

## **PROPOSTA DE UM CONTROLADOR TOLERANTE A FALHAS PARA SISTEMA DE GUIAGEM BASEADO EM GNSS**

**RAFAEL V. DE SOUSA<sup>1</sup>, RUBENS A. TABILE<sup>2</sup>, RICARDO Y. INAMASU<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Engo. Eletricista, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia de Biosistemas, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Zootecnia (FZEA), USP, Pirassununga-SP, Fone: (19) 3565.6806, rafael.sousa@usp.br.

<sup>2</sup> Engo. Agrícola, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia de Biosistemas, FZEA, USP, Pirassununga-SP.

<sup>3</sup> Engo. Mecânico, Pesquisador, Embrapa Instrumentação, EMBRAPA, São Carlos-SP.

Apresentado no  
XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016  
24 a 28 de julho de 2016 - Florianópolis - SC, Brasil

**RESUMO:** Apresenta-se o desenvolvimento de um controlador robótico para aperfeiçoar o desempenho de sistemas automáticos de guiagem que utilizam receptores GNSS para navegação autônoma em ambientes agrícolas. Foi desenvolvido um controlador baseado em lógica fuzzy que utiliza comportamentos robóticos para executar as ações de guiagem (direção e velocidade) de um trator nas ruas de pomares. Um trator, um controlador e um pomar virtual em 3D foram modelados, programados e simulados utilizando-se um software comercial para prototipagem e simulação de robôs móveis. O controlador fuzzy foi projetado para empregar um receptor GNSS e sensor LIDAR. Experimentos baseados em simulação foram realizados para avaliar a capacidade operacional do controlador de seguir um mapa em operação segura, incluindo situações de falha (redução de integridade do GNSS, falhas de plantas e manobras acentuadas). O desempenho do controlador robótico é comparado com um controlador clássico de guiagem automática. Os resultados mostram um desempenho superior do controlador robótico em comparação com o controlador clássico, pois permite a locomoção segura do trator no pomar principalmente nas situações adversas avaliadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** guiagem automática, robô agrícola, comportamento robótico fuzzy.

## **PROPOSAL FOR A FAULT-TOLERANT CONTROLLER FOR GNSS-BASED GUIDANCE SYSTEM**

**ABSTRACT:** It is presented the development of a robotic controller for improving the performance of automatic guidance systems based on GNSS receiver for autonomous navigation in agricultural environments. It was developed a controller based on fuzzy logic that applies robotic behaviors to perform the guidance actions (steering and speed) of a tractor between rows of an orchard. A tractor, a controller and a 3D virtual crop of an orange orchard were modelled, programmed and simulated using software for prototyping and simulation of mobile robots. The fuzzy controller was designed to apply a GNSS receiver and a LIDAR sensor equipped on the tractor. Experiments based on simulation were carried out for evaluating the controller operational ability to follow a map in safe operation including fault situations (GNSS loss of integrity, crop failures and hard manoeuvres). In addition, the performance of the robotic controller is compared with a classical automatic guidance controller that applies only geometric parameters to follow a map. The results show a superior performance of the robotic controller compared with the classical controller, because it allows the safe locomotion of the tractor in the orchard mainly in the evaluated adverse situations.

**KEYWORDS:** automatic guidance, agricultural robot, fuzzy robotic behavior.

## INTRODUÇÃO

As habilidades ou comportamentos importantes para a operação de um veículo agrícola autônomo podem ser agrupados em quatro categorias: guiagem para uma navegação segura e confiável; identificação de características físicas e biológicas; e execução de tarefas agrícolas junto a mapeamento das características relevantes do campo e da operação (Auat Cheein & Carelli, 2013). A guiagem automática no campo envolve comportamentos clássicos estudados em robótica móvel, como seguir um caminho pré-definido e evitar obstáculos. Porém, vários desafios específicos do ambiente agrícola estão presentes como, por exemplo, permanecer entre as linhas de plantas, manobrar no final da linha, adaptar-se às condições topográficas e variações das condições do solo, e diferenciar entre o obstáculo intransponível e os objetos ambientais comuns, como ramos saindo da copa, grama alta, e falhas nas linhas de plantas (Bayar, Bergerman, Koku, & Konukseven, 2015). Para superar tais desafios, estudos notáveis disponíveis na literatura utilizam modelos cinemáticos e dinâmicos com a integração de dados de sensores, como sistema de posicionamento em tempo real com receptor GNSS – RTK (*Global Navigation System with Real Time Kinematic* – Sistema de Posicionamento Global com Cinemática em Tempo Real), sistema de varredura a *Laser* com LIDAR (*Light Detection and Ranging* – Detecção e Varredura Óptico), unidade inercial de medida (IMU), sensores de rotação tipo *encoder* (codificador pulsado de direção e velocidade) e câmeras com sensor CCD (*Charge Coupled Device* – Dispositivo de Carga Acoplado) (Bayar, Bergerman, Konukseven, & Koku, 2016).

Os métodos propostos com base na criação de modelos determinísticos (deliberativos) podem tornar-se complexos para representar o mundo real, especialmente para ambientes dinâmicos e semi-estruturados com algum grau de incerteza como os campos agrícolas. Por isso, em outras áreas de pesquisa, um número considerável de arquiteturas baseadas em comportamentos estão sendo estudadas para navegação de robôs móveis em ambientes poucos estruturados ou inexplorados. Importantes resultados de pesquisa foram alcançados com as técnicas baseadas em algoritmos de inteligência computacional, como a Lógica Fuzzy (Algabri, Mathkour, Ramdane, & Alsulaiman, 2015; Eskridge & Hougen, 2010; Huq, Mann, & Gosine, 2008), porém o uso de abordagens baseadas em comportamento fuzzy de navegação para veículos autônomos e robôs móveis agrícolas ainda foram pouco exploradas ((García-Pérez, García-Alegre, Ribeiro, & Guinea, 2008) (Subramanian, Burks, & Dixon, 2009)).

