

Modelagem da Cinética de desidratação de caroços de jaca (*Artocarpus integrifolia*)

Modeling the Kinetics of dehydration of seeds of jackfruit (*Artocarpus integrifolia*)

C. E. M. Jerônimo

Engenharia de Petróleo e Gás, Universidade Potiguar, 59082-330, Natal-RN, Brasil

c_enrique@hotmail.com

(Recebido em 24 de março de 2012; aceito em 22 de junho de 2012)

A escassez por alimentos nutritivos e de baixo custo força a necessidade do desenvolvimento de produtos oriundos dos rejeitos agroindustriais, sobretudo da industrialização de frutas. Dentre os destaques nesse segmento tem-se o processamento dos caroços, de alto valor nutricional. Neste trabalho é feito um estudo sobre a cinética de desidratação de caroços de jaca, *Artocarpus integrifolia*. Foram estudados diferentes níveis de temperatura (343, 353, 363 e 373K) para o processo. Os resultados experimentais foram ajustados a modelos matemáticos que definem parâmetros a serem utilizados na otimização das variáveis operacionais, para obtenção de um complemento alimentar a base deste resíduo agroindustrial. Os resultados demonstraram bons níveis de ajuste ao modelo de segunda ordem de Fick, para camadas finas, com níveis de coeficientes de correlação superiores a 98%.

Palavras-chave: jaca; desidratação e difusividade efetiva

The shortage of nutritious, low-cost forces the need for the development of products from the agro-industrial wastes, especially the industrialization of fruit. Among the highlights in this segment has been processing the kernels, high nutritional value. In this paper we study on the kinetics of dehydration of seeds from jackfruit, *Artocarpus integrifolia*. We studied different temperature levels (343, 353, 363 and 373K) for the process. The experimental results were fitted to mathematical models that define parameters to be used in the optimization of operational variables, to obtain a food supplement the base of this agribusiness residue. The results showed high levels of setting the second order model Fick's for thin layers, with levels of correlation coefficients over 98%.

Keywords: jackfruit; dehydration and effective diffusivity

1. INTRODUÇÃO

A população nordestina sofre há várias décadas com as graves secas e a falta de uma alimentação digna e até mesmo saudável. Para minimização deste sofrimento e dos índices de desnutrição dessa população, mais especificamente das crianças, diversos estudos sobre o desenvolvimento de complementos alimentares, denominados multimistura, ou melhor, de produtos ricos nutricionalmente para a alimentação humana, enriquecidos a partir de subprodutos ou rejeitos da industrialização ou da própria cultura alimentar do povo, são desenvolvidos e alvos de diferentes pesquisas no meio acadêmico.

Existe no Brasil uma infinidade de produtos com excelentes valores nutricionais e que não são explorados e acabam indo para o lixo. Entre esses estão os caroços da maioria das frutas e cascas de alguns legumes.

Diversos estudos são desenvolvidos na busca de subprodutos agroindustriais que possam compor a estruturação dessas multimisturas, em especial destaque para pesquisas com: produtos como: folhas de mandioca¹¹; caroços de jaca^{1, 3}, Sementes de abóbora, cascas de melancia, sementes fora do padrão de gergelim e resíduos do processamento de polpas de frutas.

Dentre os destaques nos resíduos agroindustriais citados, os caroços (ou sementes, quando obedecidos os requisitos agrícolas associados ao conceito), que correspondem a cerca de 15 a 25% do fruto da jaqueira, se configuram como uma das grandes potencialidades de aproveitamento. Em especial, pelo fato da cultura nordestina já fazer uso desse produto na forma cozida⁹. E por outro lado sua composição é bastante rica e diversificada, de acordo com

Franco⁴, 100g de caroço de jaca, possui: 136 calorias, 30g de glicídios, 3,50g de proteínas, 0,30g de lipídios, 50mg de cálcio, 80mg de fósforo e 8,00 mg de ferro.

