

SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS DE TRILHA E SEPARAÇÃO EM COLHEDORAS DE GRÃOS¹

Daniel Marçal de Queiroz², Cristiano Márcio Alves de Souza³, Francisco de Assis de Carvalho Pinto²,
Evandro Chartuni Mantovani⁴

RESUMO

O desempenho de uma máquina colhedora de grãos está diretamente relacionado às características mecânicas dos mecanismos de trilha e separação nela utilizados. Além disso, estes mecanismos influenciam as perdas quantitativas e qualitativas de produto durante o processo. Diante disso, desenvolveu-se um programa de computador para simular os processos de trilha e separação de uma máquina colhedora de grãos. Esse programa permitiu estimar as perdas que ocorrem no sistema em função das variáveis associadas ao processo e apresentou boa interface do usuário, mostrando relativa facilidade de aprendizado e de uso quando comparados aos programas já desenvolvidos.

Palavras chave: colheita, saca-palhas, fluxo axial

ABSTRACT

Simulation of Threshing and Separation Process in Grain Harvesters

The combine harvester performance is directly related to the mechanical characteristics of the used threshing and separating devices. In addition, these devices affect the quantitative and qualitative losses of the product when processed. So, a software was developed to simulate the threshing and separating processes of grain harvester combines. This program allowed to estimate the losses occurring in the system as a function of the variables related to the process, as well as presenting an intuitive user interface, as showing relative easiness for learning and using, compared to the available development programs.

Keywords: harvesting, straw walker, axial flow

¹ Pesquisa financiada pela FAPEMIG e pela FINEP.

² Prof. Adjunto, DEA-UFV, Viçosa, MG, CEP 36570-000. E-mail: queiroz@ufv.br e facpinto@ufv.br.

³ Doutorando em Eng. Agrícola, bolsista do CNPq. DEA-UFV. E-mail: csouza@vicoso.ufv.br.

⁴ Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG. E-mail: evandro@cnpm.embrapa.br.

INTRODUÇÃO

A produção agrícola de milho, soja, arroz e feijão totalizou 91 milhões de toneladas na safra de 2002 (IBGE, 2003). Com o desenvolvimento da mecanização agrícola, ocorrida nos últimos anos, estima-se que 75% dessa safra tenham sido colhidas mecanicamente.

A colheita mecânica apresenta uma série de vantagens, em relação aos processos de colheita manual. Dentre essas vantagens, destaca-se o menor custo para realizar a operação, a redução no tempo de colheita bem como no esforço requerido dos trabalhadores rurais, uma vez que a colheita constitui uma das etapas mais árduas na cadeia de produção de grãos.

Um dos grandes problemas associados à colheita de grãos está relacionado às perdas quantitativas e qualitativas às quais os produtos estão expostos. Trabalhos realizados têm demonstrado que, dependendo das condições de colheita, as perdas de grãos podem superar 10% do total produzido. Vale lembrar que as perdas na colheita para uma cultura bem implantada, quando se utiliza uma máquina adequadamente regulada, não devem ultrapassar 3%.

Além de problemas associados à regulagem das máquinas, tanto as perdas qualitativas quanto quantitativas estão associadas ao fluxo de material e às condições do material que entra na colhedora. Cada mecanismo de uma colhedora tem uma capacidade de processamento que depende das suas características mecânicas e das condições do produto, que está sendo colhido. Sempre que a capacidade-limite de um mecanismo é ultrapassada, tanto perdas quantitativas quanto qualitativas podem ocorrer, além do risco de embuchamento da máquina. Produtos com elevada umidade são mais difíceis de serem colhidos e processados, razão pela qual a capacidade de colheita de uma máquina é sensivelmente reduzida, quando o produto apresenta elevada umidade.

Prever o comportamento dos diversos mecanismos que compõem uma máquina de colheita não é tarefa fácil diante da complexidade dos processos envolvidos.

Mesmo assim, vários pesquisadores (Beck e Kutzbach, 1996; Bjork, 1988; Huynh et al., 1982; Kim e Gregory, 1989; Mailander e Krutz, 1984; Miu e Kutzbach, 1997; Miu et al. 1997; Trollope, 1982; Usrey et al., 1992; Souza et al., 1998; Souza et al., 2003) têm trabalhado no sentido de desenvolver modelos capazes de simular o comportamento de um ou mais mecanismos utilizados em colhedoras de grãos.

Após a etapa da modelagem do sistema de interesse, a atenção é voltada aos aspectos de desenvolvimento do modelo computadorizado. A implementação de programas de computador, para simular os processos de trilha e separação em uma colhedora de grãos, pode contribuir para que os engenheiros e pesquisadores, que trabalham na área de colheita mecanizada, compreendam melhor os diversos aspectos ligados a esses processos. A partir daí, trabalhos podem ser conduzidos no sentido de desenvolver projetos de máquinas mais eficientes, ou encontrar as condições ideais de funcionamento das máquinas já existentes.

O experimento de simulação foi conduzido, logo após a construção eletrônica do modelo computadorizado, sendo, nessa etapa, processada a estimação gradiente, também denominada análise de sensibilidade, que se baseia em formar razões de valores dos parâmetros de interesse, após sucessivas simulações. Por outro lado, se o objetivo é o aperfeiçoamento e redução de custo de construção, a análise a ser realizada é a de otimização.

