

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA COLHEITA DE FRUTAS

LUCAS BASTOS DA COSTA¹, ANTONIO CARLOS VALDIERO², LUIS ANTONIO RASIA³, OLAVO LUIZ KLEVESTON⁴

¹ Eng. Mec., DCEEng/UNIJUÍ Campus Panambi, (55) 3375-4466, lucas_bastos88@yahoo.com.br

² Dr. Eng. Mec., bolsista Produtividade CNPq, DCEEng/UNIJUÍ Campus Panambi, (55) 3375-4466, valdiero@unijui.edu.br

³ Dr. Eng. Ele., DCEEng/UNIJUÍ Campus Panambi, (55) 3375-4466, rasia@unijui.edu.br

⁴ Esp. Eng. Segurança do Trabalho, DCEEng/UNIJUÍ Campus Panambi, (55) 3375-4466, olavo.kleveston@unijui.edu.br

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

RESUMO: Apresenta-se a modelagem matemática e a análise da estabilidade de um braço robótico desenvolvido para aplicações agrícolas e acoplado a um micro trator articulado de quatro rodas a partir do estudo de caso da colheita de frutos. O objetivo é pesquisar e desenvolver um módulo computacional que a partir das características do braço robótico agrícola e dos valores medidos pelos sensores das juntas, calcule e verifique as condições de estabilidade para solução do problema segurança contra tombamentos laterais e transversais. A metodologia utilizada é baseada na análise das necessidades, na descrição do braço robótico agrícola, na modelagem matemática das relações cinemáticas e das massas envolvidas, na determinação dos parâmetros geométricos segundo a convenção de Denavit-Hartenberg e na utilização da ferramenta computacional MatLab para programação e simulação das condições de estabilidade no estudo de caso. Os resultados obtidos serão implementados num protótipo experimental que está sendo desenvolvido no Núcleo de Inovação e Mecanização da Agricultura Familiar (NIMAF) da UNIJUÍ com apoio da FAPERGS e do CNPq. Esta pesquisa visa contribuir para a qualidade da mecanização agrícola, ajudando na redução dos riscos de acidentes no trabalho e tornando-o mais rápido e produtivo.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de máquinas, Robótica na agricultura, Segurança do trabalho

STABILITY ANALYSIS OF A ROBOTIC ARM FOR FRUIT HARVEST

ABSTRACT: This work presents the mathematic modeling and the stability analysis of a robotic arm developed for agricultural applications and coupled to an articulated four-wheel small tractor from the case study of fruit harvest. The aim is to research and develop a computational module that from the agricultural robotic arm characteristics and the values measured by joint sensors, calculate and check the conditions of stability to solve the security problem against transverse and side overturn. The used methodology is based on the needs analysis, the agricultural robotic arm description, the mathematic modeling of kinematic relations and involved masses, determination of geometrical parameters according to Denavit-Hartenberg convention and the use of Matlab software tool for programming and simulation of the stability conditions in the case study. The results will be implemented in na experimental prototype that is being developed at the Innovation and Mechanization Center for Family Agriculture (NIMAF) in UNIJUÍ University with financial support by FAPERGS and CNPq. This research intends to contribute for agriculture mechanization quality, helping to reduce the risks of labor accidents and making the work faster and more productive.

KEYWORDS: Machine stability, Robotics in agriculture, Labor safety

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta a modelagem matemática e a análise da estabilidade de manipuladores seriais, a partir do estudo de caso de um equipamento já projetado para colheita de frutos. O equipamento projetado por Schuler (2012) foi dimensionado para ser acoplado em um micro trator utilizado na agricultura familiar (VALDIERO et al., 2008), sujeito a riscos de tombamento em configurações críticas, tornando-o inseguro para tal aplicação assim como diversos equipamentos agrícolas quando se altera a posição do centro de gravidade em relação a um ponto de apoio no solo.

A modelagem matemática (SICILIANO et al., 2009) das relações cinemáticas entre cada elo do braço robótico em função das variáveis de junta permite a dedução de equações gerais para o cálculo e a análise da estabilidade do conjunto, permitindo a verificação das situações de risco e garantindo a segurança do operador durante a movimentação e carregamento do braço robótico.

O manuseio de carga exige atenção e grande cuidado no carregamento. Ao exceder a capacidade de carga de um manipulador, o veículo poderá tombar em sentido transversal ou longitudinal, rompendo com a estabilidade do sistema, podendo gerar grandes riscos operacionais (COSTA, 2013). Para Gavilán et al. (2005) existem medidas técnicas e equipamentos para minimizar e anular alguns riscos operacionais sem afetar o processo produtivo na movimentação e elevação de cargas, dentre as quais destacam-se o dispositivo de segurança eletrônico, que trabalha no monitoramento dos riscos de excesso de carga para fins de evitar o tombamento da máquina e respeitar os limites especificados; e o limitador de final de curso, que interrompe a força quando o braço se encontra na distância mínima admissível.

