



## MODELO DO ERRO DE TAXA DE APLICAÇÃO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ESTERÇAMENTO DE UM PULVERIZADOR TRATORIZADO

*E.A.G. Peñaloza<sup>1</sup>, H.V. Mercaldi<sup>1</sup>, K.R. Felizardo<sup>2</sup>, V.A. Oliveira<sup>1</sup>, P.E. Cruvinel<sup>3</sup>*

- (1) Departamento de Engenharia Elétrica, EESC/USP, Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, 86300-000, São Carlos, SP, egamboa@usp.br, heitor@usp.br, vilma@sc.usp.br  
(2) Universidade Técnica Federal do Paraná, Avenida Alberto Carazzai, 1640, 86300-000, Cornélio Procópio, PR, klerber@uftpa.br  
(3) Embrapa Instrumentação, Rua XV de Novembro, 1452, 13560-970, São Carlos, SP, paulo.cruvinel@embrapa.br

**Resumo:** Este trabalho apresenta um estudo sobre o erro de aplicação de agrotóxicos em culturas agrícolas como uma função do equipamento de aplicação utilizado. Erros de aplicação podem ocorrer em virtude das condições de uso dos sistemas de aplicação, o que inclui a operação do veículo utilizado para seu transporte, bem como o traçado do caminho percorrido pelo pulverizador. Neste estudo é feita uma avaliação do erro de aplicação, tomando como base a cinemática de esterçamento na condução do trator e consequentemente do pulverizador acoplado. Neste contexto, é apresentado um modelo cinemático do conjunto trator-pulverizador considerando os ângulos de esterçamento. Baseado nesse modelo cinemático são apresentados resultados de simulações para o erro da aplicação que ocorre em função de trajetórias curvilíneas realizadas pelo maquinário em função do ângulo de esterçamento.

**Palavras-chave:** modelo cinemático, esterçamento, pulverização, erro de aplicação, taxa variada.

### **MODELING THE ERROR FOR THE APPLICATION RATE OF PESTICIDES BY USING THE SPRAYER STEERING ANGLE**

**Abstract:** This paper presents a study on the error of pesticides application rate in agricultural crops as a function of the application equipment used. Application errors can occur because of the conditions of use of the equipment, which includes the operation of the vehicle used for transportation, as well as the path of the sprayer. In this study an evaluation of application errors based on the kinematics of steering in driving the tractor and consequently the sprayer coupled thereto is conducted. In this context a kinematic model of the tractor-sprayer considering the angles of steering is presented. Thus, based on this kinematic model, simulation results for the application error that occurs as a function of the curvilinear trajectories performed by machinery depending on the steering angle are presented.

**Keywords:** kinematic model, steering, pesticides spraying, pesticides drift, variable rate.

### **1. Introdução**

Para a aplicação de agrotóxicos os pulverizadores são extensivamente utilizados, podendo ser encontrados em versões mais simples como é o caso dos pulverizadores manuais costais, assim como pulverizadores de barra autopropelidos e os veículos terrestres e aéreos desenvolvidos especificamente para a pulverização (CRUVINEL, 2013). Miller e Steward em 2002 simularam modelos de esterçamento para pulverizadores autopropelidos com atuação individual em cada roda do veículo e obtiveram configurações de esterçamento das rodas que puderam reduzir erros de aplicação em trajetórias curvilíneas (MILLER & STEWARD, 2002).

Por um lado, os pulverizadores autopropelidos apresentam grande flexibilidade, mas por outro lado, seu custo é elevado comparado aos pulverizadores tratorizados como os de barra-acoplados e barra-carreta, onde, de modo geral somente as rodas dianteiras do trator participam do movimento de esterçamento.

Os sistemas do tipo de barra-acoplados são fixados diretamente na parte traseira do trator, transferindo de forma direta o seu movimento para a barra de pulverização. Neste caso, o comportamento cinemático do conjunto é similar ao autopropelido e uma estimativa do erro de aplicação foi proposta por Luck e colaboradores em 2011 (LUCK *et al.*, 2011). Os pulverizadores do tipo barra-carreta possuem o sistema de pulverização montado em um veículo separado (carreta) e são tracionados através de um acoplamento por barra de tração ou engate de 3 pontos.

Neste trabalho, são apresentados a modelagem e os resultados decorrentes do uso da cinemática de esterçamento e seus efeitos na pulverização de agrotóxicos tomando por base modelos de simulação para a cinemática do conjunto trator-pulverizador.

