

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

UM ESTUDO SOBRE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NA AGRICULTURA¹ A STUDY OF AGRICULTURE AUTONOMOUS VEHICLES

Edson Baal²

¹ Pesquisa relacionada à Mecanização da Agricultura Familiar realizada no Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Unijuí.

² Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática nível Mestrado da Unijuí, ed.baal@gmail.com

Resumo

Este estudo apresenta uma revisão da literatura sobre veículos autônomos na agricultura. O objetivo é identificar como os veículos autônomos são utilizados na agricultura, quais formas de controle e quais as metodologias utilizadas para a modelagem matemática. A partir de uma questão de pesquisa primária e questões de pesquisa secundárias foram estabelecidas *strings* de busca para pesquisar publicações nas principais bases de dados de trabalhos científicos. Identificou-se que os principais tipos de veículos autônomos aplicados nos processos agrícolas são os tratores autônomos e os robôs móveis. O controle dos veículos é realizado a partir de sensores e modelos matemáticos onde realiza-se a comparação da trajetória desenvolvida pelo veículo com a trajetória planejada. Os modelos matemáticos são elaborados a partir conceitos físicos que envolvem o sistema. Observou-se que tecnologias de robótica móvel são aplicadas nos mais diversos processos agrícolas, porém não há soluções nesse sentido específicas para a agricultura familiar.

Palavras-chave: Veículos autônomos. Agricultura. Modelagem matemática.

Abstract

This study presents a literature review of autonomous agriculture vehicles. The objective is to identify how autonomous vehicles are used in agriculture, which forms of control and which methodologies are used for mathematical modeling. From a primary research question and secondary research questions, search strings were established to search publications in the main databases of scientific papers. It was identified that the main types of autonomous vehicles applied in agricultural processes are autonomous tractors and mobile robots. Vehicle control is performed using sensors and mathematical models where the trajectory developed by the vehicle is compared with the planned trajectory. Mathematical models are elaborated from physical concepts that involve the system. It has been observed that mobile robotics technologies are applied in the most diverse agricultural processes, but there are no specific solutions for family farming.

Keywords: Autonomous vehicles. Agriculture. Mathematical modeling.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão, bem como a utilização máquinas inteligentes e veículos autônomos estão cada vez mais presentes nos processos agrícolas, frente à crescente demanda por maior produtividade e melhoria nas condições de segurança e ergonomia.

As mais modernas soluções em termos de agricultura de precisão estão restritas as propriedades agrícolas de grande porte, devido aos elevados custos envolvidos (OLIVEIRA, 2016). Na agricultura familiar, há uma grande lacuna em termos de soluções de automação e de veículos autônomos.

Veículos autônomos são equipamentos capazes de desempenhar movimentos automáticos e se auto navegar dependendo de ambiente e das tarefas programadas (AMER *et al.*, 2017). Tais veículos, também chamados de veículos não tripulados, são classificados de acordo com o ambiente de operação, que pode ser aéreo, terrestre ou submarino. Os veículos terrestres não tripulados são conhecidos pela abreviação UGV do inglês “Unmanned Ground Vehicle” (BACCO *et al.*, 2018).

De acordo com a norma internacional SAE-J3016 (2016, apud AMER *et al.*, 2017, p. 226), a automação nos veículos varia em seis diferentes níveis. No nível zero, o controle do veículo é realizado pelo operador humano e a automação se restringe à emissão de avisos para a dirigibilidade. No nível um, sistemas de assistência estão presentes, tais como, controle de velocidade de cruzeiro adaptativo, assistência de estacionamento com direção automática e assistência de manutenção de faixa. No nível dois, o sistema de automação executa aceleração, frenagem e direção, com a desativação imediata pela intervenção do motorista. No nível três, o veículo executa direção automática em ambientes conhecidos e limitados, como as autoestradas. No nível quatro, em condições seguras, o sistema automatizado é habilitado pelo motorista e o veículo desloca-se automaticamente em todas as direções e ambientes. No nível cinco, o veículo automatizado tem total autonomia, sem a necessidade de intervenção humana.

