

## Otimização do consumo energético na secagem intermitente de feijão em leito fixo

### RESUMO

**Mateus Rosolen Gomes**  
[mateus.rosolen.gomes@gmail.com](mailto:mateus.rosolen.gomes@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Apucarana, Paraná,  
Brasil

**Danielle Gonçalves de Oliveira  
Prado**  
[danielle@utfpr.edu.br](mailto:danielle@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Apucarana, Paraná,  
Brasil

**Rafael Oliveira Defendi**  
[rafaeldefendi@utfpr.edu.br](mailto:rafaeldefendi@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Apucarana, Paraná,  
Brasil

O processo de secagem é essencial para possibilitar o armazenamento de grãos. Contudo, o consumo energético desse processo é expressivo. Neste contexto, a secagem intermitente é uma alternativa que visa melhorar o processo em termos de demanda de energia ou de preservação de qualidade do produto. Neste trabalho objetivou-se o estudo da secagem intermitente de feijão por meio de modelos matemáticos da literatura, buscando-se otimizar o processo a fim de se determinar as condições operacionais que levem ao menor consumo energético. Verificou-se se essas condições operacionais de mínimo consumo de energia variavam em função das condições do processo de secagem, como temperatura ambiente e teor de umidade tanto do ar quanto do grão. Os resultados indicaram que tanto a operação intermitente, quanto a convencional, na qual as condições do ar de secagem de alimentação são mantidas constantes, podem levar a um mínimo de consumo de energia dependendo das condições do sistema. Assim, o controle da temperatura do ar em função das condições do sistema poderia reduzir os custos do processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Secagem intermitente. Consumo energético. Feijão.

## INTRODUÇÃO

A secagem de grãos é uma etapa necessária para evitar perdas na qualidade do material durante o armazenamento. Os principais danos que podem ocorrer aos grãos podem ser biológicos (microorganismos, insetos, ácaros) e físicos (temperatura, umidade, danos mecânicos). O conhecimento destes aspectos objetiva manter a composição química do produto (carboidratos, proteínas, gorduras, fibras, minerais e vitaminas) e minimizar a redução do poder germinativo e do vigor das sementes (PUZZI, 2000).

A redução do teor de umidade proporciona uma redução dos danos que poderiam ocorrer durante o armazenamento. Contudo, o processo de secagem é a etapa que pode consumir a maior parte de toda a energia consumida durante a cadeia produtiva de produtos agrícolas (SILVA *et al.*, 2000). Uma alternativa para redução destes custos é a aplicação da operação intermitente, na qual as condições de alimentação do sistema de secagem variam ao longo do tempo, como o caso de oscilações na temperatura do ar na entrada do secador.

Tradicionalmente, o processo de secagem ocorre com o ar alimentado no secador a temperatura e velocidade constante. Contudo, como os efeitos difusivos de transferência de massa no interior do grão são os fenômenos que controlam as taxas de secagem (DEFENDI *et al.*, 2016b; DEFENDI *et al.*, 2017), é interessante se aplicar a operação intermitente para se evitar desperdício de energia consumida durante o aquecimento do ar, uma vez que o caminho que a água vai percorrer até chegar a superfície do grão é o fator que vai limitar o processo.

Alguns autores observaram que com a operação intermitente foi possível não apenas reduzir o consumo energético em comparação com a secagem convencional, conduzida com as condições do ar de alimentação em regime permanente (Defendi *et al.*, 2017; Holowaty *et al.*, 2012), mas também melhorar a qualidade do produto final (Chin e Law, 2010) e reduzir o tempo efetivo de secagem (Kowalski e Szadzinska, 2014).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é otimizar o processo de secagem de feijão, buscando-se minimizar a demanda de energia do processo relativo ao aquecimento do ar por meio de simulações conduzidas com base em modelos matemáticos da literatura. Além disso, objetivou-se avaliar se o tipo de operação que minimize o consumo energético do processo ocorre em função das condições operacionais do processo, como temperatura e umidade ambiente, como também teor de umidade final e inicial do grão.