Freitas (2006) comenta que outro fator importante para a manipulação de cargas é a visibilidade. Em caso de manipulações onde as condições de visibilidade não sejam satisfatórias é necessário à utilização de refletores focados em relação à operação conduzida. A verificação da presença de obstáculos na área de manipulação e movimentação de cargas também se faz necessário, pois caso haja rampas, taludes ou qualquer tipo de depressão no solo, pode ocorrer problemas de estabilidade na máquina. Neste trabalho, trata-se da análise das condições de estabilidade para solução do problema segurança contra tombamentos laterais e transversais num plano horizontal com a mudança do centro de gravidade devido à movimentação de um braço robótico.

A seção seguinte descreve a metodologia utilizada para modelar matematicamente e analisar as condições de estabilidade do braço robótico. E então, na seção posterior formula-se o modelo matemático das relações cinemáticas utilizadas no cálculo do torque resultante no equipamento agrícola. Os resultados obtidos são apresentados na sequência. Por fim, têm-se as conclusões.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada é baseada na análise das necessidades, na descrição do braço robótico agrícola, na modelagem matemática das relações cinemáticas e das massas envolvidas, na determinação dos parâmetros geométricos segundo a convenção de Denavit-Hartenberg (SICILIANO et al., 2009) e na utilização da ferramenta computacional MatLab para programação e simulação das condições de estabilidade no estudo de caso.

O estudo de caso escolhido é um braço robótico para colheita de frutas montado num micro trator articulado de quatro rodas. Os parâmetros dimensionais e inerciais do braço robótico foram obtidos a partir do projeto de Schuler (2012) e os do micro trator a partir de medições no protótipo (VALDIERO et al., 2008).

As equações da cinemática direta de manipuladores robóticos (SICILIANO et al., 2009) são obtidas a partir do produto das matrizes de transformação homogêneas de um elo do braço em relação ao outro. Estas equações são detalhadamente deduzidas na seção seguinte.

A partir do cálculo da posição de cada elo do braço robótico, pode-se calcular facilmente a contribuição da força peso deste elo para o torque resultante usado na condição de equilíbrio.

MODELAGEM CINEMÁTICA DO BRAÇO ROBÓTICO PARA COLHEITA DE FRUTAS

A FIGURA 1 mostra uma vista isométrica do micro trator articulado de quatro rodas com o braço robótico para colheitas de frutas montado na parte traseira do chassi.

