

ESTUDO DOS MODELOS MATEMÁTICOS USADOS PARA DESCREVER AS CINÉTICAS DE SECAGENS CONTÍNUA E INTERMITENTES DE BANANAS

ANDRÉA F. RODRIGUES¹, WILTON P. SILVA², JOSIVANDA P. GOMES³, CLEIDE M. D. P. S. SILVA⁴, ÍCARO CARVALHO RAMOS⁵

¹ Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Engenharia Agrícola. UFCG/Campina Grande-PB. deafr@hotmail.com

² Engenheiro Eletricista, Professor Doutor, Depto. de Física. UFCG/Campina Grande-PB.

³ Engenheira Agrícola, Professora Doutora, Depto. de Engenharia Agrícola. UFCG/Campina Grande-PB.

⁴ Física, Professora Doutora, Depto. de Física, UFCG/Campina Grande-PB.

⁵ Tecnólogo em Gestão Pública, Especialização em Gestão de Pessoas, FACISA/Campina Grande-PB.

RESUMO

No Brasil, o desperdício de frutas ocorre com frequência devido a técnicas insuficientes de conservação. A secagem de alimentos é uma forma de diminuir essas perdas e agregar valor à matéria-prima. O uso da secagem intermitente tem proporcionado uma melhor qualidade do produto, como também, a redução do consumo de energia. Este trabalho tem o objetivo de realizar um estudo sobre o uso de modelos matemáticos para descrever os processos de secagens contínua e intermitente de bananas.

Palavras-chave: equações empíricas, secagem de banana, secagem intermitente.

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de bananas em 2013 foi de 102 milhões de toneladas. O Brasil ocupa o quinto lugar na produção mundial de banana, com uma produção total em 2013 de mais de 7,3 milhões de toneladas da fruta em uma área plantada de 498.683 hectares (IBGE, 2013). O produto vem sendo cultivado em praticamente todo o mundo. Entretanto, sua maior produção se concentra em países como Índia, China, Filipinas e Equador (FAO, 2011).

Dentre as frutas existentes no Brasil, a banana possui alto valor nutricional e é uma boa fonte de energia devido ao seu alto teor de amido e açúcar e está cada vez mais presente na dieta alimentar dos brasileiros. Devido ao seu alto teor de umidade, apresenta as maiores perdas por decomposição pós colheita porque é altamente perecível e não permite a utilização de congelamento para a sua preservação, portanto, o desenvolvimento de técnicas de processamento da banana é uma alternativa para o aproveitamento dos frutos excedentes ou fora do padrão de qualidade para o consumo *in natura*, agregando valor ao produto e para uma maior vida de prateleira (FELLOWS, 2006).

Entre as principais perdas pós-colheita estão: a falta de transporte adequado, o uso de embalagens impróprias, falta de amadurecimento controlado e a não utilização da cadeia do frio para a armazenagem. Segundo Camargo (2002), as perdas pós-colheita ocorrem em qualquer etapa do processo, iniciando-se na colheita e depois dela, durante a distribuição e, finalmente, quando o consumidor compra e utiliza o produto.

A secagem de alimentos tem sido utilizada como forma de diminuir as perdas e agregar valor à matéria-prima, onde técnicas adequadas de processamento são utilizadas para a obtenção de produtos com qualidade e valor comercial. O alimento quando seco pode ser acondicionado tornando-se disponível por um período maior de tempo quando comparado ao produto *in natura*. Uma das principais vantagens da secagem está na redução do volume final do produto, característica essa que proporciona uma consequente economia na embalagem, redução do custo de transporte e armazenamento (ANDREUCETTI et al., 2007).

A secagem contínua é um processo que consome bastante energia e a secagem intermitente, ou seja, secagem com diferentes taxas de secagem em vários períodos pode ser uma maneira de melhorar a qualidade de produtos secos, como também, melhorar a utilização de energia. É uma secagem caracterizada pela passagem descontínua do ar aquecido pela massa do produto, onde esse processo favorece a difusão da água do interior para a periferia do produto, quando este não se encontra sob ação do ar aquecido, e a evaporação da água periférica ocorre de maneira branda e equilibrada (ELIAS, 2002). Esse tipo de secagem aumenta a taxa de secagem, havendo uma redução no tempo de secagem e consequentemente contribui para a redução do consumo de energia.