Neste contexto, o trabalho tem como objetivo principal a concepção, implementação e experimentação em ambiente virtual 3D de um controlador de guiagem tolerante a falhas com base em comportamentos fuzzy para a guiagem autônoma de veículos ou robôs entre fileiras de plantas com características físicas de um pomar. Para isso, propõe-se uma nova abordagem para implementar um comportamento complexo de guiagem com base em duas estratégias: composição de comportamentos fuzzy simples de acordo com as características físicas de sua aplicação no ambiente agrícola com uso de LIDAR e receptor GNSS; coordenação destes comportamentos utilizando um processo de arbitragem baseados em Lógica Fuzzy para identificar contextos de aplicação de cada comportamento durante a navegação no ambiente agrícola.

## MATERIAL E MÉTODOS

Considerando o receptor GNSS e os dados LIDAR, dois comportamentos simples foram desenvolvidos, *'path-tracking'* e *'crop-feeler'*, baseando-se do trabalho (Sousa, 2007). O comportamento *path-tracking* é baseado em controlador fuzzy e faz uso da leitura GNSS e de um mapa geográfico pré-estabelecido (caminho ideal) para determinar o ângulo de guiagem

( $\varphi$ ) e a velocidade ( $\eta$ ) do veículo em diferentes pontos do pomar. Durante a navegação, a posição do veículo ( $x_r, y_r$ ) é fornecido pelo receptor GNSS, que foi centrado para efeito de simplificação no eixo da frente do trator (eixo da guiagem). Através das relações geométricas da posição do veículo com o ponto de referência anterior ( $x_p, y_p$ ) e com o ponto de referência avançado ( $x_a, y_a$ ) do caominho idela, determina-se o deslocamento lateral ( $\lambda$ ) e o ângulo até o ponto de referência avançado ( $\theta$ ) em relação ao caminho ideal composto pela reta que interligam os dois pontos de referência, tal como ilustrado na Figura 1.

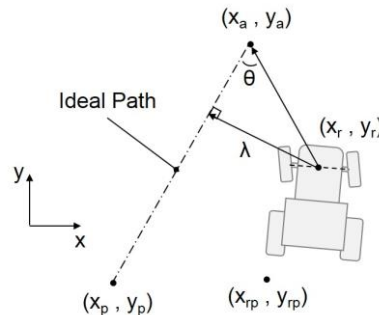


FIGURA 1. Representação dos pontos de referência do caminho ideal, do ponto de posição do robô e dos parâmetros geométricos de deslocamento lateral ( $\lambda$ ) e o ângulo até o ponto de referência avançado ( $\theta$ ).

Os dois valores crisp  $\lambda$  e  $\theta$  são definidos como entradas para o comportamento *path-tracking* e são, respectivamente, relacionadas com as funções de pertinência  $\mu_\lambda$  e  $\mu_\theta$  ilustradas nas Figuras 2a e 2b. As funções de pertinência das entradas são implementadas com formas triangulares e trapezoidais. A função de pertinência  $\mu_\lambda$  é composta por quatro termos fuzzy, *Very Close*, *Close*, *Medium* e *Far*, e a função de pertinência  $\mu_\theta$  é composta por três termos fuzzy, *Small*, *Medium* e *Wide*.

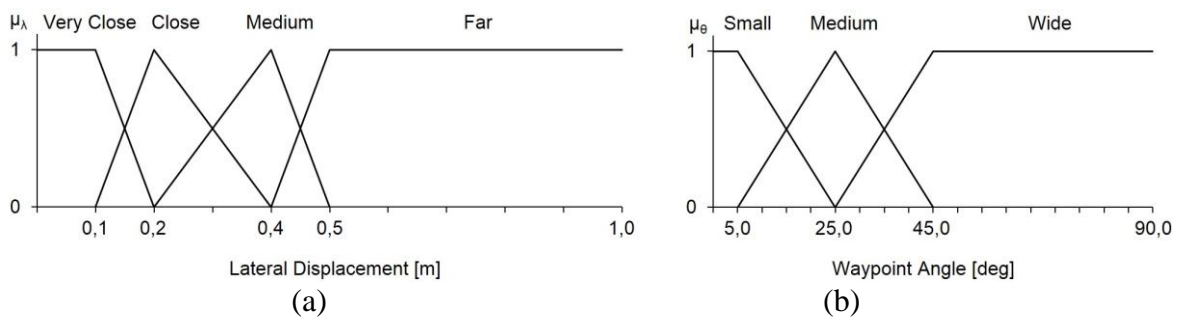


FIGURA 2. Funções de pertinência das entradas para o comportamento *path-tracking*: deslocamento lateral (a) e o ângulo até o ponto de referência avançado (b).

O intervalo para o  $\lambda$  de entrada para a função de pertinência  $\mu_\lambda$  foi limitado em 3,0 m, que foi considerada uma distância máxima de segurança entre o veículo e o caminho ideal. O intervalo para o  $\theta$  entrada para as funções de pertinência  $\mu_\lambda$  foi limitado em 90,0 graus, que é o ângulo máximo possível antes de ultrapassar o ponto de referência avançada.