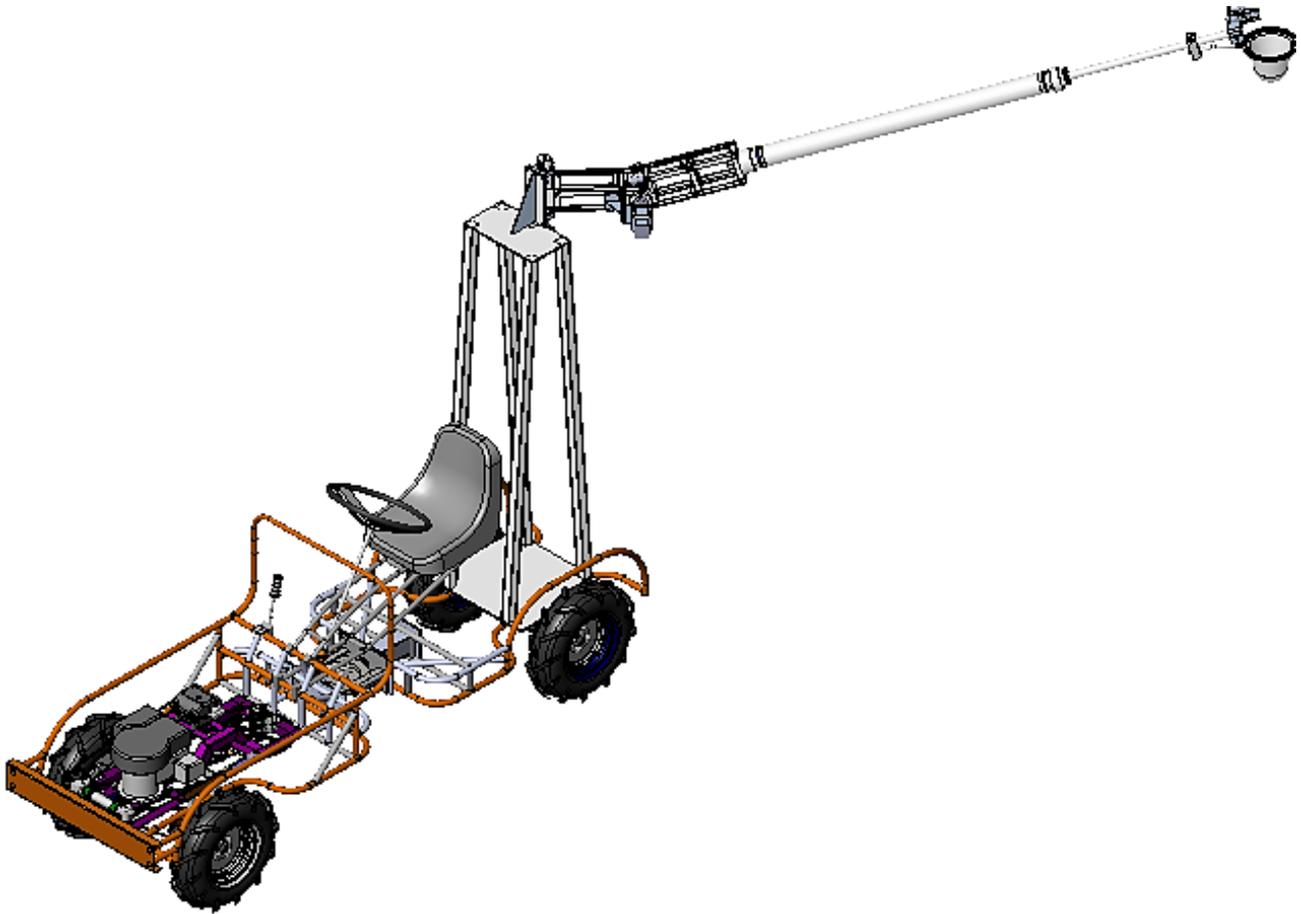


FIGURA 1. Vista isométrica do conjunto trator/manipulador robótico para colheita de frutas

Para a dedução das equações matemáticas da cinemática do braço robótico, primeiro identifica-se os elos e suas juntas, depois em cada elo define-se um sistema de coordenadas de referência utilizando-se a convenção de Denavit-Hartenberg (D-H) (SICILIANO et al., 2009), determinam-se os parâmetros de D-H, estabelece-se a matriz de transformação homogênea para cada elo da cadeia cinemática, e por fim obtém-se as equação matricial da cinemática direta por meio do produto à esquerda destas matrizes.

A FIGURA 2 ilustra a identificação dos elos e juntas do braço robótico para colheita de frutas e a FIGURA 3 mostra a definição dos sistemas de coordenadas de referência em cada elo. Cada sistema de coordenadas é determinado segundo a seguinte convenção: o eixo Z_i é ao longo do eixo da junta $i+1$, o eixo X_i é na normal entre os eixos Z_{i-1} e Z_i e o eixo Y_i obedece à regra da mão direita.

A partir dos sistemas de coordenadas de referência de cada elo é possível determinar os parâmetros de D-H, dados na TABELA 1, onde θ_i é o ângulo entre os eixos X_{i-1} e X_i , em torno do eixo Z_{i-1} (esta é a variável de junta para juntas rotativas); d_i é a posição da origem do eixo X_i em relação ao eixo Z_{i-1} (esta é a variável de junta para juntas prismáticas); a_i é a distância entre os eixos Z_{i-1} e Z_i ; e α_i é o ângulo entre o eixo Z_{i-1} e o eixo Z_i , em torno do eixo X_i .

Seguindo-se a convenção de Denavit-Hartenberg (SICILIANO et al., 2009), pode-se utilizar a chamada matriz de transformação homogênea, dada de forma geral pela equação (1), que relaciona o sistema de referência de um elo do robô em relação ao anterior:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \text{sen} \theta_i \cdot \text{sen} \alpha_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \cdot \text{sen} \alpha_i & a_i \cdot \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