O fruto da jaqueira é muito popular nas regiões tropicais do mundo, e um volume expressivo de subprodutos como cascas e caroços estão disponíveis como resíduos da agroindústria do seu processamento. É um fruto comercializado e consumido quase que exclusivamente na forma *in natura* o que leva a um índice elevado de perda na pós-colheita. Esse fato evidencia a necessidade de processos simples e baratos que possam oferecer para os produtores aproveitarem melhor o fruto da jaqueira¹³.

Os caroços da jaca são utilizados na alimentação humana, podendo ser cozidas ou torradas em forno ou assadas à brasa e além de serem nutritivas, são relativamente saborosas. A farinha de caroço de jaca pode ser aproveitada na alimentação humana como ingrediente de “multimisturas”, devido sua riqueza em proteínas e ferro¹⁰⁻¹³.

Para produção destes suplementos alimentares, a base dos caroços de jaca, faz-se uso, em geral, de uma das técnicas mais antigas de preservação, a desidratação. Esta técnica permite a obtenção de produtos com um maior tempo de vida útil, devido a baixa atividade de água, além de ter uma facilidade de armazenagem e transporte.

Entretanto, para o dimensionamento dos equipamentos que compõe a estrutura de desidratação, em pequena, média ou grande escala, necessita-se de parâmetros específicos para que esses tenham o melhor desempenho energético e operacional possível. No caso dos secadores um dos principais parâmetros são oriundos da análise da cinética de secagem, advindos do ajuste de modelos de transferência de massa e calor.

Os parâmetros cinéticos da engenharia de processos de desidratação definem a área superficial de contato nos secadores, as taxas de transferência de calor e massa e os custos operacionais com energia térmica. Sendo úteis no dimensionamento de secadores e dos níveis das variáveis operacionais.

Neste trabalho, foram determinadas as cinéticas de desidratação para os caroços de jaca a diferentes temperaturas, além de quantificado alguns parâmetros desta cinética pela modelagem matemática, por meio da regressão linear do modelo difusional simplificado de Fick. Além disso, foi avaliada a influência da temperatura de secagem nos parâmetros cinéticos, e consequentemente foram determinadas as propriedades relativas aos projetos dos secadores, em especial, as que envolvem as características térmicas (energia de ativação e constantes do modelo de Arrhenius) associadas ao material em estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionadas jacas homogêneas da variedade, popularmente, tipo “dura”, que apresentassem o mesmo grau de maturação. Destas amostras, foram retirados os caroços e estes foram submetidos a um tratamento térmico para retirada dos envoltórios das amêndoas.

A remoção das películas seguiu de uma imersão em água a 100°C por um período de 60 (sessenta) segundos. Retiradas as películas, procedeu-se um corte transversal e outro longitudinal, obtendo amostras em ¼ da amêndoa (sendo utilizadas todas as partes obtidas), com aproximadamente 1 cm de espessura; essa medida visou obter a dispersão das amostras no formato de placa plana na bandeja de secagem.

Estes cortes foram utilizados devido a uma análise preliminar realizada sobre a qualidade do produto final, em termos da umidade obtida em ensaios preliminares, visto apresentar melhores resultados com este procedimento, frente ao modelo de corte em fatias em ½ e aos caroços inteiros (pelo aumento da área superficial de contato ser maximizada); bem como, melhor adequação ao modelo de placa plana.

O material obtido era homogeneizado e procedia-se a determinação do teor de umidade seguindo as Normas Técnicas e Analíticas do Instituto Adolfo Lutz⁵.

A padronização de uso dos caroços foi realizada mediante o valor médio de umidade destes, sendo utilizadas amostras com cerca de 50% de umidade, em base úmida.

As fatias eram colocadas em bandejas perfuradas, para obter uma homogeneidade na distribuição do ar, e previamente taradas. Pesava-se a amostra inicial, cerca de 200g, utilizando balança semi-analítica (0,01g).

Estabilizadas as condições do secador, estufa com circulação de ar de 2m/s, em termos da temperatura de operação (343, 353, 363 e 373K) – averiguada por termopares digitais (0,1K), as bandejas eram colocadas no secador e em intervalos regulares eram retiradas e pesadas. Os experimentos foram realizados em duplicata¹⁰.

