

Determinação das condições ótimas de operação para a secagem de grãos de café em leito fixo em função da eficiência energética

Gracielle Johann (Universidade Estadual de Maringá) grajohann@yahoo.com.br
Nehemias Curvelo Pereira (Universidade Estadual de Maringá) nehemiascp@yahoo.com.br
Edson Antonio da Silva (Universidade Estadual do Oeste do Paraná) edsondeq@hotmail.com

Resumo:

Grãos de café são submetidos a tratamentos de secagem no período pós-colheita, com objetivo de remover a umidade excedente, evitando o crescimento de micro organismos. Nesse sentido, a secagem é essencial para a manutenção da qualidade dos grãos e, conseqüentemente, da bebida obtida pela extração dos grãos torrados. No presente trabalho, foi estudado o processo de secagem convectiva de grãos de café (*Coffea arabica* L), da variedade Catuaí, em leito profundo, sendo otimizada a eficiência energética do processo de secagem. Na otimização, considerou-se a relação entre a quantidade de energia requerida para aquecer o ar de secagem e a quantidade de energia necessária para dessorver a umidade dos grãos de café. A eficiência energética instantânea média variou entre 0,2025% e 0,0757%, respectivamente com secador operando a 1 e 5 m/s, de modo que empregando velocidade do ar de secagem igual a 1 m/s, a eficiência energética foi cinco vezes superior àquela obtida caso fosse empregada velocidade de 5 m/s.

Palavras chave: Otimização, Secagem, Grãos de Café, Eficiência Energética.

Determination of the optimum operating conditions for drying coffee beans in fixed bed due to energetic efficiency

Abstract

Coffee beans are subjected to drying treatment in the post-harvest period, in order to remove the excess moisture, preventing the growth of microorganisms. Accordingly, drying is essential for maintaining the grains quality and, consequently, the beverage obtained by extraction of roasted coffee beans. In this study, we studied the convective drying process of coffee beans (*Coffea arabica* L.), variety Catuaí, in deep bed, and we optimized the energy efficiency of the drying process. In the optimization, it was considered the relationship between the amount of energy required to heat the drying air and the amount of energy required to desorb the moisture from the coffee beans. The average instantaneous efficiency varied between 0.2025% and 0.0757%, respectively with dryer operating at 1 and 5 m/s, so that using drying air speed of 1 m/s, the energy efficiency was five times higher than that obtained if there were used 5 m/s.

Key-words: Optimization, drying, Coffee Bean, Energetic Efficiency.

1. Introdução

Os grãos de café são a mais amplamente comercializada *commodity* agrícola tropical do mundo (ISHWARYA; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2015). De acordo com a FAO (2008), eles são vendidos em 78 países ao redor do mundo, e 20-25 milhões de famílias dependem de sua

comercialização. O café, derivado dos grãos da planta do café, está entre as bebidas mais populares consumidas em todo o mundo. Normalmente, depois que os grãos são torrados e moídos, parte de seu conteúdo solúvel é extraído por água quente. Apesar de seu amplo consumo, longa história e técnicas bem desenvolvidas, a forma consistente de se fazer um café de alta qualidade continua a ser uma tarefa difícil. Esta dificuldade surge a partir da dependência da qualidade do café em um grande número de variáveis de processo. Algumas delas incluem a relação de infusão (massa de café seco/volume de água), tamanho e distribuição dos grãos moídos, tempo de preparação, temperatura da água, agitação, qualidade da água e uniformidade de extração (MORONEY et al., 2015).