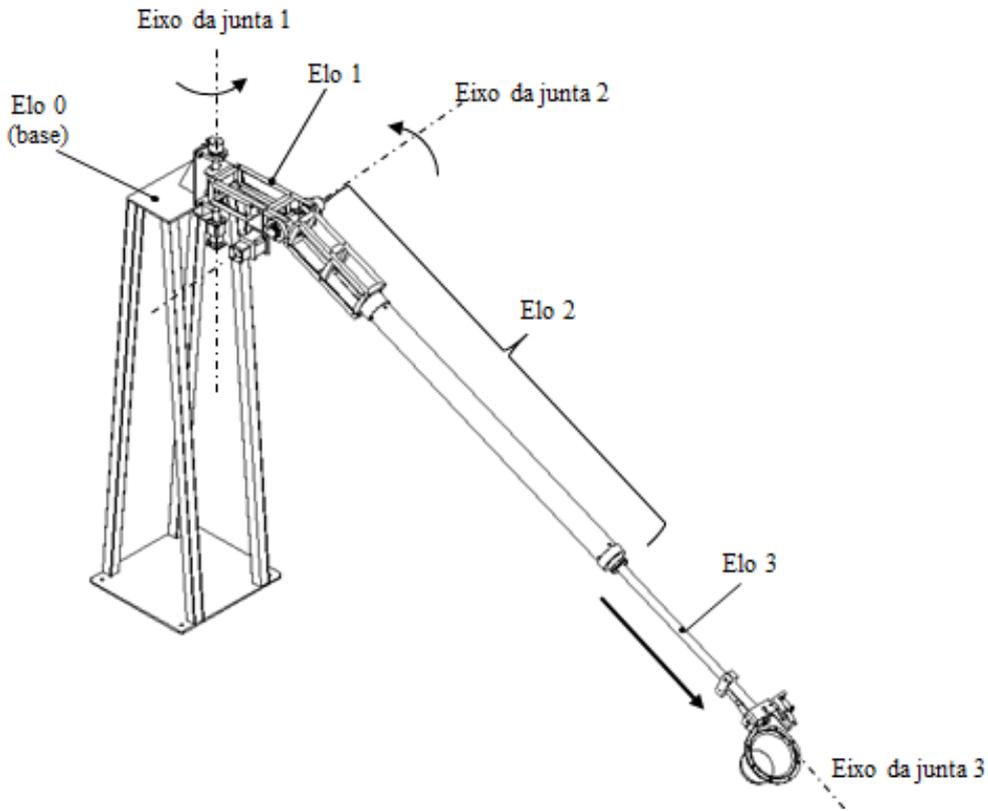


FIGURA 2. Identificação dos elos e juntas do braço robótico para colheita de frutas.

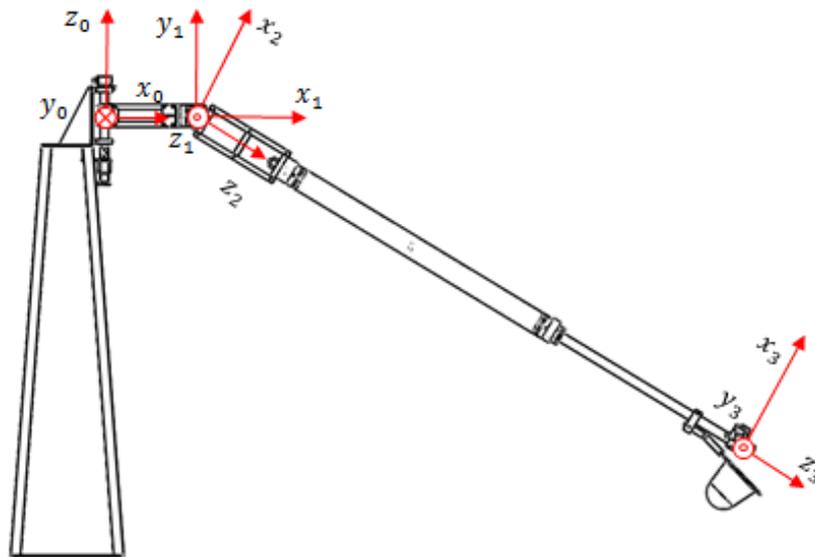


FIGURA 3. Definição dos sistemas de coordenadas de referência seguindo a convenção de Denavit-Hartenberg.

TABELA 1. Parâmetros de Denavit-Hartenberg para o braço robótico de colheita de frutas.

Parâmetros de Denavit-Hartenberg (D-H)				
Elo_i	θ_i	d_i	α_i	a_i (m)
Elo_1	θ_1	\emptyset	$\pi/2$	$a_1 = 0.410$
Elo_2	θ_2	\emptyset	$\pi/2$	\emptyset
Elo_3	\emptyset	d_3	\emptyset	\emptyset

A partir do cálculo de cada matriz de transformação homogênea em função dos parâmetros de D-H e da adequada multiplicação, obtém-se a equação da cinemática direta do braço robótico para colheita:

