



## Otimização do consumo energético da secagem do crambe em um secador de leito fixo

## Optimization of the energy consumption of crambe drying in a fixed bed dryer

Kamila Cavalcante de Oliveira<sup>1</sup>

Edson Antonio da Silva<sup>2</sup>

Gracielle Johann<sup>3</sup>

Fernando Palú<sup>4</sup>

**Resumo:** O crambe possui diversas aplicações industriais e, por isso, sua presença no âmbito industrial está cada vez mais evidente. Para aproveitá-lo melhor, realiza-se a sua secagem, de modo a não comprometer a estabilidade e qualidade do produto final. Além da necessidade de se representar de forma adequada o processo de secagem, existe uma preocupação com o consumo energético do mesmo. Sendo assim, o estudo da eficiência energética pode auxiliar na escolha das melhores condições operacionais de forma a reduzir os gastos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar a otimização da eficiência energética do processo de secagem do crambe em um secador horizontal, representando-o por meio do modelo de dupla resistência à transferência de massa. As variáveis escolhidas para realizar a otimização foram a temperatura e velocidade do ar de secagem e o método de otimização empregado foi o CDOS. Foram modificadas as condições iniciais e os critérios de eficiência energética para avaliar o comportamento da mesma. As mesmas condições ótimas de secagem foram encontradas, as quais foram as menores temperatura e velocidade do ar de secagem, e, de maneira geral, ao aumentar as dimensões do leito e umidade inicial, a eficiência energética foi maior. Além disso, verificou-se que o aumento da temperatura do ar impactou em uma redução do tempo

<sup>1</sup> UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

<sup>2</sup> UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

<sup>3</sup> UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

<sup>4</sup> UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

de secagem e ao aumentar a umidade inicial do grão, maior foi o tempo de secagem. Na aplicação do critério de desejabilidade, notou-se que a condição ótima de secagem é dependente do objetivo pretendido no processo, podendo ser tanto um tempo total de secagem menor como um consumo energético reduzido.

**Palavras-chave:** Modelagem; eficiência; secador horizontal.

---

**Abstract:** Crambe seed has several industrial applications and, consequently, its presence in the industrial scope is becoming more evident. In order to use it well, it is necessary to carry out its drying, to not compromise the stability and quality of the final product. Beyond the need to represent the drying process, there is a concern with the energy consumption of it. Therefore, the study of energy efficiency can assist in the choice of the best operating conditions in order to reduce expenses. The objective of this work was to perform the optimization of the energy efficiency of the drying process of crambe in a horizontal dryer, applying the dual mass transfer resistance model to represent it. Temperature and air flow were chosen as variables to perform the optimization and CDOS method was selected as algorithm. Modifications on initial conditions and energy efficiency criteria were made. The results showed that the same optimum conditions were found, which were the lowest temperature of air and air flow, and, in general, when bed dimensions and initial humidity were increased, the energy efficiency was higher. Also, by increasing the temperature of the air there was a reduction of the total drying time, however, with a higher initial humidity of the grain occurred an increase in time. With respect to the criterion of desirability, it was noted that the optimum drying condition is dependent on the intended goal of the process, which can be a lower total drying time or a reduced energy consumption.

**Keywords:** Modelling; efficiency; horizontal dryer.

---

## 1. Introdução

O *Crambe abyssinica*, ou crambe, como é conhecido, é uma planta da família crucífera, cuja origem vem da região do Mediterrâneo. Ele pode ser cultivado na primavera ou no inverno, sendo resistente a seca e a baixas temperaturas (Falasca *et al.*, 2010). É considerado uma oleaginosa promissora, onde seu cultivo em pequena escala propicia um rendimento aceitável (Li *et al.*, 2011).

No Brasil, o interesse pela produção de Crambe se faz presente devido aos baixos custos de cultivo, possibilidade de colheita mecanizada e por poder ser empregado como cultura de inverno, em março ou abril, logo após o cultivo principal (Falasca *et al.*, 2010).

O grão de Crambe contém cerca de 38 % de óleo em base seca, sendo que 55 a 60 % deste consiste em ácido erúico e, devido a sua presença, não é utilizado para fins comestíveis. Porém, o óleo possui muitas aplicações industriais, podendo ser utilizado como lubrificante ou em formulações de lubrificantes, para a fiação no setor têxtil, no setor de aço, indústrias de transporte e lubrificantes marinhos, como inibidor de corrosão e também na fabricação de borracha sintética, plastificantes, adesivos e para isolamento térmico (Dolack, 1996; Falasca *et al.*, 2010; Roscoe *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2012).

Há uma procura cada vez maior por fontes renováveis de energia, onde variadas plantas são estudadas como potenciais materiais para produção de biodiesel (Santos *et al.*, 2012). O óleo de crambe é visto como uma fonte de energia limpa e ecológica por ser biodegradável, não tóxico e praticamente não conter enxofre e aromáticos (Wazilewski *et al.*, 2012a). Segundo Roscoe *et al.* (2010), ele possui vantagens na produção de biodiesel, como baixo ponto de fusão e alta estabilidade oxidativa e, de acordo com Wazilewski *et al.* (2012b), o biodiesel de Crambe é mais estável do que o biodiesel de soja, sendo que ao misturar os dois combustíveis ocorre um aumento da estabilidade se comparado com a do biodiesel de soja pura.

Deste modo, a inserção do Crambe na indústria vem ganhando força ao longo dos anos, e, para que se possa atender a futuras demandas e obter uma maior produtividade faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas adequadas de manejo. Dentre estas, tem-se o armazenamento dos grãos, que é considerado uma etapa crítica, devido a possibilidade de ocorrerem mudanças físicas, químicas e microbiológicas que podem comprometer a estabilidade, qualidade e o valor nutritivo do produto armazenado (Andrade *et al.*, 2006; Costa *et al.*, 2015). De forma a evitar que estas mudanças ocorram durante o armazenamento faz-se a secagem, que permite que a quantidade de água presente no produto diminua, acarretando na redução da atividade biológica (Corrêa *et al.*, 2007). Outra vantagem da secagem é a possibilidade de se antecipar a colheita, reduzindo perdas que seriam causadas por mudanças climáticas indesejáveis (Kanaan *et al.*, 2016).