Os grãos de café são submetidos à dois tratamentos diferentes de pós-colheita, onde os principais objetivos são remover as várias camadas adjacentes aos e secá-los, a fim de evitar o crescimento de micro organismos (SUÁREZ-QUIROZ et al., 2004). O tratamento mais comum é chamado “úmido”. Neste método, os grãos de café são colocados em um tanque cheio de água, a fim de separar os grãos defeituosos e para remover a polpa e a mucilagem. Em seguida, os grãos de café são secos. Uma alternativa é usar o método “seco”, em que os grãos de café são diretamente secos, para obter grãos cinzentos, conhecidos como café natural. Depois da secagem, as camadas que cobrem os grãos são removidas mecanicamente (RAMÍREZ-MARTÍNEZ et al., 2013). A secagem é muito importante para manter a vida útil do café durante a armazenagem, e é um dos mais importantes fatores que determinam a qualidade do produto (HERNANDEZ-DIAZ et al., 2008). O café é seco, de modo a permitir o armazenamento e transporte seguros, sendo que, devido ao processo de torrefação, a umidade do café seco deve girar em torno de 11% (BURMESTER; EGGERS, 2010). Após a colheita, os frutos de café podem ou não ser lavados, e, em seguida são secos. A fermentação da polpa e mucilagem no interior do fruto ocorre durante este período. O processamento a seco é caracterizado por ser totalmente aeróbio, o que mantém uma concentração maior de glucose e frutose nos frutos (EVANGELISTA et al., 2014).

Para Bortolaia (2011), as etapas de limpeza e secagem são indispensáveis para uma boa conservação dos grãos armazenados. Nesse sentido, para Dalpasquale, Sperandio e Silva (2012), a etapa de secagem de grãos é a operação unitária crucial, existindo consenso que, quando conduzida de maneira inapropriada, levará à deterioração do produto agrícola na sua cadeia produtiva. Conforme Çakmak e Yıldız (2009), há uma série de pesquisas acerca da secagem de alimentos, destinadas a alcançar, em um curto período de tempo, produtos de maior qualidade.

Conforme Menshutina et al. (2004), considera-se, geralmente, que em secadores convencionais o calor fornecido ao secador é utilizado para o aquecimento tanto do material úmido quanto do equipamento de secagem, para a evaporação da umidade, e compensação das perdas de calor. No entanto, segundo os autores, a secagem de um grande número de materiais envolve energia, não só para a evaporação da água livre, mas também para a remoção da água ligada pelo fenômeno da capilaridade. Portanto, a eficiência energética, definida como a razão entre o calor necessário para a evaporação da umidade e o calor total fornecido ao secador é uma função das propriedades do material (porosidade, as propriedades de sorção, tamanho e forma, a umidade ligada, dentre outros), projeto do secador (tipo, configuração, o modo de aquecimento, etc.), parâmetros operacionais (temperatura de secagem, vazão de gás, etc.), e teores de umidade final e inicial.

De acordo com Luz (2010), a avaliação do consumo de energia na secagem, tendo-se como volume de controle todo o secador, objetiva averiguar a condição de temperatura do vapor de aquecimento que leve ao menor consumo energético, confiando àquela a manutenção da qualidade final e o menor custo de produção. Assim, para a definição do consumo energético

do secador, podem ser considerados os gastos com energia térmica e energia mecânica, nomeadamente para o aquecimento do ar de secagem e para sua respectiva compressão. Portanto, nesse caso, a formulação da função objetivo, consiste em minimizar a soma dos fatores referentes aos gastos energéticos mecânicos e térmicos, manipulando a velocidade e a temperatura de alimentação do ar de secagem.

Assim, o objetivos dos presente trabalho são avaliar a cinética da secagem de grãos de café, a partir de um conjunto de equações diferenciais obtido por balanços de massa e energia; desenvolver uma função objetivo que mensure a eficiência, em termos energéticos, da secagem convectiva desses grãos; e, por fim, formular uma rotina de otimização que empregue a função objetivo e o conjunto de restrições, de modo a se determinar as condições ótimas de operação do secador, minimizando o consumo energético.

2. Materiais e Métodos

Os dados experimentais empregados na validação do modelo foram obtidos por Vieira (1994), que estudou experimentalmente a secagem de grãos de café (*Coffea arabica* L), da variedade Catuaí, em uma unidade piloto, a 70 °C e 16 m s⁻¹. O leito de grãos era formado por um cilindro de 0.37 m de diâmetro e 0.5 m de altura. A temperatura ambiente foi de 18 °C e a umidade de alimentação do ar de secagem foi 0,01024 em base seca (b.s.).

A Figura 1 apresenta a representação esquemática do secador de grãos de café.