As saídas do comportamento *path-tracking* são o do ângulo da guiagem ( $\varphi$ ) e a velocidade ( $\eta$ ) que estão associados, respectivamente, relacionada com as funções de pertinência  $\mu_\varphi$  e  $\mu_\eta$  mostradas na Figura 3a e 3b. O função de pertinência  $\mu_\varphi$  é composta de quatro termos fuzzy, *Zero*, *Small*, *Medium* e *Wide*, e a função de pertinência  $\mu_\eta$  é composta por três termos fuzzy, *Slow*, *Medium* e *Fast*. O intervalo para a saída  $\varphi$  para a função de pertinência  $\mu_\varphi$  foi limitada em 45,0 °, que é o esterçamento máximo definido para o veículo. O intervalo para a saída  $\eta$  para a função de pertinência  $\mu_\eta$  foi limitado em 5,0 m / s, que é

definida com a velocidade máxima de navegação para o veículo.

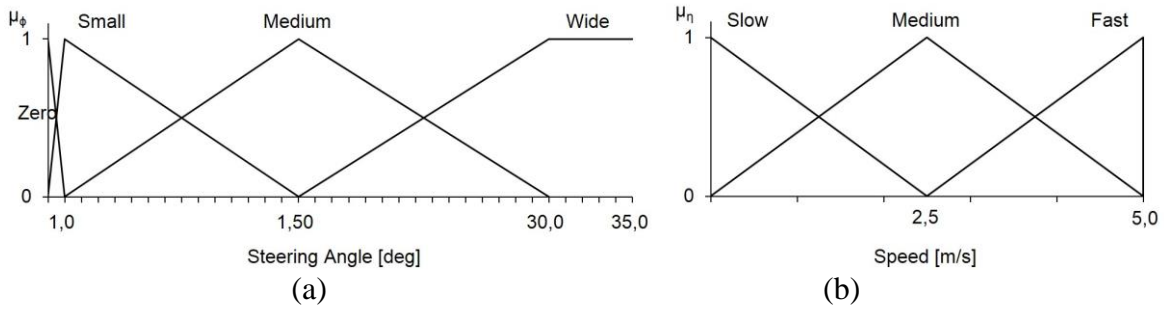


FIGURA 3. Funções de pertinência das saídas para o comportamento *path-tracking*: ângulo de guiagem (a) e a velocidade (b).

O sistema de inferência fuzzy do comportamento *path-tracking* consiste em 24 regras linguísticas (Base de Conhecimento) relacionadas com os conjuntos fuzzy (funções de pertinência) para definir a relação entre as entradas  $\lambda$  e  $\theta$  com as saídas  $\phi$  e  $\eta$ . O conjunto de regras é mostrada na Tabela 1.

TABELA 1. Conjunto de regras do sistema de inferência fuzzy para o comportamento *path-tracking*.

		Deslocamento Lateral ( $\lambda$ )							
		Very Close		Close		Medium		Far	
Ângulo de Referência Avançado ( $\theta$ )	Small	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$
	Medium	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$
	Wide	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$	$\phi_z$	$\eta_s$

Termos fuzzy para o ângulo de guiagem  $\phi$ : Zero (Z), Small (S), Medium (M) e Wide (W). Termos fuzzy para a velocidade  $\eta$ : Slow (L), Medium (M) e Fast (F).

O comportamento *crop-feeler* constitui-se de um controlador fuzzy que faz uso da leitura do LIDAR para determinar as mesmas variáveis de comando  $\phi$  e  $\eta$  do comportamento *path-tracking*. A representação geométrica desses valores são ilustrados nas Figura 4a e 4b.

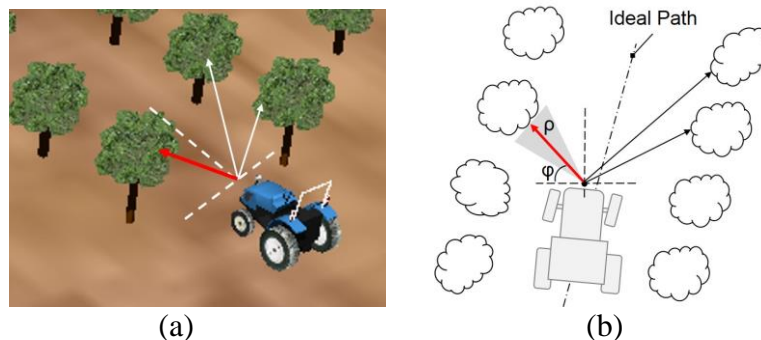


FIGURA 4. Detecção do objeto mais próximo pelo LIDAR: a) representação 3D do procedimento de detecção; b) definição geométrica da distância ( $\rho$ ) e da orientação ( $\phi$ ) de objetos no pomar.

Durante a navegação, o LIDAR fornecer 180 leituras na taxa de 75 Hz que são compostas pela distância e ângulo em relação à objetos identificados por uma varredura horizontal de 180 graus ( $1^\circ$  de resolução). O conjunto de medições é dividido em dois quadrantes, esquerda e direita, à frente do robô ( $90^\circ$  de varredura cada uma). Os dez valores

menores distância medida para cada quadrante são usados para calcular a média destas distâncias. O valor médio calculado e o ângulo da menor medida indicam a distância crítica ( $\rho$ ) e o ângulo em relação à linha de centro sensor ( $\varphi$ ) de um objeto detectado.