De uma maneira geral, existe vários modelos que estabelecem relação entre os dados experimentais da secagem a uma equação matemática para descrever a secagem de produtos agrícolas. Dentre os grupos de modelos, podem-se citar esses três: modelos empíricos, modelos baseados na termodinâmica dos processos reversíveis e os modelos de difusão líquida.

Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo descrever o processo de secagem contínua e intermitente de bananas através de modelos empíricos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – Experimentos

Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), do centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande, PB.

A matéria-prima utilizada foram as bananas da variedade nanica (*Musa spp* nanica (AAA)). As bananas maduras foram transportadas ao laboratório, em cachos, e em seguida foram despencadas e selecionadas, descartando-se os frutos com algum dano. Logo em seguida, foram descascadas, e selecionadas as bananas de diâmetro médio entre 27,00 e 29,00 mm. Para a secagem intermitente, duas amostras, depois de identificadas, foram dispostas em dois cestos de tela fina de alumínio. Os cestos foram inicialmente pesados e, em seguida, o conjunto (banana + cesto) foi pesado para aferição do peso inicial. Em adição, o comprimento e o diâmetro da banana foi medido como será detalhado. No caso da secagem contínua, os procedimentos anteriores envolveram somente um cesto.

Em um segundo momento, os cestos foram encaminhados para o secador de leito fixo (previamente regulado para a temperatura de 70 °C e velocidade do ar de secagem de 0,55 m s⁻¹), alternadamente, obedecendo o tempo estipulado de intermitência. Enquanto uma amostra secava no secador, a outra permanecia em repouso no dessecador (Figura 1).



Figura 1 – Secador de sementes e frutas em escala de laboratório.

Foram realizados dois experimentos de secagem de bananas (S₁ e S₂):

- S₁ - Secagem contínua;
- S₂ - Secagem intermitente, com intervalo de 1/2 hora;

Os experimentos foram realizados até as bananas atingirem a massa de equilíbrio. Para determinar a massa das bananas, a massa do cesto foi subtraída da massa total. Alcançado o teor de umidade de equilíbrio, as amostras foram levadas para a estufa a uma temperatura de 105 °C por 5h. Depois, as amostras foram levadas para o dessecador até atingirem a temperatura ambiente, sendo obtida a massa seca.

Com os dados da massa m e da massa seca m_s das bananas, foram determinados os teores de umidade em base seca, X , calculados pela expressão:

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (1)$$

As razões de umidade e as curvas de razão de umidade em função do tempo de secagem foram calculadas a partir dos dados de perda de massa das amostras durante as secagens e dos teores de umidade determinados no final das mesmas. No cálculo da razão de umidade foi utilizada a Equação (2).

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (2)$$

sendo,

X^* = razão de umidade do produto, adimensional

X = teor de umidade do produto, b.s.

X_e = teor de umidade de equilíbrio do produto, b.s.

X_i = teor de umidade inicial do produto, b.s.

2.2 – Modelagem matemática através de modelos empíricos

Para o ajuste matemático das curvas de secagem de bananas foram utilizadas as equações empíricas, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos empíricos utilizados no presente trabalho

Modelo	Equação	Referência
Page	$X^* = \exp(-at^b)$	Diamante et al. (2010)
Silva et alii	$X^* = \exp(-at - bt^{1/2})$	Silva et al. (2012)
Peleg	$X^* = 1 - t / (a + bt)$	Mercali et al. (2010)
Wang e Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	Kaleta e Górnicki (2010)
Lewis	$X^* = \exp(-at)$	Kaleta e Górnicki (2010)
Henderson e Pabis	$X^* = a \exp(-bt)$	Diamante et al. (2010)

A fim de descrever os quatro processos de secagem, o período de têmpera foi eliminado, e apenas o tempo em que as bananas permaneceu no secador são analisados. Às vezes, esse tempo é chamado de tempo de operação efetiva. Desta forma, em todas as experiências, o tempo de operação eficaz a ser descrito no processo de secagem é de 480 min.