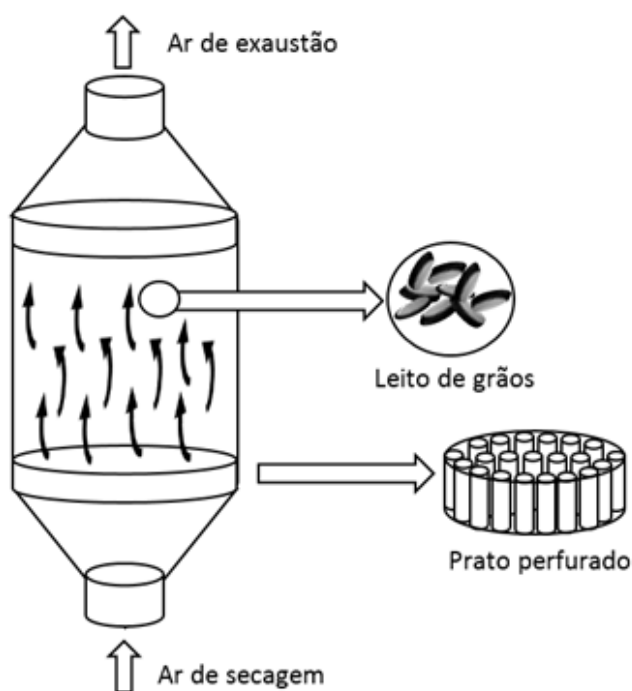


Figura 1 – Representação esquemática do secador convectivo

A modelagem do processo de secagem de grãos de café em camada fixa pode ser realizada a partir de balanços de massa e energia, conforme os princípios da conservação. As seguintes hipóteses simplificadoras foram consideradas

- a) os grãos de café formam um leito fixo e com distribuição homogênea;
- b) as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis;
- c) a umidade e temperatura iniciais do leito são uniformes;

- d) transporte unidimensional de calor e massa no leito;
- e) distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador;
- f) na transferência de calor entre o ar de secagem e o leito, predomina o fenômeno da convecção;
- g) o ar de secagem comporta-se gás ideal, nas condições de modelagem.

A partir das considerações iniciais, foi obtido um conjunto com quatro equações diferenciais:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = a k_s (X - X_E) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (Y \rho_G) = -v \frac{\partial}{\partial z} (\rho_G Y) - \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} = \frac{h_{cv}}{\rho_s (1-\varepsilon)} (T_G - T_s) - \lambda_D \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_G U_G) = \frac{h}{\varepsilon} (T_s - T_G) - v \frac{\partial}{\partial z} (\rho_G H_G) + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \lambda \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4)$$

Em que X é a umidade do leito (b.s.), t é o tempo (min), a é a área específica (m^{-1}), k_s é o coeficiente de transferência de massa (m/min), X_E é a umidade de equilíbrio (b.s.), Y é a umidade do ar de secagem (b.s.), ρ_G é a densidade do ar de secagem (kg/m), z é a coordenada espacial (m), v é a velocidade do ar de secagem (m/min), ε é a porosidade do leito (-), H_s é a entalpia do grão (kJ/kg), h_{cv} é o coeficiente convectivo volumétrico de transferência de calor ($kJ/K m^3 min$), ρ_s é a densidade do leito (kg/m), T_G é a temperatura do ar de secagem (K), T_s é a temperatura do grão (K), e λ é o calor de vaporização da água (kJ/kg).

Os parâmetros termo físicos necessários à solução das equações diferenciais são: ρ_s , 668,5 kg/ m^3 (Sfredo, Finzer e Limaverde, 2005); calor específico cp_s , 1,675 kJ/kg K (Villa e Roa, 1978); ε , 0,38 (Vieira, 1994); h_{cv} , 303,08 W/ m^2 °C (Johann et al, 2015); e k_s , $1,196 \times 10^{-3}$ m/min (Johann et al, 2015).

