

Evento: XXV Seminário de Iniciação Científica

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM PULVERIZADOR DE POMARES DO TIPO TORRE UTILIZANDO DIAGRAMAS DE BIFURCAÇÃO¹
ANALYSIS OF STABILITY OF A TOWER TYPE ORCHARD SPRAYER USING BIFURCATION DIAGRAMS

Nadine Thiele², Cássio L. M. Belusso³

¹ Projeto de iniciação científica desenvolvido na UFFS campus Cerro Largo, PRO-ICT/UFFS

² Bolsista de Iniciação Científica. Aluna de Engenharia Ambiental e Sanitária. UFFS, Campus Cerro Largo/RS, email: nadithiele@hotmail.com.

³ Professor orientador, mestre em modelagem matemática, professor da UFFS Campus Cerro Largo. email: cassio.belusso@uffs.edu.br.

Introdução

A agricultura é uma atividade básica de subsistência para o ser humano desde os tempos mais remotos. Com o passar dos séculos, as técnicas de cultivo foram aperfeiçoadas com a introdução de maquinários agrícolas que permitiram suprir a demanda da população. Dentre as tecnologias inerentes ao setor agrícola, com enfoque para as plantações de grande porte, destacam-se os pulverizadores de pomares do tipo torre. A estrutura destes é montada sobre um reboque, geralmente composta por uma ou duas torres de pulverização dotadas de ventiladores que espalham de forma homogênea os defensivos agrícolas (BELUSSO, 2011). Entretanto, é importante ressaltar que, devido à altura da torre de pulverização e a irregularidade dos terrenos agrícolas, o sistema pode apresentar sinais de instabilidade, dificultando a pulverização. Assim, com o intuito de otimizar o desempenho do equipamento, busca-se, com este trabalho, fazer uma análise do sistema que descreve o pulverizador agrícola utilizando a modelagem matemática.

A modelagem matemática é um campo de pesquisa que busca a construção e implementação de modelos matemáticos de sistemas reais. Essa atividade nem sempre é simples, uma vez que os modelos dependem de variáveis e parâmetros que representam o sistema real (AGUIRRE, 2007). Pode-se modelar um sistema por meio de equações diferenciais não lineares que, em muitos casos, não possuem solução analítica. Por outro lado, apesar de serem, por vezes, mais complexas, as equações não lineares apresentam resultados bem mais precisos. A análise de pontos de equilíbrio e de estabilidade permite buscar aproximações para estas soluções e interpretá-las (MONTEIRO, 2002).

Neste trabalho, utiliza-se a modelagem matemática para analisar a estabilidade de um pulverizador agrícola do tipo torre representado por um modelo matemático desenvolvido por Sartori Junior (2009). O modelo é composto por três equações diferenciais ordinárias de segunda ordem que representam os principais movimentos realizados pelo pulverizador. Os parâmetros de análise escolhidos para a verificação da estabilidade deste equipamento foram a rigidez da junção torsional da torre de pulverização (K_T), por estar diretamente relacionada à sustentação da mesma, a amplitude (A) e a frequência (ω) dos sinais de excitação, ambas por estarem relacionadas ao solo sobre o qual o equipamento transita e às vibrações provocadas pelas irregularidades do mesmo. O movimento do pulverizador escolhido para análise foi o deslocamento angular da torre, uma vez que esta, por localizar-se na parte mais alta do equipamento, encontra-se mais propensa a sofrer uma maior influência das vibrações.

Evento: XXV Seminário de Iniciação Científica

A opção pela utilização de diagramas de bifurcação para a análise de estabilidade deve-se ao fato de que eles são ferramentas capazes de indicar o momento exato em que ocorrem mudanças qualitativas no sistema (GUILHERME, 2004). Com isso, é possível visualizar os efeitos provenientes da variação dos parâmetros no movimento analisado. Sendo assim, este trabalho faz uma análise, com auxílio da modelagem matemática, do comportamento dinâmico do modelo matemático que representa o princípio de funcionamento de um pulverizador agrícola do tipo torre e busca identificar, através da construção de diagramas de bifurcação, sob quais condições o deslocamento angular da torre de pulverização pode apresentar condições de estabilidade e instabilidade na estrutura.