Tais valores crisp  $\rho$  e  $\varphi$  são utilizados como entradas do comportamento *crop-feeler*. Formas triangulares e trapezoidais foram aplicadas para criar a função de pertinência  $\mu_\rho$  para a variável  $\rho$ , sendo esta composta por quatro termos fuzzy *Very Close*, *Close*, *Medium* e *Far* (Figura 5A). Para a variável  $\varphi$  foi criada a função de pertinência  $\mu_\varphi$  composta de três termos fuzzy: *Small*, *Medium* e *Wide* (Figura 5b). O intervalo para as entradas  $\rho$  e  $\varphi$  foram, respectivamente, limitados em 30,0 m e 90,0 graus (faixa máxima do sensor).

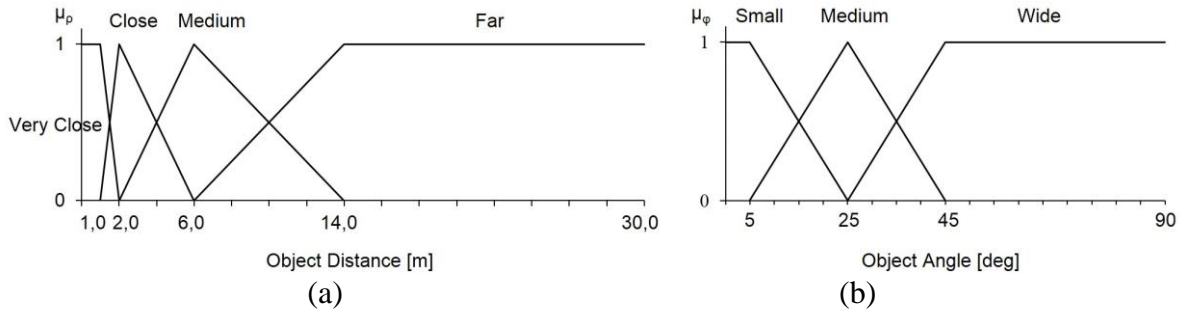


FIGURA 5. Funções de pertinência das saídas para o comportamento *crop-feeler*: distância do objeto (a) e a o ângulo de orientação do objeto (b).

As saídas de comando do comportamento *crop-feeler* são as mesmas do comportamento *path-tracking* (ângulo da guiagem  $\varphi$  e velocidade  $\eta$ ), assim as mesmas funções de pertinência  $\mu_\varphi$  e  $\mu_\eta$  mostradas na Figura 3a e 3b são utilizadas com saídas do comportamento *crop-feeler*.

O conjunto de regras para o comportamento *crop-feeler* é mostrada na Tabela 2. O conjunto é composto de 24 regras linguísticas que relacionam as funções de pertinência das entradas  $\rho$  e  $\varphi$  com as saídas  $\varphi$  e  $\eta$ .

TABELA 2. Conjunto de regras do sistema de inferência fuzzy para o comportamento *path-tracking*.

		Distância do Objeto ( $\rho$ )							
		Very Close	Very Close	Very Close	Very Close	Very Close	Very Close	Very Close	Very Close
Ângulo do Objeto ( $\varphi$ )	Small	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\eta s$
	Medium	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\eta s$
	Wide	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\phi z$	$\eta s$

Termos fuzzy para o ângulo de guiagem  $\phi$ : Zero (Z), Small (S), Medium (M) e Wide (W). Termos fuzzy para a velocidade  $\eta$ : Slow (L), Medium (M) e Fast (F).

O método Mamdani baseado na composição Max-Min foi utilizado pelos sistemas de inferência de cada um dos comportamentos e saídas crisp de cada comportamento são obtidas pelo método Centroide.

Contextos de aplicação foram definidos para cada um dos comportamentos de acordo com cenários possíveis e suas competências. O comportamento *path-tracking* deve permitir ao veículo seguir um caminho ideal desde que objetos não se apresentem próximos. O comportamento *crop-feeler* possui a competência para guiar o veículo entre as árvores do pomar evitando colisões com objetos identificados como próximos. Estes contextos foram utilizados para criação de módulo fuzzy para arbitrar o funcionamento dos comportamentos, denominado árbitro fuzzy.

A função de pertinência  $\mu_\lambda$  do comportamento *path-tracking* e as funções de membro  $\mu_\rho$  e  $\mu_\varphi$  do comportamento *crop-feeler* foram utilizadas como funções de pertinência de entrada

para o árbitro fuzzy. A saída do árbitro fuzzy é um índice que indica o nível de importância para os comportamentos dependendo do contexto apresentado em cada momento. A função de pertinência de saída  $\mu_b$  foi associado ao índice em uma escala de 0 a 1, e associada a dois termos difusos *Crop-Feeler* e *Tracking Path* (Figura 6).

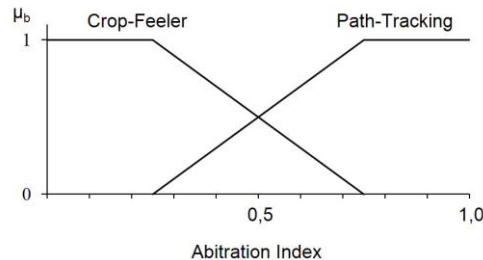


FIGURA 5. Funções de pertinência de saída para o árbitro fuzzy.