São necessários, ainda, a relação de equilíbrio entre a atividade da água, a_w (-), e a umidade de equilíbrio dos grãos de café, e o calor de vaporização da água pura, conforme Nilnot et al. (2012) e Treybal (1980):

$$X_E = 1,1281 \left[-\frac{\ln(1-a_w)}{343,15+40,535} \right]^{0.5405} \quad (5)$$

$$\lambda = 2,162 \times 10^3 + 2T_s \quad (6)$$

Na resolução do sistema do conjunto de equações diferenciais foi empregado o método das linhas. Neste método as derivadas espaciais foram aproximadas por diferenças finitas, esta metodologia transforma o sistema de equações diferenciais parciais num sistema de equações ordinárias. Para aplicar este método o domínio do problema (comprimento do secador) foi dividido em 10 elementos de discretização, conforme ilustrado na Figura 2.

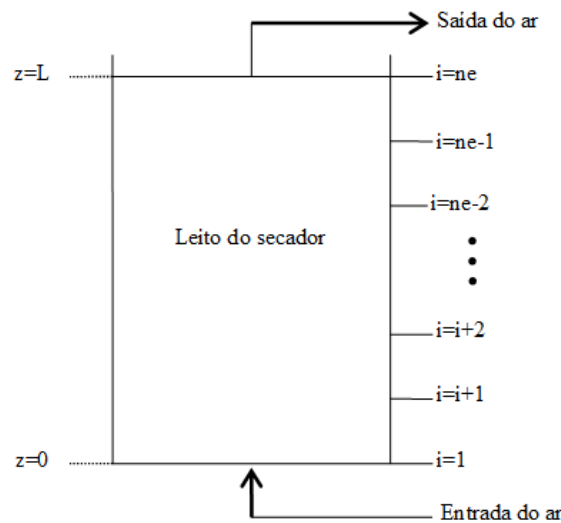


Figura 2 – Discretização do leito fixo do secador

O consumo energético, E_Q , é a energia necessária para aquecer o ar de secagem da temperatura ambiente até a temperatura de operação do secador:

$$E_Q = t_{\text{final}} v A \varepsilon \int_{T_{G_0}}^{T_{G_{\text{feed}}}} \rho_G H_G dT_G \quad (7)$$

Em que E_Q é a energia total consumida para aquecer o ar de secagem por unidade de tempo (kJ/min), t_{final} é o tempo total de secagem (min), T_{G_0} é a temperatura inicial do ar de secagem (°C), $T_{G_{\text{feed}}}$ é a temperatura de alimentação do ar de secagem (°C), e cp_G é o calor específico do ar de secagem (kJ/kg °C).

A quantidade de energia necessária para dessorver a umidade presente no leito de grãos, E_D , do instante inicial ao tempo final de secagem, é:

$$E_D = -m_s \lambda \int_0^{t_{\text{final}}} \Psi dt \quad (8)$$

Em que E_D é a energia consumida para dessorver a umidade (kJ/min), m_s é a massa dos grãos secos (kg), e Ψ é a taxa de secagem (kg/kg min).

Diante disso, pode-se, então, definir uma função objetivo, que é maximizar a eficiência energética da secagem, η , ou seja, maximizar a razão entre a quantidade de energia efetivamente empregada na remoção da umidade e a aquela adicionada ao ar de secagem, para aquecê-lo:

$$\eta = \max \frac{E_D}{E_Q} \quad (9)$$

Baker (1997) aponta que o teor de umidade seguro para armazenamento de grãos varia de acordo com a espécie, girando em torno de 8 à 10% para oleaginosas e de 12 à 14% para amiláceas, sendo que o menor teor de umidade torna viável o armazenamento por períodos superiores a um ano.

Usualmente, os grãos que serão utilizados como semente não são expostos à temperaturas superiores a 50 °C, já grãos cuja finalidade é o consumo após cozimento ou a extração de óleo são submetidos a temperaturas não superiores a 80 °C (Brooker et al. 1974).

Assim, a Eq. (9) foi sujeita a seguinte restrição, conforme Brooker et al. (1974) e Trelea, Trystram e Courtois (1997), mantendo fixa a temperatura em 70 °C:

$$1 \text{ m/s} \geq v \leq 5 \text{ m/s} \quad (10)$$

As simulações para otimização, desenvolvidas em camada profunda e fixa consideraram como variável manipulável a velocidade do ar de secagem, até que fosse atingida a umidade média do leito de grãos de café igual a 13%.

