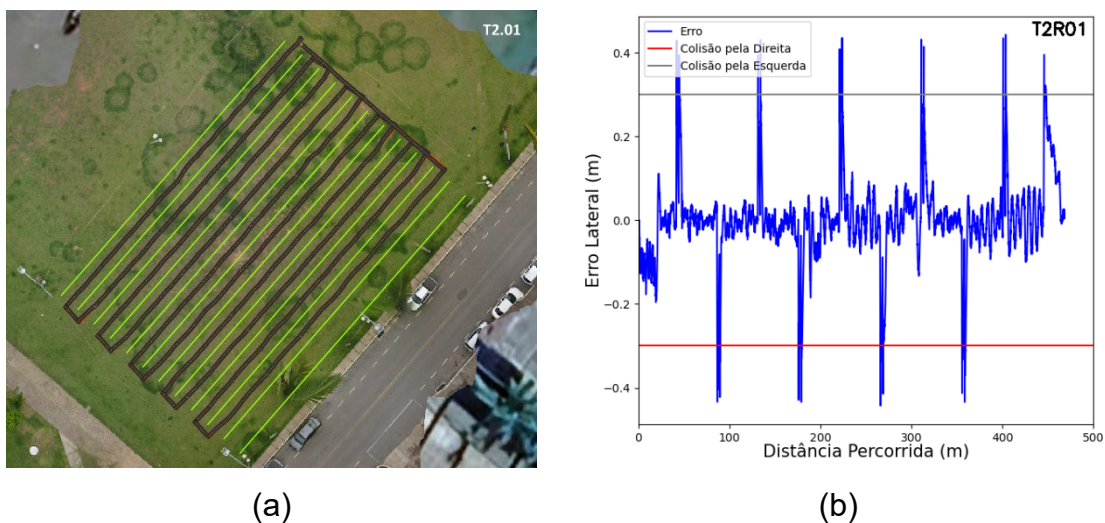
Fonte: Autor

Figura 29 - Teste 1 - Repetição 09: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



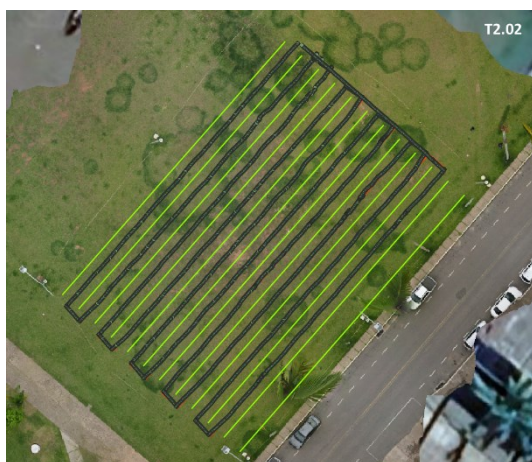
Fonte: Autor

Figura 30 - Teste 2 - Repetição 01: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.

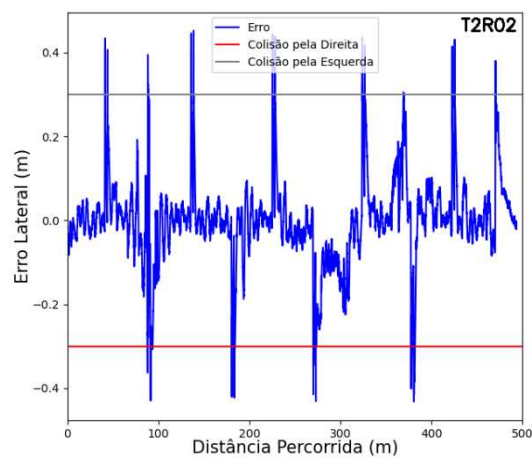


Fonte: Autor

Figura 31 - Teste 2 - Repetição 02: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



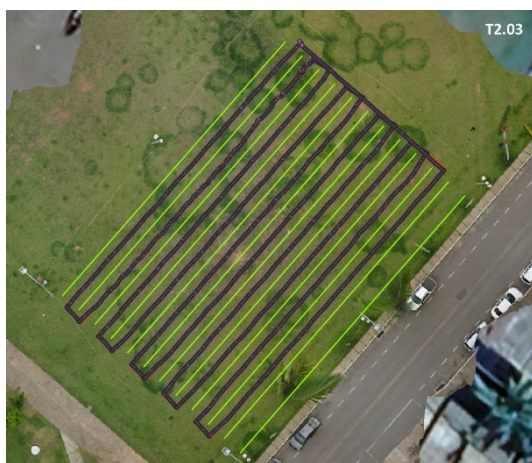
(a)