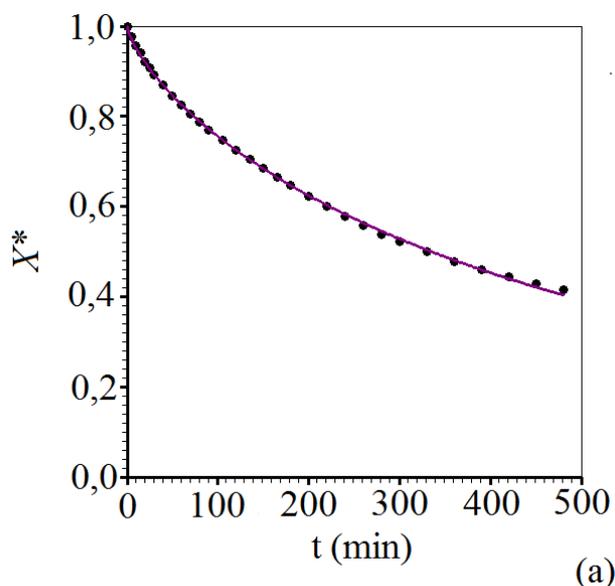
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

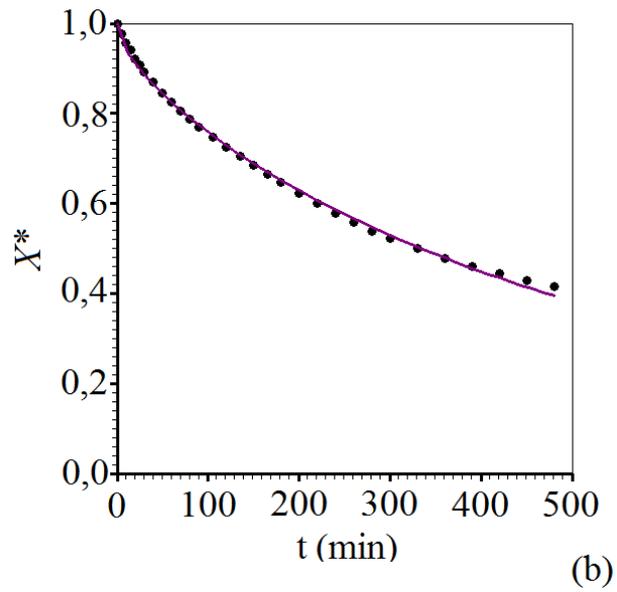
Com o auxílio do programa computacional LAB Fit Curve Fitting Software disponível na internet em www.labfit.net, as equações referentes a Tabela 1 foram aplicadas aos dados experimentais para obter o ajuste matemático das curvas de secagem de banana. Na análise dos resultados, foram utilizados como indicadores estatísticos o coeficiente de determinação R^2 e o qui-quadrado χ^2 como também os parâmetros, os quais podem ser observados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Resultados dos modelos empíricos para secagem contínua

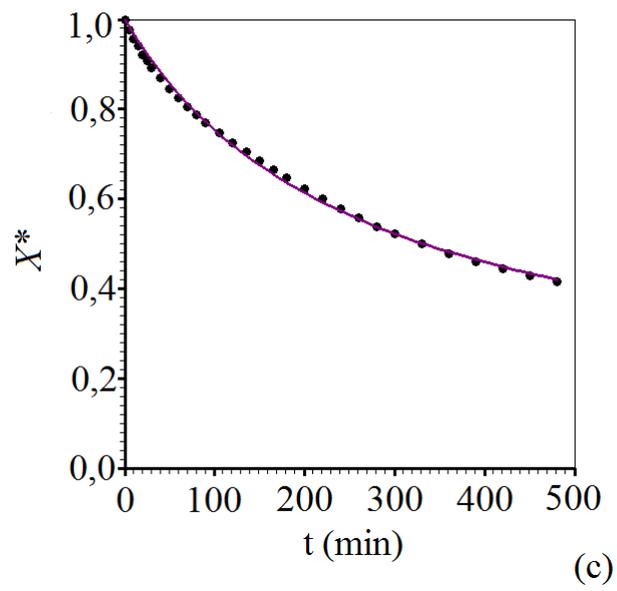
Modelo	a	b	R^2	χ^2
Page	$0,9025 \times 10^{-2}$	0,7468	0,999461	$5,5960 \times 10^{-4}$
Silva et alii	$0,1239 \times 10^{-2}$	$0,1529 \times 10^{-1}$	0,997843	$2,2305 \times 10^{-3}$
Peleg	$0,2940 \times 10^3$	$0,1114 \times 10^1$	0,998391	$2,2077 \times 10^{-3}$
Wang e Singh	$-0,2520 \times 10^{-2}$	$0,2859 \times 10^{-5}$	0,992968	$1,4788 \times 10^{-2}$
Lewis	$0,2224 \times 10^{-2}$	-	0,987284	$4,2553 \times 10^{-2}$
Henderson e Pabis	0,9466	$0,1965 \times 10^{-2}$	0,983939	$1,6166 \times 10^{-2}$

