

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM SOLAR DO PEDÚNCULO DE CAJU

MODELING AND SIMULATION OF THE SOLAR DRYING OF CASHEW PULP

Antônio Vitor Machado^{1*}, Edson Leandro de Oliveira², Jackson Araújo de Oliveira³, Domingos Fabiano S. Souza⁴,
Laerte Moura de Freitas⁵.

Resumo: Os altos índices de poluição alcançados pelo uso de energia fósseis é bastante preocupante na atualidade, com isso a busca pela utilização de fontes de energia limpa e renovável é de grande interesse no presente. A secagem solar do pedúnculo de caju é uma alternativa viável para atender aos produtores, que com a utilização desta tecnologia poderão agregar valor aos seus produtos e minimizar suas perdas pós-colheita. Neste sentido este trabalho teve como objetivo o estudo da secagem solar do pedúnculo do caju utilizando um secador solar de radiação indireta. Foram realizados experimentos em uma unidade piloto de secador solar sob convecção forçada, utilizando fatias do pedúnculo de caju com espessuras de 1cm. Posteriormente, foi desenvolvido um modelo matemático fenomenológico para simular o secador solar e analisar o comportamento deste frente às variáveis pertinentes do processo. O modelo final é representado por um sistema de equações diferenciais parciais a duas fases (matriz sólida e fase gás) e integrado numericamente pelo método das linhas. Os resultados obtidos com a simulação foram validados com os experimentos e, os mesmos mostraram-se condizentes com os dados de secagem solar do pedúnculo de caju.

Palavras-chave: Secagem solar, pedúnculo de caju, modelagem e simulação.

Abstract: The high indices of pollution reached by the energy use fossils are sufficiently preoccupying in the present. Actually, the development of new technologies that can use renewable energy sources is quite important. Solar drying of cashew pulp is a viable alternative to take care of to the producers that with the use of this technology will be able to add value for their products and to minimize its losses postharvest. In this direction this work had as objective the study of the solar drying of cashew pulp using solar dryer of indirect radiation. Experiments in a unit had been carried through pilot of solar dryer under forced convection, using slices of the cashew pulp with thicknesses of 1cm. Later, a phenomenological mathematical model was developed to simulate the solar dryer and to analyze the behavior of this front to the pertinent variable of the process. The final model is represented by a system of partial distinguishing equations the two phases (first solid and phase gás) and integrated numerically for the method of the lines. The results gotten with the simulation had been validated with the experiments and, the same ones had revealed condizentes with the data solar drying of cashew pulp.

Keywords: solar drying, cashew pulp, simulation and modeling.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas, com uma produção que superou os 46 milhões de toneladas no ano de 2010 (FAO, 2010). O Brasil possui uma terra privilegiada no que diz respeito à produção de frutas, devido a sua grande área territorial e reúne condições climáticas favoráveis para a fruticultura. A fruticultura é, hoje, um dos segmentos de maior importância da agricultura nacional respondendo por mais de 35% da produção agrícola nacional (ALMEIDA, 2006).

A região Nordeste vem se destacando na produção de frutas como o melão, uva, abacaxi, banana, manga e caju, pois as condições climatológicas são muito mais favoráveis do que nas regiões sul e sudeste do Brasil (TODAFRUTA, 2011). A cajucultura é uma atividade de destaque socioeconômico para o Nordeste, principalmente para os Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí, onde se encontram os maiores plantios do país.