Para a resolução do conjunto de equações diferenciais, Eq. (1) a (4), foi utilizado o método das linhas, após discretização em relação ao espaço, por diferenças finitas, aplicando 10 elementos de discretização. Após a obtenção de um conjunto de equações diferenciais ordinárias, aplicou-se o método numérico de Rosenbrock (ROSENBROCK, 1963), por meio do comando *dsolve* do software Maple 13[®].

Para a otimização da Eq. (9), empregou-se o comando *Search* do software Maple 13[®], adotando-se a estratégia *globalsearch*, que permite a inclusão de restrições no processo de definição do ponto ótimo da função objetivo.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise energética da secagem de grãos de café em leito profundo, operando com ar de secagem a 70 °C.

Velocidade de secagem	t_D (min)	X_F (b.s.)	η_D [-]	$\eta_{l_{max}}$ [-]
1 m/s	1055	0,12972	0,2025%	0,3759%
2 m/s	1055	0,12965	0,1013%	0,1888%
3 m/s	1055	0,12963	0,0675%	0,1260%
5 m/s	1055	0,12962	0,0405%	0,0757%

Tabela 1 – Resultados da análise energética da secagem em leito profundo

Verifica-se, da Tabela 1, que para todas as velocidades, o tempo de secagem é o mesmo, 1055 min, uma vez que a taxa de secagem não sofre influência da velocidade, já que os valores dos coeficientes de transferência de calor e massa são constantes, na mesma temperatura. Entretanto, embora não haja influência da velocidade na taxa de secagem, operar o secador com velocidade mais elevada, implica em maior consumo energético (Figura 3).

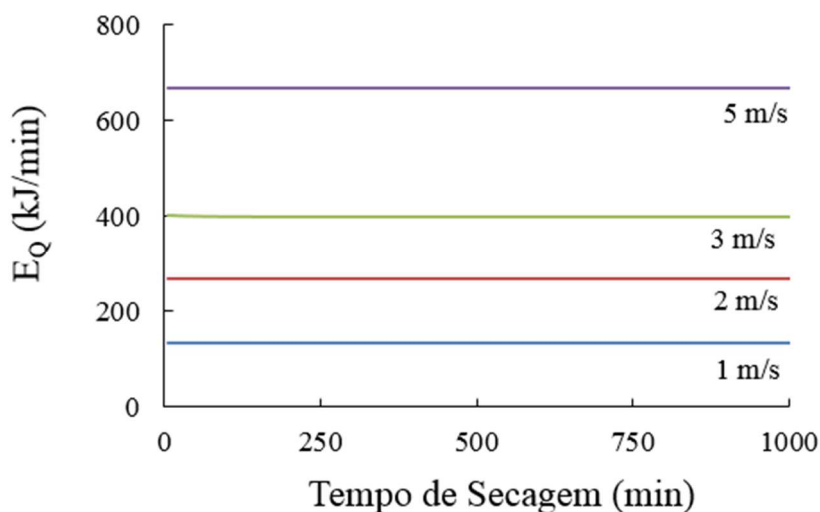


Figura 3 – Energia requerida para aquecer o ar até a temperatura de secagem (70 °C)

A Figura 3 ilustra o consumo de energia ao longo do processo de secagem para o aquecimento do ar de secagem da temperatura ambiente à de operação do secador, calculado pela Eq. (7). Para a secagem conduzida a 1 m/s, a energia requerida é de 133 kJ/min; 2 m/s de 267 kJ/min; a 4 m/s de 400 kJ/min e a 5 m/s de 667 kJ/min. O consumo de energia para o aquecimento é uma função das condições iniciais ambientais do ar e das condições operacionais do secador.

A Figura 4, por sua vez, apresenta o comportamento da eficiência energética da secagem, conforme otimizado pela função objetivo, Eq. (9), para diferentes velocidades do ar de secagem.