2 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho encontra-se inteiramente voltado à simulação computacional e, para isso, o software utilizado foi o MatLab. O modelo matemático proposto baseia-se no modelo desenvolvido por Sartori Júnior (2009). Para a criação do algoritmo computacional que gera os diagramas de bifurcação utilizou-se o modelo matemático em variáveis de estado, o que permite uma análise individual das variáveis, neste caso a variável que representa o deslocamento angular da torre (ϕ_2). Inicialmente foram definidos os intervalos de cada parâmetro a serem considerados durante as simulações. A cada execução do algoritmo, analisaram-se os efeitos da variação de cada um dos parâmetros escolhidos no deslocamento angular da torre. A fim de proporcionar uma maior aproximação da realidade, as oscilações do solo foram representadas por funções periódicas, tendo em vista que terrenos agrícolas são, na sua grande maioria, irregulares. A Figura 1 apresenta o equipamento real (à esquerda), onde é possível verificar todos os seus componentes, e uma simplificação do modelo (à direita), fora do seu ponto de equilíbrio, com todos os parâmetros e variáveis do sistema indicados.

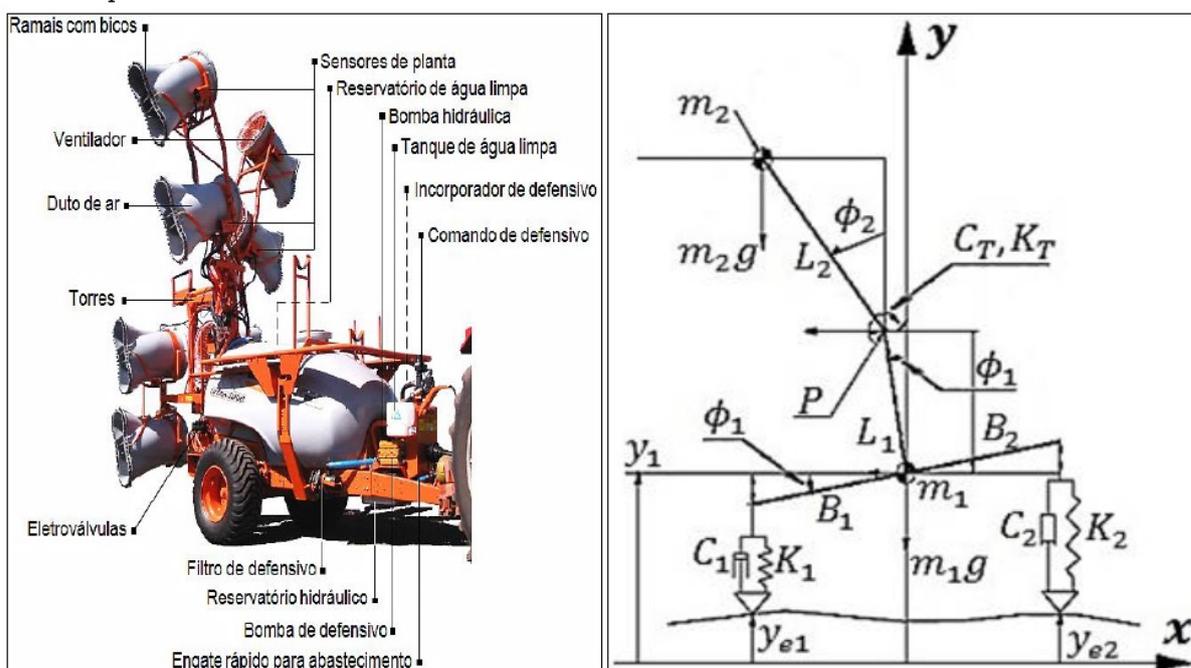


Figura 1: Pulverizador agrícola do tipo torre: (esq.) modelo real, (dir.) modelo simplificado.

Evento: XXV Seminário de Iniciação Científica

(SARTORI JUNIOR *et al.*, 2009).

O modelo matemático que representa os principais movimentos do pulverizador é composto por três equações diferenciais ordinárias não lineares de segunda ordem e está apresentado na forma matricial na Equação 1. Os demais parâmetros utilizados nas simulações foram obtidos a partir dos trabalhos de Sartori Júnior (2009) e Belusso (2011), os quais seguem as recomendações do fabricante.