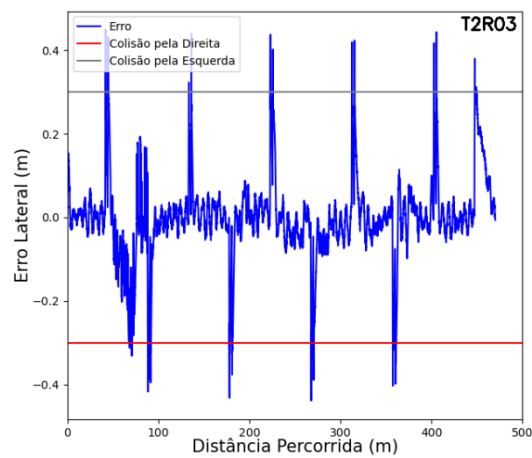
(b)

Fonte: Autor

Figura 32 - Teste 2 - Repetição 03: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



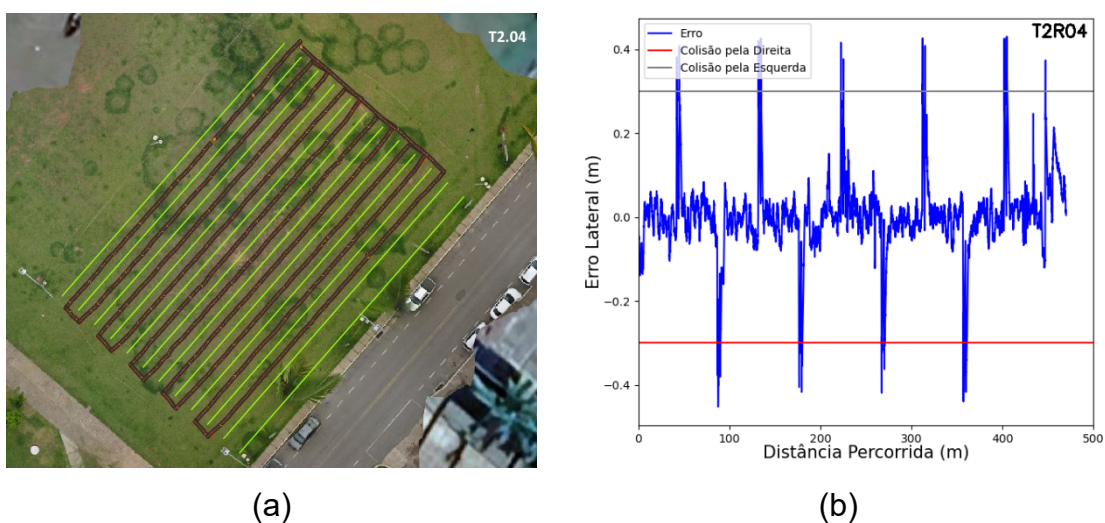
(a)



(b)