## METODOLOGIA

O modelo de secagem de Page foi o utilizado para descrever as cinéticas de secagem dos grãos de feijão. Este modelo foi ajustado e generalizado em função da temperatura do ar e do teor inicial do grão por Junior e Corrêa (1999):

$$XR = \exp(-kt^n) \quad (1)$$

t é o tempo em horas, k e n são parâmetros do modelo de Page, cujos respectivos valores ajustados em função da temperatura do ar e do teor de umidade inicial do grão estão apresentados pelas Equações (2) e (3):

$$k = 0,4460 - 0,0236T + 0,0003T^2 + 1,0833X_0 - 0,6902X_0^2 \quad (2)$$

$$n = 1,0591 - 0,0056T - 1,6569X_0 + 1,4230X_0^2 + 0,0121T \times X_0 \quad (3)$$

Junior e Corrêa (1999), durante o ajuste do modelo de Page, utilizaram o modelo da equação modificada por Henderson, ajustada por Bach (1979), para estimar o teor de umidade de equilíbrio do feijão:

$$X_e = \left[ -\frac{\ln(1-UR)}{8,0707 \times 10^{-16} (273,15+T)^{5,2304}} \right]^{1/1,7692} \quad (4)$$

Com base no modelo de Page, as cinéticas de secagem de feijão foram simuladas e minizou-se a função objetivo representada pela Equação 5, a qual relaciona o consumo energético do processo com o processo de aquecimento do mesmo da temperatura ambiente até a temperatura de operação na entrada do secador.

$$\Delta H = \dot{m} t \Delta \hat{H} = \int \dot{m} t c_p \Delta T \quad (5)$$

$\Delta H$  é a variação da entalpia do ar durante o processo de aquecimento em kJ,  $\Delta \hat{H}$  é a variação da entalpia específica do ar em kJ/kg,  $\dot{m}$  é a vazão mássica de ar em kg/s e  $c_p$  é o calor específico do ar em kJ/kg°C

Os parâmetros determinados durante o processo de otimização foram a amplitude, o meio período e a temperatura das oscilações do tipo de grau que foram impostas na modulação da temperatura do ar de secagem. Para uma amplitude de 15°C, uma temperatura central de 55 °C e um valor de período de 40 min, durante o processo de secagem, a temperatura do ar seria 62,5°C durante os 20 primeiros minutos e 47,5°C durante os próximos 20 minutos e em sequência e sucessivamente oscilaria novamente entre 62,5 e 47,5°C a cada 20 minutos de operação.

As otimizações foram realizadas variando-se os valores da temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), da umidade inicial do grão ( $X_0$ ), da umidade do ar ( $Y_g$ ) e os valores de teor de umidade de armazenamento do grão ( $X_f$ ), a fim de se avaliar se o ponto ótimo de operação caracterizado pelo ponto de mínimo consumo energético muda em virtude destas condições operacionais. Ao sistema de otimização foram impostas as restrições apresentadas pela Tabela 1 e as condições nas quais o sistema foi otimizado estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Restrições dos parâmetros envolvidos na secagem de feijão

Parâmetro	Máximo	Mínimo
Amplitude (°C)	30	0
Temperatura Central (°C)	55	45
Meio Período (h)	10	0,3

Tabela 2: Condições para a otimização do consumo energético da secagem de feijão

Parâmetros	Mínimo	Máximo
$X_f$	0,11	0,15
$T_{amb}$ (°C)	15	25
$X_0$	0,15	0,3
$Y_g$ (g/m <sup>3</sup> )	0	10

## RESULTADOS

A tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros otimizados de amplitude, temperatura central e meio período, que levaram ao menor consumo energético do processo para diferentes temperaturas ambientes, e mantendo-se constante em ambos os casos as outras condições operacionais ( $Y_g = 0 \text{ g/m}^3$ ,  $X_0 = 0,3$  e  $X_f = 0,11$ ).

Tabela 3: Valores dos parâmetros que levaram ao menor consumo de energia para diferentes temperaturas ambientes

Tamb(°C)	Amplitude (°C)	Tcentral(°C)	MeioPeríodo(h)	Consumo(kJ)	Tinicial	Operação
15	30	45	5	1631,9	Menor Valor	Intermitente
25	30	45	5	1028,5	Menor Valor	Intermitente

A tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros otimizados de amplitude, temperatura central e meio período, que levaram ao menor consumo energético do processo para diferentes teores de umidade do ar, e mantendo-se constante em ambos os casos as outras condições operacionais ( $T_{amb} = 25 \text{ °C}$ ,  $X_0 = 0,3$  e  $X_f = 0,11$ ).

Tabela 4: Valores dos parâmetros que levaram ao menor consumo de energia para diferentes teores de umidade do ar

$Y_g \text{ (g/m}^3\text{)}$	Amplitude (°C)	Tcentral(°C)	MeioPeríodo(h)	Consumo(kJ)	Tinicial	Operação
0	30	45	5	1028,5	Menor Valor	Intermitente
10	30	55	2,3	1284,6	Maior Valor	Convencional

A tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros otimizados de amplitude, temperatura central e meio período, que levaram ao menor consumo energético do processo para diferentes teores de umidade inicial do grão, e mantendo-se constante em ambos os casos as outras condições operacionais ( $T_{amb} = 25 \text{ °C}$ ,  $Y_g = 0 \text{ g/m}^3$ , e  $X_f = 0,11$ ).