A modelagem do ambiente agrícola virtual e do veículo agrícola, bem como a programação das rotinas referentes do controlador foram realizadas utilizando o software Webots versão 7.4.3 da empresa Cyberbotics ([www.cyberbotics.com](http://www.cyberbotics.com)). A programação dos controladores foi feita utilizando uma ferramenta do software Webots que permite a integração com o software Matlab da empresa MathWorks ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)).

Construiu-se um ambiente agrícola de 5.000 m<sup>2</sup> terreno composto por grades adjacentes e contínuas com inclinações diferentes que conferiram ao terreno diferentes elevações com a diferença máxima de até 1 metro entre os valores mínimo e máximo. Também foi construída uma plantação de laranjeiras, sendo constituída por quatro tipo árvores com características de laranjeira e com geometrias diferentes (altura e volume de copa). Essas árvores foram replicadas e posicionadas aleatoriamente em linhas com espaçamento de 4 metros entre as árvores e de 6 metros entre linhas formando um pomar como ilustrado na Figura 1.

Um trator virtual com características estruturais do trator fruteiro comercial TC50 Boomer da empresa CNH foi utilizado como veículo autônomo. O veículo possui um sistema de guiagem com capacidade de esterçamento das rodas dianteiras e capacidade de comando de velocidade em conjunto ou independentemente em cada roda. O veículo foi equipado com um sensor laser LIDAR características do sensor comercial LM291 da empresa Sick ([www.sick.com](http://www.sick.com)) e com dois receptores GNSS, sendo um com acurácia absoluta para mapeamento do caminho real do veículo e outro com acurácia variável para o sistema de guiagem.

O ambiente foi configurado e programado para atender aos experimentos de navegação de forma que fosse possível acompanhar a trajetória do veículo, as variáveis de controle (ângulo de guiagem e velocidade), o deslocamento lateral em relação à trajetória ideal e o valor eficaz do deslocamento lateral (raiz quadrada do erro médio quadrático) em cada simulação. Além disso, simulações foram executadas incluindo perda de acurácia do receptor GNSS e a situação de falhas nas linhas de plantio.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente foram realizadas simulações para avaliar individualmente a capacidade de cada comportamento fuzzy (*path-tracking* fuzzy e *crop-feeler* fuzzy) para controlar a navegação do veículo em relação a navegação que emprega as coordenadas do GNSS para determinar o ângulo de guiagem utilizando parâmetros geométricos e sem suporte da Lógica Fuzzy (*path-tracking* geométrico). No caso da navegação pelo *path-tracking* geométrico a velocidade varia de 0 km/h a 8 km/h inversamente proporcional ao ângulo de guiagem que pode variar de 0° a 45°. As Figuras 6a, 6b, 6c, 6d mostram os resultados das simulações, trajetória e deslocamento lateral, considerando o GNSS com acurácia de 0,02 m. Como se

pode observar em ambas situações o veículo navegou entre as linhas de plantio perseguindo o caminho ideal (Figuras 6a e 6c) com deslocamentos laterais absolutos (Figuras 6e e 6f) inferiores a 0,5 m, a não ser durante a manobra de cabeceira em que tais valores situaram-se entre 0,5 m e 1,0 m (máximo de 0,68 m para o *path-tracking* geométrico e 0,69 m respectivamente para *path-tracking* fuzzy). O valor eficaz do deslocamento lateral para a navegação com o *path-tracking* geométrico (Figura 6b) foi de 0,17 m e para a navegação com o *path-tracking* fuzzy (Figura 6d) foi de 0,19 m.