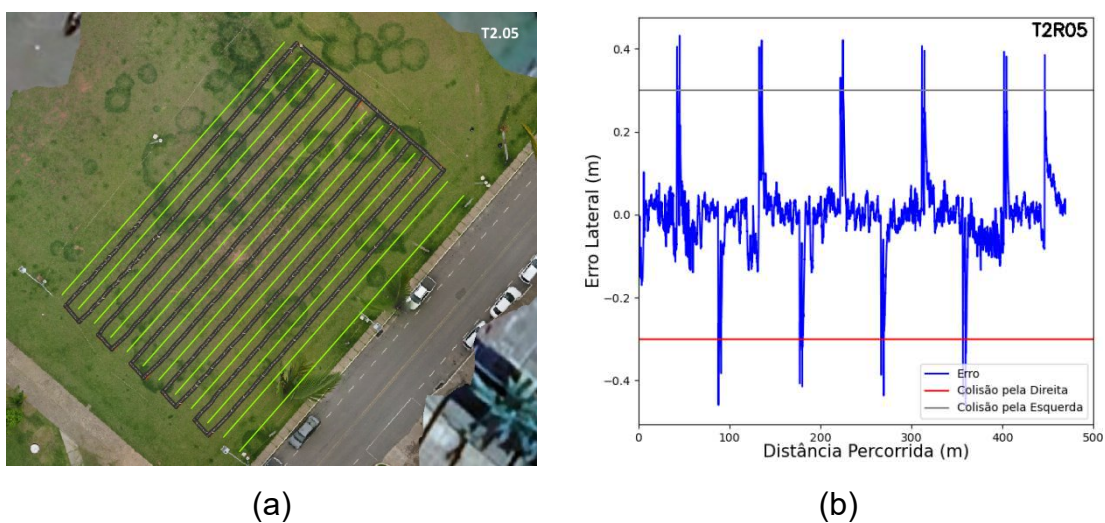
Fonte: Autor

Figura 33 - Teste 2 - Repetição 04: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



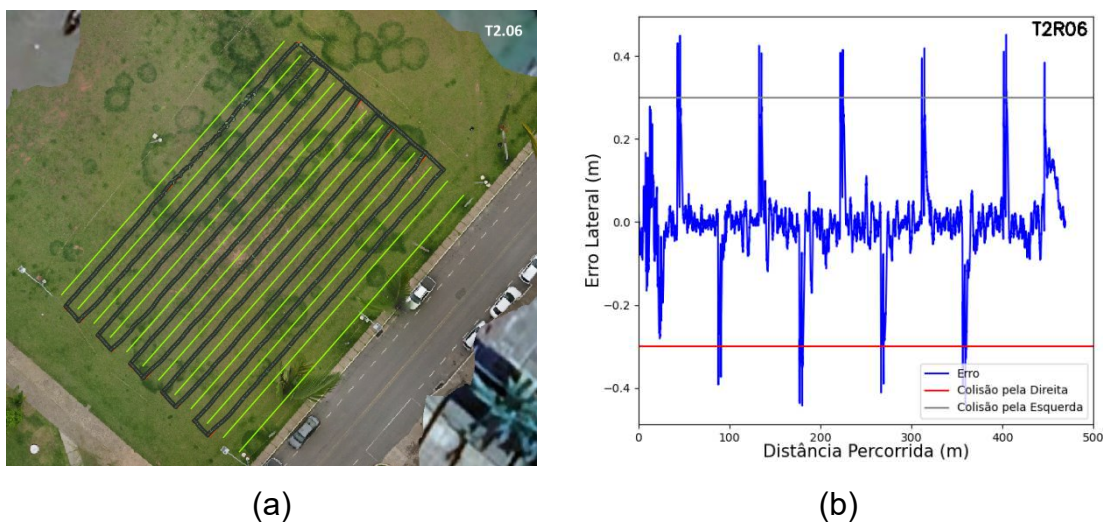
Fonte: Autor

Figura 34 - Teste 2 - Repetição 05: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



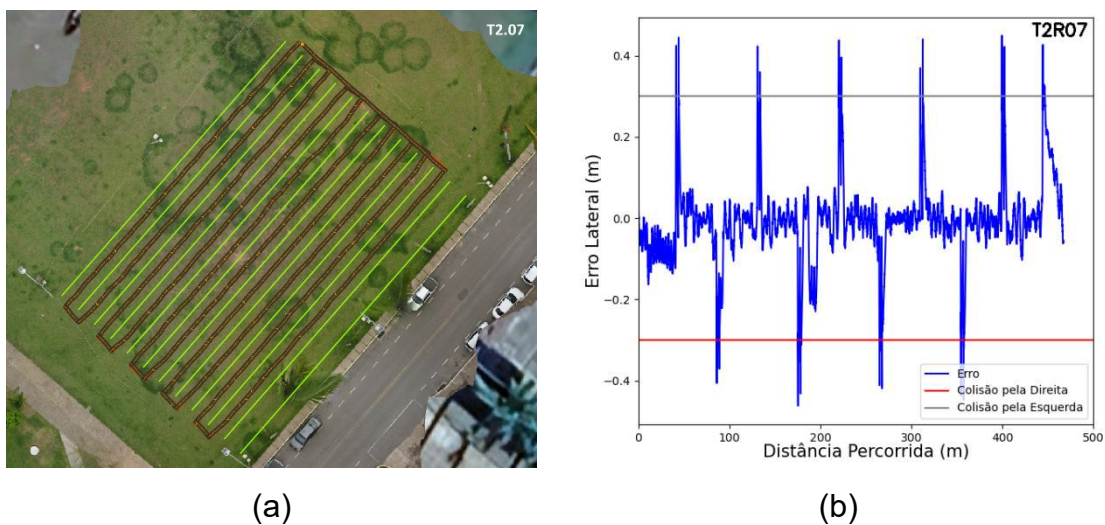
Fonte: Autor

Figura 35 - Teste 2 - Repetição 06: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



Fonte: Autor

Figura 36 - Teste 2 - Repetição 07: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.