O procedimento experimental era dado por encerrado quando a diferença entre três pesagens não variava de 0,05g.

Por meio do software³ Microsoft Excel[®] eram tabuladas as informações relativas a massa, e pelas equações do balanço de material para o teor de sólidos calculadas os pontos da curva de secagem. O mesmo software foi utilizado para ajuste dos modelos matemáticos associados, conforme modelo simplificado de Fick para Camadas planas, descrito por Souza e colaboradores¹⁰⁻¹³.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A massa de dados obtida foi tabulada e conseqüentemente desenvolvida o tratamento dessa. Os resultados obtidos para as variações da massa ao longo do tempo de secagem (1) foram convertidos para valores de umidade de acordo com a equação (2), e estes posteriormente transformados para a base seca (2).

$$m = f(t) \quad (1)$$

$$U_{bu} = 1 - \frac{m_i(1-U_i)}{m(t)} \rightarrow U_{bs} = \frac{U_{bu}}{1-U_{bu}} \quad (2)$$

Onde:

m: massa de caroços de jaca [M];

t: tempo [T]

U_{bu} : umidade dos caroços de jaca ao longo do tempo, em base úmida [MM^{-1}];

i: indexador dos pontos experimentais para um determinado tempo;

U_i : umidade inicial dos caroços de jaca [MM^{-1}];

U_{bs} : umidade dos caroços de jaca ao longo do tempo, em base seca [MM^{-1}].

Na Figura 1 são mostradas as curvas de secagem obtidas para os ensaios realizados (valores médios), em suas diferentes temperaturas de operação. Observou-se um comportamento de decréscimo exponencial nas curvas, conforme comportamento observado por diferentes autores, em amostras de derivados de frutas ou vegetais⁸⁻¹³.

O efeito da elevação da temperatura pode ser observado com o deslocamento entre as taxas de variação, vistos pelo distanciamento entre curvas.

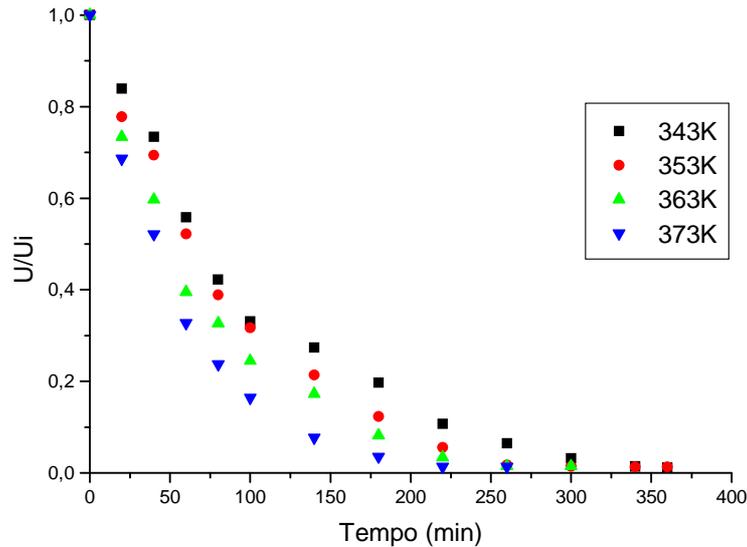


Figura 1: Curvas de Secagem para os Ensaios a 343, 353, 363 e 373K.

Os níveis de umidade obtidos para os diferentes produtos, em tempos superiores a 300 minutos foram inferiores a 5% (valor recomendado para uma segura estabilização e conservação de produtos desidratados).

Como forma de obter os parâmetros cinéticos desta disposição gráfica foram desenvolvidos os modelos matemáticos, e para tal as referências da literatura para tais estimativas utilizou-se o modelo de Fick simplificado⁸⁻¹³.

Buscando as adaptações para o modelo de Fick têm-se as seguintes considerações:

- 1) A disposição do material preenche todos os espaços;
- 2) O produto foi disposto de forma a apresentar uma espessura uniforme;
- 3) Pode-se considerar como uma camada em placa infinita, onde o montante de ar que incide sobre o sistema é proveniente dos três ângulos de contato.