Os gráficos que representam as cinéticas de secagem descritas pelas equações de Page, Silva et alii, Peleg, Wang e Singh, Lewis e Henderson e Pabis são apresentados na Figura 2, onde apresenta os conjuntos de dados experimentais (pontos) assim como os obtidos com as simulações dos modelos (linhas contínuas).

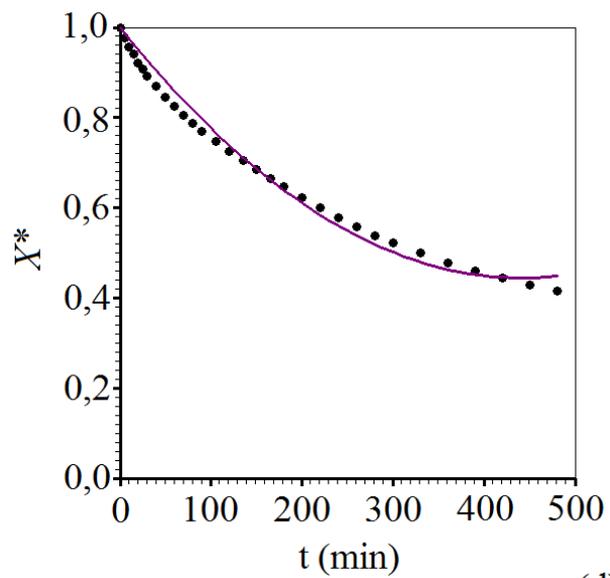




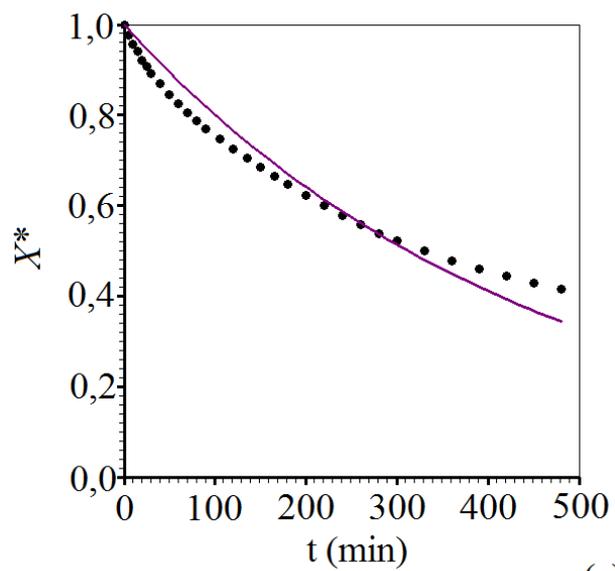
(b)



(c)



(d)



(e)

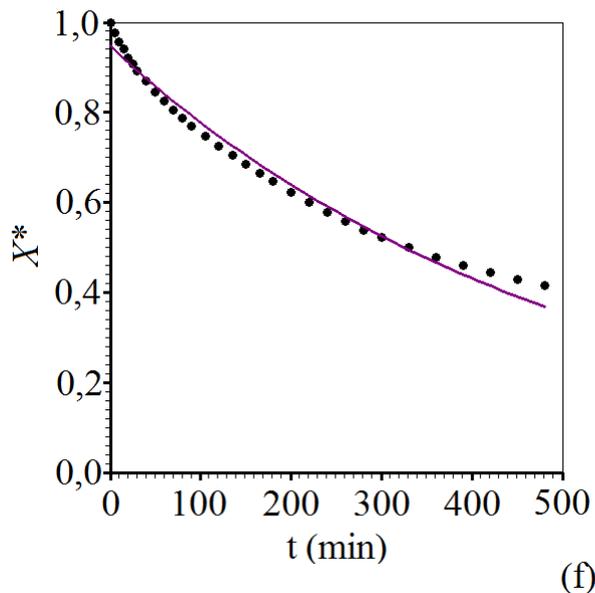


Figura 2– Cinética de secagem contínua para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pelas equações empíricas: (a) Page; (b) Silva et alii; (c) Peleg; (d) Wang e Singh; (e) Lewis; (f) Henderson e Pabis.