Souza et al. (1998) implementaram um modelo de simulação de perdas no mecanismo de trilha, na colheita de milho-pipoca, utilizando o modelo proposto por Huynh et al. (1982), sendo encontradas eficiências de separação variando entre 75 e 85%. Esse modelo apresentou 3,96% de erro relativo médio, em relação aos resultados obtidos experimentalmente. Adotando um procedimento similar ao de Huynh et al. (1982), Miu et al. (1997) desenvolveram um modelo para prever o processo de trilha e separação, em sistemas de trilha do tipo axial. O modelo foi validado com base em resultados experimentais, com coeficiente de determinação estatístico maior que 0,97. Da

mesma forma, Souza et al. (2003) implementaram um modelo de simulação de trilha e separação mecânica, para uma máquina de arrasto com sistema de trilha em fluxo axial, usada no recolhimento de feijão. Os resultados simulados apresentaram 1,78% de erro relativo médio, em relação àqueles obtidos experimentalmente.

Assim, este trabalho objetivou a implementação de modelos de simulação e a realização de análises de sensibilidade dos processos de trilha e separação, em colhedoras de grãos.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Um programa computacional orientado a objetos, com interface interativa e

flexível foi desenvolvido para simular os processos de trilha e separação, em uma colhedora combinada de grãos. A linguagem de programação MS Visual Basic, versão 6, foi utilizada no desenvolvimento do programa computacional.

O programa computacional desenvolvido consiste de três seções, uma para a entrada de dados sobre a lavoura e características operacionais, outra exclusivamente para simulação de perdas no mecanismo de trilha e no saca-palhas e a última para simulação de perdas no mecanismo de trilha e separação de um sistema axial (Figura 1). Um sistema de banco de dados, contendo as características de colhedoras, foi implementado no programa desenvolvido. Para acessar os dados armazenados, o usuário deve selecionar o tipo de sistema de trilha e separação usado na colhedora e o modelo da mesma.

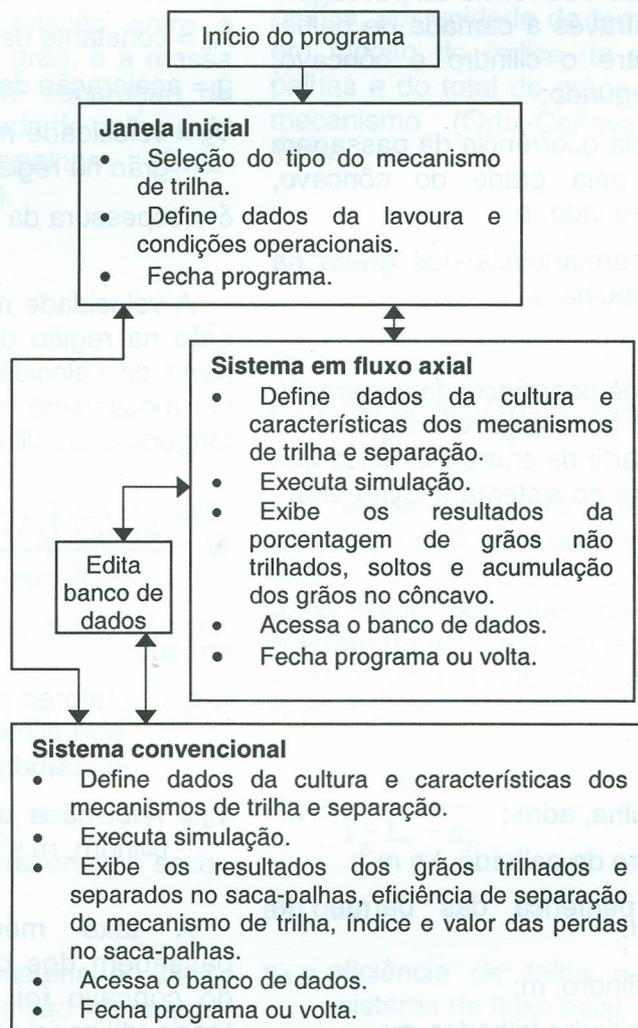


Figura 1. Fluxograma do programa computacional desenvolvido.

Para simular a eficiência de trilha e separação de uma máquina de fluxo tangencial, foi utilizada a equação proposta por Huynh et al. (1982), apresentada a seguir, na Equação 1:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_2^j \lambda_3^j (\lambda_2^j - \lambda_3^j) e^{-\lambda_1 t_c} + \lambda_3 \lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_1) e^{-\lambda_2^j t_c} + \lambda_1 \lambda_2^j (\lambda_1 - \lambda_3^j) e^{-\lambda_3 t_c}}{(\lambda_1 - \lambda_2^j)(\lambda_2^j - \lambda_3)(\lambda_1 - \lambda_3)}$$

em que:

η_T = eficiência de separação do côncavo, dec.;

m = número de camadas em que será dividida a camada de palha-grão na região entre o cilindro e o côncavo, no sentido radial;

λ_1 = taxa média de ocorrência da separação entre a panícula ou espiga e os grãos, grãos por segundo;

λ_2^j = taxa média de ocorrência da passagem dos grãos através a camada de palha, formada entre o cilindro e côncavo, grãos por segundo;

λ_3 = taxa média de ocorrência da passagem dos grãos pela grade do côncavo, grãos por segundo; e

t_c = tempo de permanência dos grãos na região de debulha, s.