Na agricultura os veículos autônomos são utilizados na forma de tratores autônomos e robôs móveis para processos agrícolas específicos. Os tratores autônomos desempenham uma função idêntica aos tratores convencionais, servem como fonte de tração e potência para o trabalho com implementos agrícolas, com a particularidade que seu deslocamento ocorre sem a necessidade de uma pessoa embarcada para operar o equipamento. Robôs móveis são equipamentos aplicados para desempenhar atividades específicas nos processos agrícolas, tais como poda de árvores, aplicação de defensivos, colheita em pomares, entre outras.

Este estudo trata de uma revisão sobre a utilização de veículos autônomos na agricultura, no qual a visão geral sobre o tema é apresentada nesta seção. Os materiais e métodos são apresentados na seção 2. Na seção 3 tem-se os resultados e discussão. As considerações finais são apresentadas na seção 4 e por fim tem-se as referências bibliográficas.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão apresentada neste trabalho baseou-se na metodologia de revisão sistemática conforme Bezerra Junior (2018). A seguir apresenta-se os principais pontos estruturantes para realizar o estudo.

2.1 Questão de pesquisa

Questão de pesquisa primária: Como os veículos autônomos são utilizados na agricultura? A partir dessa pergunta, são formuladas três perguntas secundárias.

Quais os principais tipos de veículos autônomos utilizados na agricultura?

Quais são as principais formas de controle dos veículos autônomos?

Qual é a metodologia utilizada para realizar a modelagem matemática dos veículos autônomos utilizados na agricultura?

2.2 Processo de busca

Para a realização da pesquisa, buscou-se trabalhos científicos com a temática sobre veículos autônomos para a agricultura nas bases de dados: IEEE Xplore Digital Library, Google Acadêmico, Portal de Periódicos CAPES, Science Direct e Scopus.

Considerou-se trabalhos científicos publicados entre 2014 até 2019 no intuito de analisar somente os trabalhos mais recentes na área. Alguns trabalhos anteriores a 2014 foram considerados pois apresentavam conceitos fundamentais relacionados à modelagem matemática de veículos autônomos, julgou-se que tais trabalhos eram relevantes e poderiam contribuir para este estudo.

Em todas as bases de dados utilizou-se palavras chaves relacionadas a veículos autônomos para agricultura no idioma português e inglês, com as seguintes strings de busca: “veículos autônomos para a agricultura” ou “agriculture autonomous vehicle”; “controle de veículos autônomos” ou “control for autonomous vehicle” e “modelagem de veículos autônomos” ou “modelling autonomous vehicle”.

2.3 Critérios de inclusão e exclusão de trabalhos

Os trabalhos foram incluídos ou excluídos da pesquisa conforme os seguintes critérios:

Critério de inclusão 1: Trabalhos científicos que tratam de veículos autônomos para a agricultura.

Critério de inclusão 2: Trabalhos científicos que tratam da modelagem matemática de veículos autônomos.

Critério de inclusão 3: Trabalhos científicos que tratam da simulação computacional de veículos

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

autônomos.

Critério de inclusão 4: Trabalhos científicos que tratam do controle de veículos autônomos.

Critério de exclusão 1: Trabalhos que não tratam de veículos autônomos.

Critério de exclusão 2: Trabalhos repetidos.

2.4 Avaliação da qualidade

Com a finalidade de identificar os melhores artigos a serem considerados nesta revisão, foram estabelecidos alguns critérios de qualidade para a seleção dos trabalhos, tais como:

Critério de qualidade 1: Trabalhos científicos publicados no período de 01 de janeiro de 2014 até o ano de 2019.

Critério de qualidade 2: Trabalhos científicos que tratam especificamente de veículos autônomos para a agricultura familiar.

Critério de qualidade 3: Trabalhos científicos que utilizam o idioma inglês ou português.