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 & (\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2) \cdot d_3 + a_1 \cdot \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 & \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 & (\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2) \cdot d_3 + a_1 \cdot \sin \theta_1 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & -\cos \theta_2 \cdot d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Esta matriz fornece as informações da orientação e da posição do sistema de coordenadas de referência $x_3y_3z_3$ (efetuador final do braço robótico) em relação ao sistema de referência $x_0y_0z_0$ (base fixa no chassi do micro trator). Da mesma forma é possível obter a localização de cada elo do braço robótico em relação à base fixa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da modelagem cinemática do braço robótico para colheita de frutas, pode-se calcular a posição da força peso em cada elo em função de sua configuração, dada pelos valores das variáveis de junta medidas pelos sensores. No presente caso, dois encoders incrementais fornecem os sinais proporcionais aos deslocamentos angulares (θ_1 e θ_2) das duas primeiras juntas do braço robótico e um transdutor de deslocamento fornece o sinal proporcional ao deslocamento linear (d_3) da haste telescópica do braço, onde na sua extremidade está montado o efetuador final (ferramenta para colheita de frutas).

Em cada elo i , pode-se expressar o vetor da posição do centro de gravidade em relação ao seu sistema de referência como:

$$\vec{P}_{CGi}^i = \begin{bmatrix} X_{CGi}^i \\ Y_{CGi}^i \\ Z_{CGi}^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

O cálculo do torque gerado pela força peso de cada elo em relação ao sistema de referência da base é dado pelo seguinte produto vetorial:

$$\vec{T}_i^0 = \vec{P}_{CGi}^i \times \vec{F}_i \quad (4)$$

onde \vec{P}_{CGi}^i é o vetor posição do centro de gravidade do elo i em relação ao sistema da base e \vec{F}_i é força peso do elo i de massa m_i , dado por:

$$\vec{F}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_i g \end{bmatrix} \quad (5)$$

Na condição de estabilidade para que não haja o tombamento no sentido longitudinal e transversal, conforme ilustrado na FIGURA 4, a componente T_y da resultante dos torques devido às cargas no braço robótico não deve ultrapassar o momento da força peso do trator em relação ao eixo traseiro e nem a componente T_x da resultante dos torques devido às cargas no braço robótico não deve ultrapassar o momento da força peso do trator em relação ao ponto de apoio das rodas laterais.

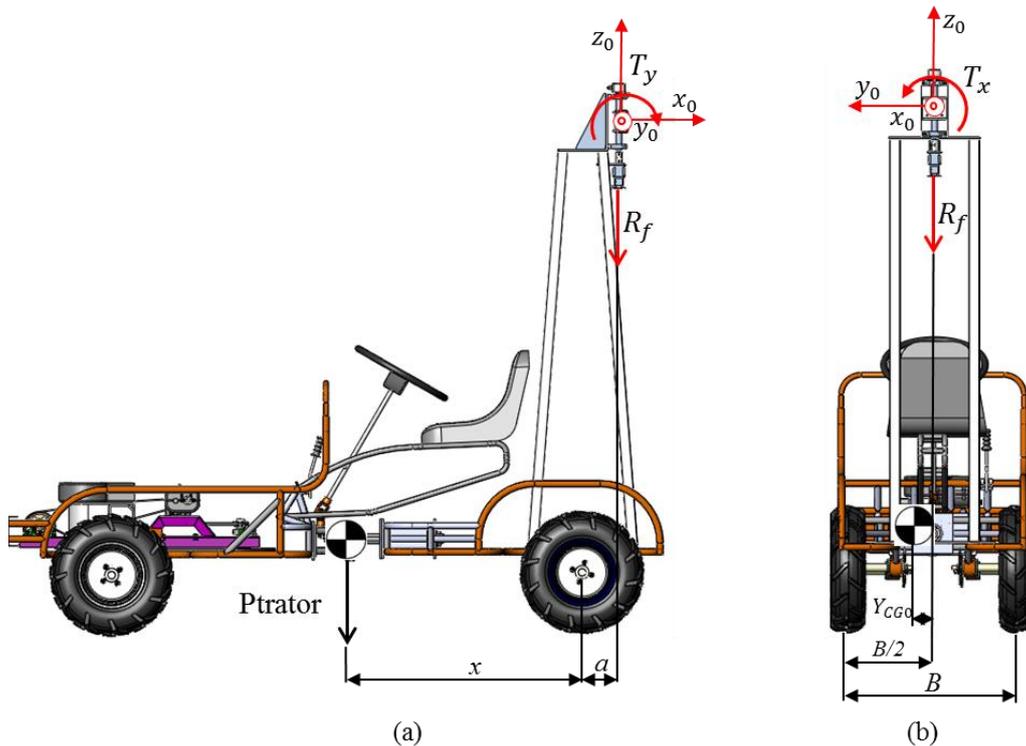


FIGURA 4. Forças e torques envolvidos das condições de estabilidade (a) contra o tombamento longitudinal. (b) e contra o tombamento transversal.