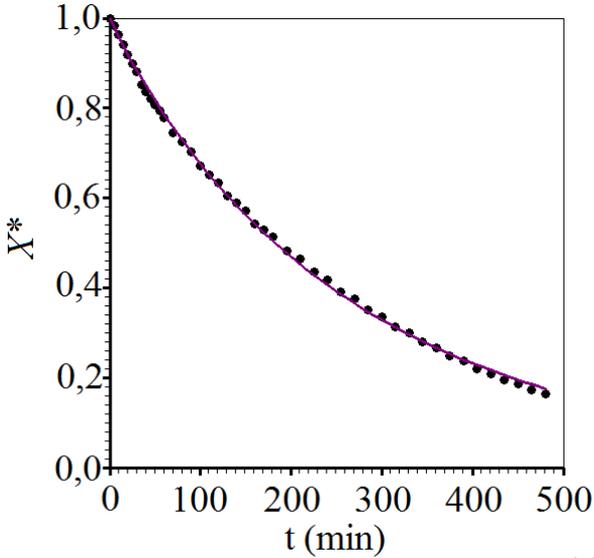
Observa-se através dos indicadores estatísticos da Tabela 2 e de uma visualização da Figura 2, que os modelos de Page, Silva et alii, Peleg e Wang e Singh foram os que melhores se ajustaram aos dados experimentais, com destaque para o modelo de Page, embora possua um ótimo coeficiente de determinação, o seu qui-quadrado está muito alto. Corrêa et al. (2007), usou Page para descrever a curva da cinética de secagem do feijão. Já Silva, E., (2013), utilizou vários modelos e o que melhor representou a cinética de secagem da banana foi o modelo de Page.

Baseado nos melhores indicadores estatísticos obtidos pelas equações empíricas para descrever a cinética de secagem contínua, será apresentado a seguir os resultados dos ajustes matemáticos da curva da secagem intermitente de banana, no qual o período de intermitência foi eliminado.

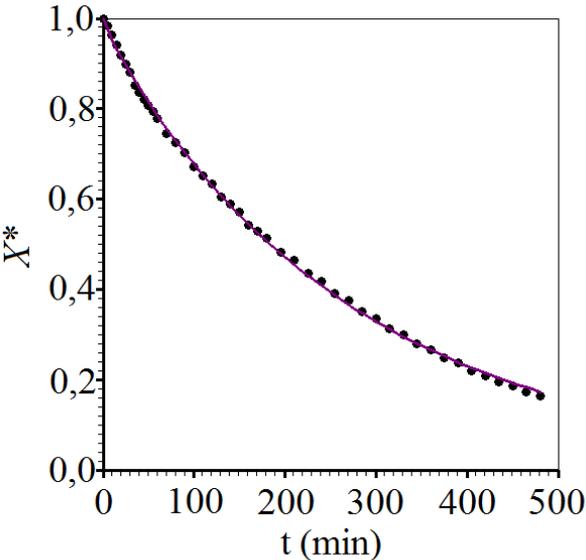
Na Tabela 3 e na Figura 3 são apresentados os resultados dos modelos empíricos para a secagem intermitente, com intervalo de 1/2 h.

Tabela 3 - Resultados dos modelos empíricos para secagem intermitente, com intervalo de 1/2 h.

