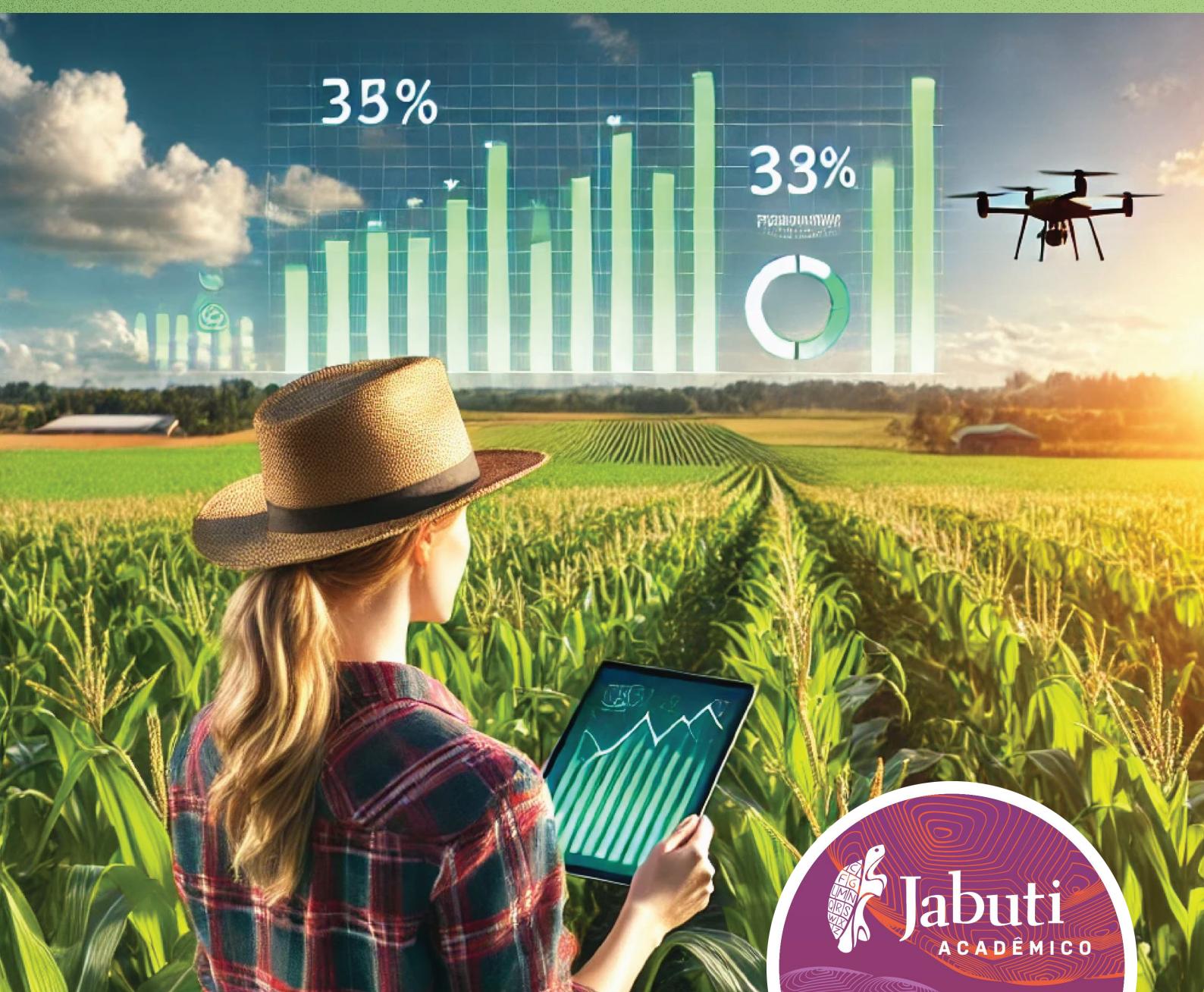


# Agricultura de Precisão: Um Novo Olhar na Era Digital

editores Luís Henrique Bassoi | Alberto Carlos de Campos Bernardi | Carlos Manoel Pedro Vaz  
João Leonardo Fernandes Pires | Luciano Gebler | Lúcio André de Castro Jorge | Ricardo Yassushi Inamasu



**EDITORIA CUBO**

R. Conde do Pinhal, 1762 - Centro  
São Carlos - SP, 13560-648  
Telefone: (16) 3509-7800  
[www.editoracubo.com.br](http://www.editoracubo.com.br)

As opiniões, conceitos, afirmações e conteúdo desta publicação são de exclusiva e de inteira responsabilidade dos autores.

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Agricultura de precisão [livro eletrônico] : um novo olhar na era digital / editores Luís Henrique Bassoi...[et al.]. -- São Carlos, SP : Cubo Multimídia, 2024.  
PDF

Vários autores.  
Outros editores: Alberto Carlos de Campos Bernardi, Carlos Manoel Pedro Vaz, João Leonardo Fernandes Pires, Luciano Gebler, Lúcio André de Castro Jorge, Ricardo Yassushi Inamasu.  
Bibliografia.  
ISBN 978-65-86819-38-0

1. Agricultura 2. Agricultura de precisão  
3. Agropecuária 4. Automação 5. Dados - Análise  
6. Engenharia agrícola 7. Inovações tecnológicas  
I. Bassoi, Luis Henrique. II. Bernardi, Alberto Carlos de Campos. III. Vaz, Carlos Manoel Pedro. IV. Pires, João Leonardo Fernandes. V. Gebler, Luciano. VI. Jorge, Lúcio André de Castro. VII. Inamasu, Ricardo Yassushi.

24-239267

CDD-631.3

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Agricultura de precisão 631.3

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380

Para versão eletrônica, acesse:  
<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000001>

Este livro foi produzido por

**editora cubo**  
soluções para o universo acadêmico

---

© 2024 Os Editores. Todos os direitos reservados.