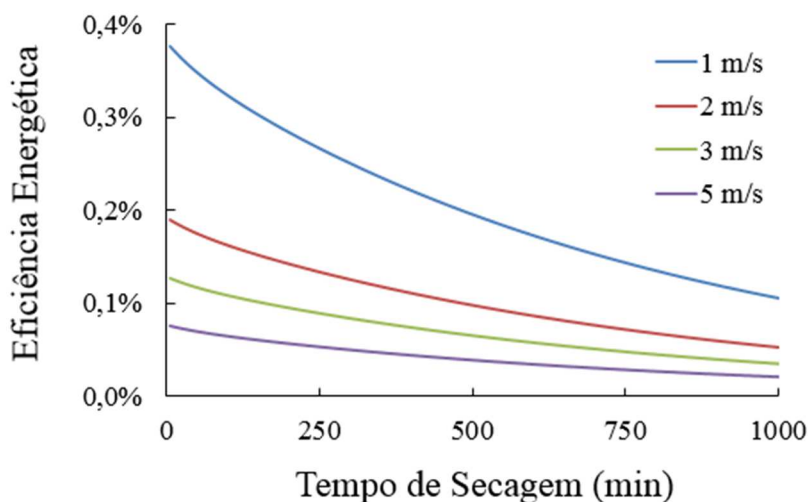


Figura 4 – Eficiência energética da secagem operando com ar a 70 °C e diferentes velocidades

A otimização da função objetivo indicou como condição de melhor eficiência energética a operação do secador em menor velocidade, no caso da restrição imposta pela Eq. (10), a velocidade do ar de secagem igual a 1 m/s, apresenta menor consumo de energia, alcançando a umidade final de 13%, para os grãos de café com umidade inicial de 45,58%.

Da Figura 3 e da Tabela 1, é possível observar que a eficiência energética instantânea é influenciada pela velocidade do ar de secagem, de modo que, fixando a umidade inicial e a temperatura, velocidades menores imprimem maior eficiência. Para a secagem conduzida a 1 m/s a eficiência média foi 0,2025% e a máxima de 0,3759%; a 2 m/s foi 0,1013% e a máxima de 0,1888%; a 3 m/s a eficiência média foi 0,0675% e a máxima de 0,1260%; e a 5 m/s a eficiência média foi 0,0757% e a máxima de 0,0757%.

A medida que o processo decorre, a eficiência do processo diminui, tendo em vista que a energia continua a ser fornecida na mesma quantidade, porém a taxa de secagem é reduzida devido à remoção gradual da umidade ao longo do tempo.

Diante dos resultados obtidos, é possível concluir que, empregando velocidade do ar de secagem igual a 1 m/s, a eficiência energética, definida nos termos da Eq. (9), é cinco vezes superior àquela obtida caso fosse empregada velocidade de 5 m/s, operando a temperatura fixa de 70 °C.

4. Conclusões

Foi estudado o processo de secagem convectiva de grãos de café em leito profundo, sendo desenvolvido um modelo fenomenológico; e otimizada a eficiência energética do processo de secagem, relacionado a quantidade de energia requerida para aquecer o ar de secagem e a quantidade de energia necessária para dessorver a umidade dos grãos de café.

Para todas as velocidades do ar de secagem, partindo de 18 °C e 45,58%, operando a 70 °C, até que a umidade média do leito atingisse 13%, o tempo total da secagem foi de 1055 min. Uma vez que a velocidade não influencia a taxa de secagem.

A energia requerida para aquecer o ar de secagem variou de 133 kJ/min a 667 kJ/min, respectivamente operando a 1 e 5 m/s.

Por sua vez, a eficiência energética instantânea média variou entre 0,2025% e 0,0757%, respectivamente operando a 1 e 5 m/s. Sendo que empregando velocidade do ar de secagem igual a 1 m/s, a eficiência energética foi cinco vezes superior àquela obtida caso fosse empregada velocidade de 5 m/s.