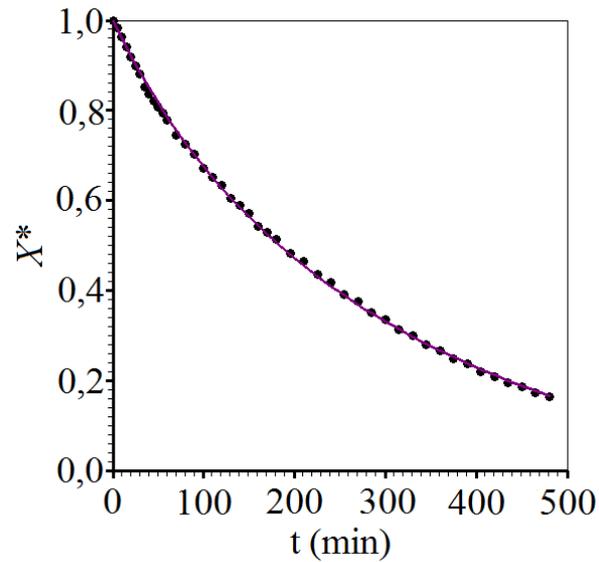
Modelo	a	b	R ²	χ ²
Page	0,4937 x 10 ⁻²	0,9499	0,999246	2,3306 x 10 ⁻³
Silva et alii	0,3435 x 10 ⁻²	0,4695 x 10 ⁻²	0,997843	1,9043 x 10 ⁻³
Peleg	0,2379 x 10 ³	0,7019	0,999563	1,4479 x 10 ⁻³
Wang e Singh	-0,3358 x 10 ⁻²	0,3521 x 10 ⁻⁵	0,995920	2,0199 x 10 ⁻²



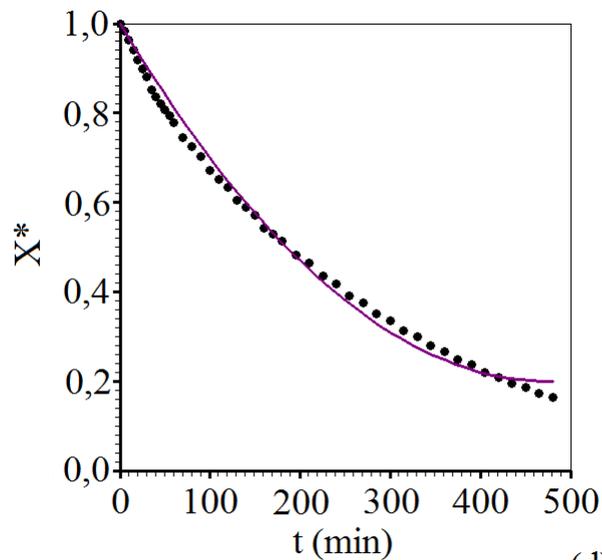
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 – Cinética de secagem intermitente, com intervalo de 1/2 h para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pelas equações empíricas: (a) Page; (b) Silva et alii; (c) Peleg; (d) Wang e Singh.

A inspeção visual dessa figura, bem como os indicadores estatísticos permitem afirmar que os resultados obtidos para o modelo de Peleg foi melhor que os outros três modelos.

Para a secagem contínua o modelo de Page foi mais satisfatório, enquanto que, para a secagem intermitente os modelo de Peleg e Silva et alii, apresentaram ótimos indicadores estatísticos, o gráfico da Figura 6 contém todas as secagens e o modelo de Peleg foi escolhido para representar os processos de secagem de bananas inteiras. Através de uma inspeção visual das figuras representadas por Peleg, houve boa concordância entre os dados experimentais a linha correspondente da simulação.