A TABELA 2, os valores das coordenadas do centro de gravidade de cada elo em relação ao seu sistema de referência, juntamente com a intensidade do centro de gravidade de cada elo. Estes valores serão utilizados no vetor da expressão 4 para o cálculo final da estabilidade.

TABELA 2. Valores das coordenadas do centro de gravidade de cada elo em relação ao sistema da base (fixo no chassi do micro tractor).

Descrição	Massa m_i (kg)	Sistema de Referência	X_{CGi} (m)	Y_{CGi} (m)	Z_{CGi} (m)
Massa do tractor + Massa Base	228.51	$X_0Y_0Z_0$	-1,33	0,00026	-2,056
Elo_1	2,06	$X_1Y_1Z_1$	-0,0483	- 0,00081	0,00826
Elo_2	3,33	$X_2Y_2Z_2$	0,0009	-0,0388	1,060
Elo_3	1,86	$X_3Y_3Z_3$	-0,00345	0,0141	-0,601

A metodologia proposta prevê ainda a definição de uma carga variável no efetuator final do braço robótico para colheita que pode simular uma interação com o meio ou simplesmente simular uma condição de carga de frutos. Neste estudo de caso, simulou-se uma massa m_4 de 50 kg; conforme ilustra a FIGURA 5. A FIGURA 6 a posição do centro de gravidade do trator somado à base fixa do braço robótico.

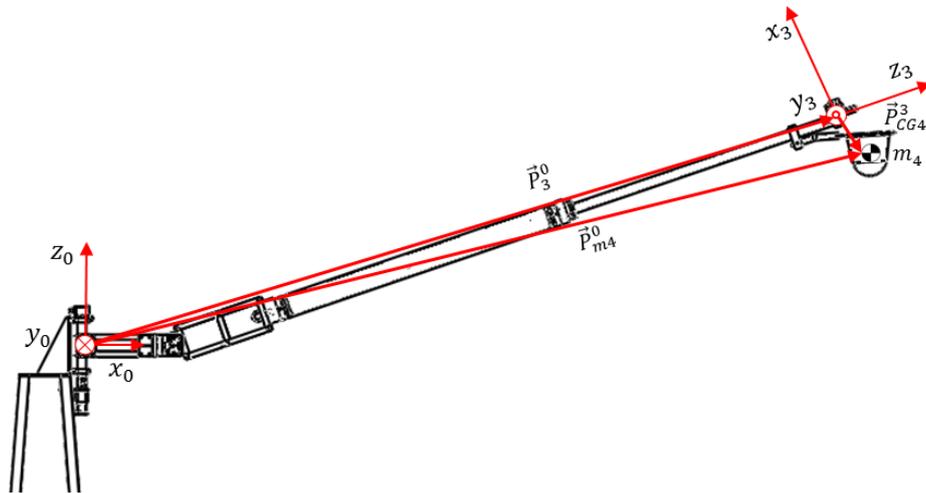


FIGURA 5. Posição do centro de gravidade da carga em relação ao sistema de referência da base fixa.