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix} = [M]^{-1} \begin{bmatrix} K_1 y_{s1} + K_2 y_{s2} + C_1 \dot{y}_{s1} + C_2 \dot{y}_{s2} \\ -K_1 B_1 \cos \phi_1 y_{s1} + K_2 B_2 \cos \phi_1 y_{s2} - C_1 B_1 \cos \phi_1 \dot{y}_{s1} + C_2 B_2 \cos \phi_1 \dot{y}_{s2} \\ 0 \end{bmatrix} \\ - [M]^{-1} \begin{bmatrix} (K_2 B_2 - K_1 B_1) \sin \phi_1 + (m_1 + m_2) g \\ (K_1 B_1^2 + K_2 B_2^2) \sin \phi_1 \cos \phi_1 - m_2 g L_1 \sin \phi_1 \\ -m_2 g L_2 \sin \phi_2 \end{bmatrix} \\ - [M]^{-1} \begin{bmatrix} 0 & -m_2 L_1 \cos \phi_1 & -m_2 L_2 \cos \phi_2 \\ 0 & 0 & -m_2 L_1 L_2 \sin(\phi_2 - \phi_1) \\ 0 & -m_2 L_1 L_2 \sin(\phi_2 - \phi_1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1^2 \\ \dot{\phi}_1^2 \\ \dot{\phi}_2^2 \end{bmatrix} \\ - [M]^{-1} \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & (C_2 B_2 - C_1 B_1) \cos \phi_1 & 0 \\ (C_2 B_2 - C_1 B_1) \cos \phi_1 & C_T + (C_1 B_1^2 + C_2 B_2^2) \cos^2 \phi_1 & -C_T \\ 0 & -C_T & C_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} \\ - [M]^{-1} \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & 0 & 0 \\ (K_2 B_2 - K_1 B_1) \cos \phi_1 & K_T & -K_T \\ 0 & -K_T & K_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$$

Onde M é dada por:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & -m_2 L_1 \sin \phi_1 & -m_2 L_2 \sin \phi_2 \\ -m_2 L_1 \sin \phi_1 & I_1 + m_2 L_1^2 & m_2 L_1 L_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \\ -m_2 L_2 \sin \phi_2 & m_2 L_1 L_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) & I_2 + m_2 L_2^2 \end{bmatrix}$$

(1)

Os sinais de excitação do modelo utilizado nas simulações têm origem no solo, por meio do contato dos pneus do equipamento com a superfície, onde cada pneu representa uma excitação distinta. As variáveis utilizadas para representar essas excitações foram y_{s1} e y_{s2} , correspondendo, respectivamente, ao deslocamento do pneu esquerdo e do pneu direito. Ambas as excitações são ondas senoidais, diferenciadas somente por um ângulo de fase determinado, representado por ϕ , e são dados por $y_{s1} = A \sin(\omega t + \phi)$ e $y_{s2} = A \sin(\omega t + \phi + \theta)$.

3 Resultados e discussões

Os diagramas de bifurcação construídos permitem a análise global das soluções, uma vez que,

Evento: XXV Seminário de Iniciação Científica

através de um único gráfico, é possível observar o comportamento para todo um intervalo definido de parâmetro. As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam os diagramas de bifurcação para o parâmetro da frequência dos sinais de excitação, sendo a Figura 2(b) uma ampliação da Figura 2(a) para uma melhor visualização das bifurcações e também da região caótica.