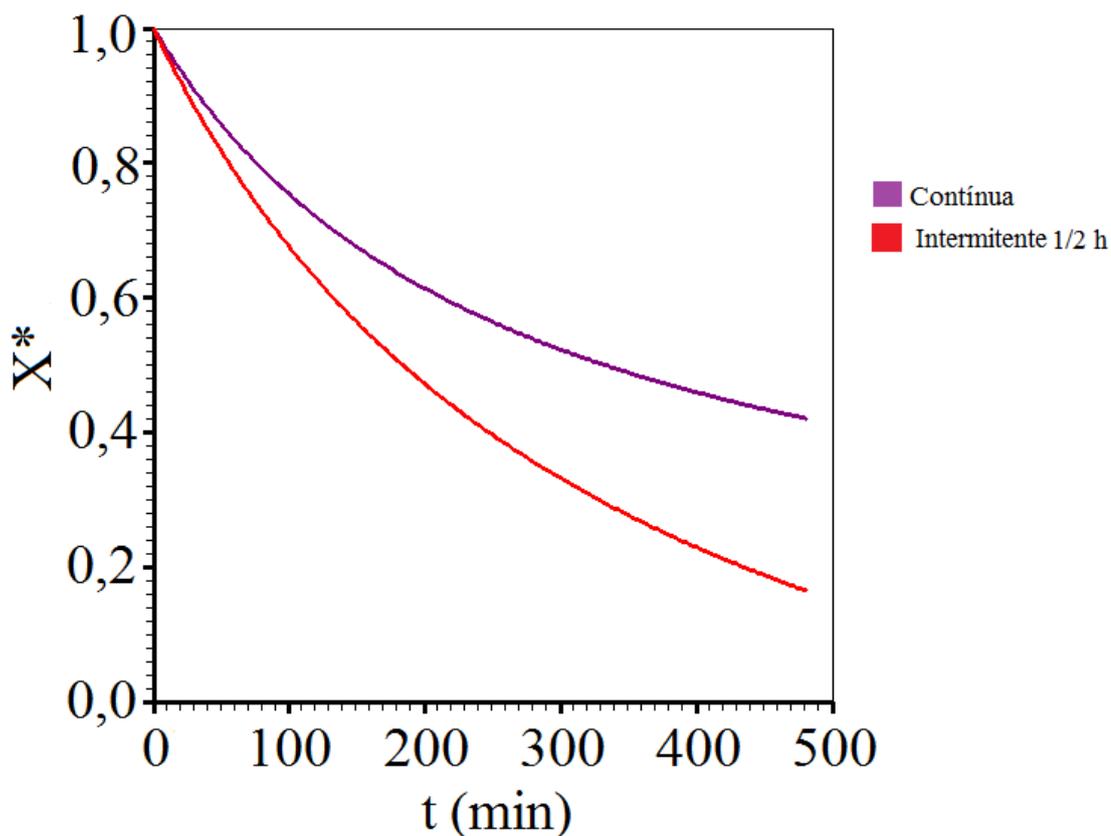


Figura 4 – Cinética de todas as secagens de banana para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pela equação de Peleg.

A Figura 6 permite observar que a secagem intermitente é significativamente diferente da secagem contínua, ou seja, na secagem com intermitência a banana perdeu mais umidade quando comparado com a secagem contínua durante o mesmo período de tempo. Isso demonstra que com a secagem intermitente houve uma redução do tempo de secagem e consequentemente, do consumo de energia. Esse fato pôde ser observado também em uma pesquisa realizada por Putranto et al. (2011) no qual os autores analisaram a eficiência da secagem de arroz e café comparando a secagem contínua e intermitente e constataram que com a secagem intermitente obtiveram uma redução do tempo de secagem e do consumo de energia.

Na Figura 7 pode-se observar na superposição da secagem de banana contínua e intermitente com têmpera de 1/2 hora que com o mesmo tempo de secagem de 480 minutos a banana perdeu mais umidade quando utilizou-se a secagem intermitente.