Este é um livro publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

# Mirã 2.0 – Plataforma Robótica Agrícola para monitoramento das condições do solo em culturas de soja no Brasil

7

Mirã 2.0 – Agricultural Robotic Platform for monitoring soil condition of soya crops in Brazil

Andres Eduardo Baquero Velasquez<sup>1</sup>, Vitor Akihiro Hisano Higuti<sup>2</sup>, Mateus Valverde Gasparino<sup>3</sup>, Leonardo Bonacini<sup>4</sup>, Daniel Varela Magalhães<sup>5</sup>, Marcelo Becker<sup>6</sup>, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Engenheiro Sênior de Robótica Autônoma, Earthsense Inc., Champaign (IL), USA, andres@earthsense.co

<sup>2</sup>Engenheiro Chefe de Robótica Autônoma, Earthsense Inc., Champaign (IL), USA, akihiro@earthsense.co

<sup>3</sup>Doutorando, Universidade de Illinois em Urbana, Champaign, Urbana (IL), USA, mvalve@illinois.edu

<sup>4</sup>Engehneiro Sênior de Robótica Autônoma, Earthsense, Inc., Champaing (IL), USA, leo@earthsense.co

<sup>5</sup>Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, daniel@sc.usp.br

<sup>6</sup>Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, becker@sc.usp.br

<sup>7</sup>Pesquisadora, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, debora.milori@embrapa.br

## RESUMO

A soja é uma das culturas de maior importância para o Brasil. Por causa disso, tem sido foco de inúmeras pesquisas nos últimos anos. Esta cultura possui algumas doenças que geram grandes perdas financeiras para os agricultores, como, por exemplo, ferrugem, oídio, antracnose e seca da haste e da vagem. Essas doenças podem afetar quase que todo o ciclo de vida do cultivo de soja. Um dos objetivos da agricultura de precisão é a identificação de pragas e doenças para reduzir seu impacto no desenvolvimento das plantas. Fazer o monitoramento do cultivo utilizando apenas força de trabalho humana é inviável devido à grande quantidade de tempo necessária e à baixa precisão. Por causa disso, um cenário promissor é a utilização de um robô móvel com rodas para fazer monitoramento dos campos de soja. Com base neste cenário, o presente trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento da plataforma Mirã 2.0, a qual deve permitir a aquisição de dados em campo para monitorar o solo dos cultivos de soja, utilizando *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. A plataforma foi projetada e construída considerando as características do cultivo de soja e os desafios da navegação nos ambientes agrícolas. Desta forma, este robô reduz os esforços para realizar o monitoramento do solo em cultivos de soja.

**Palavras-chave:** agricultura de precisão; robótica móvel; monitoramento do solo.

## ABSTRACT

Soya is one of Brazil's most important crops. Because of it, it has been the focus of countless research projects in recent years. This crop has a number of diseases (i.e. rust, powdery mildew, anthracnose and stem and pod dryness) that generate major financial losses for the farmers. These diseases can affect almost the entire life cycle of soya crop. One of the precision agriculture goals is the identification of pests and diseases in order to reduce their impact on plant development. Monitoring crops using only human labor is not feasible due to the large amount of time required and the low level of precision. Because of this, a promising scenario is the use of wheeled mobile robots to monitor the soya fields. Based on this scenario, the aim of this work is to present the development of the Mirã 2.0 platform, which should allow the acquisition of data in the field to be used to monitor the soil of soya crops, using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. This platform was designed and built taking into account the main characteristics of the soya crops and the challenges navigation in agricultural environments. In this way, this robot reduces efforts to perform soil monitoring in soya crops.

**Keywords:** precision agriculture; mobile robotics; soil monitoring.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000078>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial gera a necessidade do aumento da produção de alimentos, um fator que até hoje tem sido suprido, mas este cenário pode mudar ao longo dos anos (Valin et al., 2014). Este fator fez com que a Agricultura de Precisão (AP) se tornasse popular, pois essa tem por objetivo gerir informações de variabilidade de culturas agrícolas no tempo e no espaço (Cisternas et al., 2020).

Neste contexto, a utilização de robôs na agricultura tem crescido nos últimos anos (Reina et al., 2016). Segundo Yaghoubi et al. (2013), o número de robôs agrícolas está aumentando ao longo dos anos e podem ser utilizados em várias etapas, como, por exemplo, plantio, controle de pragas e colheita.

Apesar de existirem vários robôs sendo desenvolvidos no mundo, apenas alguns são adotados na prática (Bechar; Vigneault, 2016; Sparrow; Howard, 2021). Isso acontece porque as operações em campo são complexas e várias questões devem ser levadas em consideração para permitir que o robô atue neste cenário, na análise de custo-benefício (Pedersen et al., 2017).

Os desafios de uma plataforma robótica podem ser divididos em duas categorias: universais –referentes às características que robôs em outras aplicações podem se deparar, como identificação de obstáculos e planejamento de trajetória – e específicas – que estão relacionadas à natureza do cultivo, como identificação de cultivo e pragas (Fountas et al., 2020). Estes desafios ocorrem porque as plantações não são uniformes (Yaghoubi et al., 2013), e na maioria dos casos são semiestruturadas ou não estruturadas, com presença de objetos estáticos e dinâmicos (Reina et al., 2016).

Para essas plataformas, as habilidades mais importantes são navegação, detecção, ação e mapeamento

(Cheein; Carelli, 2013). Por causa disso, os principais sensores utilizados para esses robôs são câmera, LiDAR (Detecção de Luz e Alcance), GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), UMI (Unidade de Medição Inercial) e encoders (Fountas et al., 2020). Dentre esses sensores, GNSS podem permitir uma navegação precisa, contudo não garantem que a plataforma está navegando em cima do cultivo ou que há um objeto na trajetória do robô (Higuti et al., 2019). Para isso, são usados sensores do tipo câmera e LiDAR, porém câmeras são afetadas por problemas de variação de iluminação. Hiremath et al. (2014) afirmam que LiDAR são mais confiáveis que câmeras para o ambiente agrícola.

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de uma plataforma robótica para monitoramento do solo em culturas de soja. A cultura de soja representa 57,19% (35,8 milhões de hectares) da área cultivada de cereais, leguminosas e oleaginosas em 2017/2018 (CONAB, 2019), e 49,25% (115,3 milhões de toneladas) da produção total de cereais, leguminosas e oleaginosas em 2018/2019 (CONAB, 2019).

## 2 MIRÃ 2.0 – DESCRIÇÃO GERAL

Mirã 2.0 (Figura 1a) é uma plataforma robótica com esterçamento e propulsão nas 4 rodas (4WDS) desenvolvida para monitorar características do solo em culturas de soja. Um sistema LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) é utilizado para queimar uma amostra do solo (uma pequena porção do terreno), gerando um plasma que é lido por um sistema composto por um telescópio e um espectrômetro, para gerar um gráfico com as informações das características da amostra (Larenas, et al., 2016a, 2016b, 2016c). Esta pla-



Figura 1. a) CAD do Mirã 2.0, b) Mirã 2.0.