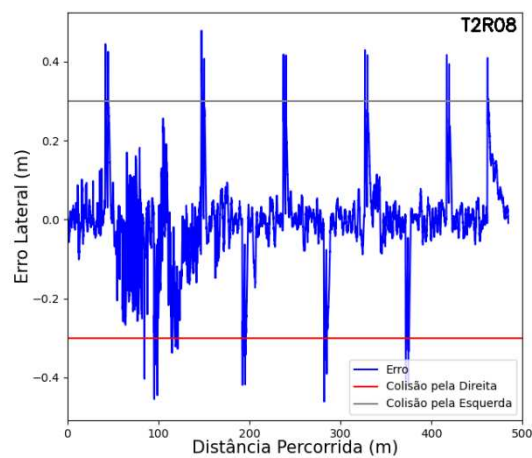


Fonte: Autor

Figura 37 - Teste 2 - Repetição 08: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



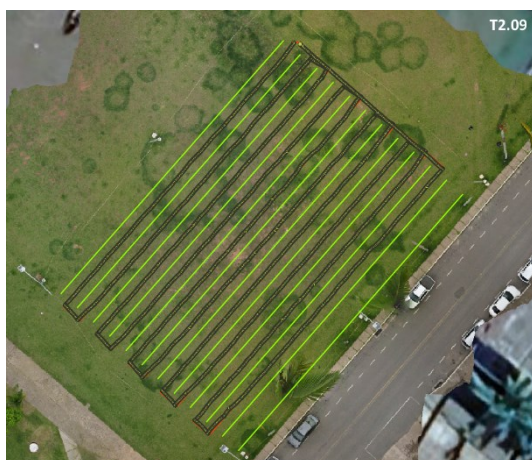
(a)



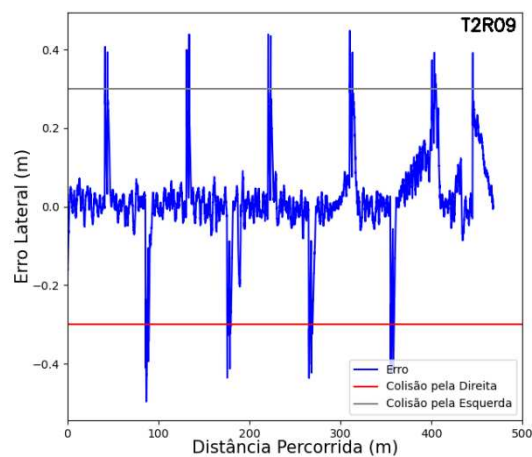
(b)

Fonte: Autor

Figura 38 - Teste 2 - Repetição 09: (a) rota executada sobre a rota planejada, (b) evolução do erro lateral ao longo da rota.



(a)



(b)

Fonte: Autor

APÊNDICE B - Dados de erro lateral do presente trabalho e de outros autores

A seguir, apresenta-se a Tabela 7 que contém um resumo das principais métricas do presente trabalho e também dos trabalhos de outros autores, em que se empregou veículos autônomos com componentes, metodologias, condições e operações diferentes, porém também objetivando a redução do erro lateral.

Tabela 7 - Resumo dos resultados do presente trabalho e de outros autores.