## 2. Materiais e Métodos

Para o estudo do conjunto trator-pulverizador foram selecionados equipamentos comerciais, um trator John Deere modelo 6110J e um pulverizador tratorizado tipo barra-carreta Jacto modelo Advance 3000 AM24. Neste tipo de configuração (Figura 1), as manobras são realizadas através do esterçamento das rodas dianteiras do trator. Em pulverizadores de barra, a vazão em cada ponta é dada por:

$$Q_p = \frac{D_p v_T E}{60000} \quad (1)$$

onde  $Q_p$  é a vazão na ponta [ $l/min$ ],  $V_p$  é a velocidade da ponta [ $km/h$ ],  $E$  é o espaçamento entre as pontas [ $cm$ ] e  $D$  é a taxa de aplicação [ $l/ha$ ] do agroquímico.

Considerando os sistemas de pulverização convencionais, nos quais a vazão do agroquímico a ser aplicado se distribui igualmente entre as pontas, é comum encontrar controladores de pulverização que apresentem erros de aplicação inferiores a 5%. Neste trabalho, é considerado o erro relativo à aplicação em percursos curvilíneos.

Também, no âmbito deste desenvolvimento não foram consideradas outras fontes de erro de aplicação, como é o caso do desgaste das pontas, a falta de calibração do pulverizador, o erro de prescrição, erros do controlador de pulverização, a má formação das gotas, bem como sua absorção pela planta e o efeito da deriva.

O erro de aplicação neste caso é dado em função da diferença de velocidade entre as pontas internas e externas relativas ao raio de curva no centro do veículo pulverizador, onde é medida a velocidade para cálculo da vazão de aplicação, conforme ilustra a equação (1). A velocidade de cada ponta em função da velocidade angular pode ser dada por  $V_p = w R_p$  em que  $w$  é a velocidade angular do pulverizador [ $rad/s$ ] e  $R_p$  é a posição da ponta com relação ao centro do raio da curva  $R$ , dado em metros.

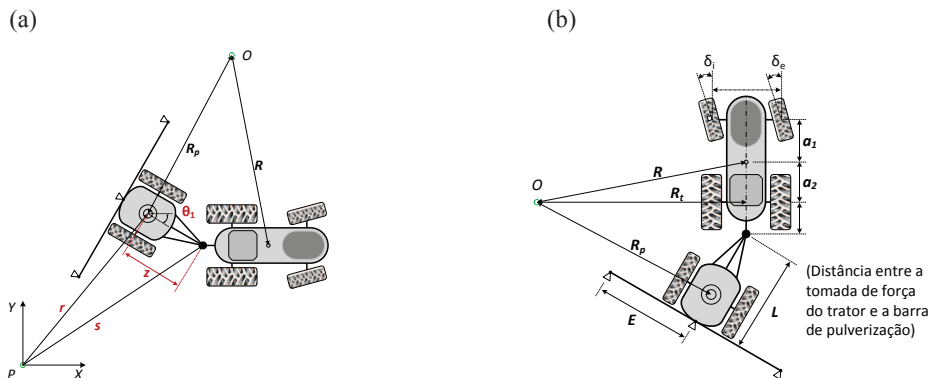


Figura 1. (a) Cinemática do conjunto trator-pulverizador (b) Modelo do esterçamento para curvas.

### 2.1 Cinemáticas de esterçamento

Para avaliar o erro de aplicação é proposta uma trajetória curvilínea do tipo espiral (Figura 2a), onde cada ponto é espaçado do anterior por 10 metros (Figura 2b). O modelo desenvolvido neste trabalho é baseado na geometria de Akerman, isto é, são consideradas velocidades suficientemente baixas para que não ocorra deslizamento nas rodas (JAZAR, 2008).

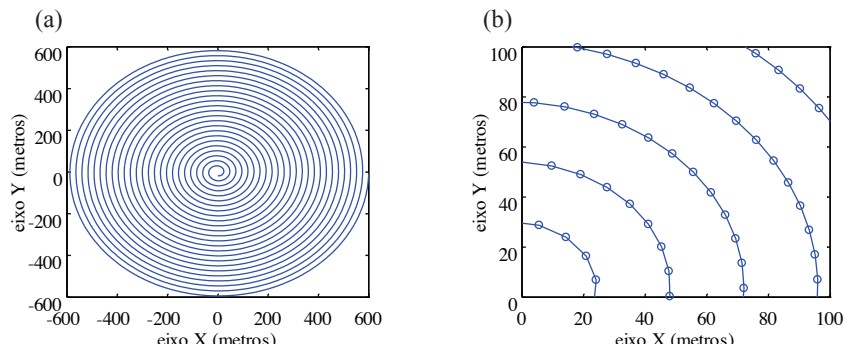


Figura 2. (a) Percurso projetado para avaliar o desempenho do conjunto trator pulverizador em trajetórias curvilíneas; (b) Detalhe do espaçamento entre os pontos.