Critério de qualidade 4: Trabalhos científicos declaram claramente a metodologia de modelagem matemática, simulação computacional e o controle aplicados em veículos autônomos para agricultura.

2.5 Processo de seleção dos trabalhos científicos

Com a utilização das *strings* de busca nas bases de dados, pesquisou-se os artigos relacionados ao tema. Em seguida, procedeu-se com a leitura do título e do resumo, quando havia dúvidas na seleção do artigo, era realizada a leitura completa do trabalho. A seleção dos trabalhos foi realizada conforme os critérios descritos no item 2.3 deste capítulo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos na busca e seleção dos trabalhos científicos. Foram encontrados 80 artigos dos quais 5 eram repetidos. Na tabela 1 consta o total de artigos encontrados, excluindo os artigos repetidos, em relação a cada base de dados.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Tabela 1 – Resultado das buscas de trabalhos científicos

| Fonte | Total de artigos |
|------------------|------------------|
| IEEE | 9 |
| Google Acadêmico | 14 |
| CAPES | 10 |
| Science Direct | 39 |
| Scopus | 3 |
| Total | 75 |

Fonte: Autor

A pesquisa foi realizada com base em uma questão de pesquisa primária que corresponde a: Como os veículos autônomos são utilizados na agricultura? A partir dessa questão de pesquisa surgiram questões secundárias que são apresentadas e respondidas a seguir.

3.1 Quais os principais tipos de veículos autônomos utilizados na agricultura?

Conforme levantamento, os principais veículos autônomos utilizados na agricultura são tratores de grande e pequeno porte, conforme a figura 1 e a figura 2, apresentado por Reina *et al.* (2016) e Kayacan; Ramon; Saeys (2015) respectivamente.

Figura 1 - Trator autônomo de grande porte



Fonte: Reina *et al.* (2016).

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Figura 2 - Trator autônomo de pequeno porte



Fonte: Kayacan; Ramon; Saeys (2015).

Além dos tratores, alguns tipos de quadriciclos são equipados com sistemas que o tornam um veículo autônomo, tal veículo, por apresentar versatilidade para transitar em terrenos irregulares, é utilizado em atividades agrícolas (BASCETTA; CUCCI; MATTEUCCI; 2016).

Observa-se que os tipos de veículos autônomos para a agricultura dividem-se em dois grupos. O primeiro corresponde a veículos comerciais, os quais são equipados com sistemas que tornam esses veículos autônomos. Já o segundo, são veículos concebidos especificamente para realizar operações globais de forma autônoma, em muitos trabalhos, tais veículos são denominados de robôs.

3.2 Quais são as principais formas de controle dos veículos autônomos?

Nas áreas agrícolas, não homogeneidades presentes no terreno, tais como morros, árvores, rios, pontes, torres de linhas de transmissão de energia elétrica, entre outros, são fatores de riscos de acidentes na utilização de veículos autônomos. Dessa forma é fundamental o controle e sensoriamento dos veículos para garantir um desempenho seguro e confiável.

Para identificar obstáculos ao longo da trajetória, os veículos são equipados com sensores eletrônicos. Os principais tipos de sensores identificados nesta revisão são: *laser scanner*, câmera de infravermelho e radar a *laser*.

O sensor *laser scanner* permite executar levantamentos tridimensionais na área de atuação do veículo (WANG et al., 2016).