Tabela 5: Valores dos parâmetros que levaram ao menor consumo de energia para diferentes teores de umidade inicial do grão

$X_0$	Amplitude (°C)	Tcentral(°C)	MeioPeríodo(h)	Consumo(kJ)	Tinicial	Operação
0,3	30	45	5	1028,5	Menor Valor	Intermitente
0,15	30	45	5	93,8	Menor Valor	Convencional

A tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros otimizados de amplitude, temperatura central e meio período, que levaram ao menor consumo energético do processo para diferentes teores de umidade de armazenamento, e mantendo-se constante em ambos os casos as outras condições operacionais ( $T_{amb} = 25 \text{ °C}$ ,  $Y_g = 0 \text{ g/m}^3$  e  $X_0 = 0,3$ ).

Tabela 6: Valores dos parâmetros que levaram ao menor consumo de energia para diferentes teores de umidade de armazenamento

$X_f$	Amplitude (°C)	Tcentral(°C)	MeioPeríodo(h)	Consumo(kJ)	Tinicial	Operação
0,11	30	45	5	1028,5	Menor Valor	Intermitente
0,15	30	45	5	160,1	Menor Valor	Convencional

---

## CONCLUSÃO

Os resultados das simulações apresentaram que tanto a operação convencional quanto a operação intermitente podem levar ao ponto de menor demanda energética referente ao processo de aquecimento do ar na secagem de grãos de feijão. Verificou-se que o melhor tipo de operação é dependente das condições do sistema, como temperatura e umidade ambiente e teor de umidade inicial e final do produto. Como as condições operacionais variam em função de condições climáticas e do tipo de produto a ser tratado, uma redução no custo operacional do processo de secagem poderia ser alcançada com o controle da temperatura do ar de secagem em função das condições operacionais.

## Energy consumption optimization in the intermittent drying of bean in fixed bed

### ABSTRACT

Drying process is essential for storing grain. However, energy consumption of this process is significant. In this context, intermittent drying is an alternative that aims to improve the process in terms of energy demand or product quality preservation. The objective of this study was to study intermittent drying of beans by means of literature mathematical models, in order to optimize the process to determine the operational conditions that lead to lower energy consumption. It was found that these operating conditions of minimum energy consumption varied according to the conditions of the drying process, such as ambient temperature and moisture content of both air and grain. These results indicated that both intermittent and conventional operation, in which the feed drying air conditions are kept constant, can lead to a minimum of energy consumption depending on the conditions of the system. Controlling air temperature as a function of the system conditions could reduce process costs.

**KEYWORDS:** Intermittent drying. Energy consumption. Beans.

## REFERÊNCIAS

- CHIN, S.K.; LAW, C.L. Product Quality and Drying Characteristics of Intermittent Heat Pump Drying of *Ganoderma tsugae* Murrill, *Drying Technology*, 2010, 28, 1457-1465.
- DEFENDI, R. O.; NICOLIN, D. J.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Assessment of the Initial Moisture Content on Soybean Drying Kinetics and Transport Properties, *Drying Technology: An International Journal*, 2016a, 34:3, 360-371.
- DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. The Air Temperature Modulation Impact on the Drying of Soybeans in Fixed Bed, *Drying Technology: An International Journal*, 2016b, 34:5, 516-529.
- DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Optimization study of soybean intermittent drying in fixed-bed drying technology, 2017, *Drying Technology: An International Journal*, 35:1, 125-137.
- HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L. A.; SCHMALKO, M. E. Intermittent drying simulation in deep bed dryer of yerba maté, *Journal of Food Engineering*, 2012, 111, p. 110-114.
- JÚNIOR, P. C. A.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 1999, v.3, n.3, p. 349-353.
- KOWALSKI, S.J.; SZADZINSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2014, 82, 65-70.
- PUZZI, D. Abastecimento e Armazenagem de Grãos. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, SP, 2000.
- SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e Secadores. In *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. SILVA, J. S. Viçosa: Aprenda Fácil, 107-138, 2000.

**Recebido:** 31 ago. 2017.

**Aprovado:** 02 out. 2017.

**Como citar:**

GOMES, M. R. et al. Otimização do consumo energético na secagem intermitente de feijão em leito fixo .  
In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Mateus Rosolen Gomes  
Rua Marcílio Dias, 635, Apucarana, Paraná, Brasil.

**Direito autoral:**

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