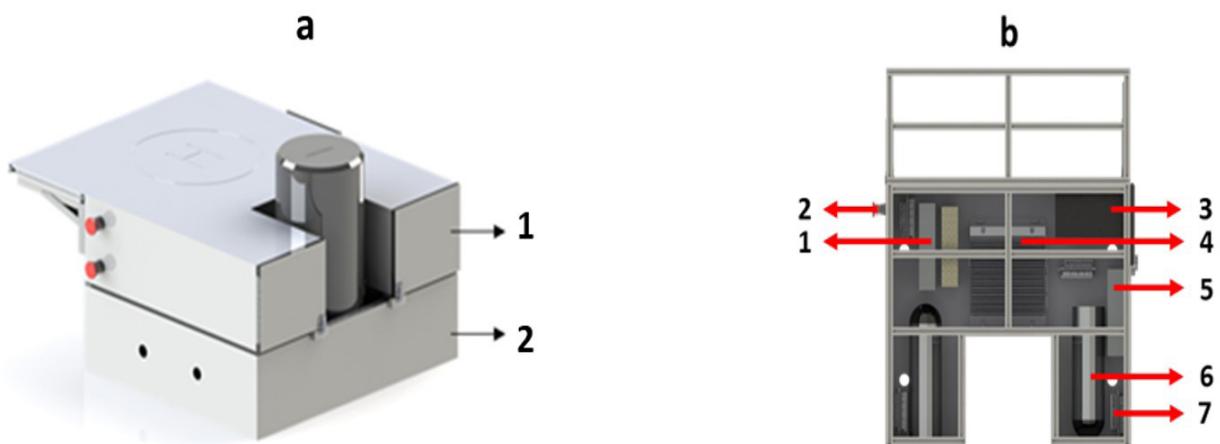
taforma foi desenhada e construída pelo Laboratório de Robótica Móvel (LabRoM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), com a Embrapa instrumentação. As dimensões do Mirã 2.0 são 1.1 m x 1.1 m x 1.2 m (comprimento, largura e altura), e foi desenvolvida para navegar usando três diferentes trilhas da cultura, porque o sistema LIBS precisa de partes sem plantas do terreno para fazer as análises. A Figura 1b apresenta o robô em uma cultura de soja usando três trilhas consecutivas para sua navegação.

A estrutura do robô está composta de 4 partes: 1) corpo central, 2) sistema de suspensão, 3) módulo de esterçamento, 4) módulo de propulsão. O corpo central do robô é composto de duas caixas feitas de perfil de alumínio (0,040 m x 0,020 m) com dimensões de 0,75 m x 0,646 m x 0,27 m (largura, comprimento, altura). As partes laterais e frontais de cada caixa foram cobertas com folhas de polietileno grosso, enquanto as partes inferiores foram cobertas com folhas de alumínio grosso, de 0,007 m, para suportar e fixar os componentes embarcados neelas. A parte superior da caixa inferior não foi coberta, para dar acesso aos componentes do sistema LIBS, e sua parte traseira foi coberta com uma folha de alumínio para suportar o sistema de balanço do sistema de suspensão. A parte superior da caixa superior foi coberta com uma folha de polietileno grosso, que vai ser usada como heliporto para futuras pesquisas relacionadas ao trabalho cooperativo do Mirã com drones. Adicionalmente, na parte traseira da caixa superior foi coberta com uma folha de polietileno. A Figura 2a apresenta o corpo central do robô, e a Figura 2b mostra a distribuição dos componentes eletrônicos dentro da caixa superior.

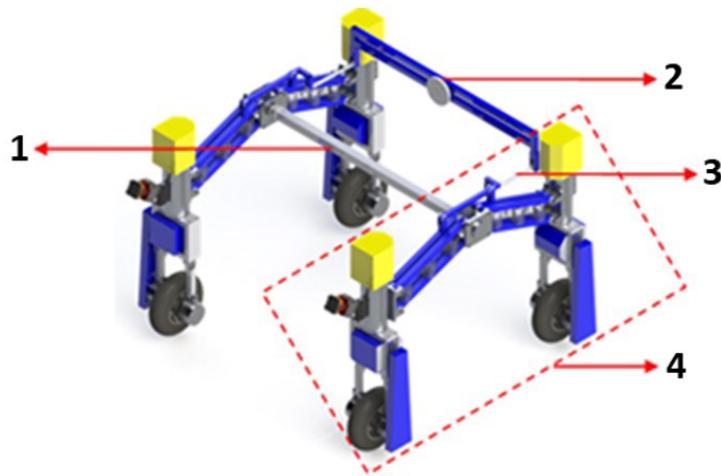
### 3 SUSPENSÃO

O sistema de suspensão do Mirã 2.0 foi desenhado para se adaptar (de forma passiva) às irregularidades do terreno em culturas de soja. Para cumprir esse objetivo, o sistema de suspensão está dividido em três partes principais: 1) barra de pivô (parte 1 da Figura 3), 2) dois mecanismos de cinco barras (parte 4 da Figura 3), 3) o eixo principal do robô (parte 1 da Figura 3).

Cada mecanismo de cinco barras está composto por dois módulos de rodas e dois conjuntos de tubos quadrados (barras azuis da Figura 3). Quando uma irregularidade do terreno faz com que uma das rodas se mexa para cima ou para baixo, o mecanismo de cinco barras move-se adequadamente para gerar o movimento oposto na outra roda. Isso garante que a roda oposta não perca o contato com o solo. Adicionalmente, este movimento é transmitido de um lado para o outro mediante a barra pivô posicionada na parte traseira do robô (parte 2 da Figura 3), com o objetivo de ajustar o mecanismo de cinco barras do lado oposto para garantir o contato da maioria das rodas com o solo. Todo esse movimento tenta garantir que o corpo principal tenha a menor inclinação possível com relação ao chão (corpo principal paralelo ao chão). Adicionalmente às três partes principais da suspensão, acrescentaram-se duas barras hexagonais (parte 3 da Figura 3), que ajudam como *link* entre os mecanismos cinco barras e a barra pivô, e um conjunto de molas (posicionadas no meio dos tubos quadrados azuis) que permitem retornar o sistema de suspensão a seu estado de repouso quando o robô tenha passado sobre a irregularidade. Cada mola foi projetada para suportar 20 kg e foram usadas 12 molas em cada lado do robô. A Figura 3 apresenta as partes do sistema de suspensão do Mirã 2.0.



**Figura 2.** a) Corpo central do Mirã 2.0 composto pela caixa superior (1) e pela caixa inferior (2), b) Distribuição dos componentes eletrônicos dentro da caixa superior (1 – reguladores de tensão, 2 – botão de emergência, 3 – bateria para o computador, 4 – computador principal, 5 – regulador de tensão para o computador, 6 – bateria para os motores e as placas EPOS e ESCON, 7 – placas ESCON).



**Figura 3.** Sistema de suspensão do Mirã 2.0.

#### 4 MÓDULO DA RODA

O Mirã 2.0 possui quatro módulos de roda que podem ser divididos em duas partes: direção e propulsão. A direção é composta por sete partes (Figura 4a): 1) caixa de proteção do motor de direção, 2) motor de direção, 3) eixo de direção, 4) dois rolamentos de esferas de contato angular, 5) camisa de alumínio, 6) suporte LiDAR, e 7) mecanismo de ligação do módulo de roda com o sistema de suspensão.