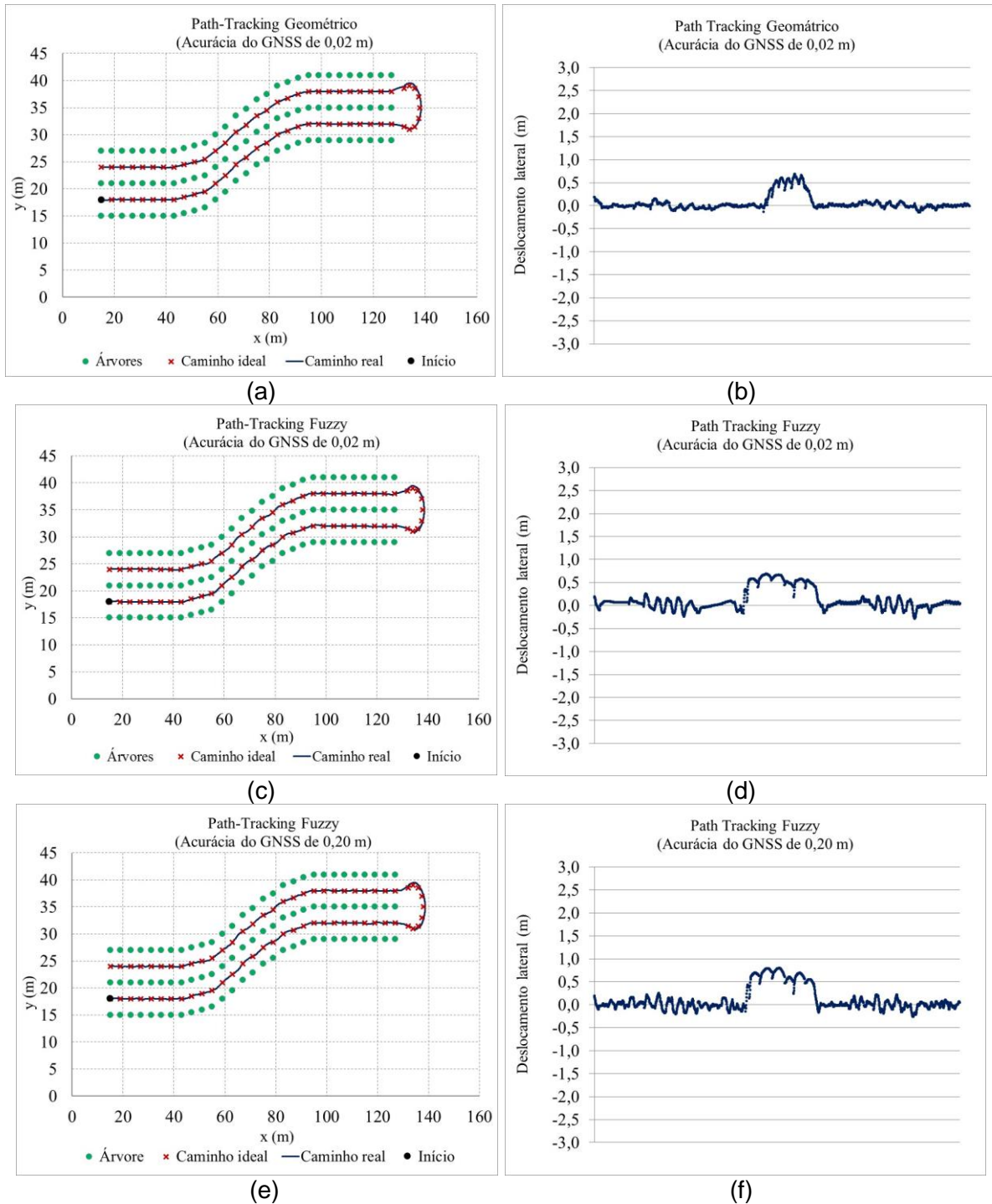


FIGURA 6. Trajetória de navegação e deslocamentos laterais para avaliação dos comportamentos *path-tracking* fuzzy em relação ao comportamento *path-tracking* geométrico.

Tornando pior a acurácia do GNSS para 0,20 m, o veículo colidiu com as árvores logo no início da trajetória para a navegação com o *path-tracking* geométrico. Porém, para a navegação com o *path-tracking* fuzzy, o veículo manteve-se entre as linhas de plantio perseguindo o caminho ideal (Figura 6e) com deslocamentos laterais absolutos (Figuras 6f) inferiores a 0,5 m, a não ser durante a manobra de cabeceira em que tais valores situaram-se entre 0,5 m e 1,0 m (máximo de 0,8 m). Nesse último caso, o valor eficaz do deslocamento lateral foi 0,28.

As Figuras 7a e 7b mostram os resultados da simulação, trajetória e deslocamento lateral, considerando navegação somente com o comportamento *crop-feeler* fuzzy. Foram adicionadas três falhas nas linhas de plantio com três árvores faltantes em cada falha (Figura 7a). Como se pode observar, o veículo navegou entre as linhas de plantio perseguindo o caminho ideal (Figura 7a) com deslocamentos laterais absolutos inferiores a 1,0 m (máximo de 0,82 m). O valor eficaz dos deslocamentos laterais (Figura 7b) foi de 0,31 m.

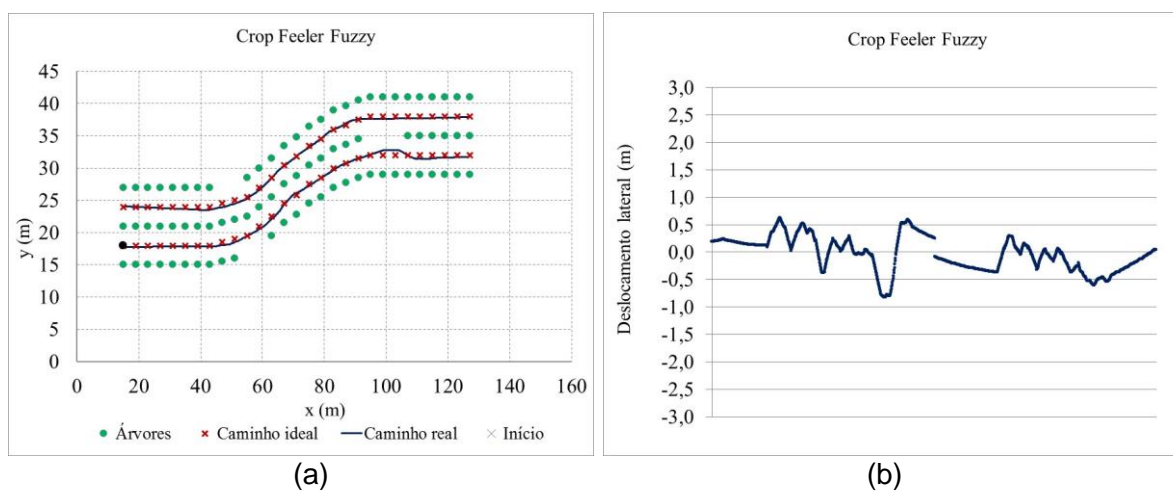


FIGURA 7. Trajetória de navegação e deslocamentos laterais para avaliação do comportamento *crop-feeler* fuzzy.