Para obter as velocidades de cada ponta de pulverização foi usado o modelo cinemático do conjunto trator-pulverizador. Sejam os vetores  $r = [x \ y]^T$  e  $S = [x_p \ y_p]^T$  e as posições do trator e pulverizador, respectivamente. O vetor  $Z$  definido na Figura 1a pode ser descrito pela diferença  $s = r - z$ , assim, obtém-se a posição do pulverizador em função da posição do trator e a velocidade do pulverizador em função da velocidade do trator:

$$\begin{bmatrix} x_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) - L \cos(\theta_1) \\ y(t) - L \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} + L \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \\ \dot{y} - L \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

em que  $L$  é o comprimento do pulverizador. Com o modelo cinemático do pulverizador (Equação 2), pode-se calcular a velocidade do pulverizador e as velocidades de cada ponta em função da cinemática do trator.

2.1.1. Modelo para o esterçamento

O ângulo que fornece a direção do trator pode ser aproximado por um valor médio usando um modelo cinemático de uma bicicleta. O modelo cinemático leva em conta o centro de rotação e o centro de massa do trator, assim como as dimensões e as distâncias do ponto de acoplamento com respeito ao trator e ao pulverizador. Para obter a taxa que é aplicada por cada bico são usadas as equações que definem a posição e orientação do trator e do pulverizador (Equação 2), assim como o modelo que representa a razão de fluxo do herbicida e água (Equação 1) (OLIVI *et al.*, 2010).

Através do raio de curva do conjunto trator-pulverizador pode-se calcular o ângulo médio de esterçamento das rodas interna e externa do trator para avaliar o erro de aplicação em função do ângulo de esterçamento das rodas. O modelo para o ângulo médio de esterçamento das rodas do trator é dado por:

$$\delta(t) = \cot^{-1} \left( \frac{\sqrt{R(t)^2 - a_2^2}}{(a_2 + a_1)} \right) \quad (4)$$

em que  $R(t)$  é o radio de curvatura do trator,  $a_1$  e  $a_2$  são constantes que determinam a distância entre o centro de massa e o eixo das rodas dianteiras e traseiras, respectivamente.

2.1.2. Validação do modelo cinemático

Para validar o modelo cinemático é usada a distância entre os vetores de posição do conjunto trator-pulverizador. Seja  $b$  a distância Euclidiana entre os vetores  $r$  e  $s$  Calculando  $b$ , para todos os valores de posição do trator e pulverizador para certa velocidade, deve-se encontrar como resultado um valor constante igual à magnitude do vetor  $|Z| = L$ . Este resultado é consistente com a diferença  $z = r - s$  que foi o ponto de partida da modelagem da cinemática do conjunto trator-pulverizador.

3. Resultados e Discussão

O modelo cinemático do conjunto trator pulverizador foi simulado utilizando a plataforma MatLab<sup>®</sup> e Simulink<sup>®</sup> com os parâmetros físicos do conjunto dos seus respectivos manuais.

Na Figura 3 é apresentado o gráfico do erro de aplicação em função do raio de curva para pontas nas posições +/- 6m e +/- 12m, o valor de referência, posição 0m com relação ao centro do pulverizador, bem como são apresentados os erros da aplicação em função do ângulo de esterçamento. Na Figura 3a pode ser observado o erro de aplicação em função do raio. Na Figura 3b é possível verificar o valor do raio de curva (~250m) para o qual o erro de aplicação é inferior a +/- 5%, no pior caso (posição -12m).

Na Figura 3c é apresentado o gráfico do ângulo de esterçamento versus o raio de curva. Assim como esperado, é possível verificar a diminuição do ângulo de esterçamento quando o raio de curvatura aumenta e se aproxima de uma reta. Na Figura 3d é apresentado o gráfico do erro de aplicação em função do ângulo de esterçamento para pontas nas posições +/- 6m e +/- 12m, bem como o valor de referência.