Logo, no sistema estudado observou-se que a umidade de equilíbrio é praticamente igual a zero, sendo atingido quando toda a umidade do material é retirada. Considerando a secagem como em tempos longos, com valores superiores a 200 minutos, a solução do modelo difusional (2ª Lei de Fick) conforme descrita por Souza e colaboradores¹³, leva a uma expressão do tipo:

$$\frac{U_{bs}}{U_i} = A e^{\frac{-\pi^2 Def}{4L^2}} \quad (3)$$

Essa equação num processo de linearização do modelo tem-se uma solução do tipo (4). Contudo, os dados experimentais da Figura 1 foram ajustados ao modelo, e sua representação gráfica é apresentada na Figura 2.

$$\ln \frac{U_{bs}}{U_i} = \ln A - \frac{\pi^2 Def}{4L^2} t \quad (4)$$

Onde:

D_{ef} : difusividade Efetiva da Umidade [L^2T^{-1}];

L: metade da Espessura [L];

A – Fator Exponencial [$L^2TL^{-2}T^{-1}$].

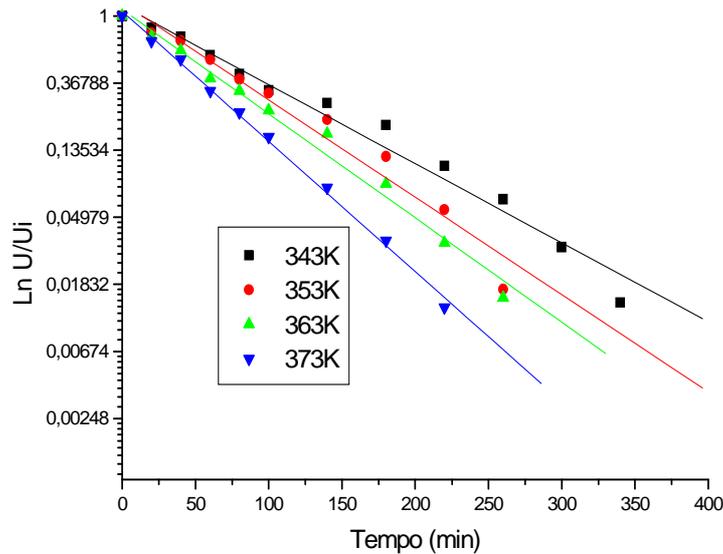


Figura 2: Representação do Modelo Ajustado aos Dados Experimentais.

Consequentemente, o ajuste linear das equações mostradas na Figura 2, em seus coeficientes lineares e angulares permitem o cálculo dos parâmetros relativos a cinética de secagem. Na Tabela 1 são mostrados os valores obtidos para as difusividades efetivas para as temperaturas estudadas e os respectivos coeficientes de correlação das curvas ajustadas.

Tabela 1: Difusividades Efetivas Obtidas pelos Ajustes da 2ª Lei de Fick.

Temperatura (K)	$D_{ef} \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$	Coefficiente de Correlação - R^2 (%)
343	1,19	98,65
353	1,49	98,75
363	1,57	99,21
373	1,97	98,85

Os resultados apresentados correspondem às mesmas ordens de grandezas obtidas para outros produtos agroindustriais, conforme observado por Marques⁶, e confirma a boa representatividade que as simplificações do modelo de Fick têm associadas.

Para o cálculo da energia necessária ao cálculo de transferência térmica dos secadores, os dados estimados para a difusividade efetiva foram avaliados em relação ao efeito da temperatura sobre os seus valores. Essa correlação pode ser desenvolvida por meio da representação da equação de Arrhenius para ajuste de cinéticas químicas, equação 5, obtendo a energia de ativação para a desidratação dos caroços de Jaca.

$$\ln D_{ef} = \ln D_{\infty} - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

Onde:

D_{ef} : difusividade Efetiva da Umidade [L^2T^{-1}];

D_{∞} - Constante Exponencial [adimensional];