Conhecer o comportamento dos fenômenos envolvidos na secagem é de significativa importância para o projeto, operação e simulação de sistemas industriais de secadores (Corrêa *et al.*, 2003). A obtenção de um modelo que represente o processo de secagem é de grande relevância por permitir a predição do tempo de secagem, em diversas condições de operação, a partir da solução do mesmo.

Os modelos de secagem em camada fina não consideram gradientes de umidade do ar e temperatura nos grãos nos intervalos de tempo, sendo assim, estes parâmetros permanecem constantes (Jayas *et al.*, 1991). Estes modelos podem ser classificados em: empíricos, semi-teóricos e teóricos.

Os modelos de leito profundo descrevem o processo difusivo da umidade no interior do grão ou entre a superfície do mesmo e o ar atmosférico e também dizem sobre os fenômenos de transferência de massa e energia que existem nos volumes de vazio, cujo fenômeno é convectivo. Sendo assim, o modelo de leito profundo é dependente do modelo de camada fina (Pabis *et al.*, 1998; Borges, 2002). São classificados em: modelos logarítmicos, modelos de balanço de energia e massa e modelos de equações diferenciais parciais, sendo o último o modelo considerado mais preciso, devido ao menor número de condições simplificadoras (Parry, 1985).

Além da importância de se caracterizar o processo de secagem e encontrar um modelo que o represente de maneira adequada, hoje em dia, vê-se a necessidade de se estudar o consumo energético dos processos, de forma a se obter a melhor tecnologia.

Segundo Luz (2010) e Defendi *et al.* (2015), o consumo energético no processo de secagem é significativo e seu valor depende de propriedades do sólido, do fluido e do equipamento, por isso, deve-se buscar a condição de temperatura do gás de aquecimento que proporcione o menor consumo de energia e custo de produção, sem perder a qualidade final do produto.

Para representar o desempenho energético do processo de secagem, um dos critérios mais citados é a eficiência energética (Kudra, 2004). Ela é definida como a relação entre a energia necessária para evaporar a mistura fluida e a energia requerida para aquecer o ar de secagem, sendo que estas duas formas de energia caracterizam a maior parte da energia presente no processo de secagem (Fernandes, 2005). Então, segundo Johann (2016), pode-se utilizar como função objetivo a maximização dessa eficiência. E, conforme cita Dalbello (1995), tanto a temperatura do ar como a velocidade do ar de secagem são fatores relevantes na avaliação da eficiência do processo e qualidade final do produto.

Pode-se seguir para a simulação e otimização do processo de secagem como alternativa para quantificar a eficiência energética, determinando, com isso, as melhores condições operacionais com base na função objetivo devidamente escolhida.

No trabalho de Curcio *et al.* (2015) foi realizada a otimização da secagem convectiva de vegetais utilizando o algoritmo CDOS com o intuito de estabelecer o melhor conjunto de condições operacionais que levassem à qualidade e segurança de alimentos secos. Basile *et al.* (2015) estudaram a reação de troca água-gás em reatores de membrana seletiva de hidrogênio utilizando o método de otimização CDOS para analisar a influência de alguns parâmetros na performance da troca água-gás em termos de conversão de CO, recuperação de hidrogênio e pureza do hidrogênio permeado. Chakraborty *et al.* (2014) empregaram o método de otimização CDOS para encontrar as melhores condições de taxa de fluxo cruzado, pressão transmembranar, pH e razão polímero/metálico de modo a maximizar o índice de desempenho da remoção de cromo tóxico de soluções aquosas.

O presente trabalho tem como objetivo a otimização da eficiência energética do processo de secagem do crumbe em um secador horizontal. Para efetuar a mesma será realizada a representação matemática do processo de secagem por meio do modelo de dupla resistência à transferência de massa. O método de otimização a ser empregado será o da direção conjugada com deslocamento ortogonal e a obtenção do melhor resultado levará em consideração a inserção de restrições baseadas nas condições operacionais, além disso, modificações nas condições iniciais e critérios para representar a eficiência energética serão efetuadas.

## 2. Materiais e Métodos

Utilizou-se o modelo de dupla resistência à transferência de massa para descrever o processo de secagem, empregado também nos estudos realizados por Stakić e Tsotsas (2005) na secagem de carvão industrial e cubos de batata por Stakić *et al.* (2011).

As taxas de secagem são representadas por:

$$\Psi_S = k_S(\bar{X} - X^*)\rho_S(1 - \varepsilon) \quad \text{Eq.(01)}$$

$$\Psi_F = k_F(Y^* - Y) \quad \text{Eq.(02)}$$

Em que  $\Psi$  é a taxa de secagem ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{min}$ ),  $k_S$  é o coeficiente interno de transferência de massa ( $\text{m}/\text{min}$ ),  $\bar{X}$  é a umidade média dos grãos (b.s.),  $X^*$  é a umidade de equilíbrio dos grãos (b.s.),  $\rho_S$  é a densidade dos grãos ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\varepsilon$  é a porosidade do leito,  $k_F$  é o coeficiente externo de transferência de massa ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{min}$ ),  $Y^*$  é a umidade de equilíbrio do ar de secagem (b.s.),  $Y$  é a umidade do ar de secagem (b.s.).