Para transmitir a rotação do motor de direção, um lado do eixo de direção é acoplado ao eixo do redutor do motor de direção, e o outro é acoplado à parte de propulsão do módulo de roda (Figura 4b). O eixo da direção passa por dois rolamentos de esferas de contato angular (referência 7206), que são fixados na camisa de alumínio para permitir que a rotação do motor da direção seja transmitida para a parte de propulsão, do módulo da roda, sem mover a camisa de alumínio (parte fixa do módulo da roda). Além disso, o suporte LiDAR e o mecanismo para conectar o módulo da roda às barras paralelas duplas do sistema de suspensão estão na parte dianteira e traseira da camisa de alumínio. Por fim, na parte superior

da direção, encontra-se uma caixa amarela de proteção para o motor de direção.

A parte de propulsão do módulo roda (Figura 4b) é composta por oito partes: 1) quadro de alumínio, 2) motor propulsor, 3) caixa de proteção para motor propulsor, 4) sistema de polias, 5) eixo roda, 6) duas flanges de roda, 7) pneu com câmara de ar, e 8-) caixa de proteção do sistema de polias. A barra superior do quadro de alumínio é utilizada para acoplar a parte de propulsão e o eixo de direção, e sua barra inferior é acoplada ao volante. Dentro do quadro de alumínio estão localizados o motor de propulsão e a caixa de proteção.

A base da roda é composta por uma barra de alumínio conectada em suas extremidades à flange da roda. Além disso, existem dois rolamentos de esferas (referência 6005-zz) dentro da flange da roda, para permitir o movimento desta. Finalmente, a rotação do motor de propulsão é transmitida ao eixo da roda por duas polias e uma correia sincronizadora (sistema de polias). A primeira polia tem 10 dentes e é acoplada ao redutor do motor de propulsão, enquanto a segunda polia tem 30 dentes e é acoplada ao eixo da roda. Como as duas polias têm número de dentes diferentes e a polia



**Figura 4.** a) Componentes de direção do módulo das rodas, b) Componentes da propulsão do módulo das rodas.

da roda tem o maior número de dentes, então há uma relação de transmissão de 1:3. Esta relação faz com que o torque no eixo da roda seja o triplo do torque do motor de propulsão, mas a velocidade do motor de propulsão no eixo do redutor é reduzida pela terceira parte.

## 5 DISPOSITIVOS EMBARCADOS E ATUADORES

O Mirã 2.0 possui oito motores EC (Eletronicamente Comutados) 90 FLAT (referência: 429271) fabricados pela Maxon Motor. Quatro desses são utilizados para o conjunto de propulsão, e os demais são para o conjunto de direção. A tensão nominal é de 36 V, a corrente nominal (corrente contínua máxima) é de 4,76 A, a velocidade nominal é de 2.510 rpm (rotação por minuto) e o torque nominal é de 560 mNm (Maxon Motor, 2017a). Esses motores possuem dois eixos de saída (dianteiro e traseiro). O eixo dianteiro é acoplado a um encoder incremental MILE (referência: 453234), e o outro é acoplado a um redutor planetário GP 52C (referência: 223086), que possui redução igual a 21:1 e rendimento máximo igual a 83% (Maxon Motor,

2018b). O encoder incremental possui dois canais e 512 pulsos por volta (Maxon Motor, 2017b).

Para controlar os motores do sistema de propulsão são utilizadas quatro placas ESCON 50/5. De acordo com Maxon Motor (2018a), ESCON é poderoso servocontrolador PWM (Pulse Width Module) de quatro quadrantes de tamanho pequeno para o controle eficiente de motores CC (Corrente Contínua) ativados por ímã permanente. Esta placa pode operar motores DC e EC e possui três modos de operação: controlador de corrente, controlador de velocidade (malha fechada) e controlador de velocidade (malha aberta).

Para controlar os motores do sistema de direção são utilizadas quatro placas EPOS2 24/5. A placa EPOS2 24/5 é um controlador de posicionamento digital de construção modular, é adequado para motores EC e DC e possui 10 modos de operação, entre os quais está o modo de posição (Maxon Motor, 2017c). A comunicação entre os dispositivos de propulsão e o sistema de direção é mostrada na Figura 5.

A comunicação entre o computador e as placas EPOS2 é feita via USB (*Universal Serial Bus*). O computador en-

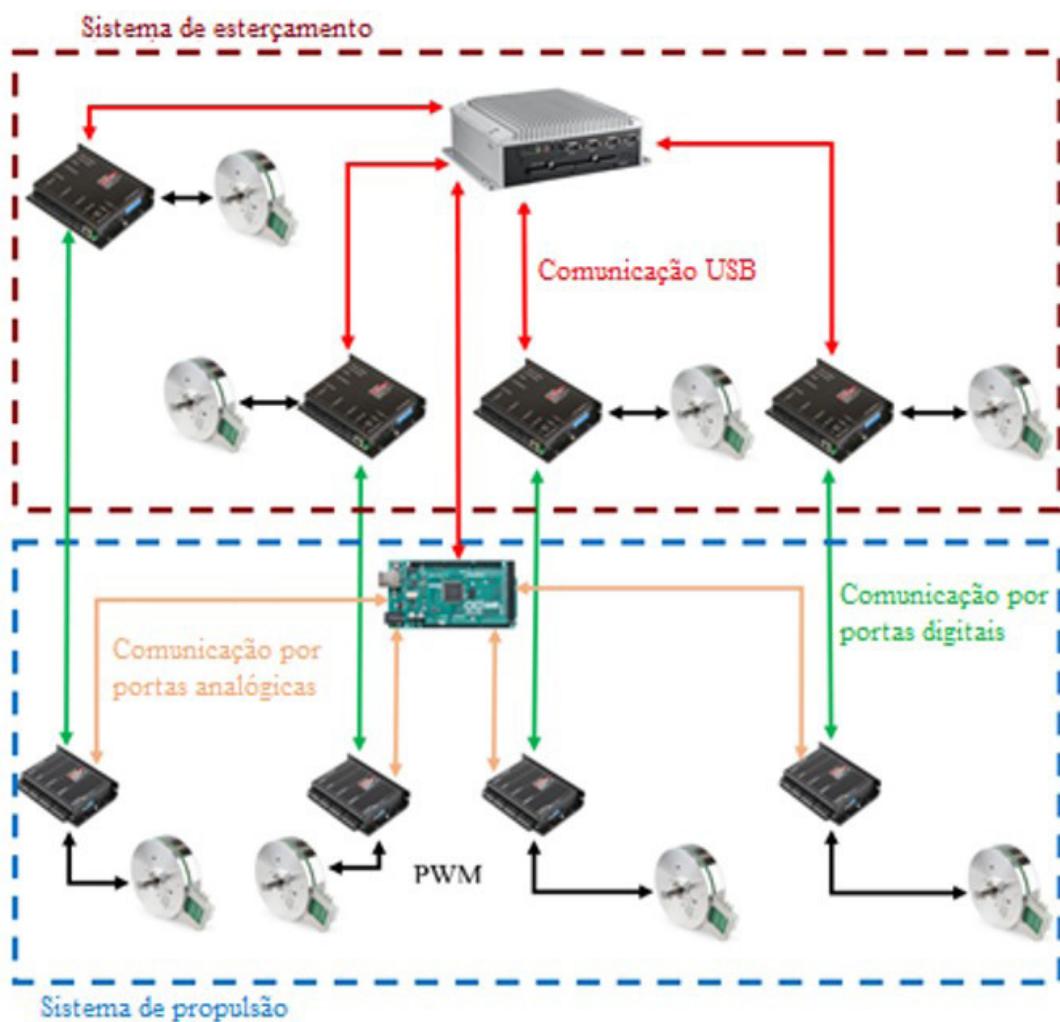


Figura 5. Comunicação entre sistema de direção e sistemas de propulsão.