Referências

- ISHWARYA, S.P.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. *Spray-Freeze-Drying approach for soluble coffee processing and its effect on quality characteristics*. Journal of Food Engineering Vol. 149, p. 171–18, 2015.
- FAO. *Discussion paper on ochratoxin A in coffee*. Netherlands: The Hague, 2014.
- MORONEY, K.M.; LEE, W.T.; O'BRIEN, S.B.G.; SUIJVER, F.; MARRA, J. *Modelling of coffee extraction during brewing using multiscale methods: An experimentally validated model*. Chemical Engineering Science Vol. 137, p. 216–234, 2015.
- SUÁREZ-QUIROZ, M.; GONZALEZ-RÍOS, O.; BAREL, M.; GUYOT, B.; SCHORR-GALINDO, S.; GUIRAUD, J.P. *Effect of chemical and environmental factors on Aspergillus ochraceus growth and toxigenesis in green coffee*. Food Microbiology Vol. 21, p. 629–634, 2004.
- RAMÍREZ-MARTÍNEZ, A.; SALGADO-CERVANTES, M.A.; RODRÍGUEZ-JIMENES, G.C.; GARCÍA-ALVARADO, M.A.; CHERBLANC, F.; BÉNET, J.C. *Water transport in parchment and endosperm of coffee bean*. Journal of Food Engineering Vol. 114, p. 375–383, 2013.
- HERNANDEZ-DIAZ, W.N.; LOPEZ, I.I.R.; SALGADO-CERVANTES, M.A.; RODRIGUEZ-JIMENES, J.C.; GARCIA-ALVARADO, J.A. *Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry*. Journal of Food Engineering Vol. 86, p. 1–9, 2008.
- BURMESTER, K.; EGGERS, R. *Heat and mass transfer during the coffee drying process*. Journal of Food Engineering Vol. 99, p. 430–436, 2010.
- EVANGELISTA, S.R.; SILVA, C.F.; MIGUEL, M.G.P.C.; CORDEIRO, C.S.; PINHEIRO, A.N.M.; DUARTE, W.F.; SCHWAN, R.F. *Improvement of coffee beverage quality by using selected yeasts strains during the fermentation in dry process*. Food Research International Vol. 61, p. 183–195, 2014.
- LUZ, G.R. *Avaliação de estratégias de operação e de controle da secagem industrial de farelo de soja*. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, 2010.
- SFREDO, M.A.; FINZER, J.R.D.; LIMAVERDE, J.R. *Heat and mass transfer in coffee fruits drying*. Journal of Food Engineering Vol. 70, p. 15–25, 2005.
- VILLA, L.G.; ROA, G. *Simulação matemática de secagem de café e cacau*. Campinas: Departamento de Engenharia Agrícola, 1978.
- JOHANN, G.; PEREIRA, N.C.; SILVA, E.A. *Abordagem numérica da secagem de grãos de café*.
- NILNONT, W.; THEPA, S.; JANJAI, S.; KASAYAPANAND, N.; THAMRONGMAS, C.; BALA, B.K. *Finite element simulation for coffee (Coffea arabica) drying*. Food and Bioprocesses Vol. 90, p. 341–350, 2012.
- TREYBAL, R.E. *Mass-transfer operations*. New York: McGraw Hill, 1980.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying cereal grains*. Westport: AVI Publishing Company, 1974.
- TRELEA, I.C.; TRYSTRAM, G.; COURTOIS, F. *Optimal Constrained Non-linear Control of Batch Processes: Application to Corn Drying*. Journal of Food Engineering Vol. 31, p. 403–421, 1997.
- ROSENBROCK, H.H. *Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations*. Computer Journal Vol. 5, p. 329–330, 1963.

MENSHUTINA, N.V.; GORDIENKO, M.G.; VOYNOVSKIY, A.A.; KUDRA, T. *Dynamic Analysis of Drying Energy Consumption*. Drying Technology Vol. 22, p. 2281–2290, 2004.

Bortolaia, L.A. *Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DALPASQUALE, V.A.; SPERANDIO, D.; SILVA, L.H.M. *Fixed-bed drying simulation with constant enthalpy, using the improved Michigan State University model*. Acta Scientiarum Technology Vol. (2), p. 137–140, 2012.

ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C. *Design of a new solar dryer system with swirling flow for drying seeded grape*. International Communications in Heat and Mass Transfer Vol. 36, p. 984–990, 2009.