A taxa média de ocorrência da separação entre a panícula ou espiga e os grãos foi determinada, a partir da energia cinética que o cilindro transfere ao sistema (Huynh et al., 1982).

$$\lambda_1 = k_t \frac{\rho V_t^2 W D}{Q C} \quad (2)$$

em que:

k_t = fator de debulha, adm.;

ρ = densidade livre da palhada, kg m^{-3} ;

V_t = velocidade periférica das barras do cilindro, m s^{-1} ;

W = largura do cilindro, m;

D = diâmetro do cilindro trilhador, m;

Q = taxa de alimentação de palhada do sistema de trilha, kg s^{-1} ; e

C = abertura média entre cilindro e côncavo, m.

A taxa média de ocorrência da passagem dos grãos através de uma camada de palha foi determinada considerando-se as forças gravitacionais e centrífuga e a resistência oferecida pela palhada (Huynh et al., 1982).

$$\lambda_2^j = \frac{1}{\tau} \quad (3)$$

$$\tau = k_m \sqrt{\frac{\delta}{g + \frac{2 V_s^2}{D}}} \quad (4)$$

em que:

τ = tempo médio decorrido para o grão ultrapassar uma camada de palha-grão, de espessura δ , até atingir o côncavo, s;

k_m = constante de correção, adm.;

g = aceleração da gravidade, m s^{-2} ;

V_s = velocidade média de avanço da palha-grão na região de trilha, m s^{-1} ; e

δ = espessura da camada até a posição j , m.

A velocidade média de avanço da palha-grão na região de trilha foi determinada, a partir da velocidade de entrada do produto no mecanismo de trilha e da velocidade tangencial do cilindro (Huynh et al., 1982).

$$V_s = \frac{k_f V_0 + k_r V_t}{2} \quad (5)$$

em que:

k_f e k_r = fatores de deslizamento da esteira, que alimenta o cilindro e das barras do cilindro, respectivamente; e

V_0 = velocidade da esteira, que alimenta o cilindro, m s^{-1} .

A taxa média de ocorrência da passagem dos grãos através das grades do côncavo foi determinada, a partir da teoria utilizada para prever a passagem de

partículas através do crivo de uma peneira (Huynh et al., 1982).

$$\lambda_3 = \frac{V_s (a_1 - a_2 - d_g) (b_1 - b_2 - d_g)}{a_1 b_1^2} \quad (6)$$

em que:

a_1 = distância entre os barras circulares do côncavo, m;

a_2 = diâmetro das barras circulares do côncavo, m;

b_1 = distância entre as barras retangulares do côncavo, m;

b_2 = espessura das barras retangulares do côncavo, m; e

d_g = diâmetro equivalente do grão, m.

O índice de perdas no saca-palhas foi determinado a partir da relação entre a massa de material, exceto grão, e a massa de grãos, da eficiência de separação do côncavo, da altura da camada de palha e do comprimento do saca-palhas (Ortiz-Cañavate e Hernanz, 1989).

$$P_{sp} = \left(\frac{1 + k + \eta_T}{1 - \eta_T} \right) e^{-\mu \frac{L_{sp}}{h_{sp}}} \quad (7)$$

em que:

P_{sp} = porcentagem de perda de grãos no saca-palhas, em relação à quantidade de grãos que entra nesse mecanismo;

η_T = porcentagem de grãos, que atravessa o côncavo;

μ = constante, que varia entre 0,40 e 0,60, adm.;

L_{sp} = comprimento do saca-palhas, m;

k = relação palha/grão, adm.; e

h_{sp} = altura da camada de material no saca-palhas, m.

A altura da camada de material no saca-palhas foi calculada em função da massa específica e da velocidade de deslocamento longitudinal do material, exceto grãos, e da

largura do saca-palhas (Ortiz-Cañavate e Hernanz, 1989).

$$h_{sp} = \frac{Q_g}{\rho_{sp} v_{sp} W_{sp}} \quad (8)$$

em que:

Q_g = fluxo de grãos, que entra no mecanismo de trilha, kg s^{-1} ;

ρ_{sp} = massa específica do material, exceto grãos, kg m^{-3} ;

v_{sp} = componente longitudinal da velocidade do material sobre o saca-palhas, m s^{-1} ; e

W_{sp} = largura do saca-palhas, m.

A quantidade de grãos perdida no saca-palhas, por unidade de tempo, foi calculada em função do índice de perdas no saca-palhas e do total de grãos que entra nesse mecanismo (Ortiz-Cañavate e Hernanz, 1989).

$$P_{sp} = p_{sp} Q_g (1 - \eta_T) \quad (9)$$

em que:

P_{sp} = perda de grãos no saca-palhas, kg s^{-1} .

A eficiência de trilha e separação, em sistemas de fluxo axial, foi calculada com base na equação de continuidade, considerando-se que os eventos, que ocorrem na trilha e associados à separação, seguem uma distribuição exponencial (Miu et al., 1997).

$$\eta_A = \frac{s_d}{1 - L_t - s_s} \quad (10)$$

em que:

η_A = eficiência de trilha e separação em sistema de fluxo axial, dec.;

s_d = função densidade de probabilidade da separação de grãos, dec.;

s_s = fração acumulada de grãos separados, dec.; e

L_t = perda de grãos por deficiência de trilha, dec.