via à EPOS2 a posição desejada do motor de direção e os valores para os sinais de habilitar e direção. Para transmitir esses sinais para a placa ESCON, duas portas digitais da ESCON são conectadas a duas portas lógicas do EPOS2. Estas portas são utilizadas para indicar quando o motor de propulsão deve partir e a direção de sua rotação. Se o sinal de habilitar for 1 (nível lógico alto), o motor inicia sua rotação, caso contrário (habilitar igual a 0) o motor para. Quando a direção é 1 (nível lógico alto), o motor gira no sentido horário, caso contrário (direção igual a 0) o motor gira no sentido anti-horário. Além dos sinais de habilitar e direção, um sinal PWM é utilizado para indicar a velocidade do motor de propulsão. Este sinal é gerado pela placa Arduino e transmitido à ESCON por uma porta analógica. Além disso, a placa ESCON e EPOS2 iniciam o movimento dos motores de propulsão e direção utilizando um sinal PWM para cada motor. Por fim, o computador envia para a placa Arduino Mega 2560 o valor do sinal PWM a ser enviado à ESCON, e este recebe do Arduino o valor de velocidade ou corrente do motor de propulsão. Além dos motores, das placas ESCON e EPOS2, e do Arduino, o Mirã 2.0 possui outros dispositivos embarcados para sua navegação. O computador do Mirã 2.0 é um ARK-3510 fabricado pela Advantech: um computador indus-

trial com processador Intel i7, 6GB de RAM, 500GB de disco rígido e seis portas USB. O sistema operacional é o Linux Ubuntu 14.04. Além disso, a plataforma robótica possui uma Unidade de Medição Inercial MPU9150 para medir os ângulos de Euler (arfagem, rolamento e guinada), dois sensores 2D LiDAR cujo modelo comercial é o UTM-30LX (fabricado pela empresa Hokuyo) e um receptor GPS cujo modelo comercial é PIKSI, fabricado pela Swift Navigation. Todos os dispositivos embarcados (exceto as placas e os motores ESCON) são conectados ao computador ARK-3510, conforme mostrado na Figura 6.

Como as quatro placas EPOS2, Arduino, UMI, GPS e os dois sensores LiDAR estão conectados ao ARK-3510 por portas USB, foi necessário o uso de um *hub* USB, pois o computador possui apenas seis portas USB. Por fim, um roteador sem fio foi embutido para acessar o computador remotamente. Seu modelo comercial é o AC1350, fabricado pela TP-LINK.

## 6 POSIÇÃO DO CENTRO DE MASSA DO ROBÔ

A posição do centro de massa do robô foi determinada pelo método apresentado em Velasquez (2015) e Jazar (2018). De acordo com este método, a posi-

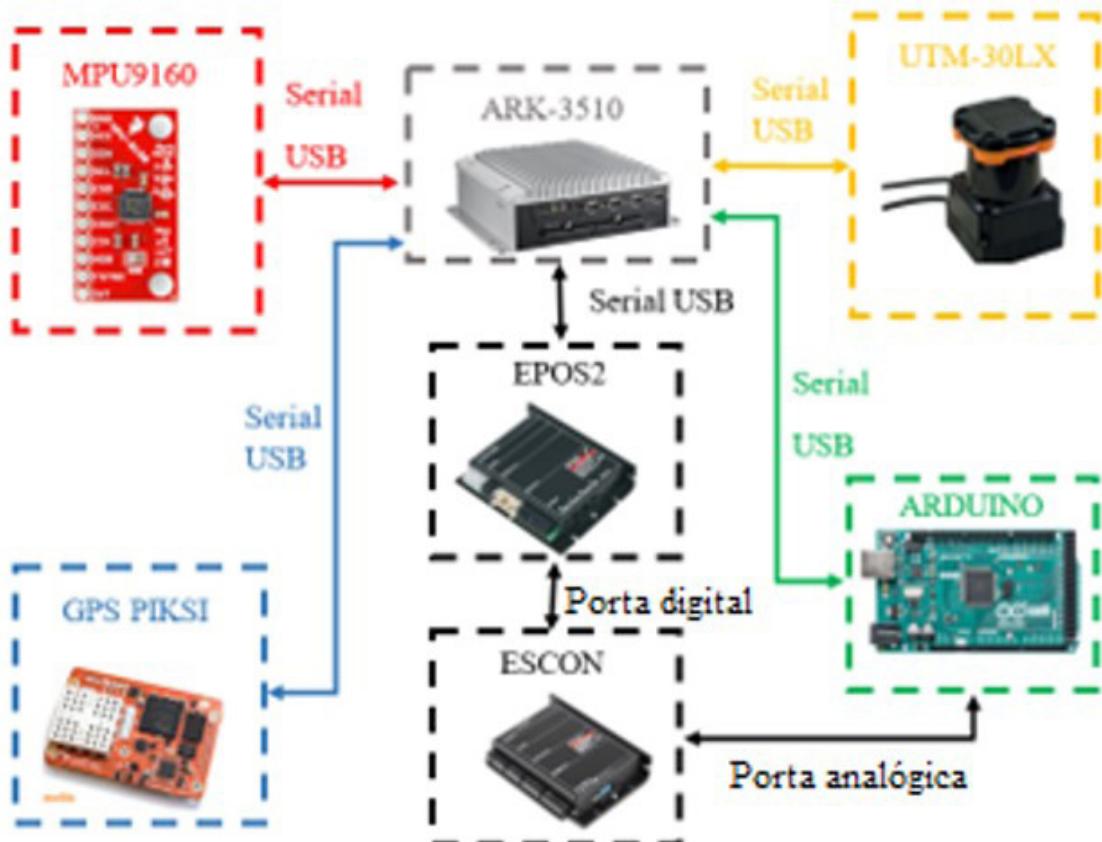


Figura 6. Comunicação entre dispositivos embarcados da plataforma robótica.