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

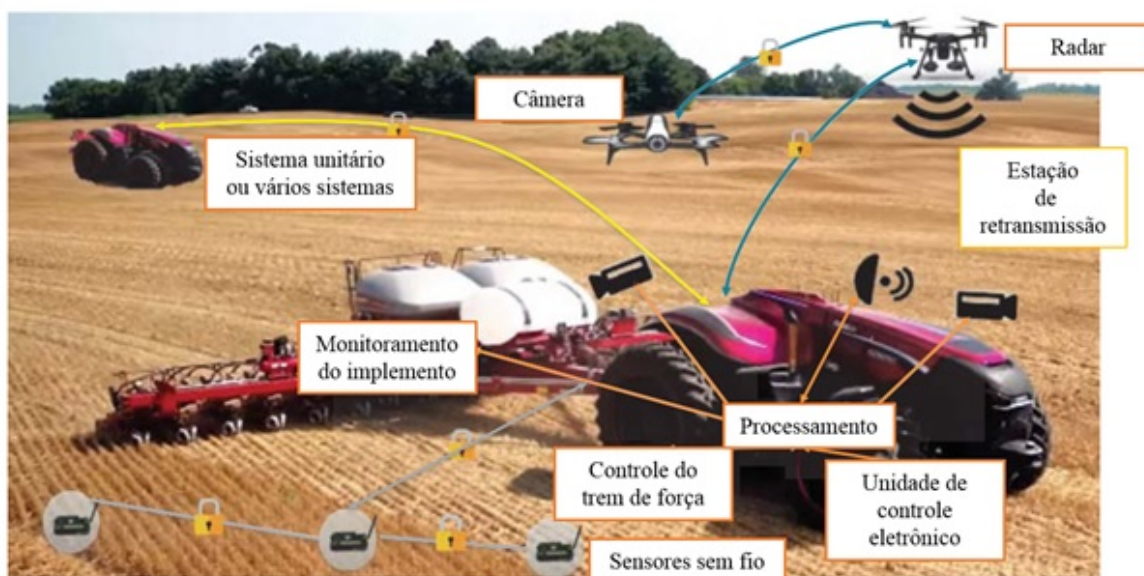
As câmeras de infravermelho, também chamadas de câmeras térmicas são dispositivos capazes de identificar imagens na faixa de radiações infravermelhas, neste caso, esse sensor é indicado para identificar seres humanos e animais que estariam na rota do veículo (MILELLA e REINA, 2014).

Os radares a *laser* são largamente utilizados na robótica e em veículos autônomos, devido a capacidade de medição com precisão da posição (SUBRAMANIAN; BURKS; ARROYO, 2006).

Em ambientes agrícolas, sistemas avançados de sensoriamento são requisitos importantes para que um veículo autônomo possa perceber e compreender o ambiente, reconhecendo estruturas artificiais e naturais, topologia, vegetação e caminhos dirigíveis. Nesse sentido utiliza-se uma combinação de vários tipos de sensores (MILELLA e REINA, 2014).

Bacco et al. (2018) apresentam um trator autônomo com a integração sistemas de sensoriamento por radar com o auxílio de um veículo aéreo não tripulado, conforme mostra a figura 3.

Figura 3 - Trator autônomo com a integração de diferentes sensores



Fonte: Adaptado de Bacco et al. (2018).

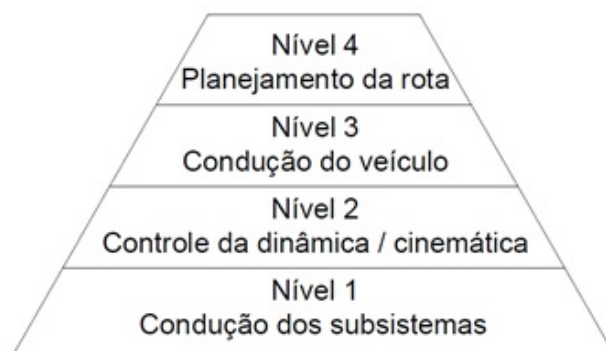
Além da parte de sensoriamento, é necessário realizar o controle dos veículos autônomos. Muitos trabalhos apresentam sistemas de controle baseado em modelos, conforme Kayacan; Ramon; Saeys (2015), Herrera *et al.*, (2016) e Hamersma e Els (2014).

O sistema de controle de veículos autônomos é estruturado em forma de cascata (RAFFO *et al.*, 2009). Conforme a figura 4, no nível 4 há o planejamento da navegação e trajetória do veículo. No nível 3, estão os algoritmos de controle para o seguimento da trajetória baseados em modelos

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

matemáticos. O controle da dinâmica do veículo está no nível 2. Por fim, no nível 1, estão os sistemas de sensores e atuadores de controle de subsistemas.