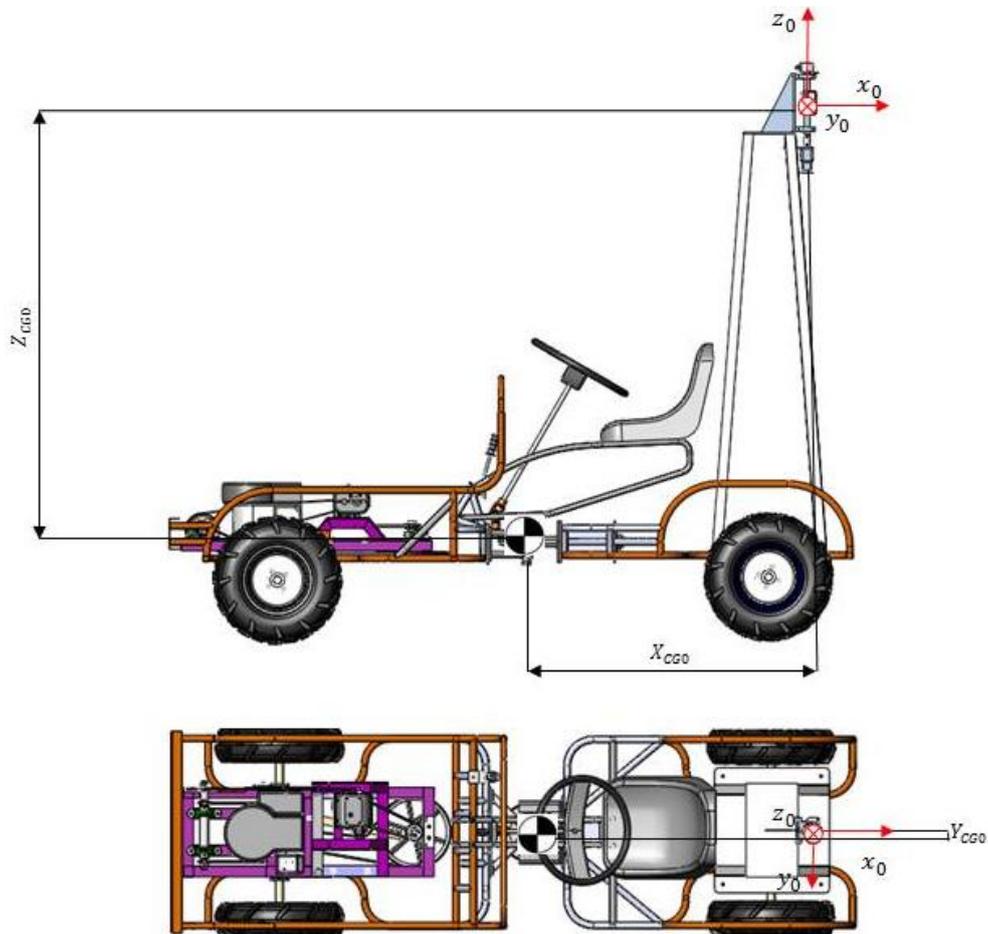


FIGURA 6. Posição do centro de gravidade do trator somado a base fixa do braço robótico.

A simulação das condições de estabilidade simulando-se diversas configurações possíveis para o braço robótico (diferentes valores dos ângulos θ_1 , θ_2 e das posições de d_3) foi obtida por meio de programação computacional. Os resultados da simulação numérica e as análises críticas são expressos através de um gráfico do mapeamento das posições críticas mostrado na FIGURA 7.