Como não existe acúmulo na interface sólido/ar, o fluxo de água que entra na superfície externa do sólido é igual ao fluxo de água que sai da interface em direção ao seio do gás, ou seja:

$$\Psi_S = \Psi_F \quad \text{Eq.(03)}$$

Conforme cita Johann (2016), a cinética do processo de secagem de grãos em leito profundo pode ser obtida por meio de balanços de massa e energia aplicando os princípios de conservação. Assim, mediante algumas hipóteses simplificadoras, têm-se as equações que representam a secagem, na ordem, balanço de massa no sólido, balanço de massa no ar, balanço de energia no sólido e balanço de energia no ar:

$$\rho_S \frac{\partial X}{\partial t} (1 - \varepsilon) = \Psi \quad \text{Eq.(04)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (Y \rho_G) \varepsilon = -v \varepsilon \frac{\partial}{\partial z} (\rho_G Y) - \rho_S \frac{\partial X}{\partial t} (1 - \varepsilon) \quad \text{Eq.(05)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_S H_S) (1 - \varepsilon) = \lambda \rho_S \frac{\partial X}{\partial t} (1 - \varepsilon) + h_c (T_G - T_S) \quad \text{Eq.(06)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_G U_G) \varepsilon = -\lambda \rho_S \frac{\partial X}{\partial t} (1 - \varepsilon) + h_c (T_S - T_G) - v \varepsilon \frac{\partial}{\partial z} (\rho_G H_G) \quad \text{Eq.(07)}$$

As condições iniciais e de contorno utilizadas estão expressas nas Equações (08) a (14).

$$X(z, 0) = X_0 \quad \text{Eq.(08)}$$

$$Y(z, 0) = Y_0 \quad \text{Eq.(09)}$$

$$T_G(z, 0) = T_S(z, 0) \quad \text{Eq.(10)}$$

$$T_G(z, 0) = T_{amb} \quad \text{Eq. (11)}$$

$$T_G(0, t) = T_{Gfeed} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\left. \frac{\partial X}{\partial t} \right|_{z=0} = \frac{\Psi}{\rho_S (1 - \varepsilon)} \quad \text{Eq.(13)}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial t} H_S \right|_{z=0} = \frac{\frac{\partial X}{\partial t} \lambda \rho_S (1 - \varepsilon) + h_c (T_G - T_S)}{\rho_S (1 - \varepsilon)} \quad \text{Eq.(14)}$$

Em que  $v$  é a velocidade do ar de secagem (m/s),  $\varepsilon$  é a porosidade,  $z$  é a coordenada espacial, paralela ao fluxo de ar (m),  $\rho_G$  é a densidade do ar de secagem ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_S$  é a densidade dos grãos ( $\text{kg/m}^3$ ),  $H_S$  é a entalpia dos grãos (kJ/kg),  $\lambda$  é o calor de vaporização da água pura (kJ/kg),  $h_c$  é o coeficiente volumétrico de transferência de calor ( $\text{kJ/min m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ),  $T_G$  é a temperatura do ar de secagem ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_S$  é a temperatura dos grãos ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_{Gfeed}$  é a temperatura de alimentação do ar de secagem ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente ( $^\circ\text{C}$ ),  $U_G$  é a energia interna do ar de secagem (kJ/kg) e  $H_G$  é a entalpia do ar de secagem (kJ/kg).

Segundo Glueckauf e Coates (1947), o coeficiente interno de transferência de massa é correlacionado com a difusividade efetiva por:

$$k_S = 15 \frac{D_{eff}}{r_p^2} \quad \text{Eq.(15)}$$

Em que  $D_{eff}$  é a difusividade mássica efetiva ( $\text{m}^2/\text{min}$ ) e  $r_p$  é o raio dos grãos (m).

O coeficiente externo de transferência de massa,  $k_F$ , pode ser estimado mediante utilização da correlação empírica proposta por Ranz e Marshall (1952), para leito fixo, desde que  $Re > 80$ :

$$Sh = \frac{k_F 2r_p}{D} = 2 + 1.8Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad \text{Eq.(16)}$$

Em que  $Sh$ ,  $Re$  e  $Sc$  são os números adimensionais de Sherwood, Reynolds e Schmidt, respectivamente, e  $D$  é a difusividade do ar ( $m^2/min$ ).

Outros parâmetros do modelo, como densidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica, foram ajustados a partir dos dados experimentais referentes à secagem dos grãos crambe, obtidos no estudo de Cruz (2016). Estes parâmetros variam ao longo do processo de secagem, por isso foram avaliados considerando as propriedades de cada componente puro presente nos grãos de crambe. As Equações (17) a (21), sugeridas no trabalho de Singh e Heldman (1993), foram utilizadas para determinar as propriedades comentadas.

$$\rho_S = \frac{1 - \varepsilon}{\sum \left( \frac{x_j}{\rho_j} \right)} \quad \text{Eq.(17)}$$

$$cp_S = \sum x_j \times cp_j \quad \text{Eq.(18)}$$

$$k_S = \frac{1}{2} \left[ \sum x_{vj} \times k_j + \frac{1}{\sum \left( \frac{x_{vj}}{k_j} \right)} \right] \quad \text{Eq.(19)}$$

$$\alpha_S = \sum x_j \times \alpha_j \quad \text{Eq.(20)}$$

$$x_{vj} = \frac{\frac{x_j}{\rho_j}}{\sum \left( \frac{x_j}{\rho_j} \right)} \quad \text{Eq.(21)}$$

Sendo  $x_j$  a fração mássica de cada componente puro,  $cp_S$  o calor específico ( $J/kg^\circ C$ ),  $x_{vj}$  a fração volumétrica de cada componente puro,  $k_S$  a condutividade térmica do sólido ( $W/m^\circ C$ ) e  $\alpha_S$  é a difusividade térmica do sólido ( $m^2/s$ ).

O coeficiente interno de transferência de massa,  $k_S$ , foi representado por meio de uma função linear considerando a umidade dos grãos de crambe, que é dependente da temperatura do ar de secagem e do tempo (Equação (22)), sendo  $\alpha$  o parâmetro ajustado.

$$k_S = \alpha X(z, t) \quad \text{Eq.(22)}$$

A avaliação dos valores de  $h_c$  e  $\alpha$  foi efetuada conforme apresentado por Johann (2016) em seu trabalho, onde a adequação dos resultados encontrados aos dados experimentais foi

comprovada mediante testes estatísticos, sendo as equações ajustadas expressas nas Equações (23) e (24).

$$h_c = 2,5381 \times 10^7 v^{0,0725} T_{G_{feed}}^{0,1532} \quad \text{Eq.(23)}$$

$$\alpha = 0.1894 e^{0.0167 T_{G_{feed}}} \quad \text{Eq.(24)}$$

Sendo assim, o modelo matemático consistiu em um sistema de equações diferenciais (Equações (04) a (14)), o qual foi discretizado por diferenças finitas, em relação ao espaço, com 10 elementos de discretização, obtendo-se com isso um sistema de equações diferenciais ordinárias. Para sua resolução empregou-se o método das linhas e, após isso, o método numérico de Rosenbrok, com a rotina *dsolve*, do *software* Maple 14®.