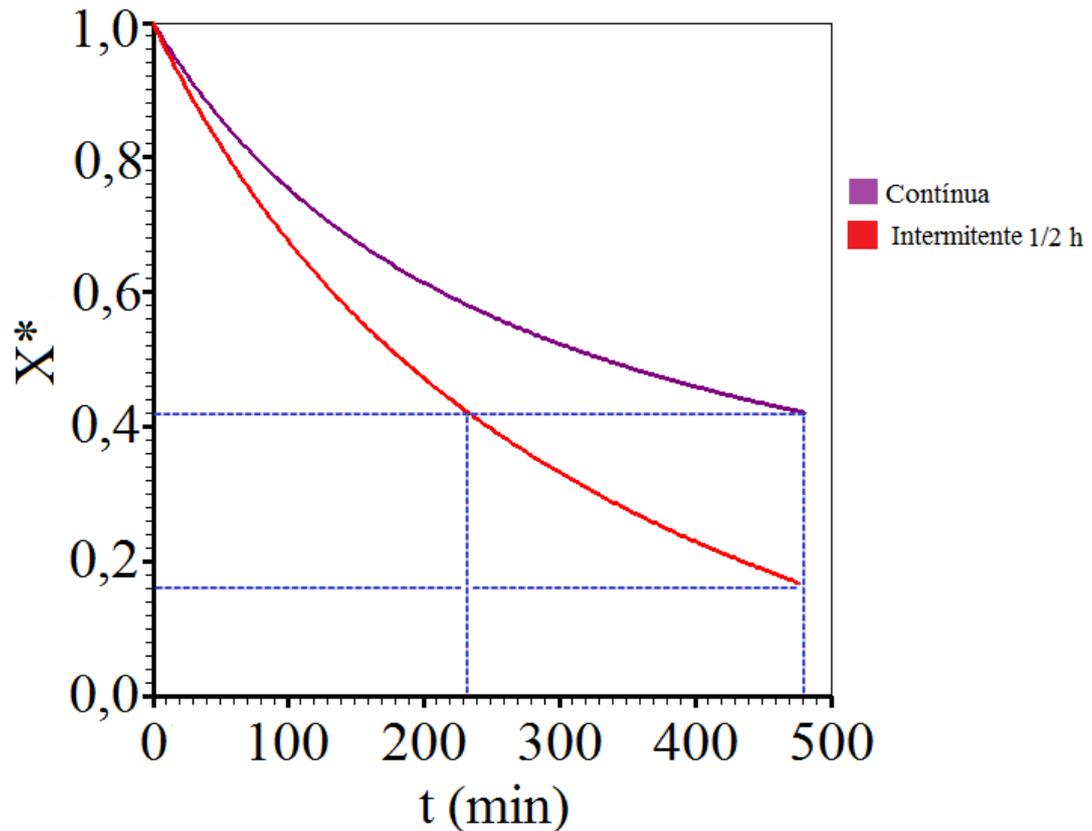


Figura 5 – Superposição da secagem de banana contínua e intermitente para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pela equação de Peleg.

Constata-se também que a razão de umidade obtida pela secagem contínua foi alcançada pela secagem intermitente em praticamente metade do tempo necessário a secagem contínua. Mostra que no tempo igual a 480 minutos, na secagem contínua foi $X^* = 0,42$, e para o processo intermitente com têmpera de 1/2 h foi $X^* = 0,16$.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se a pesquisa, para descrever as cinéticas de secagens contínua e intermitente de bananas inteiras, o modelo de Peleg foi o que melhor representou os dois tipos de secagem e a secagem intermitente proporcionou uma economia de tempo e consequentemente de energia quando comparado a secagem contínua.

5. REFERÊNCIAS

- ANDREUCCETTI, C.; FERREIRA, M. D.; MORETTI, C. L.; HONÓRIO, S. L. Qualidade pós-colheita de frutos de tomate cv. Andréa tratados com etileno. **Horticultura Brasileira**, v. 25, n. 1, p. 122-126, 2007.
- CAMARGO, G. A. Perdas pós-colheita de verduras e frutas frescas. In: **Anuário da Agricultura Brasileira (AGRIANUAL)**. São Paulo. 2002. p. 41-42.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- DIAMANTE, L.M., IHNS, R., SAVAGE, G.P., VANHANEN, L. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 9, p. 1956–1962, 2010.
- ELIAS, M. C. **Armazenamento e conservação de grãos, em médias e pequenas escalas**. 3. ed. Pelotas: UFPEL, COREDE-SUL, 2002. 218 p.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Summary of Food and Agriculture Statistics**. FAOSTAT 2011 Disponível em <http://www.fao.org>, acessado em Agosto de 2013.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos – Princípios e Prática**. Editora Artmed S.A. São Paulo-SP, 2006. 602p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p. 1-83, 2013.
- KALETA, A., GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 5, p. 891–898, 2010.
- MERCALI, G.D., TESSARO, I.C., NORENA, C.P.Z., MARCZAK, L.D.F. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum.). **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, n. 11, p. 2281–2289, 2010
- PUTRANTO, ADITYA, CHEN, XIAO DONG, DEVAHASTIN, SAKAMON, XIAO, ZONGYUAN, WEBLEY, PAUL A. Application of the reactionengineering approach (REA) for modeling intermittent drying under time-varying humidity and temperature. **Chem. Eng.Sci.**, v. 66, p. 2149–2156, 2011.
- SILVA, W.P., SILVA, C.M.D.P.S., SOUSA, J.A.R., FARIAS, V.S.O., 2012. Empirical and diffusion models to describe water transport into chickpea (*Cicer arietinum* L.). **International Journal of Food Science and Technology**. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03183.x>.

SILVA, E. F. M. **Modelos empíricos e difusivos para a descrição da secagem de bananas.** 2013. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.