Para estimar a função densidade de probabilidade da separação de grãos, foi utilizada uma expressão baseada em uma distribuição exponencial (Miu et al., 1997).

$$s_d = \frac{\lambda \beta}{\lambda - \beta} (e^{-\beta x} - e^{-\lambda x}) \quad (11)$$

em que:

λ = taxa linear de trilha, m^{-1} ;

β = taxa linear de separação, m^{-1} ; e

x = distância entre o início do cilindro e o ponto considerado, m.

A taxa linear de trilha foi calculada, em função do tempo decorrido para ocorrência do evento e da velocidade axial do material no espaço onde acontece a trilha (Miu et al., 1997).

$$\lambda = \frac{1}{\tau v_a} \quad (12)$$

em que:

τ = tempo de ocorrência do evento, s; e

v_a = velocidade axial do material, $m s^{-1}$.

A perda de grãos por deficiência de trilha foi calculada levando-se em consideração a taxa linear de trilha e o comprimento do mecanismo (Miu et al., 1997):

$$L_t = e^{-\lambda L} \quad (13)$$

em que:

L = comprimento do cilindro de trilha, m.

A porcentagem acumulada de grãos separados foi calculada em função da posição no cilindro e das taxas lineares de trilha e de separação (Miu et al., 1997):

$$s_s = \frac{1}{\lambda - \beta} (\lambda (1 - e^{-\beta x}) - \beta (1 - e^{-\lambda x})) \quad (14)$$

A taxa linear de separação foi estimada, a partir da probabilidade de passagem dos grãos pela malha do côncavo (Miu et al., 1997).

$$\beta = \frac{1}{b_1} \left(\frac{c_o p_o \alpha + c_o c_s p_1 \alpha_m}{360} \right) \text{tg}(\gamma_m) \quad (15)$$

em que:

c_o = coeficiente associado à passagem dos grãos pela malha do côncavo, adm.;

p_o = probabilidade de passagem dos grãos pelo côncavo, dec.;

α = ângulo da hélice do rotor de entrada, graus;

c_s = coeficiente associado à grade da região de separação, adm.;

p_1 = probabilidade de passagem dos grãos pela grade da região de separação, dec.;

α_m = ângulo das aberturas da região de separação, graus;

γ_m = ângulo formado entre a componente tangencial e a componente axial do vetor velocidade do produto no interior do sistema, graus; e

b_1 = distância entre as barras do côncavo, m.

A probabilidade de passagem dos grãos pelas grades do côncavo e do rotor é obtida, em função das dimensões da malha utilizada (Miu et al., 1997):

$$p_o = \frac{(a_1 - a_2 - d_g)(b_1 - b_2 - d_g)}{a_1 b_1} \quad (16)$$

$$p_1 = \frac{(a'_1 - a'_2 - d_g)(b'_1 - b'_2 - d_g)}{a'_1 b'_1} \quad (17)$$

em que:

a_1 e a'_1 = distância entre as barras longitudinais do côncavo e do rotor, m;

b_1 e b'_1 = distância entre as barras radiais do côncavo e do rotor, m;

a_2 e a'_2 = diâmetro das barras longitudinais do côncavo e do rotor, m;

b_2 e b'_2 = largura das barras radiais do côncavo e do rotor, m; e

d_g = diâmetro equivalente dos grãos, m.

Características dos sistemas simulados

Para simular o processo de trilha e separação numa colhedora com sistema de trilha convencional e em outra com sistema de trilha em fluxo axial, partiu-se de uma relação palha/grão média igual a 1,0 e massa específica da palhada igual a 24,0 kg m⁻³. Os grãos apresentavam umidade média de 12,0% e diâmetro equivalente médio de 0,0042 m. A largura da plataforma de corte foi 3,5 m.

As dimensões e características do sistema de trilha e separação simulado foram obtidas a partir de Huynh et al. (1982). Esse sistema de trilha convencional apresentava 1,32 m de largura do cilindro, 0,54 m de diâmetro do cilindro e 0,48 m de comprimento do côncavo. A velocidade do produto na entrada do sistema de trilha e a velocidade periférica do cilindro foram de 2,7 e 30,8 m s⁻¹, respectivamente. Foram assumidos coeficientes de deslizamento das esteiras de alimentação do sistema de trilha e das barras do cilindro iguais a 0,40. A abertura entre cilindro e côncavo foi de 0,013 m. A distância entre as barras longitudinais do côncavo foi 0,019 m; a distância entre as barras radiais do côncavo foi 0,033 m, o diâmetro das barras longitudinais do côncavo e a largura das barras radiais do côncavo foram 0,0095 m. A velocidade de deslocamento da palhada no saca-palhas foi de 0,4 m s⁻¹. O saca-palhas apresentava comprimento de 2,40 m e largura de 0,70 m. A massa específica da palhada no saca-palhas foi de 15,0 kg m⁻³. Os fatores de debulha e de correção foram obtidos na literatura, sendo utilizados os valores de 0,0027 e 2,25, respectivamente.