Na otimização da eficiência energética foram utilizados critérios de eficiência energética como função objetivo, propostas por Kudra (2004) em seu estudo, expressas nas Equações (25) e (28).

De acordo com Kudra (2004), a eficiência energética instantânea, que muda a cada intervalo de tempo, pode ser definida como:

$$E = \frac{\text{energia requerida para evaporação}}{\text{energia requerida para aquecer o ar}} = \frac{E_R}{E_A} \quad \text{Eq.(25)}$$

Sendo:

$$E_R = -m_s \lambda_D \frac{dX}{dt} \quad \text{Eq.(26)}$$

$$E_A = vA\varepsilon \int_{T_{G,0}}^{T_{G_{feed}}} \rho_G H_G dT_G \quad \text{Eq.(27)}$$

Em que  $E_R$  é a energia consumida para remover a umidade (kJ/min),  $m_s$  é a massa dos grãos secos (kg),  $\lambda_D$  é o calor de dessorção (kJ/kg),  $E_A$  é a energia total gasta para aquecer o ar de secagem por unidade de tempo (kJ/min),  $T_{G,0}$  é a temperatura inicial do ar de secagem (°C) e  $c_{pG}$  é o calor específico do ar de secagem (kJ/kg °C).

Na Equação (28) tem-se a eficiência térmica.

$$E = \frac{T_{gás,e} - T_{gás,s}}{T_{gás,e} - T_{amb}} \quad \text{Eq.(28)}$$

Em que  $T_{gás,e}$  é a temperatura do ar de secagem na entrada do secador e  $T_{gás,s}$  é a temperatura do ar de secagem na saída do secador.

As variáveis selecionadas para realizar a otimização energética foram a temperatura do ar e velocidade do ar de secagem, sujeitas as restrições apresentadas nas Equações (29) e (30). O limite inferior de temperatura foi escolhido de forma a ser superior à temperatura ambiente e o



limite superior teve como base restrições do equipamento. Para a velocidade do ar de secagem, restrições de operação do ventilador foram determinantes na escolha dos limites de funcionamento do mesmo.

$$40^{\circ}\text{C} \leq T_{G_{\text{feed}}} \leq 60^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. (29)}$$

$$1,5 \text{ m/s} \leq v \leq 2,5 \text{ m/s} \quad \text{Eq. (30)}$$

Após obtenção das equações e parâmetros que representam o processo de secagem, construiu-se um programa computacional com o intuito de inserir o critério de eficiência energética como função objetivo e implantar o método de otimização para resolução do problema proposto. Assim, para resolução da otimização da função objetivo, cuja finalidade era a de maximizá-la, aplicou-se a estratégia *Global Search*, da rotina *Search*, do *software Maple 14*<sup>®</sup>, que faz a inclusão das restrições para definir o ponto ótimo da função objetivo (método CDOS).

Na Tabela 1 tem-se as condições operacionais do processo de secagem do crambe que foram empregadas na otimização.

**Tabela 1:** Condições operacionais da secagem do crambe.

Parâmetro	Valor
Umidade inicial dos grãos (b.s.)	$X_0 = 0,24; 0,31 \text{ e } 0,38$
Umidade final dos grãos (b.s.)	$X_f = 0,10$
Temperatura inicial dos grãos e do ar de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{S_0} = T_{G_0} = 25$
Umidade inicial do ar de secagem (b.s.)	$Y_0 = 0,006$
Altura do leito (m)	$L = 0,01$
Área transversal do leito ( $\text{m}^2$ )	$A = 0,003$

Foram realizadas otimizações com diferentes valores de umidade inicial, conforme apresentado na Tabela 1, com o objetivo de verificar a influência deste parâmetro na condição ótima de operação do secador. A umidade final do grão de crambe foi escolhida de acordo com o estabelecido por Knights (2002) e Glaser (1996) em seus respectivos trabalhos, onde indicaram que o armazenamento e comercialização dos grãos devem ser efetuados com 10% ou menos de conteúdo de água.

Ajustaram-se superfícies de resposta com as variáveis temperatura do ar de secagem, velocidade do ar e eficiência energética e temperatura do ar de secagem, velocidade do ar e tempo de secagem para comparar os resultados obtidos com os dois critérios de eficiência energética empregados e diferentes umidades iniciais do grão, assim como para verificação do

perfil das superfícies. Calculou-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para constatar se houve ou não um bom ajuste.

Aplicou-se o critério de desejabilidade para avaliar a influência do tempo e da eficiência energética na otimização do processo de secagem, devido à relevância de se considerar o tempo total de secagem, sendo que existe a possibilidade de se escolher pontos ótimos que conferem a melhor eficiência energética, porém um tempo de secagem muito maior, acarretando em custos adicionais e, caso somente o tempo de secagem for considerado na otimização, a eficiência energética do processo pode ser muito baixa, ocasionando gastos a mais com o fornecimento de energia.

Sendo assim, estas duas variáveis foram primeiramente normalizadas mediante a Equação (31), após isso, atribuiu-se um peso ( $p$ ) às mesmas para obtenção de uma nova variável normalizada, chamada de desejabilidade, Equação (32), com  $p$  variando de 0,1 a 0,9.

$$\text{Variável normalizada } i = \frac{\text{Maior valor} - \text{Valor da posição } i}{\text{Maior valor} - \text{Menor valor}} \quad \text{Eq. (31)}$$

$$\text{Desejabilidade} = p (\text{Eficiência}) - (1 - p)(\text{Tempo}) \quad \text{Eq. (32)}$$

Por fim, ajustou-se uma superfície de resposta utilizando a desejabilidade para os resultados encontrados com cada peso empregado, verificando se houve ou não ajuste por meio da determinação do  $R^2$ .