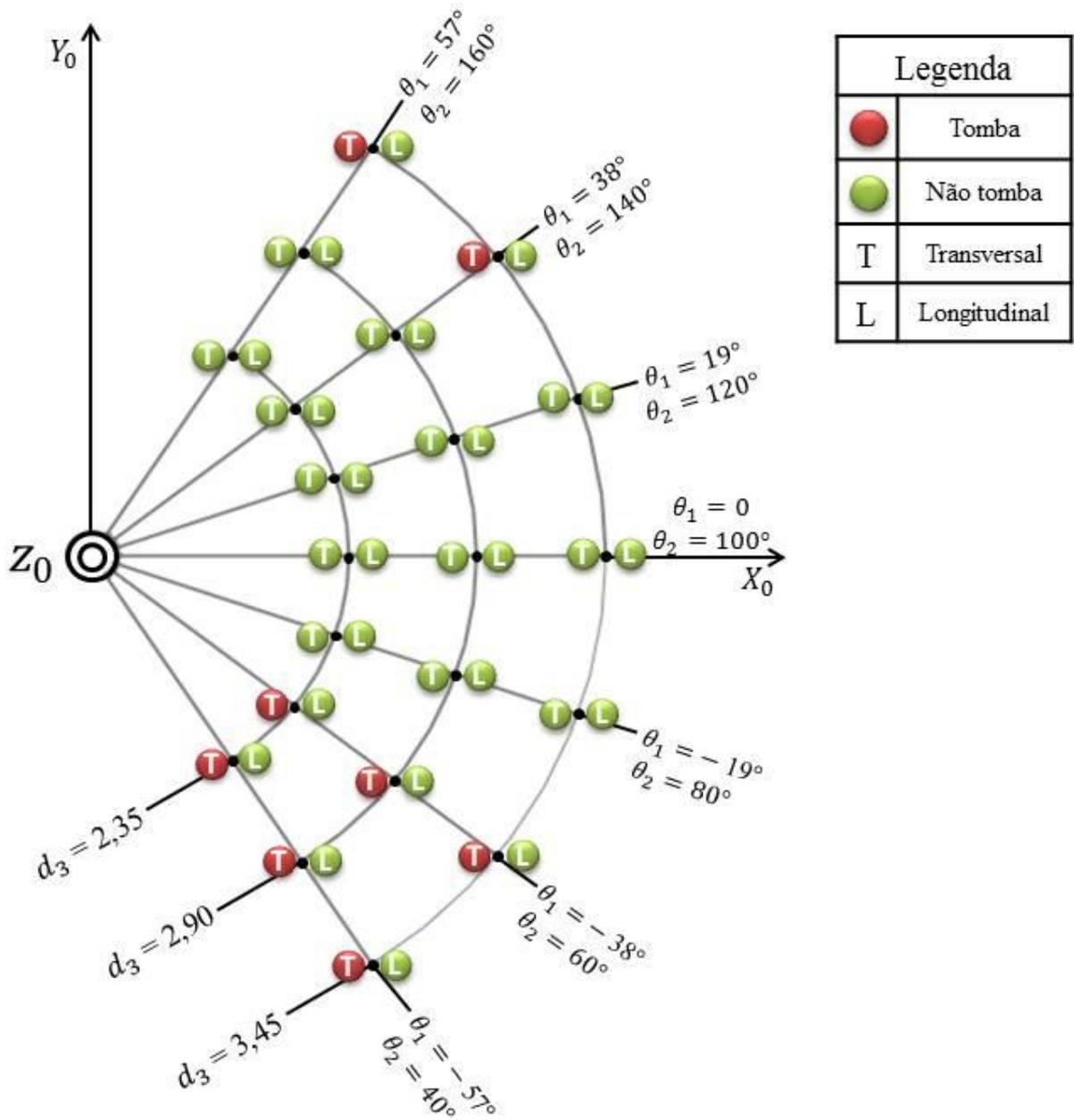


FIGURA 7. Gráfico do mapeamento da estabilidade.

Os pontos críticos com instabilidade do sistema e possível risco à segurança do operador estão ilustrados com bolas vermelhas e as condições seguras para a manipulação do braço robótico para colheita de frutas estão indicadas em verde. A letra “L” indica que foi analisada a condição de estabilidade longitudinal e a letra “T” indica que foi analisada a condição de estabilidade transversal. Em cada ponto analisado estão discriminados os valores das variáveis de junta referentes à configuração do braço robótico.

CONCLUSÕES

Os resultados do desenvolvimento da modelagem matemática e da análise da estabilidade do

braço robótico para colheita de frutas mostram a importância da sinergia de conhecimentos de robótica industrial e de projeto de máquinas agrícolas através de uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento. O algoritmo de análise de estabilidade pode ser generalizado para planos inclinados e facilmente implementado em Unidades de Comando Eletrônico (ECUs) de máquinas e equipamentos com eletrônica embarcada ou na automatização de máquinas convencionais. As próximas etapas da pesquisa preveem a implementação num protótipo experimental que está sendo desenvolvido no Núcleo de Inovação e Mecanização da Agricultura Familiar (NIMAF) da UNIJUÍ com apoio da FAPERGS e do CNPq. Pretende-se assim contribuir para a melhoria do maquinário agrícola, tornando-o mais seguro, com menos riscos de acidentes para o operador, e tornando a tarefa mais rápida e produtiva.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. Os autores são agradecidos também à Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelas bolsas de iniciação científica e desenvolvimento tecnológico, à UNIJUÍ pela infraestrutura do Núcleo de Inovação e Mecanização da Agricultura Familiar (NIMAF), implantado com recursos provenientes da FAPERGS e complementados pelo SEBRAE e pelo FINEP/SEBRAE/MCT, num convênio de interação Universidades-Empresas do Arranjo Produtivo Local Metal-Mecânica.

REFERÊNCIAS

- COSTA, L. B. *Modelagem matemática e análise da estabilidade de manipuladores seriais*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). UNIJUÍ: Panambi, 2013.
- FREITAS, C. F. S. *Segurança na operação de guindastes hidráulicos móveis*. Monografia (Programa de Pós-Graduação em Engenharia). Universidade de Pernambuco: Recife, 2006.
- GAVILÁN, V. R. B.; LINS, J. F. A. B.; GONÇALVES, D. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A. *Fatores de risco ocupacional do operador de guindastes de pequeno porte: uma revisão de literatura*. 2005.
- SCHULER, D. *Projeto de um manipulador robótico para colheita de frutos*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). UNIJUÍ: Panambi, 2012.
- SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L., VILLANI, L., ORIOLO, G. *Robotics: Modeling, Planning and Control*. 1 ed. Springer: Inglaterra, 2009.
- VALDIERO, A. C.; VIAU, L. V. M.s; ANDRIGUETTO, P. L.; BAAL, E.n; SILVA, J. G. da; *Innovative modular design of a machine for aromatic plants harvesting*. In: CIGR – International Conference of Agricultural Engineering, XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2008, Foz do Iguaçu: 2008.