As dimensões e características do sistema de trilha e separação simulado

foram obtidas a partir de Mailander e Krutz (1984). Esse sistema de trilha em fluxo axial apresentava 0,55 m de diâmetro e 1,96 m de comprimento do cilindro trilhador (rotor). O cilindro trilhador trabalhava com 1100 rpm de rotação. O componente axial do vetor velocidade do material foi de 1,20 m s⁻¹. As distâncias entre as barras longitudinais e entre as barras radiais do côncavo foram 0,04 e 0,02 m, respectivamente. As distâncias entre as barras longitudinais e entre as barras radiais do rotor foram 0,05 e 0,03 m, respectivamente. A largura das barras longitudinais do côncavo foi de 0,01 m, sendo o diâmetro das barras radiais de 0,008 m. O rotor apresentava diâmetro das barras radiais e largura das barras longitudinais de 0,01 m. Adotou-se 0,056 s para ocorrência da debulha.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações propostas por Huynh et al. (1982), para modelar as perdas nos mecanismos convencionais de trilha, por Ortiz-Cañavate e Hernanz (1989), para modelar as perdas nos saca-palhas e por Miu et al. (1997), para modelar as perdas nos mecanismos de trilha, em fluxo axial de colhedoras de grãos, foram usadas com base no desenvolvimento do programa computacional.

Para validar os modelos, vários cenários foram simulados por meio do programa computacional desenvolvido e confrontados com os resultados simulados obtidos por Huynh et al. (1982), Miu et al. (1997) e Souza et al. (1998). Valores numéricos, com acurácia superior a duas casas decimais, foram obtidos para as variáveis avaliadas.

Na Figura 2, está apresentada a janela inicial do programa computacional desenvolvido, na qual o usuário especifica o tipo de mecanismo de trilha utilizado pela colhedora e fornece dados gerais a respeito do sistema.

A janela de entrada de dados e exibição dos resultados para análise de perdas, em colhedoras com sistema convencional de trilha, está apresentada na Figura 3. A eficiência de separação no côncavo e no saca-palhas é apresentada como resultado de saída.

Simulação do Processo de Separação em uma Colhedora Combinada

Tipo de Mecanismo de Trilha

Conventional (cilindro e côncavo + saca-palhas)

Fluxo Axial

Dados Gerais

| | |
|--|-----|
| Produtividade da cultura (t/ha) | 3.0 |
| Velocidade de deslocamento da colhedora (km/h) | 5.0 |
| Largura da plataforma (m) | 3.5 |
| Relação palha/grão da cultura | 1.0 |

Departamento de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Viçosa
FAPEMIG Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

Figura 2. Janela de entrada do programa de computador implementado para a simulação do processo de trilha e separação em colhedoras de grãos.

Perdas nos Mecanismo de Trilha e Separação - Sistema Conventional

Dados de Entrada

Selecionar colhedora: Conventional 1045

| | | | |
|--|--------|---|---------|
| Massa específica da palha no cilindro/côncavo (kg/m ³) | 24.0 | Coefficiente kT de trilha | 0.00217 |
| Teor de umidade do produto (% b.u.) | 12.0 | Coefficiente km de trilha | 2.25 |
| Diâmetro dos grãos (m) | 0.0042 | Número de termos da série para cálculo de λ_2 | 10 |
| Distância entre o cilindro e o côncavo (m) | 0.013 | Dimensão a1 da grade do côncavo (m) | 0.019 |
| Diâmetro do cilindro (m) | 0.54 | Dimensão a2 da grade do côncavo (m) | 0.0095 |
| Largura do cilindro (m) | 1.32 | Dimensão b1 da grade do côncavo (m) | 0.033 |
| Comprimento do côncavo (m) | 0.48 | Dimensão b2 da grade do côncavo (m) | 0.0095 |
| Velocidade de entrada do produto no sistema de trilha (m/s) | 2.7 | Velocidade da palha no saca-palhas (m/s) | 0.4 |
| Velocidade tangencial do cilindro (m/s) | 30.8 | Comprimento do saca-palhas (m) | 2.40 |
| Coefficiente kf de trilha | 0.4 | Coefficiente μ do saca-palhas | 0.5 |
| Coefficiente kr de trilha | 0.4 | Massa específica da palha no saca-palhas (kg/m ³) | 15.0 |
| | | Largura do saca-palhas (m) | 0.70 |

Resultados Obtidos

| | |
|---|--------|
| Eficiência de separação do cilindro/côncavo (%) | 85.663 |
| Índice de perdas do saca-palhas (%) | 25.166 |
| Perdas no saca-palhas (kg/s) | 0.053 |

Quantidade de Grãos Separada no Saca-Palhas:

Porcentagem acumulada de separação como função do comprimento do saca-palhas

| Comprimento (m) | Massa de Graos Separada Acumulada (kg/s) |
|-----------------|--|
| 0,048 | 1,556 |
| 0,096 | 1,452 |
| 0,144 | 1,355 |
| 0,192 | 1,265 |
| 0,240 | 1,180 |
| 0,288 | 1,101 |
| 0,336 | 1,028 |
| 0,384 | 0,959 |
| 0,432 | 0,895 |
| 0,480 | 0,835 |
| 0,528 | 0,780 |
| 0,576 | 0,727 |
| 0,624 | 0,679 |

Porcentagem Acumulada de Grãos Trilhados:

Porcentagem acumulada de separação como função do comprimento do côncavo

| Comprimento (m) | Eficiência Acumulada (%) |
|-----------------|--------------------------|
| 0,010 | 0,18 |
| 0,019 | 0,93 |
| 0,029 | 2,20 |
| 0,038 | 3,88 |
| 0,048 | 5,87 |
| 0,058 | 8,11 |

Figura 3. Janela de entrada e saída de dados para simulação de sistemas convencionais de trilha e separação.