Além disso, para averiguar o comportamento da eficiência energética caso o tamanho do leito fosse modificado, foram aumentados os valores da área transversal ao fluxo de ar e da profundidade do leito dos grãos de crambe reais, em 100 e 10 vezes, respectivamente. Procedeu-se com a rotina de otimização da mesma forma, avaliando as duas equações propostas para a eficiência energética e mudando-se a umidade inicial do grão de crambe, ajustando as superfícies de resposta e verificando o  $R^2$ .

### 3. Resultados e Discussão

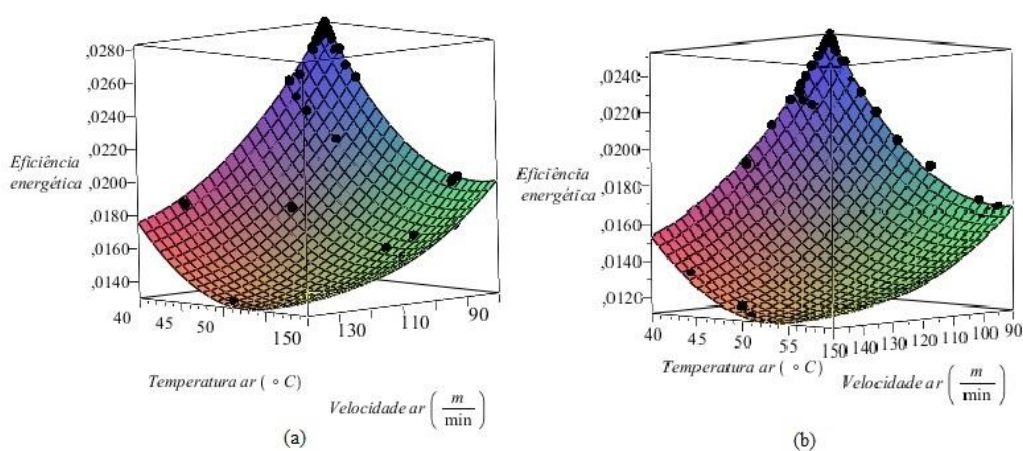
Os resultados encontrados de condições operacionais ótimas do processo de secagem para os dois tamanhos de leito simulados estão expressos na

Tabela 2.

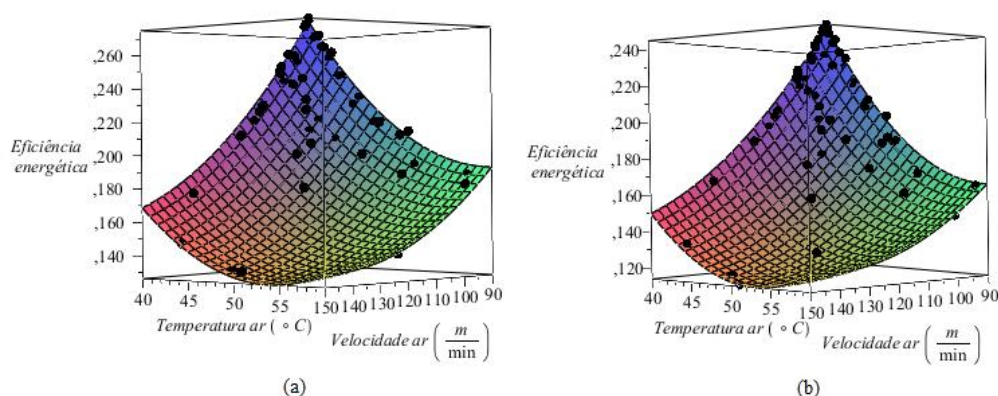
**Tabela 2:** Resultados da otimização da eficiência energética da secagem de crambe.

	Umidade (% b.s.)	Temperatura (°C)	Velocidade (m/min)	Eficiência para L=0,01 m	Eficiência para L=0,1 m
<b>Equação (25)</b>	24	40	90	0,02837	0,2750
	31	40	90	0,03699	0,3610
	38	40	90	0,04515	0,4560
<b>Equação (28)</b>	24	40	90	0,02526	0,2450
	31	40	90	0,02526	0,2450
	38	40	90	0,03083	0,3043

Observa-se que as simulações efetuadas com dimensões de leito diferentes levaram aos mesmos resultados de condição ótima para as duas equações de eficiência aplicadas e condições iniciais de umidade do grão variadas, sendo as condições ótimas correspondentes às menores temperatura do ar e velocidade do ar de secagem. Porém, a eficiência energética aumentou significativamente com o aumento das dimensões do leito, além disso, ela foi maior quando a umidade inicial do grão aumentou, exceto para as umidades iniciais de 24% e 31% b.s. para a Equação (28), cujos valores foram iguais. Com relação às superfícies de resposta, o  $R^2$  de todas elas foram superiores a 0,99, indicando um ajuste satisfatório das mesmas aos resultados encontrados. Exemplos das superfícies geradas se encontram nas Figuras 1 e 2.



**Figura 1:** Superfície de resposta para  $X_0=24\%$  b.s. e  $L = 0,01$  m. (a) Com Equação (25) e (b) Com Equação (28).

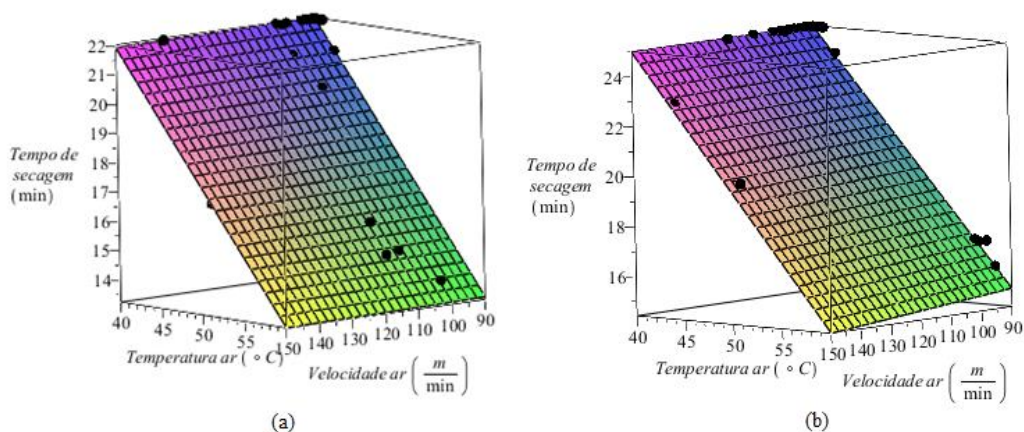


**Figura 2:** Superfície de resposta para  $X_0=24\%$  b.s. e  $L = 0,1$  m. (a) Com Equação (25) e (b) Com Equação (28).