ção longitudinal do centro de massa pode ser calculada medindo a força sob as rodas dianteiras ou traseiras do robô quando o robô está estacionado em um terreno plano. Além disso, a posição lateral do centro de massa pode ser determinada medindo a força sob as rodas do lado direito ou esquerdo do robô quando o robô está estacionado em um terreno plano. Finalmente, a altura do centro de massa é calculada medindo a força sob as rodas dianteiras quando o robô está estacionado em um terreno inclinado. As posições do centro de massa do Mirã 2.0 estão resumidas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Nestas tabelas, a1 é a distância entre o centro de massa e o eixo dianteiro do robô; a2 é a distância entre o centro de massa e o eixo traseiro do robô; b1 é a distância lateral entre o centro de massa e as rodas do lado esquerdo; b2 é a distância entre o centro de massa e as rodas do lado direito; h é a altura do centro de massa.

Conforme as Tabelas 1, 2 e 3, observa-se que a parte traseira da plataforma é mais pesada que a parte dianteira em razão de a posição longitudinal do centro de massa estar mais próxima do eixo traseiro do que do eixo dianteiro. Embora todos os cuidados possíveis tenham sido tomados para fazer uma medição precisa, a Tabela 1 revela que a posição lateral do centro de massa foi diferente quando calculada com re-

lação ao lado direito e quando calculada com relação ao lado esquerdo. Isso indica que o centro de massa nesse tipo de plataforma não tem uma posição fixa.

## 7 TORQUE DA RODA E MÁXIMA INCLINAÇÃO

Como o sistema de propulsão de cada roda é composto por roda, conjunto de duas polias movidas por uma correia sincronizadora e motor com redutor, então o torque gerado pela roda depende do sistema de transmissão.

Para calcular o torque da roda e sua velocidade máxima, é necessário conhecer o torque no eixo do redutor (Equação 1). Como o torque no eixo do motor é igual a 560 mN.m e este está conectado ao redutor que tem redução igual a 21:1 e sua eficiência máxima é de 83%, então o torque no eixo do redutor pode ser calculado conforme a Equação 1.

$$\tau_{eixo} = \tau_{motor} \times 21 \times 0.83 = 9,76 \text{ N.m} \quad (1)$$

Como a rotação do motor de propulsão é transmitida ao eixo da roda por duas polias e uma correia sincronizadora, e sua relação de transmissão é 1:3, então o torque no eixo da roda é três vezes o torque do motor de propulsão (29,28 N.m). Para calcular a força gerada pelo motor de propulsão na roda, utiliza-se a Equação 2.

$$F_{roda} (N) = \frac{3 \times \tau_{eixo}}{r_{roda}} = \frac{3 \times 9,76 \text{ Nm}}{0,125 \text{ m}} = 234,24 \text{ N} \quad (2)$$

Nessa,  $r_{roda}$  é o raio da roda (0,125 m). De acordo com a Equação 2, a maior força gerada por roda é 234,24 N. Como a plataforma robótica tem quatro rodas, sua maior força de propulsão é 936,96 N. Como o peso do robô é 125,8 kg (valor crítico para o peso do robô) e a força de propulsão é igual a 936,96 N (maior força de propulsão), então a plataforma robótica pode navegar em um terreno com inclinação inferior a 49,46° (ver Equação 3).

$$\theta_{inclinação} (\circ) = \left( \frac{4 \times F_{roda}}{m \times g} \right) = \left( \frac{936.96 \text{ N}}{125.8 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) = 49,46^\circ \quad (3)$$

Na Equação 3, m é a massa do robô e g é a gravidade. Segundo Höfig e Araujo-Junior (2015), “[...] as classes de declividade do solo foram classificadas de acordo com o potencial de mecanização em extremamente apto (0 a 5%), muito apto (5,1 a 10%), apto (10,1 a 15%), moderadamente capaz (15,1 -20%) e não recomendado (> 20%)”. Assim, a plataforma ro-

**Tabela 1.** Posição lateral do centro de massa do Mirã 2.0.

Ponto de Medição	Posição Lateral (m)
Forças medidas sob as rodas do lado direito	b1 = 0,452 ± 0,0014 b2 = 0,447 ± 0,0017
Forças medidas sob as rodas do lado esquerdo	b1 = 0,437 ± 0,0029 b2 = 0,462 ± 0,0027

**Tabela 2.** Posição longitudinal do centro de massa do Mirã 2.0.

Ponto de Medição	Posição longitudinal (m)
Forças medidas sob as rodas dianteiras	a1 = 0,5 ± 0,0015 a2 = 0,4 ± 0,0017
Forças medidas sob as rodas traseiras	a1 = 0,5 ± 0,0015 a2 = 0,4 ± 0,0011

**Tabela 3.** Altura do centro de massa do Mirã 2.0.

Ponto de Medição	Altura (m)
Forças medidas sob as rodas dianteiras	h = 69,83 ± 0,0014

bótica proposta pode navegar em lavouras com declives recomendados e pode navegar em algumas lavouras com declives não recomendados (>20%) (Higuti et al., 2017).

## 8 SISTEMA ELÉTRICO DO ROBÔ

O sistema elétrico da plataforma robótica é composto por duas baterias de lítio de 36 V e 10 Ah, uma bateria de lítio de 36 V e 6,75 Ah, dois reguladores de tensão cuja referência comercial é RSD-300C-24 e um regulador de tensão cuja referência comercial é RSD-150C-12.

A primeira bateria de 36 V e 10 Ah é utilizada para fornecer a tensão e corrente das placas EPOS2 e motores de direção. Esta bateria é conectada a um botão de emergência e a um fusível para fornecer um sistema de segurança para parada de emergência do robô. Além disso, o botão está conectado aos reguladores de tensão (RDS-300C-24). Estes reguladores são utilizados para reduzir a tensão da bateria de 36 V para 24 V, pois a tensão máxima de alimentação da placa EPOS2 é 24 V. Duas placas EPOS2 e dois motores são conectados em cada regulador de tensão (RDS-300C-24).

A outra bateria de 36 V e 10 Ah é utilizada para fornecer a tensão e corrente das placas ESCON e motores de propulsão. Esta bateria é conectada a um segundo botão de emergência para fornecer um sistema de segurança para parada de emergência do robô. Como os sistemas de potência ESCON suportam uma tensão de alimentação superior a 36 V, não é necessário o uso de regulador de tensão, e os ESCON são conectados ao segundo botão de emergência. Por fim, a bateria de 36 V e 6,75 Ah é utilizada para fornecer a tensão e corrente para os demais dispositivos (Arduino, computador e LiDAR). Para isso, esta bateria é conectada ao regulador de tensão RSD-150C-12 para reduzir a tensão de 36 V para 12 V.