Na Figura 4 está apresentada a janela de acesso ao sistema de banco de dados implementado. Observa-se que o usuário pode selecionar o tipo de colhedora com base no sistema de trilha e separação e, em seguida, visualizar as características de determinado modelo. Pode-se adicionar ou excluir um modelo de colhedora, ou ainda, editar somente o campo desejado, de maneira fácil e rápida.

Os resultados da eficiência de separação no côncavo, simulados em função do comprimento do mesmo e da velocidade de deslocamento da colhedora, estão apresentados na Figura 5. Verifica-se que a eficiência simulada de separação do côncavo apresenta comportamento quadrático com o aumento de seu comprimento, para os valores de eficiência mais elevados. À medida que se aumenta a velocidade de deslocamento da colhedora, a taxa de alimentação também aumenta; entretanto, esse aumento provoca pequena redução na eficiência de separação do côncavo da máquina.

Na Figura 6, estão apresentados os valores de eficiência de separação do côncavo, simulados em função da velocidade periférica do cilindro trilhador e da velocidade de deslocamento da colhedora. Verifica-se que a eficiência de separação aumenta com o

aumento na velocidade periférica do cilindro trilhador e reduz à medida que a taxa de alimentação é aumentada. Observa-se que, neste caso, a variação na eficiência de separação em função da taxa de alimentação apresenta comportamento distinto, diferente daquela apresentada na Figura 5.

Na Figura 7, estão apresentados os valores simulados de perda no saca-palhas, como função do comprimento do mesmo e da velocidade de deslocamento da máquina. Verifica-se que as perdas no saca-palhas reduzem com a diminuição na velocidade de deslocamento da máquina e, exponencialmente, com o aumento no comprimento do saca-palhas.

Os índices de perda no saca-palhas, em função da velocidade de deslocamento da colhedora e da velocidade da palhada no saca-palhas, estão apresentados na Figura 8. O aumento na velocidade da palhada no saca-palhas ocasionou diminuição no índice de perdas, sendo que o aumento na velocidade de trabalho da colhedora deslocou as curvas para novos pontos operacionais. Isso mostra a importância de se ter a velocidade da palhada no saca-palhas regulável, para evitar perdas devidas à variação na taxa de alimentação da colhedora.

Banco de Dados de Colhedoras

Tipo de colhedora: Marca/Modelo:

| | | | |
|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Diâmetro do cilindro (m) | <input type="text" value="0.54"/> | Dimensão b1 da grade do côncavo (m) | <input type="text" value="0.033"/> |
| Largura do cilindro (m) | <input type="text" value="1.32"/> | Dimensão b2 da grade do côncavo (m) | <input type="text" value="0.0095"/> |
| Comprimento do côncavo (m) | <input type="text" value="0.48"/> | Velocidade da palha no saca-palhas (m/s) | <input type="text" value="0.4"/> |
| Velocidade tangencial do cilindro (m/s) | <input type="text" value="30.8"/> | Comprimento do saca-palhas (m) | <input type="text" value="2.40"/> |
| Coefficiente k _f de trilha | <input type="text" value="0.4"/> | Coefficiente μ do saca-palhas | <input type="text" value="0.5"/> |
| Coefficiente k _r de trilha | <input type="text" value="0.4"/> | Massa específica da palha no saca-palhas (kg/m ³) | <input type="text" value="15.0"/> |
| Dimensão a1 da grade do côncavo (m) | <input type="text" value="0.019"/> | Largura do saca-palhas (m) | <input type="text" value="0.70"/> |
| Dimensão a2 da grade do côncavo (m) | <input type="text" value="0.0095"/> | | |

Velocidade de entrada do produto no sistema de trilha (m/s)

Systema convencional de trilha

Figura 4. Janela de acesso ao banco de dados das características de colhedoras.

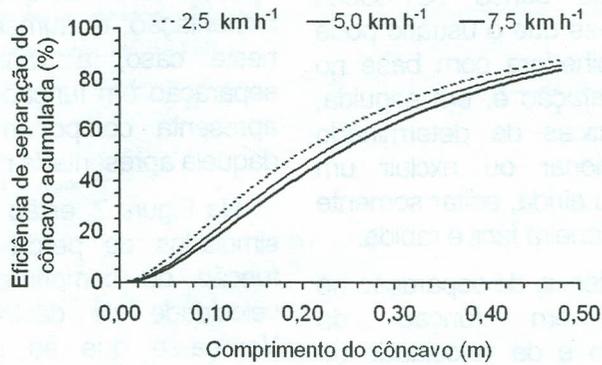


Figura 5. Eficiência de separação do côncavo acumulada, em função do comprimento do mesmo para as respectivas velocidades de deslocamento da colhedora.

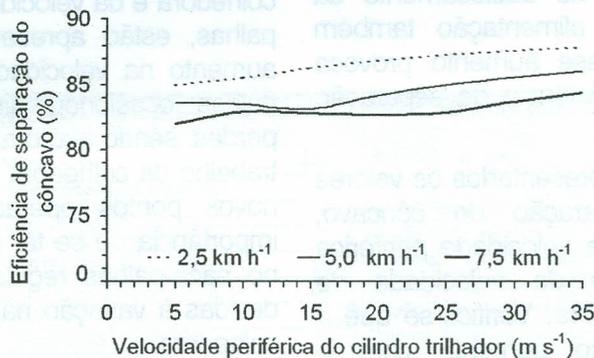


Figura 6. Eficiência de separação do côncavo, em função da velocidade periférica do cilindro trilhador, para as respectivas velocidades de deslocamento da colhedora.