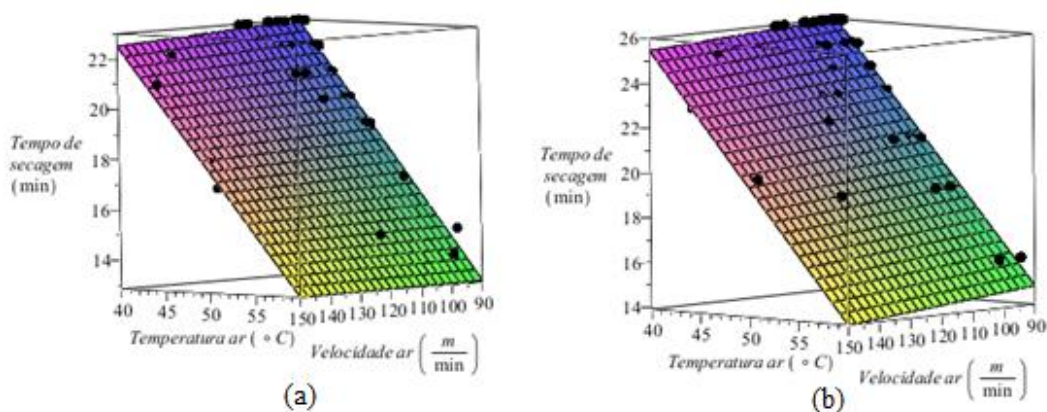
Os resultados encontrados para a temperatura e velocidade do ar de secagem ótimas são coerentes, visto que o aumento da temperatura do ar ocasiona um aumento no consumo energético proveniente do aquecimento do ar desde a temperatura ambiente até a temperatura de operação. Igualmente, a energia térmica empregada para aquecer o ar é maior quanto mais elevado é o valor da velocidade do ar de secagem. Sendo assim, como a energia requerida para aquecer o ar é inversamente proporcional à eficiência energética, seu aumento provoca uma diminuição da eficiência.

Nos estudos de Young e Dickens (1975) e Walker e Bakker-Arkema (1978) notou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem diminuiu a eficiência energética, assim como o aumento do fluxo do ar de secagem. No trabalho de Dalbello (1995), com a secagem do milho-pipoca e do amendoim, obteve-se a melhor eficiência energética na utilização da menor temperatura do ar ( $40^{\circ}\text{C}$ ), sendo que ao aumentá-la existia uma tendência de redução da eficiência. Conforme verificado por Hernández-Dias *et al.* (2013) e Amantéa *et al.* (2013), na secagem de grãos de café e grãos de milho, respectivamente, a maior eficiência energética foi alcançada nas condições de menor temperatura do ar e velocidade do ar de secagem.

Avaliou-se também a interação entre a temperatura e velocidade do ar com o tempo de secagem nas simulações com as duas dimensões de leito, utilizando os dois critérios de eficiência energética (Figuras 3 e 4).



**Figura 3:** Superfície de resposta para o tempo, com  $X_0=24\%$  b.s. e  $L = 0,01$  m. (a) Com Equação (25) e (b) Com Equação (28).

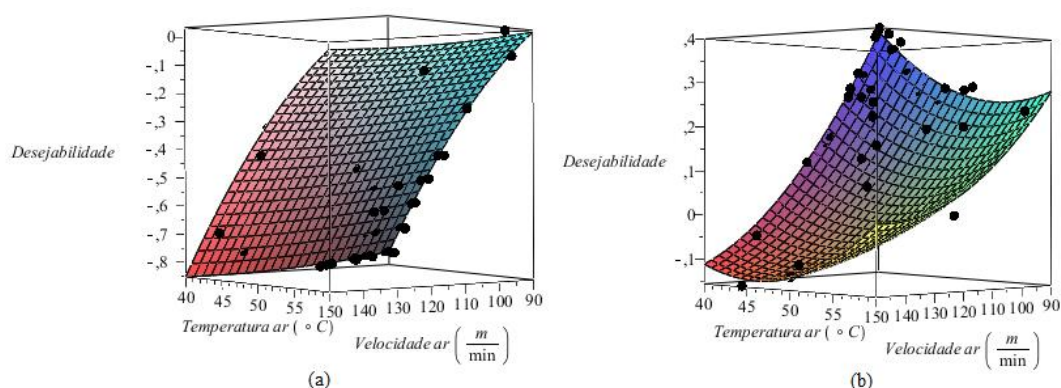


**Figura 4:** Superfície de resposta para o tempo, com  $X_0=24\%$  b.s. e  $L = 0,1$  m. (a) Com Equação (25) e (b) Com Equação (28).

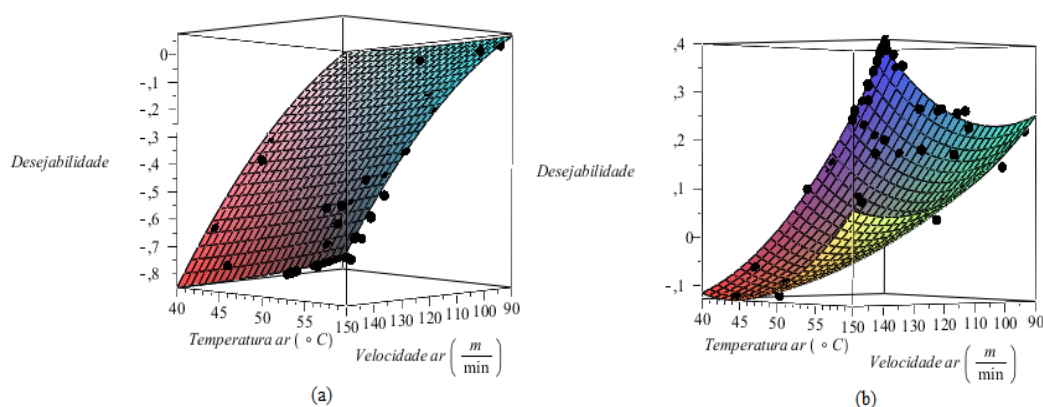
Nota-se que, tanto no emprego da Equação (25) como da Equação (28), a velocidade do ar de secagem não influenciou no tempo total de secagem, sendo somente a temperatura do ar um fator relevante, onde ao se aumentar a mesma o tempo total de secagem tende a diminuir. Além disso, observou-se que para os dois critérios de eficiência aplicados o tempo total de secagem foi o mesmo, sendo que somente o resultado encontrado com a umidade inicial do grão de 24% b.s. foi diferente com relação à Equação empregada.