A segunda etapa de simulações foi realizada para avaliar o controlador fuzzy completo, onde os dois comportamentos fuzzy são selecionados para operar em momentos diferentes de acordo com contextos de aplicação identificados pelo árbitro fuzzy. As Figuras 8a, 8b, 8c e 8d mostram os resultados da simulação, trajetória do veículo, as variáveis de controle (ângulo de guiagem e velocidade) e o deslocamento lateral para navegação, em uma trajetória com seis linhas de plantio contendo algumas falhas nessas linhas, e com acurácia do GNSS igual a 0,20 m. Como se pode observar, o veículo navegou entre as linhas de plantio perseguindo o caminho ideal (Figura 8a) com deslocamentos laterais absolutos inferiores a 1,0 m (máximo de 0,78 m). O valor eficaz dos deslocamentos laterais (Figura 8b) foi de 0,36 m. Os comportamentos alternaram-se com predominância do comportamento *path-tracking* fuzzy como pode ser observado nas Figuras 8a, 8c e 8d pela diferenciação de cores na trajetória, no ângulo de guiagem e na velocidade respectivamente. Os maiores ângulos de guiagem (Figura 8c) ocorrem nas curvas e manobras de cabeceira com valores máximos de 35° à esquerda ou à direita. As velocidades de navegação situam-se entre 1 km/h e 6 km/h, sendo que os menores valores de velocidade correspondem aos momentos de maiores ângulos de guiagem nas manobras mais acentuadas (desvio de árvores e manobra de cabeceira).

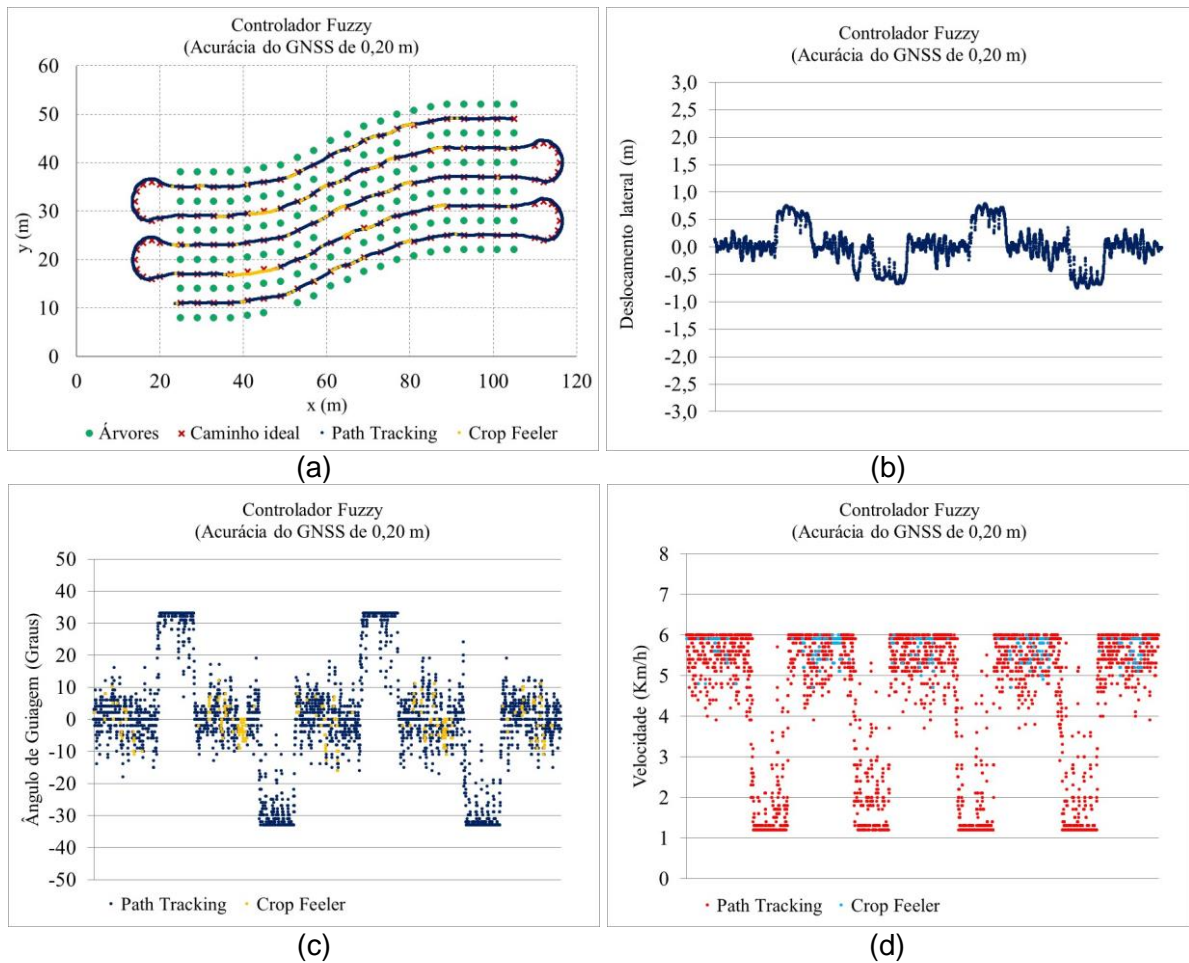


FIGURA 8. Trajetória de navegação (a), deslocamentos laterais (b), ângulos de guiagem (c) e velocidades para avaliação do veículo com controlador fuzzy e acurácia do GNSS de 0,20 m.