Para determinar a autonomia elétrica do robô, o consumo de energia de todos os sensores e dispositi-

tivos embarcados foi calculado utilizando a Equação 4 e as informações apresentadas na Tabela 4.

$$P(W) = V \times I \quad (4)$$

Conforme a Tabela 4, o consumo de energia de um motor de propulsão com placa ESCON respectivamente é de 171,55 W. Como cada bateria de 36 V e 10 Ah fornece 360 Wh e está conectada a dois conjuntos de motor de propulsão com placa ESCON, então a autonomia desta bateria é de aproximadamente 63 minutos. Já o conjunto do motor de direção e sua placa EPOS2 tem um consumo de energia igual a 114,65 W, e como a segunda bateria também fornece 360 Wh, então a autonomia elétrica é de aproximadamente 82 minutos. O consumo de energia da bateria usada para alimentar os demais dispositivos (GPS, UMI, LiDAR e PC) é de 111 Wh e autonomia elétrica de aproximadamente 92 minutos. Para determinar a autonomia elétrica do robô, é utilizado o menor valor da autonomia elétrica das baterias embutidas. Para este caso, a autonomia elétrica do robô é de aproximadamente 63 minutos.

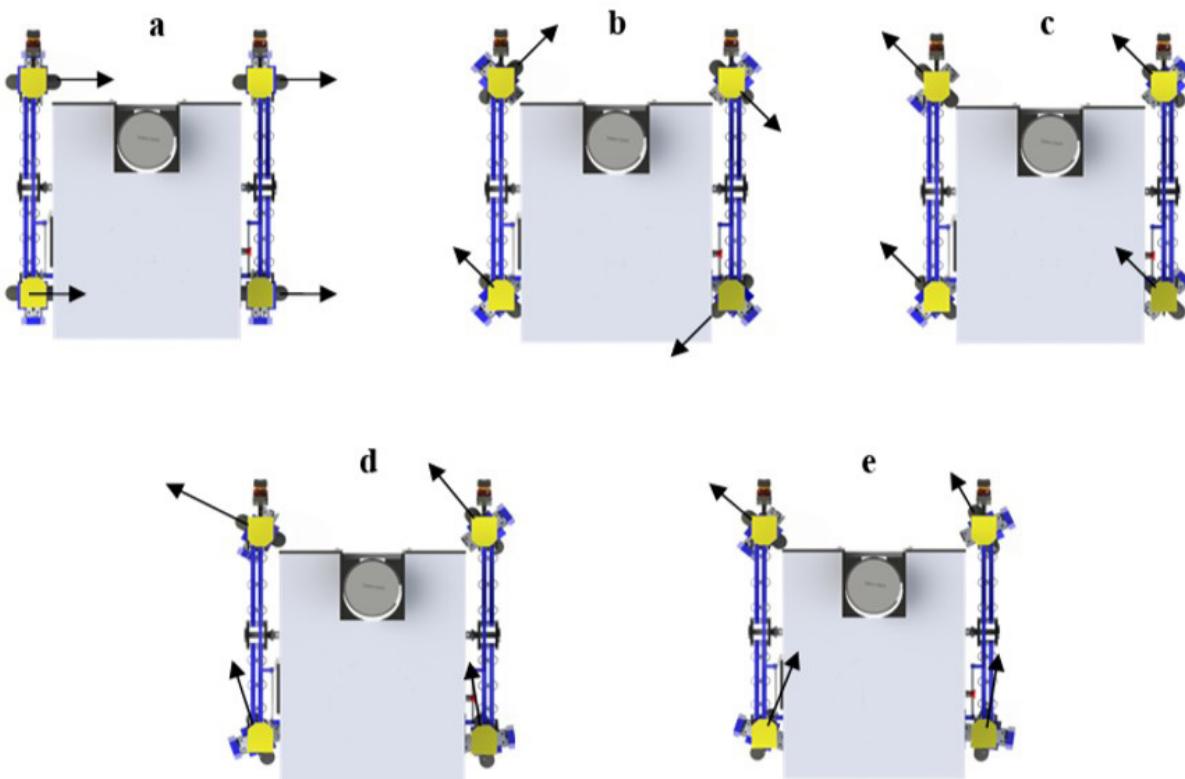
## 9 MODO DE NAVEGAÇÃO DO ROBÔ

O Mirã 2.0 possui cinco modos de navegação: 1) movimento lateral; 2) movimento diagonal; 3) rotação em seu eixo z; 4) Ackerman positivo e 5) Ackerman negativo.

O segundo modo de navegação do robô é a rotação em seu eixo z (Figura 7b). Para isso, a roda dianteira do lado esquerdo e a roda traseira do lado direito são esterçadas a -45° (direcionamento para o lado direito do robô). Além disso, a roda dianteira do lado direito e a roda traseira do lado esquerdo estão esterçadas a 45° (direcionando para o lado esquerdo do robô). Para gerar uma rotação do robô em direção ao seu lado direito, as rodas do lado esquerdo do robô movem-se para a frente e as outras rodas movem-

**Tabela 4.** Potência consumida por cada componente do robô.

Componente	Tensão (V)	Corrente Nominal (A)	Pontência Consumida (W)
UTM-30LX	12	1,00	12,00
ARK 3510	12	5,00	60,00
PISKI GPS	5	0,50	2,50
MPU-9150	5	0,10	0,50
Motores de propulsão + ESCON 50/5	36	4,86	171,55
Motores de esterçamento + EPOS2 24/5	24	4,88	114,65



**Figura 7.** Modos de navegação do Mirã 2.0. a) Movimento lateral, b) Rotação sobre seu eixo z, c) Movimento diagonal, e) Ackerman positivo e f) Ackerman negativo.

-se para trás. Para gerar a rotação oposta, a rotação de cada roda é invertida. O deslocamento diagonal é o terceiro modo de navegação (Figura 7c). Neste modo, todas as rodas esterçam a 45° para gerar um deslocamento diagonal do robô em direção ao seu lado esquerdo ou a -45° para gerar o deslocamento diagonal oposto. O sentido de rotação das quatro rodas é o mesmo e depende do movimento do robô. Os dois últimos modos de navegação do robô são o movimento Ackerman negativo (Figura 7d) e positivo (Figura 7e).

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A plataforma Mirã 2.0 foi projetada e construída para navegar em terreno agrícola, mais especificamente cultura de soja, com o objetivo de monitorar, utilizando LIBS, o solo, facilitando esta tarefa da AP.

Esta plataforma foi desenvolvida baseando-se nas características do cultivo de soja. Além disso, como o Mirã 2.0 possui GNSS, torna-se possível fazer a geolocalização de objeto, que é uma informação importante para a área de AP.