O cajueiro (*Anacardium occidentale L.*) pertencente à família *Anacardiaceae*, e destaca-se entre as plantas frutíferas tropicais. Em face da crescente comercialização do fruto conhecido por castanha de caju e do pseudofruto, que é o pedúnculo hipertrofiado e carnoso o hipocarpo, geralmente chamado apenas caju, cuja casca é muito frágil, o que dificulta o seu transporte das áreas de produção aos mercados de consumo ou à indústria (Aragão, et al.; 2007). Além de frágil, este produto é altamente perecível, apresentando mecanismos aceleradores de degradação microbiológica apresentando elevadíssimos índices de perda pós-colheita (Machado, 2011). A produção nacional de castanha de caju em 2007 foi de 265.888 toneladas, considerando que o pedúnculo corresponde a 90 % do peso total do fruto, neste ano de 2007 produziu-se 2.392.992 toneladas de pedúnculo de caju ((Machado, 2009), deste total a maior parte é desperdiçada, cerca de 94%, contribuindo, assim, para a rejeição ou perda de centenas de milhares de toneladas do produto ano. Diante deste cenário o pedúnculo de caju

*autor para correspondência

Recebido para publicação em 11/07/2012; aprovado em 22/08/2012

¹ Eng. de Alimentos D. Sc. Professor Adjunto da - UATA /CCTA – UFCG. CEP – 58840-000. Pombal – PB. E-mail: machadoav@ccta.ufcg.edu.br*

² Eng. Químico D. Sc. Professor Associado do - CT /DEQ – UFRN. CEP – 59072-970. Natal – RN. E-mail: edson@eq.ufrn.br

³ Eng. Químico D. Sc. Professor Adjunto do - CT /DEQ – UFRN. CEP – 59072-970. Natal – RN. E-mail: jackson@eq.ufrn.br

⁴ Eng. Químico D. Sc. Professor Adjunto do - CT /DEQ – UFRN. CEP – 59072-970. Natal – RN. E-mail: fabiano@eq.ufrn.br

⁵ Eng. Químico Discente - CT /DEQ – UFRN. CEP – 59072-970. Natal – RN, E-mail: laerte_moura@yahoo.com.br

apresenta elevado potencial para exploração, pois é matéria-prima rica em carboidratos, fibras, vitaminas e sais minerais (Machado, 2011).

Deve-se ressaltar, que o Brasil é o único país no contexto mundial que possui o hábito de consumo do pedúnculo de caju nas suas diferentes formas, *in natura* como fruto de mesa tornando-se um negócio promissor para o mercado (Machado, 2011). O caju é um fruto bastante procurado por sua polpa saborosa que apresenta um alto teor de vitamina C com teor médio de 164,2 mg/100g de vitamina C, este conteúdo é 4 ou 5 vezes maior que o teor vitamina C apresentado pela laranja que contém em média 32,8 mg/100g, além de ser uma excelente fonte de sais minerais (SOUZA, et al.; 2005). O pedúnculo do caju é extremamente perecível e também pode ser considerado como um dos frutos mais baratos entre todos os outros cultivados no Brasil (SOUZA, 2007).

Na conservação de alimentos, a desidratação ou secagem é apontada como um dos procedimentos mais importante para a redução da atividade de água (A_w) favorecendo o transporte e a manipulação do produto, além de prolongar a vida de prateleira (AKAPINAR, 2006). A desidratação de frutas possui um mercado promissor e com grande potencial de crescimento e muito pouco explorado empresarialmente na atualidade no Brasil (MACHADO, 2008).

A conservação de frutas através da desidratação ou secagem é um dos processos comerciais mais usados mundialmente na conservação de produtos agropecuários, sem que eles percam suas propriedades biológicas e nutritivas (UFLA, 2011). A redução do teor de umidade do produto, e conseqüentemente, de sua atividade de água, tem por objetivo evitar o desenvolvimento de microrganismos e de reações químicas indesejáveis que podem deteriorar o produto tornando-o impróprio para o consumo (MADAMBA, 2007). Entre as principais vantagens oferecidas pela secagem de frutas está a concentração dos nutrientes e o maior tempo de vida de prateleira. Além disso, o sabor permanece quase inalterado por longo tempo, uma vez que é minimizada a proliferação de microrganismos. A secagem é atualmente empregada não apenas com o objetivo de conservação dos alimentos, mas também para elaboração de produtos diferenciados, como por exemplo, as massas, biscoitos, iogurtes, sorvetes entre outros (FIOREZE, 2004).