A performance do controlador fuzzy na situação de perda de acurácia do GNSS para trajetória com seis linhas de plantio contendo algumas falhas nessas linhas, foi levada ao extremo. A navegação segura, sem colisões e perda definitiva do caminho, foi alcançada com acurácia do GNSS igual a 2,00 m (Figuras 9a e 9b).

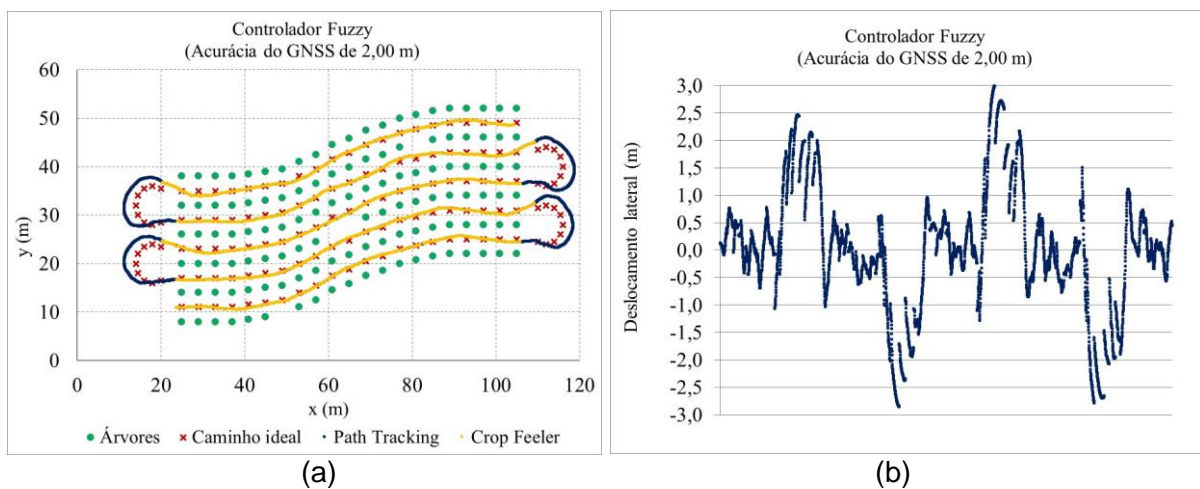


FIGURA 9. Trajetória de navegação (a) e os deslocamentos laterais (b) do veículo para o controlador fuzzy com acurácia do GNSS de 2,00 m.

Como se pode observar nas Figuras 9a e 9b respectivamente, o veículo navegou entre as linhas de plantio perseguindo o caminho ideal com deslocamento lateral absoluto máximo igual a 3,0 m. O valor eficaz dos deslocamentos laterais (Figura 9b) foi de 1,16 m. Os comportamentos alternaram-se com predominância do comportamento *crop-feeler* fuzzy como pode ser observado nas Figuras 9a pela diferenciação de cores na trajetória do veículo.

## CONCLUSÕES

Foi apresentada a concepção, implementação e experimentação em ambiente virtual de um controlador de guiagem tolerante a falhas com base em comportamentos fuzzy para a guiagem autônoma de veículos ou robôs em pomares. Foi adotada uma nova abordagem para implementar um comportamento complexo com base na composição de comportamentos fuzzy simples de acordo com as características físicas de sua aplicação no ambiente agrícola com uso de LIDAR e receptor GNSS. A coordenação destes comportamentos utiliza um processo de arbitragem baseados em Lógica Fuzzy para identificar contextos de aplicação de cada comportamento durante a navegação. Os resultados mostram um desempenho superior do controlador robótico em comparação com o controlador clássico, na medida em que permitiu a locomoção segura do trator no pomar mesmo na presença de redução de integridade do GNSS, falhas de plantas e manobras acentuadas de cabeceira.

**AGRADECIMENTOS:** Ao CNPq financiamento concedido (proc. 485033/2013-5). Ao técnico Edson José de Souza Sardinha pelo suporte ao desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Algabri, M., Mathkour, H., Ramdane, H., Alsulaiman, M. (2015). Computers in Human Behavior Comparative study of soft computing techniques for mobile robot navigation in an unknown environment. *Computers in Human Behavior*, 50, 42–56.
- Auat Cheein, F. A., Carelli, R. (2013). Agricultural robotics: Unmanned robotic service units in agricultural tasks. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(3), 48–58.
- Bayar, G., Bergerman, M., Koku, A. B., Konukseven, E. I. (2015). Localization and control of an autonomous orchard vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 118–128.
- Bayar, G., Bergerman, M., Konukseven, E. I., Koku, A. B. (2016). Improving the trajectory tracking performance of autonomous orchard vehicles using wheel slip compensation. *Biosystems Engineering*, 1–16.
- Eskridge, B. E., & Hougen, D. F. (2010). Extending adaptive fuzzy behavior hierarchies to multiple levels of composite behaviors. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(9), 1076–1084.
- García-Pérez, L., García-Alegre, M. C., Ribeiro, A., Guinea, D. (2008). An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(1), 39–48.
- Huq, R., Mann, G. K. I., Gosine, R. G. (2008). Mobile robot navigation using motor schema and fuzzy context dependent behavior modulation, *Appl. Soft Comput.*, 8, 422–436.
- SOUSA, R. V. Robô agrícola móvel (RAM): uma arquitetura baseada em comportamentos hierárquicos e difusos para sistemas autônomos de guiagem e navegação. 2007, 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, S.P. – 2007.
- Subramanian, V., Burks, T. F., Dixon, W. E. (2009). *Transactions of the ASABE*, 52(5), 1411–1422.