Figura 4 - Estrutura para o controle de veículos autônomos



Fonte: Adaptado de Raffo *et al.* (2009)

Um ponto fundamental para o deslocamento seguro de veículos autônomos com rodas é o controle e rastreamento de sua trajetória. Esse controle baseia-se na modelagem do veículo (RAFFO *et al.*, 2009).

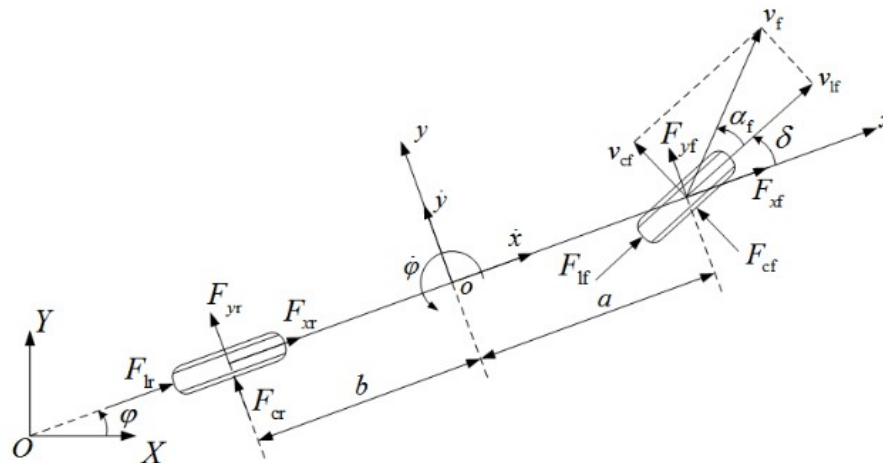
Os métodos de controle e rastreamento de trajetória utilizam a estimativa do erro entre a posição atual do veículo e o caminho de referência a ser seguido descrito pelo modelo matemático do veículo. Assim, na próxima seção, apresenta-se o estudo das metodologias de modelagem de veículos autônomos para uma melhor compreensão dos sistemas de controle.

3.3 Qual é a metodologia utilizada para realizar a modelagem matemática dos veículos autônomos utilizados na agricultura?

Conforme Herrera *et al.*, (2016) a metodologia para modelagem matemática dos veículos autônomos considera os princípios físicos dinâmicos presentes no sistema. Para facilitar o tratamento matemático, a análise do movimento dos veículos autônomos pode ser dividida em dinâmica longitudinal e dinâmica de guinada (LI *et al.*, 2016). A dinâmica longitudinal consiste na análise do movimento em linha reta, já a dinâmica de guinada compreende os movimentos longitudinal, lateral e rotacional responsáveis pela mudança de direção do veículo.

Diversos autores, como por exemplo Amer *et al.*, (2017), Kraus *et al.*, (2013), Kayacan *et al.*, (2015) Wei *et al.*, (2018), Herrera *et al.*, (2016) utilizaram o Modelo da Bicicleta para analisar a dinâmica de guinada de veículos autônomos. Tal modelo, ilustrado na figura 5, engloba os movimentos longitudinal, lateral e rotacional, considerando as não linearidades presentes no sistema para o movimento de mudança de direção. Tal análise aplica-se a veículos terrestres com eixos duplos e quatro rodas, supõe-se que o veículo é simétrico em relação ao plano longitudinal.

Figura 5 - Modelo da bicicleta para veículos autônomos



Fonte: Wei *et al.* (2018).