Ainda, verificou-se que o tempo de secagem tende a ser maior conforme aumentam-se a umidade inicial do grão e o tamanho do leito, onde, fixando a umidade inicial do grão e a equação aplicada, o tempo total aumentou um minuto com o aumento do leito. E, mantendo-se o tamanho do leito fixo, o tempo total de secagem aumentou três minutos de 24% b.s. para 31% b.s. e dois minutos de 31% b.s. para 38% b.s., chegando a 28 minutos com 38% b.s. e  $L = 0,1$  m. Verificou-se também que o coeficiente de determinação,  $R^2$ , para todas as superfícies de resposta foi superior a 0,98, o que demonstra bom ajuste das mesmas aos resultados obtidos.

Com relação à aplicação do critério de desejabilidade, tem-se nas Figuras 5 e 6 as superfícies de resposta geradas para algumas das condições simuladas.



**Figura 5:** Superfície de resposta para a desejabilidade, com  $X_0=24\%$  b.s., Equação (25) e  $L = 0,1$  m. (a) Com peso = 0,1 e (b) Com peso = 0,7.



**Figura 6:** Superfície de resposta para a desejabilidade, com  $X_0=38\%$  b.s., Equação (25) e  $L = 0,1$  m. (a) Com peso = 0,1 e (b) Com peso = 0,7.

Observou-se que os resultados obtidos para a condição ótima de temperatura e velocidade do ar de secagem foram idênticos em todos os casos analisados para o mesmo valor de peso e critérios utilizados, exceto para a umidade inicial de 38% b.s. e  $p=0,1$ , onde o valor ótimo da velocidade do ar de secagem variou conforme a equação empregada. Com relação à desejabilidade, os resultados encontrados seguiram um mesmo padrão de comportamento, sendo que os valores variaram muito pouco de uma equação para outra e com a mudança da umidade inicial.

Notou-se, além disso, que o valor da desejabilidade aumentou conforme aumento do peso, exceto para o caso da umidade inicial de 38% b.s. e Equação (28) no leito com dimensões aumentadas, onde ocorreu variação significativa nos valores obtidos com cada peso aplicado. Ainda, observou-se que até a situação com  $p=0,6$  a condição ótima era a menor velocidade do ar

de secagem e maior temperatura do ar, porém, de  $p=0,7$  a  $p=0,9$  a condição ótima para a temperatura passou a ser a temperatura do ar mais baixa.

Como a influência do consumo energético no resultado é mais significativa conforme aumenta-se o peso, ao simular uma situação onde o mesmo prevalece há a tendência de o resultado ser igual ao obtido sem considerar a desejabilidade. Do mesmo modo, quando o peso é baixo, o valor do tempo total de secagem é mais relevante para o processo, por isso a condição ótima tende a ser a da maior temperatura do ar, que leva a um tempo de secagem menor. Sendo assim, tem-se que a condição ótima de secagem é dependente do objetivo particular de cada processo, podendo este ser o tempo total necessário para a secagem ou o menor consumo energético.

#### **4. Conclusão**

Nas simulações realizadas para a eficiência energética, observou-se que ao variar o critério aplicado e umidade inicial do grão, os mesmos resultados de condição ótima foram obtidos, os quais foram as menores temperatura e fluxo do ar de secagem. Ainda, a eficiência energética aumentou com o aumento das dimensões do leito e umidade inicial do grão.

Para as superfícies de resposta geradas com o tempo de secagem, notou-se que a velocidade do ar não influenciou no mesmo, porém, o aumento da temperatura do ar implicou em uma redução do tempo total de secagem. Por outro lado, o aumento da umidade inicial do grão ocasionou em um maior tempo de secagem.

Nas simulações efetuadas com a desejabilidade, observou-se que, em grande maioria, os mesmos resultados de condição ótima foram obtidos, com um mesmo valor de peso e equações utilizadas, porém, notou-se uma mudança da temperatura ótima entre  $p=0,6$  e  $p=0,7$ .

Portanto, vê-se que a condição ótima de operação pode variar conforme o objetivo principal pretendido no processo de secagem.

#### **5. Agradecimentos**

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo apoio financeiro ao projeto.

#### **6. Referências**

AMANTEÁ, R.P., FORTES, M., MARTINS, J.H. & FERREIRA W.R. 2013. Numerical Simulation Techniques for Optimizing Thermodynamic Efficiencies of Cereal Grain Dryers. *Drying Technology*, 31, 672–683.