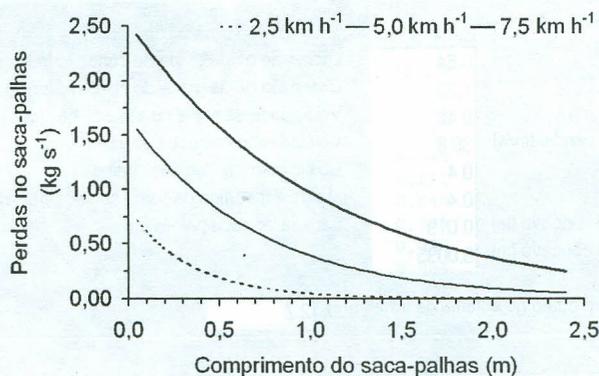


Figura 7. Perdas no saca-palhas, em função do comprimento do mecanismo, para as respectivas velocidades de deslocamento da colhedora.

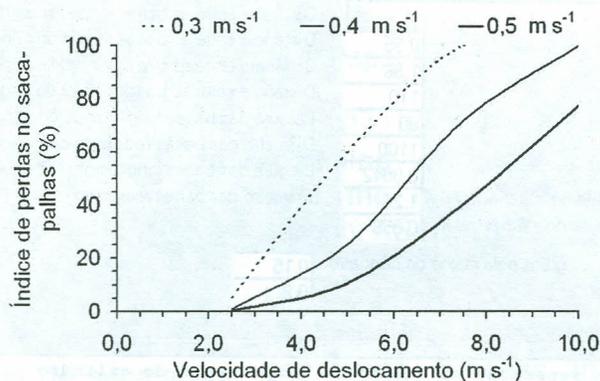


Figura 8. Índice de perdas no saca-palhas, em função da velocidade de deslocamento da colhedora, para as respectivas velocidades da palhada no saca-palhas.

Na Figura 9, está apresentada a janela de entrada e saída de dados para a simulação do processo de trilha e separação em colhedoras com sistema de trilha em fluxo axial. Como resultado da simulação, têm-se as porcentagens de grãos não trilhados, soltos e separados no sistema de trilha e separação.

Os dados relativos a uma simulação do processo de trilha e separação de uma colhedora com sistema de trilha em fluxo axial, trabalhando com velocidade de deslocamento de $5,0 \text{ km h}^{-1}$, estão apresentados na Figura 10.

A quantidade de grãos separada, neste caso, atinge praticamente 100%; os grãos são trilhados, praticamente, nos primeiros $0,25 \text{ m}$ do cilindro e a quantidade de grãos soltos atinge um limite máximo em torno de 70%, logo no início do cilindro e, depois, reduz para praticamente zero no final do mecanismo, independentemente da taxa de alimentação da colhedora.

Na Figura 11, estão apresentados os dados de eficiência de trilha e separação acumulada, em função do comprimento e da rotação do cilindro trilhador. Verifica-se que os valores de eficiência de trilha e separação acumulada aumentam com o incremento na rotação do cilindro trilhador.

O sistema de trilha em fluxo axial apresentou, em média, 99% da eficiência

de separação e o sistema convencional de trilha 95%. Verificou-se que a eficiência de separação de grãos da colhedora, com sistema de trilha em fluxo axial, é menos influenciada pela taxa de alimentação do que aquela da colhedora com sistema convencional de trilha. Ressalta-se que o saca-palhas foi o mecanismo que apresentou maior variação na eficiência de separação de grãos, quando a taxa de alimentação foi aumentada.

No sistema convencional de trilha e separação, aumentando 10% na taxa de alimentação do côncavo e do saca-palhas diminuiu-se a eficiência de separação média de 1 e 20%, respectivamente. Esse mesmo aumento do comprimento do côncavo e do saca-palhas proporcionou aumento de 4 e 3% na eficiência de separação, respectivamente. Quando se aumentou em 10% a velocidade periférica do cilindro trilhador, observou-se aumento de 0,5% na eficiência de separação do côncavo. No sistema de trilha e separação em fluxo axial, ao aumentar 10% no comprimento e na rotação do cilindro trilhador, obteve-se 0,5 e 1,6% de aumento na eficiência média de trilha e separação, respectivamente, enquanto o mesmo aumento na taxa de alimentação proporcionou diminuição na eficiência de trilha e separação, inferior a 0,5%.