Conforme Wei *et al.* (2018) o Modelo da Bicicleta baseia-se nas equações:

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot \dot{y} \cdot \dot{\varphi} + 2 \cdot F_{xf} + 2 \cdot F_{xr} \quad (1)$$

$$m \cdot \ddot{y} = -m \cdot \dot{x} \cdot \dot{\varphi} + 2 \cdot F_{yf} + 2 \cdot F_{yr} \quad (2)$$

$$I \cdot \ddot{\varphi} = 2 \cdot a \cdot F_{yf} + 2 \cdot b \cdot F_{yr} \quad (3)$$

onde as variáveis F_x e F_y são as forças no pneu em relação ao sistema de coordenada do veículo. A roda dianteira é identificada pelo índice f e a roda traseira é identificada pelo índice r . As variáveis δ e α são o ângulo de direção do veículo e ângulo de deslizamento entre o pneu e o solo respectivamente. As variáveis a e b correspondem às distâncias do eixo frontal e do eixo traseiro até o centro de massa do veículo no sentido longitudinal. Tal modelo possui três graus de liberdade: velocidade longitudinal e lateral, \dot{x} e \dot{y} , e velocidade angular de guinada $\dot{\varphi}$. As variáveis m e I correspondem à massa e ao momento de inércia do veículo. As variáveis \ddot{x} , \ddot{y} e $\ddot{\varphi}$, correspondem à aceleração no sentido de deslocamento x , aceleração no sentido de deslocamento y e aceleração angular de guinada respectivamente. As forças são dadas em N , as distâncias em m , a massa em kg , o momento de inércia em kgm^2 , os ângulos em rad , a velocidade linear e angular em m/s e rad/s^2 , a aceleração linear do veículo é dada em m/s^2 e a aceleração angular em rad/s^2 .

A dinâmica longitudinal de um veículo, de acordo com Sun *et al.* (2019), pode ser descrita pela mecânica Newtoniana. No deslocamento há a ação de forças de resistência ao movimento que podem ser divididas em dois grupos, a resistência no estado de deslocamento constante e a resistência no estado de deslocamento transiente para aceleração ou desaceleração do veículo. O primeiro inclui a resistência ao rolamento (F_R) a resistência aerodinâmica (F_w) e a resistência

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

devido ao efeito gravitacional (F_G). O segundo refere-se a força de resistência devido a aceleração (F_a).

Dessa forma, a resistência total para o deslocamento longitudinal do veículo será o somatório de todas as forças de resistência, esse somatório representa a força tração (F_T) necessária para movimentar o veículo, conforme equação:

$$F_T = F_a + F_G + F_w + F_R \quad (4)$$

Um veículo é composto por diversos componentes, como motor, embreagem, caixa de câmbio, diferencial, suspensão, chassi e rodas. Esses componentes estão interconectados e afetam o comportamento de um veículo direta ou indiretamente. Os componentes que influenciam diretamente na dinâmica do veículo formam um sistema que é chamado de trem de força (KUMAR et al., 2017). Esse sistema compreende no motor, eixo de acionamento, transmissão e rodas.

Nos trabalhos apresentados por Eckert et al. (2018) e Wei et al. (2018) utilizou-se o modelo do trem de força do veículo para determinar o torque requerido no eixo de saída do motor (T_m) para movimentar o veículo, conforme equação:

$$T_m = \frac{r_d}{\eta_t \cdot i_t} \cdot F_T \quad (5)$$

onde i_t é a redução do sistema de transmissão do veículo, η_t é a rendimento do sistema de transmissão e r_d é o raio da roda.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenvolvimento deste estudo foi possível identificar que as tecnologias em robótica móvel e veículos autônomos estão presentes na agricultura.

Os veículos autônomos para a agricultura são divididos em dois grupos, os tratores autônomos que servem como fonte de potência e tração para implementos agrícolas e os robôs móveis, aplicados para realizar operações agrícolas específicas.

O controle dos veículos é realizado através da integração de sensores e modelos matemáticos que são responsáveis pela comparação da rota desenvolvida pelo veículo com a rota planejada.

Os modelos matemáticos que descrevem o deslocamento dos veículos autônomos são elaborados a partir do conceitos e leis físicas que envolvem o sistema, como os conceitos da cinemática e dinâmica de corpos rígidos.