- ANDRADE, E.T., CORREA, P.C., TEIXEIRA, L.P., PEREIRA, R.G. & CALOMENI, J.F. 2006. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. *Engevista*, 8, 83-95.
- BASILE, A., CURCIO, S., BAGNATO, G., LIGUORI, S., JOKAR, S.M. & IULIANELLI, A. 2015. Water gas shift reaction in membrane reactors: Theoretical investigation by artificial neural networks model and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 5897-5906.
- BORGES, P.A.P. 2002. Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CHAKRABORTY, S., DASGUPTA, J., FAROOQ, U., SIKDER, J., DRIOLI, E. & CURCIO, S. 2014. Experimental analysis, modeling and optimization of chromium (VI) removal from aqueous solutions by polymer-enhanced ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 456, 139-154.
- CORRÊA, P.C., ARAÚJO, E.F. & AFONSO JÚNIOR, P.C. 2003. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays L.*). *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 2, 110-119.
- CORRÊA, P.C., RESENDE, O., MARTINAZZO, A.P., GONELI, A.L.D. & BOTELHO, F.M. 2007. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, 27, 501-510.
- COSTA, L.M., RESENDE, O., GONÇALVES, D.N. & OLIVEIRA, D.E.C. 2015. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. *Bioscience Journal*, 31, 392-403.
- CRUZ, F.P.B. 2016. Estudo, modelagem matemática e controle do processo de secagem de crambe (*Crambe Abyssinica*) em secador de leito fixo de bancada. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- CURCIO, S., AVERSA, M., CALABRÒ, V. & IORIO, G. 2015. Modeling of microbial spoilage and color degradation occurring in convective drying of vegetables: a route to process optimization. *Journal of Food Process Engineering*, 38, 76-92.
- DALBELLO, O. 1995. Eficiência do processo de secagem de amendoim (*Arachis hypogaea L.*) e milho-pipoca (*Zea mays L.*). Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- DEFENDI, R.O., PARAÍSO, P.R. & JORGE, L.M.M. 2015. Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime. *Engevista*, 17, 421-432.
- DOLACK, P. 1996. Crambe, Industrial Rapessed, and Tung Provide Valuable Oils. *Industrial Uses*, 17-23. Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/publications/IUS6/ius6c.pdf>. Acessado em Junho de 2016.
- FALASCA, S. L., LAMAS, M.C., CARBALLO, S.M. & ANSCHAU, A. 2010. Crambe abyssinica: An almost unknown crop with a promissory future to produce biodiesel in Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 5808-5812.
- FERNANDES, C.F. 2005. Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos.

GLASER, L.K. 1996. Crambe: an economic assessment of the feasibility of providing multiple-peril crop insurance. Economic Research Service for the Risk Management Agency, Federal Crop Insurance Corporation.

GLUECKAUF, E. & COATES, J.I. 1947. Theory of chromatography part IV: the influence of incomplete equilibrium on the front boundary of chromatograms and on the effectiveness of separation. *Journal of American Chemical Society*, 1315–1321.

HERNÁNDEZ-DÍAZ, W.N., HERNÁNDEZ-CAMPOS, F.J., VARGAS-GALARZA, Z., RODRÍGUEZ-JIMENES, G.C. & GARCÍA-ALVARADO, M.A. 2013. Coffee grain rotary drying optimization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12, 315-325.

JAYAS, D.S., CENKOWSKI, S., PABIS, S. & MUIR, W.E. 1991. Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9, 551-588.

JOHANN, G. 2016. Modelagem, simulação e otimização de secadores convectivos de grãos: determinação da eficiência energética. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá.

KANAAN, A.F., HAMM, J.B.S., FLORES, C.G., OLIVEIRA, J.C.P. & ALMEIDA, A.R.F. 2016. Drying of rye (*Lolium multiflorum* L.) in fixed bed with parallel air flow. *Engvista*, 18, 11-12.

KNIGHTS, S.E. 2002. Crambe: a North Dakota case study. Rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication No W02/005, RIRDC Project No TA001-55.

KUDRA, T. 2004. Energy Aspects in Drying. *Drying Technology*, 22, 917-932.

LI, X., AHLMAN, A., LINDGREN, H. & ZHU, L. 2011. Highly efficient in vitro regeneration of the industrial oilseed crop *Crambe abyssinica*. *Industrial Crops and Products*, 33, 170-175.

LUZ, G.R. 2010. Avaliação de estratégias de operação e de controle da secagem industrial de farelo de soja. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá.

PABIS, S., JAYAS, D.S. & CENKOWSKI, S. 1998. *Grain Drying Theory and Practice*, New York, John Wiley & Sons.

PARRY, J.L. 1985. A review of mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32, 1–29.

RANZ, W.E. & MARSHALL JR., W.R. 1952. Evaporation from drops. Parts I & II. *Chemical Engineering Progress*, 48, 173-180.

ROSCOE, R., BROCH, D.L. & NERY, W.S.L. Análise de Sensibilidade dos Modelos Agrícolas e Industrial de Utilização do Óleo de Crambe na Cadeia Produtiva de Biodiesel em Mato Grosso do Sul. IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, 2010 João Pessoa, Brasil.

SANTOS, J.I., ROGÉRIO, F., MIGLIAVACCA, R.A., GOUVEIA, B., SILVA, T.B. & BARBOSA, M.C. 2012. Efeito da Adubação Potássica na Cultura do Crambe. *Bioscience Journal*, 28, 346-350.

SINGH, R.P. & HELDMAN, D.R. 1993. *Introduction to Food Engineering*. 2ª ed., Academic Press, San Diego.

STAKIĆ, M. & TSOTSAS, E. 2005. Model-Based Analysis of Convective Grain Drying Processes. *Drying Technology*, 23, 1895–1908.

STAKIĆ, M., BANJAC, M. & UROŠEVIĆ, T. 2011. Numerical study on hygroscopic material drying in packed bed. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28, 273-384.

WALKER, L.P. & BAKKER-ARKEMA, F.W. 1978. Energy efficiency in concurrent flow rice drying. East Lansing, ASAE.

WAZILEWSKI, W.T., ROSA, H.A., CHAVES, L.I., VELOSO, G. & BARRICCATTI, R.A. 2012a. Avaliação de Propriedades Físico-químicas do Biodiesel Metílico de Óleo de Crambe abyssinica Hochst. *Jornal of Agronomic Science*, 1, 187-195.

WAZILEWSKI, W.T., BARRICCATTI, R.A., MARTINS, G.I., SECCO, D., SOUZA, S.N.M., ROSA, H.A. & CHAVES, L.I. 2012b. Study of the methyl crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) and soybean biodiesel oxidative stability. *Industrial Crops and Products*, 43, 207-212.

YOUNG, J. H. & DICKENS, J. W. 1975. Evaluation of costs for drying in hatch or cross-flow systems. *Transactions of the ASAE*, 18, 734-739.