Perdas nos Mecanismo de Trilha e Separação - Sistema de Fluxo Axial

Dados de Entrada

Selecionar colhedora: Axial 1005

Diâmetro do cilindro (m) 0.55

Comprimento do cilindro (m) 1.96

Ângulo da hélice do rotor (graus) 110

Ângulo das aberturas do rotor (graus) 90

Rotação de trabalho do cilindro (rpm) 1100

Diâmetro equivalente do grão (m) 0.0042

Componente axial do vetor velocidade do material (m/s) 1.20

Tempo característico de ocorrência da debulha (s) 0.056

Distância entre as barras longitudinais do côncavo (m) 0.04

Distância entre as barras radiais do côncavo (m) 0.02

Distância entre as barras longitudinais do rotor (m) 0.05

Distância entre as barras radiais do rotor (m) 0.03

Largura das barras longitudinais do côncavo (m) 0.010

Diâmetro das barras radiais do côncavo (m) 0.008

Largura das barras longitudinais do rotor (m) 0.010

Diâmetro das barras radiais do rotor (m) 0.010

Coefficiente associado à passagem dos grãos pela malha do côncavo 0.15

Coefficiente associado grade do rotor 0.2

Resultados Simulados

Análise da eficiência de separação em função do comprimento do cilindro

| Comprimento (m) | Graos Nao-Trilhados (%) | Graos Soltos (%) | Graos Separados Acumulados (%) |
|-----------------|-------------------------|------------------|--------------------------------|
| 0,039 | 43,171 | 52,995 | 3,834 |
| 0,078 | 18,637 | 69,702 | 11,661 |
| 0,118 | 8,046 | 71,462 | 20,492 |
| 0,157 | 3,474 | 67,404 | 29,123 |
| 0,196 | 1,500 | 61,395 | 37,105 |

Simular

Voltar

Efechar

Dados

Figura 9. Janela de entrada e saída de dados relativos à simulação da trilha e separação em sistema de fluxo axial.



Figura 10. Eficiência de trilha e separação para um sistema de trilha em fluxo axial.

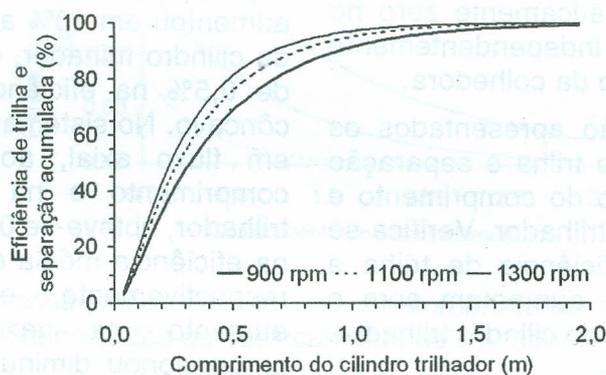


Figura 11. Eficiência de trilha e separação acumulada, em função do comprimento e da rotação do cilindro trilhador.

CONCLUSÕES

- O processo de trilha e separação no sistema convencional simulado foi mais influenciado pela taxa de alimentação que os demais parâmetros, enquanto no sistema em fluxo axial foi a rotação do cilindro trilhador.
- A velocidade de deslocamento de 2,5 km h⁻¹ e a velocidade periférica do cilindro trilhador de 35 m s⁻¹ proporcionaram os maiores valores simulados de eficiência de separação do côncavo.
- Os menores valores simulados de perdas no saca-palhas foram obtidos à velocidade de deslocamento de 2,5 km h⁻¹ e à velocidade da palhada no saca-palhas de 0,3 m s⁻¹.
- A rotação do cilindro trilhador de 1300 rpm proporcionou maiores valores simulados de eficiência de trilha e separação, independentemente da taxa de alimentação da colhedora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BECK, F.; KUTZBACH, H.D. **Computer simulation of grain/chaff separation on grain pan and cleaning shoe of the combine harvester**. St. Joseph, ASAE, 1996. 28p. Paper 96-1051
- BJORK, A. **Computer modelling of grain separation and grain separation losses for a rotary combine**. St. Joseph, ASAE, 1988. 20p. Paper 88-0102
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Estatísticas Agrícolas**. <http://www.ibge.gov.br>. 20 Mar. 2003.
- HUYNH, V.M.; POWELL, T.; SIDDALL, J.N. Threshing and separating process – A new mathematical model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.25, n.1, p.65-73. 1982.
- KIM, S.H.; GREGORY, J.M. **Power requirement model for combine harvester**. St. Joseph, ASAE, 1989. 10p. Paper 89-1592
- MAILANDER, M.; KRUTZ, G. **Development of a dynamic model of a combine harvester in corn**. St. Joseph, ASAE, 1984. 17p. Paper 84-1588
- MIU, P.I.; KUTZBACH, H.D. **Mathematical modeling of grain separation process over the length of straw walkers**. St. Joseph, ASAE, 1997. 12p. Paper 97-1062
- MIU, P.I.; BECK, F.; KUTZBACH, H.D. **Mathematical modeling of threshing and separating process in axial threshing units**. St. Joseph, ASAE, 1997. 17p. Paper 97-1063
- ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNANZ, J.L. **Técnica de la mecanización agraria**. 3^a. Edição. Madrid, Espanha, Ediciones Mundi-Prensa. 1989. 641 p.
- SOUZA, C.M.A.; PINTO, F.A.C.; MANTOVANI, E.C.; QUEIROZ, D.M. Simulação e análise do processo de trilha e separação mecânica do milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.2, n.2, p.212-218. 1998.
- SOUZA, C.M.A.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; DIAS, G.P. Modelo de simulação do processo de trilha e separação mecânica em uma recolhadora-trilhadora de fluxo axial para feijão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p.96-105, 2003.
- TROLLOPE, J.R.A. mathematical model of the threshing process in a conventional combine-thresher. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.27, p.119-130. 1982.
- USREY, L.J.; WALKER, J.T.; LOEWER, O.J. Physical characteristics of rice straw for harvesting simulation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.35, n.3, p.923-928. 1992.