Trabalho	Principais Características	Erro Lateral
Presente trabalho.	Veículo diferencial autônomo utilizando módulos de GNSS-RTK e IMU.	<p>- Com Região de Manobra (erro do algoritmo): maior erro lateral: 0,443 m à 1,525 m média do erro absoluto: 0,053 m à 0,224 m desvio padrão: 0,074 m à 0,225 m erro quadrático médio: 0,091 m à 0,314 m</p> <p>- Sem Região de Manobra (erro do algoritmo): maior erro lateral: 0,331 m à 0,711 m média do erro absoluto: 0,007 m à 0,151 m desvio padrão: 0,042 m à 0,105 m erro quadrático médio: 0,043 m à 0,181 m</p> <p>- Sem Região de Manobra (erro global): maior erro lateral: 0,233 m à 0,608 m média do erro absoluto: 0,008 m à 0,209 m desvio padrão: 0,019 m à 0,117 m erro quadrático médio: 0,046 m à 0,239 m</p>
(ABDELHAFID <i>et al.</i> , 2022)	Veículo do tipo triciclo. Utiliza apenas DGPS para navegação (módulo <i>rover</i> com correção por Estação de Referência).	média: 0,91 m
(BELL, 2000)	Trator utilizando apenas GPS (CPDGPS - Carrier-Phase Differential)	média: até 0,05 m desvio padrão: até 0,06 m
(REITBAUER; SCHMIED, 2021)	Veículo diferencial elétrico virador de compostagem eWender E35eco da Pusch & Schinnerl GmbH com	média: 0,027 a 0,032 m desvio padrão: 0,015 a 0,02 m

	Receptor geodésico de antena dupla e rede RTK, IMU XSens MTI-G-710 e odometria com inversor e <i>encoders</i> Atech AC-X.	
(PINI <i>et al.</i> , 2020)	Veículo diferencial autônomo utilizando módulos de GNSS-RTK e IMU.	<ul style="list-style-type: none"> - Sob folhagens de pomar de Kiwi: <ul style="list-style-type: none"> média: 0,064 m desvio padrão: 0,013 cm - Sob folhagens em vinhedos: <ul style="list-style-type: none"> média: 0,015 m desvio padrão: 0,007 m - Em estufas: <ul style="list-style-type: none"> média: 0,863 m desvio padrão: 0,652 m
(LEVOIR <i>et al.</i> , 2020)	Veículo diferencial autônomo utilizando câmera, LiDAR e GNSS-RTK.	<ul style="list-style-type: none"> - Câmera: <ul style="list-style-type: none"> média: -0,0013 m; desvio padrão: 0,0251 m - RTK-GPS: <ul style="list-style-type: none"> média: 0,0033 m desvio padrão: 0,0088 m - LiDAR: <ul style="list-style-type: none"> média: 0,0083 m desvio padrão: 0,0137 m
(XIANG; NOGUCHI, 2014)	Veículo da E-Gator da Deere & Companhia utilizando GNSS-RTK e IMU.	<ul style="list-style-type: none"> - Em linha reta: <ul style="list-style-type: none"> máximo: até 0,01 m - Em manobra: <ul style="list-style-type: none"> máximo: até 0,025 m
(WANG <i>et al.</i> , 2021)	Trator New Holland T1404 com GNSS-RTK. Não entrou na avaliação do erro lateral o trecho de manobra.	<ul style="list-style-type: none"> - Estrada de concreto (método PP): <ul style="list-style-type: none"> média: 0,051 m RMSE: 0,313 m - Estrada de concreto (método desenvolvido): <ul style="list-style-type: none"> média: 0,005 m RMSE: 0,02 m - Área Agrícola (método PP): <ul style="list-style-type: none"> média: -0,143 m RMSE: 0,479 m - Área Agrícola (método desenvolvido): <ul style="list-style-type: none"> média: 0,032 m RMSE: 0,037 m

<p>(YAN <i>et al.</i>, 2022)</p>	<p>Turtlebot 2 - baseado em ROS, utilizando câmera Intel Realsense tracking camera T265, IMU e <i>encoders</i>. Voltado para casas de vegetação.</p>	<p>- Teste 3 - Casa de Vegetação (VIO): desvio padrão: 0,2996 m RMSE: 0,7295 m</p> <p>- Teste 3 - Casa de Vegetação (fusão): desvio padrão: 0,0460 m RMSE: 0,1140 m</p> <p>- Teste 5 - Área Externa (VIO): desvio padrão: 0,5362 m RMSE: 1,0631 m</p> <p>- Teste 5 - Área Externa (fusão): desvio padrão: 0,3758 m RMSE: 0,6067 m</p>
<p>(ABDELHAFID <i>et al.</i>, 2022)</p>	<p>Plataforma robótica diferencial com navegação por câmera, com sistema de pulverização. Teste simulado em piso acimentado simulando gotejamento em linha verde pintada.</p>	<p>- Sistema Autônomo (caminho senoidal): média: 0,02122 m desvio padrão: 0,09320 m</p> <p>- Operador Humano (caminho senoidal): média: 0,00785 m desvio padrão: 0,06437 m</p>