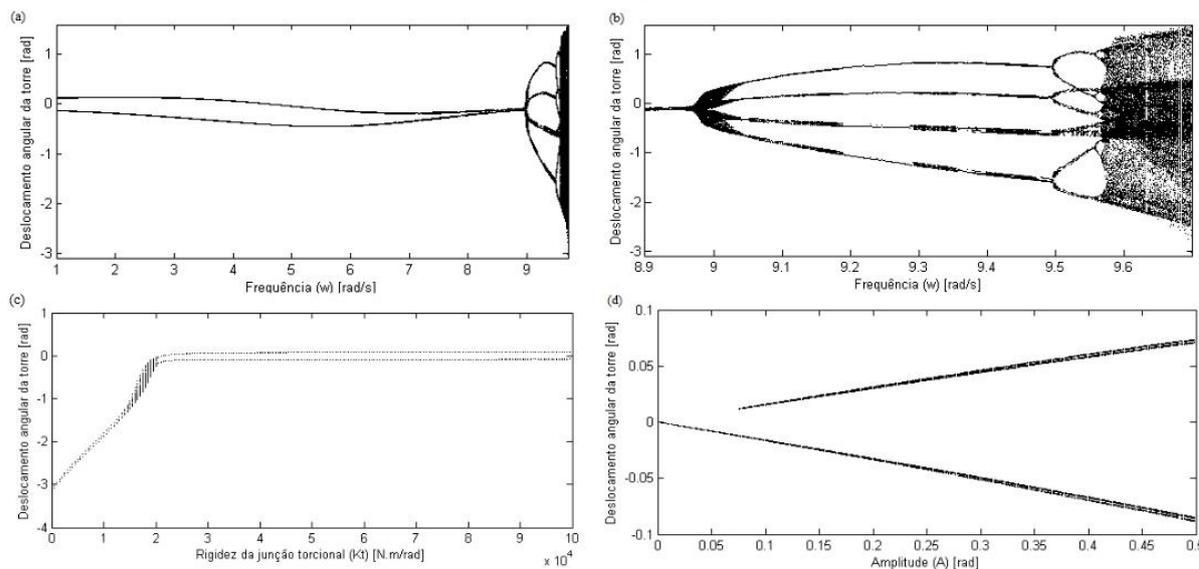


Figura 2. (a) Diagrama de bifurcação mediante variação de: (a) e (b) frequência dos sinais de excitação, (c) rigidez da junção torsional, (d) amplitude dos sinais de excitação.

Nelas, observa-se sinais de estabilidade nas soluções do sistema para valores menores de frequência, onde não há mudança qualitativa nas soluções apresentadas no diagrama. Porém, a amplitude de resposta do deslocamento angular da torre torna-se maior com o aumento gradual deste parâmetro e, a partir de uma frequência em torno de $\omega = 8,9$ rad/s, começam a ocorrer mudanças qualitativas nas soluções do sistema. Por volta da frequência $\omega = 9$ rad/s ocorre a primeira bifurcação, ou seja, a torre, que antes oscilava em torno de um único ponto de equilíbrio, passa a oscilar em torno de mais de um ponto. Além disso, pode-se detectar o momento em que o sistema se torna caótico e já não é mais possível prever como o mesmo vai se comportar.

Na Figura 2(c) tem-se o diagrama de bifurcação para o parâmetro da rigidez da junção torsional da torre. Nota-se uma periodicidade nas soluções, o que caracteriza a estabilidade da torre no intervalo de valores escolhido para esse parâmetro.

A análise mediante a variação do parâmetro da amplitude nos sinais de excitação pode ser observada na Figura 2(d) e permite verificar que, com o aumento gradual no valor do parâmetro, a amplitude de resposta do deslocamento angular da torre também aumenta. Logo, a variação deste parâmetro influencia diretamente na estabilidade do equipamento.

5 Considerações Finais

Os diagramas de bifurcação possuem a capacidade de mostrar, de uma só vez, diferentes comportamentos que um sistema não linear pode apresentar mediante variação de determinado parâmetro. Através da construção dos diagramas, conseguiu-se atingir os objetivos propostos no trabalho, verificando a influência de parâmetros de controle no deslocamento angular da torre de

Evento: XXV Seminário de Iniciação Científica

um pulverizador agrícola.

A variação na frequência dos sinais de excitação mostrou intervalos com respostas estáveis e intervalos com respostas instáveis, incluindo caos. Percebeu-se que a variação do parâmetro de rigidez não provocou efeitos drásticos no deslocamento angular da torre, caracterizando o movimento como periódico. A variação do parâmetro da amplitude nos sinais de excitação dos pneus demonstrou que, conforme aumenta-se a amplitude dos sinais de excitação, há também um aumento na amplitude de resposta do sistema, pois o contato dos pneus com o solo provoca vibrações na estrutura que são sentidas na torre de pulverização.

Como parte de trabalhos futuros, pretende-se analisar a influência dos demais parâmetros do modelo na estabilidade do pulverizador, além de outros sinais de excitação, abrangendo mais tipos de solos.

Palavras-chave: Modelagem matemática; Sistemas não lineares; Simulação numérica; Caos.

Keywords: Mathematical modeling; Non-linear systems; Numerical simulation; Chaos.

Referências

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas:** Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Belo Horizonte: UFMG, 2007, 3^a. ed.

BELUSSO, C. L. M. **Análise da estabilidade do modelo não linear de um pulverizador agrícola do tipo torre.** 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.

GUILHERME, K. de L. **Vibrações Não-Lineares e Não-Ideais de um Sistema de Dois Graus de Liberdade.** 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MONTEIRO, Luiz Henrique Alves. **Sistemas Dinâmicos.** São Paulo, Editora Livraria da Física, 2002.

SARTORI JUNIOR, S.; BALTHAZAR, J. M.; PONTES JUNIOR, B. R. **Non-Linear Dynamics of a Tower Orchard Sprayer Based on an Inverted Pendulum Model.** *Biosystems Engineering*, v. 103, p. 417-426, 2009.