Os cinco modos de navegação foram utilizados para validar a movimentação da plataforma no cultivo de soja. Tais modos mostraram um bom desempenho na relação entre a navegação manual e o cultivo. Desta

forma, pode-se viabilizar a implementação da navegação autônoma da plataforma Mirã 2.0

O uso desse tipo de plataforma robótica vai permitir reduzir o tempo e esforço necessário para o monitoramento de culturas de soja. Por exemplo, o tempo atual para obter os resultados da análise do solo demora alguns dias, mas utilizando o Mirã 2.0 e o sistema LIBS, o tempo será de alguns segundos.

## AGRADECIMENTOS

À Embrapa, à Escola de Engenharia de São Carlos, às agências de fomento Capes, CNPq e Fapesp, e ao Lanaf (CNPq 440226/2021-0 e Embrapa 20.24.00.059.00.00).

## REFERÊNCIAS

- BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: concepts and components. *Biosystems Engineering*, v. 149, p. 94-111, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>.
- CHEEIN, F. A. A.; CARELLI, R. Agricultural Robotics: Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, [S.I], v. 7, n. 3, p. 48-58, 2013.

- CISTERNAS, I.; VELÁSQUEZ, I.; CARO, A.; RODRÍGUEZ, A. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 176, p. 105626, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira:** grãos. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 28 nov. 2022
- FOUNTAS, S.; MYLONAS, N.; MALOUNAS, I.; RODIAS, E.; HELLMANN SANTOS, C.; PEKKERIET, E. Agricultural robotics for field operations. **Sensors (Basel)**, v. 20, n. 9, p. 2672, 2020. DOI: <http://doi.org/10.3390/s20092672>.
- HIGUTI, V. A. H.; VELASQUEZ, A. E. B.; GASPARINO, M. V.; DE OLIVEIRA G. C.; CARRASCO, C. I.; RISARDI, J. C.; MAGALHÃES, D. V.; BECKER, M. Robotic platform with passive suspension to be applied on soybean crops: initial results. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 24, 2017, Curitiba. **Proceedings...**Curitiba: ABCM, 2017. p. 1-10.
- HIGUTI, V. A.; VELASQUEZ, A. E.; MAGALHAES, D. V.; BECKER, M.; CHOWDHARY, G. Under canopy light detection and ranging-based autonomous navigation. **Journal of Field Robotics**, v. 36, n. 3, p. 547-567, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1002/rob.21852>.
- HIREMATH, S.A.; VAN DER HEIJDEN, G.W.A.M.; VAN EVERT, F.K.; STEIN, A.; TER BRAAK, C.J.F. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 100, p. 41-50, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.005>.
- HÖFIG, P., ARAUJO-JUNIOR, C.F. Classes de declividade do terreno e potencial para mecanização no estado de Paraná (Types of ground declivity and potential for mechanization in the Paraná state). **Coffee Science**, [S.I], Vol. 10, n. 2, p. 195-203, 2015.
- JAZAR, R. N. **Vehicle dynamics: theory and application**. New York: Springer, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-0-387-74244-1>.
- LARENAS, M. C.; MAGALHÃES, D. V.; BECKER, M. Design of robotics arm for LIBS in field. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-USP – SiPGEM. **Proceedings [...]**. São Carlos: EESC, 2016b. p. 1-9.
- LARENAS, M. C.; MAGALHÃES, D. V.; MILORI, D. M. B. P. Sistema de enfoque automático para espectroscopia de plasma induzido por laserT. In: **REUNION IBERO-AMERICANA DE ÓPTICA Y REUNIÓN IBERO-AMERICANA DE ÓPTICA, LASERS Y APLICACIONES. Proceedings [...]**. Pucón: RIAO, 2016a.
- LARENAS, M. C.; MILORI, D. M. B. P.; MAGALHÃES, D. V. Efeito da compactação do solo sobre o nível da sinal obtida por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS). In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-
- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-USP – SiPGEM. **Proceedings [...]**. São Carlos: EESC, 2016c. p. 1-16.
- MAXON MOTOR. **EC 90 Flat**. 2017a. Disponível em: [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/8825435389982.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/8825435389982.pdf). Acesso em: 28 nove. 2022.
- MAXON MOTOR. **Encoder MILE**. 2017b. Disponível em: [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/8825854066718.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/8825854066718.pdf). Acesso em: 28 nov. 2022.
- MAXON MOTOR. **EPOS2 Application Notes Collection**. 2017c. Disponível em: [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/root/8834322759710/EPOS2-Application-Notes-Collection-En.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8834322759710/EPOS2-Application-Notes-Collection-En.pdf). Acesso em: 28 nov. 2022.
- MAXON MOTOR. **ESCON**. 2018a. Disponível em: [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/root/8884130873374/EN-21-498-499-503.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8884130873374/EN-21-498-499-503.pdf). Acesso em: 28 nov. 2022.
- MAXON MOTOR. **Planetary Gearhead GP 52C**. 2018b. Disponível em: [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/8831071289374.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/8831071289374.pdf). Acesso em: 28 nov. 2022.
- PEDERSEN, S. M.; FOUNTAS, S.; SORENSEN, C. G., VAN EVERT, F. K.; BLACKMORE, B. S. Robotic seeding: economic perspectives. In: PEDERSEN, S. M.; LIND, K. M. (Eds.). **Precision Agriculture: technology and economic perspectives**. Cham: Springer, 2017. p. 167-179. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-319-68715-5\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-319-68715-5_8).
- REINA, G.; MIELLA, A.; ROUVEURE, R.; NIELSEN, M.; WORST, R.; BLAS, M. R. Ambient awareness for agricultural robotic vehicles. **Biosystems Engineering**, v. 146, p. 114-132, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.010>.
- SPARROW, R.; HOWARD, M. Robots in agriculture: prospects, impacts, ethics, and policy. **Precision Agriculture**, v. 22, n. 3, p. 818-833, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11119-020-09757-9>.
- VALIN, H.; SANDS, R. D.; VAN DER MENSBRUGGHE, D.; NELSON, G. C.; AHAMMAD, H.; BLANC, E.; BODIRSKY, B.; FUJIMORI, S.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HEYHOE, E.; KYLE, P.; MASON-D'CROZ, D.; PALTSEV, S.; ROLINSKI, S.; TABEAU, A.; VAN MEIJL, H.; VON LAMPE, M.; WILLENOCKEL, D. The future of food demand: understanding differences in global economic models. **Agricultural Economics**, v. 45, n. 1, p. 51-67, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1111/agec.12089>.
- VELASQUEZ, A. E. B. **Helvis III: desenvolvimento e caracterização da plataforma robótica [[Q6: Q6]]**. 2015. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- YAGHOURI, S.; AKBARZADEH, N. A.; BAZARGANI, S. S.; BAZARGANI, S. S.; BAMIZAN, M.; ASL, M. I. Autonomous robots for agricultural tasks and farm assignment and future trends in agro robots. **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering**, v. 13, n. 3, p. 1-6, 2013.