E_a – Energia de Ativação [$ML^2T^{-2}MOL$]

R – Constante Universal dos gases [$M^{-1}LT^2MOL^{-1}$]

T – temperatura [θ]

A representação gráfica do efeito da temperatura é mostrada na Figura 3. Nesta figura observou-se a dependência padrão à temperatura para uma cinética de primeira ordem e de caráter decrescente. O coeficiente de correlação da equação obtida foi de 98,75%. Tais parâmetros D_{∞} e E_a servem para o cálculo de diferentes componentes no dimensionamento de

diferentes tipos de secadores industriais. Logo, a literatura é enriquecida com uma referência no desenvolvimento deste tipo de equipamento.

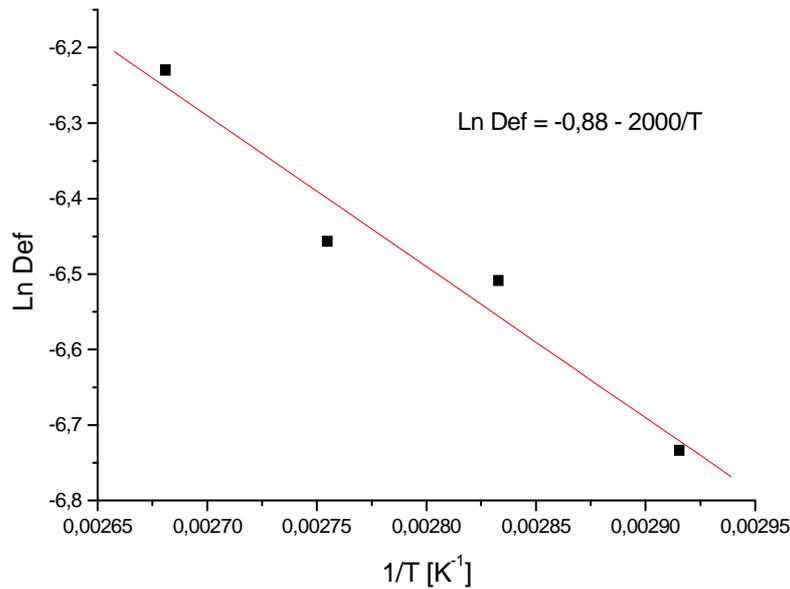


Figura 3: Ajuste da Equação de Arrhenius aos Dados Experimentais.

Em termos de qualidade, não foram avaliados os desempenhos dos produtos obtidos. Entretanto, na literatura foram identificados estudos que relatam tal comparação.

Nos resultados do comparativo da qualidade dos produtos obtidos nesse processamento, observa-se que estes caroços desidratados são boas fontes de minerais, carboidratos e proteínas. Atestando seu emprego como complemento alimentar em dietas de indivíduos carentes destes nutrientes.

Além disso, é possível constatar que as perdas com o processo de desidratação não afetam as características do produto. No entanto, o ensaio desses autores foi realizado a um nível de temperatura de 333K, o que não necessariamente apresenta mesmo comportamento para outros níveis de temperatura. Sendo necessários estudos mais aprofundados para aperfeiçoar o processo quanto às perdas nutricionais, já que os modelos para otimização do tempo de processamento já foram obtidos neste trabalho.

4. CONCLUSÃO

Com base nos objetivos propostos ao trabalho e resultados obtidos é possível tecer as seguintes conclusões:

1. As curvas de secagem foram desenvolvidas em metodologia padronizada, gerando resultados que permitiram a modelagem matemática conforme a equação simplificada da segunda lei de Fick, tendo-se níveis superiores a 98% de coeficientes de correlação aos dados experimentais, para secagem em camada fina de caroços de jaca cortados em seção longitudinal e latitudinal.

2. O efeito da temperatura é diretamente proporcional as velocidades de secagem dos caroços de jaca, ou seja, quanto maior o nível operacional da secagem, mais rápido ocorre o processo de transferência da umidade; obtendo-se menores tempos de secagem a uma temperatura de 373K, e não observando prejuízos nos aspectos visuais dos produtos obtidos.