Nesta pesquisa não encontrou-se trabalhos que tratam especificamente de veículos autônomos e robôs móveis aplicados à agricultura familiar, o que mostra que apesar da crescente demanda por soluções tecnológicas em termos de agricultura precisão, há uma lacuna no desenvolvimento de

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

tais equipamentos para esse setor.

REFERÊNCIAS

AMER, Noor Hafizah et al. Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: a review of state of the art and challenges. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 86, n. 2, p. 225-254, 2017.

BACCO, Manlio et al. Smart farming: opportunities, challenges and technology enablers. In: **2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture-Tuscany (IOT Tuscany)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

BASCETTA, Luca; CUCCI, Davide A.; MATTEUCCI, Matteo. Kinematic trajectory tracking controller for an all-terrain Ackermann steering vehicle. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 15, p. 13-18, 2016.

BEZERRA JUNIOR, Jose Etienne; QUEIROZ, Paulo Gabriel Gadelha; DE LIMA, Rommel Wladimir. A study of the publications of educational robotics: A Systematic Review of Literature. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 4, p. 1193-1199, 2018.

ECKERT, Jony Javorski et al. Energy storage and control optimization for an electric vehicle. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 11, p. 3506-3523, 2018.

HAMERSMA, Herman A.; ELS, P. Schalk. Longitudinal vehicle dynamics control for improved vehicle safety. **Journal of Terramechanics**, v. 54, p. 19-36, 2014.

HERRERA, Daniel; TOSETTI, Santiago; CARELLI, Ricardo. Dynamic modeling and identification of an agriculture autonomous vehicle. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 6, p. 2631-2637, 2016.

KAYACAN, Erkan et al. Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 115, p. 78-87, 2015.

KRAUS, Tom et al. Moving horizon estimation and nonlinear model predictive control for autonomous agricultural vehicles. **Computers and electronics in agriculture**, v. 98, p. 25-33, 2013.

KUMAR, Subhadeep; BHATT, Nirav; PASUMARTHY, Ramkrishna. A novel vehicle model for longitudinal motion analysis. In: 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). IEEE, 2017. p. 743-748.

LI, Boyuan; DU, Haiping; LI, Weihua. Trajectory control for autonomous electric vehicles with in-wheel motors based on a dynamics model approach. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 10,

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

n. 5, p. 318-330, 2016.

MILELLA, A.; REINA, G. 3D reconstruction and classification of natural environments by an autonomous vehicle using multi-baseline stereo. **Intelligent Service Robotics**, v. 7, p. 79-92, 2014.

OLIVEIRA, Walciney José das Chagas et al. Estimativa do custo horário de equipamentos e serviços em diferentes níveis de tecnificação em agricultura de precisão. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 59, n. 4, p. 378-385, 2016.

RAFFO, Guilherme V. et al. Control predictivo en cascada de un vehículo autónomo. **Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI**, v. 6, n. 1, p. 63-74, 2009.

REINA, Giulio et al. Ambient awareness for agricultural robotic vehicles. **biosystems engineering**, v. 146, p. 114-132, 2016.

SUBRAMANIAN, Vijay; BURKS, Thomas F.; ARROYO, A. A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. **Computers and electronics in agriculture**, v. 53, n. 2, p. 130-143, 2006.

SUN, Xiaoqiang et al. Optimal control of intelligent vehicle longitudinal dynamics via hybrid model predictive control. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 112, p. 190-200, 2019.

WANG, T.; WU, Y.; LIANG, J.; HAN, C.; CHEN, J.; ZHAO, Q. Analysis and Experimental Kinematics of a Skid-Steering Wheeled Robot Based on a Laser Scanner Sensor. **Sensors** v. 15, p. 9681-9702, 2015.

WEI, Shouyang et al. An Integrated Longitudinal and Lateral Vehicle Following Control System With Radar and Vehicle-to-Vehicle Communication. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 2, p. 1116-1127, 2019.