Nestes resultados pode ser observada uma relação direta, em valores absolutos, entre o aumento do erro de aplicação e o aumento do ângulo de esterçamento.

4. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um modelo cinemático do conjunto trator-pulverizador para avaliação do erro de aplicação de agrotóxicos agrícolas. Este modelo forneceu subsídios para o estudo do erro de aplicação em função do raio de curvatura e do ângulo de esterçamento das rodas do trator. Foi encontrado o valor de  $|Z| = 6,05$  para uma velocidade de 11,78m/s, o que indica coerência com a dimensão estabelecida entre a tomada de

força do trator e a barra de pulverização  $L$ . As manobras durante a pulverização de agrotóxicos podem acarretar desperdício de insumo e erro de aplicação. Este erro de aplicação precisa ser quantificado em operações de campo para avaliação do impacto econômico e da qualidade da aplicação. A análise conjunta dos resultados apresentados indica que é possível o desenvolvimento de um algoritmo para monitorar o erro de aplicação baseado em sensores de esterçamento das rodas do veículo que transporta o sistema de pulverização.

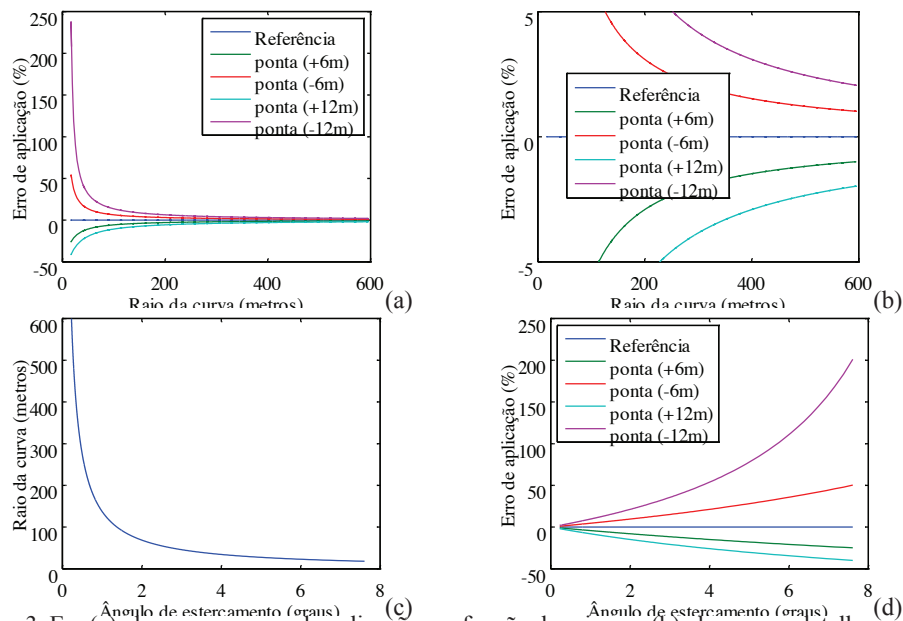


Figura 3. Em (a) observa-se o erro de aplicação em função do raio, em (b) observa-se detalhes onde o erro é inferior a  $\pm 5\%$ , em (c) observa-se a variação do raio de curvatura versus o ângulo de esterçamento, (d) os erros da aplicação em função do ângulo de esterçamento.

## Referências

- CRUVINEL, P.E. Desenvolvimento da aplicação aérea de agrotóxicos como estratégia para o controle de pragas agrícolas de interesse nacional, (Coordenação) Rede de Pesquisa, MP2 Embrapa, código No. 02.11.07.025.00.00, 2013.
- JAZAR, R. N. Vehicle Dynamics: Theory and Application. Riverdale, NY, Springer, 2008. 1015 p.
- LUCK, J. D.; PITLA, S. K.; ZANDONADI, R.S.; SAMA, M. P.; Shearer, S. A. Estimating off-rate pesticide application errors resulting from agricultural sprayer turning movements. Precision Agriculture, v.12, p. 534-545, 2011.
- MILLER, M. A.; STEWARD, B. L. Control and evaluation methods for multi-mode steering. Automation Technology for Off-Road Equipment Conference, Chicago, IL, p. 357-366, 2002.
- OLIVI, L. R.; VILMAA, O.; FELIZARDO K. R. Hybrid modeling and predictive control for a variable rate herbicide application System. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito MS, p.3479-3484, 2010.