3. Foi possível a determinação da energia de ativação da secagem de caroços de jaca em camada fina, por meio do ajuste matemático da equação de Arrhenius.

4. O produto obtido após a desidratação dos caroços de jaca é uma fonte de carboidratos, proteínas e minerais (conforme descreve a literatura especializada¹⁻⁶), sendo necessários estudos

mais aprofundados sobre a cinética de desnaturação desses nutrientes, para com isso validar as melhores rotas e condições operacionais do processo.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Departamento de Engenharia Química da UFRN.

-
1. BORGES, S. V. Sementes de jaca (*artocarpus integrifolia*) e de abóbora (*curcubita moschata*) desidratadas em diferentes temperaturas e utilizadas como ingredientes em biscoitos tipo cookie. *Alim. Nutr.*, Araraquara. v.17, n.3, p.317-321, jul./set. 2006.
 2. DUARTE, M. E. M. et al. Desidratação osmótica de fatias de jaca. *Rev. Ciênc. Agron.*, v. 43, n. 3, p. 478-483, jul-set, 2012.
 3. EXCEL. Microsoft® Office Excel 2003 (11.8346.8341). Parte do produto Microsoft Office Professional Edição 2003. Copyright © 1998-2002.
 4. FRANCO, GUILHERME. Tabela de composição química dos alimentos. Atheneu, 9a ed., Rio de Janeiro, 1995. p. 307.
 5. INSTITUTO ADOLFO LUTZ (São Paulo). Métodos físico-químicos para análise de alimentos /coordenadores Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglia. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. p. 1020.
 6. MARQUES, L. F. et al. Secagem precedida de desidratação osmótica de pseudofruto de caju: comparação entre modelos matemáticos aplicados. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.9, n.2, p.161-170, 2007.
 7. OLIVEIRA, L. F. Efeito dos parâmetros do processo de desidratação de jaca (*artocarpus heterophyllus*, lam.) sobre as propriedades químicas, físico-químicas e aceitação sensorial. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica-RJ, 2009.
 8. OLIVEIRA, R. A. DE; OLIVEIRA, W. P. DE; PARK, K. J. Determinação da Difusividade Efetiva de Raiz de Chicória. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.181-189, 2006.
 9. PRATES, M. F. O.; ASHERI, D. P. R. Secagem de soluções filmogênicas de amido de fruta-de-lobo (*solanum lycocarpum* st. hil.) e propriedades físicas dos filmes em função do plastificante e da temperatura. *B. CEPPA*, Curitiba, v. 28, n. 2, p. 187-204, jul./dez. 2010.
 10. QUEIROGA et al. Análise da desidratação osmótica do feijão verde (*vigna unguiculata* l. walp). *HOLOS*, Ano 27, Vol. 5, 2011. 106.
 11. SILVA, J. H. V.; JORDÃO FILHO, J. RIBEIRO, M. L. G.; SILVA, E. L. Efeitos da inclusão do farelo de sementes de jaqueira (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) na ração sobre a produção, pigmentação da gema e umidade fecal em codornas. *Ciência Agrotécnica*, Lavras, v. 31, n. 2, p. 523-530, mar.-abr., 2007.
 12. SOUZA, M. S. S. et al. Desenvolvimento e Avaliação de Passas de Jaca Obtidas por Desidratação Osmótica Seguida de Secagem Convectiva. *UNOPAR Cient Ciênc Biol Saúde*. 13(2):89-94. 2011.
 13. SOUZA, T. S. et al. Desidratação osmótica de frutículos de jaca (*Artocarpus integrifolia* L.): aplicação de modelos matemáticos. *Acta Scientiarum. Technology*. Maringá, v. 31, n. 2, p. 225-230, 2009. DOI: 10.4025/actascitechnol.v31i2.1026.
 14. VIZEU, V. E.; FEIJO, M. B. S. and CAMPOS, R. C. de. Determinação da composição mineral de diferentes formulações de multimistura. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* [online]. 2005, vol.25, n.2, pp. 254-258. ISSN 0101-2061. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612005000200012>.