Entre os diferentes sistemas de secagem, podem ser citados os secadores mecânicos e o secador solar. Nos secadores mecânicos a energia usada, para o aquecimento do gás de secagem, são oriundas da queima de lenha; da queima de combustíveis fósseis ou ainda pelo uso de eletricidade. Já no secador solar, o gás de secagem é aquecido pela energia do sol e ainda hoje esta energia é a mais utilizada na secagem, principalmente quando se trata de grãos e sementes. A secagem solar tradicional é aquela realizada com o produto exposto a céu aberto sob condições ambientais normais (PARK, 2007).

A secagem utilizando a energia solar apresenta-se como alternativa de grande interesse pelas suas qualidades e características de ser limpa, gratuita e de grande potencial, largamente disponível em todo o Brasil e principalmente no Nordeste (FERREIRA, et al., 2008).

O desenvolvimento de tecnologia para o aproveitamento da energia solar utilizando equipamentos que possam transformar energia solar em calor é extremamente importante no momento atual, frente à escassez das fontes de energias fósseis normalmente utilizadas e de seu grande poder poluidor (MACHADOAV, 2012).

O Brasil dispõe de um grande potencial para uso da energia solar em quase todo o território nacional, principalmente na região Nordeste, onde se tem sol por quase todo ano. Essa energia constitui uma opção vantajosa na viabilidade de projetos que poderiam promover o desenvolvimento dessa região em vários setores como na secagem de frutos, no aquecimento de água para uso industrial e doméstico, e também na conversão de energia solar em elétrica para local onde a rede elétrica de energia tem difícil alcance. Os sistemas de secagem solar utilizados na secagem de frutas apresentam aspectos importantes como, o baixo custo de operação e de manutenção dos equipamentos (SINÍCIO, 2006).

Dentre as tecnologias acessíveis a agricultura familiar pode-se citar a secagem em secadores solar. De fácil manuseio e simples montagem, este equipamento utiliza-se da radiação solar para promover a evaporação da água contida nos alimentos (podendo também ser utilizada em outros materiais). Cabe-se destacar que a quantidade processada pode variar de algumas gramas a várias toneladas de material. Porém, a variabilidade nas condições climáticas em determinadas regiões pode inviabilizar o seu uso. Recentes pesquisas foram desenvolvidas no LEAFT (Laboratório de Energia Alternativa e Fenômenos de Transporte/UFRN) com o intuito de estudar a secagem de alimentos, em especial, o pedúnculo de caju utilizando o secador solar de contato indireto desenvolvidos por MACHADO (2009).

A secagem do pedúnculo de caju em secadores solar de radiação direta e indireta é uma alternativa viável na produção de caju desidratado para atender a demanda do mercado consumidor, minimizando assim as perdas do fruto "*in-natura*" no campo, conseqüentemente aumentando o valor agregado de seus produtos e melhorando a renda dos produtores (MACHADO, 2012).

Um aspecto importante para secagem solar é o tempo e a intensidade de incidência solar (SREEKUMAR, 2008). A intensidade da radiação solar pode variar dia após dia, com ponto máximo coincidente entre dez e quatorze horas (10 e 14 horas). Assim, o processo de secagem pode naturalmente decorrer dias. Um modo eficiente de diminuir o tempo de secagem é a introdução de sopradores (SOKHANSANJ, 2006). Este pode alterar o coeficiente global de transferência de calor e reduzir o tempo de processamento. Logo, por intermédio de um soprador (convecção forçada), o ar entra em condição ambiente na

caixa coletora que se encontra pré-aquecida pela radiação solar e transformada em energia térmica. Em seguida, o mesmo flui até a câmara de secagem e inicia o processo de secagem mais rapidamente (JAIRAJ, 2009).

É possível conduzir o estudo da secagem de várias formas. Uma das formas mais rápidas e economicamente atraentes para tanto é a modelagem matemática do processo, seguida de simulação. A modelagem matemática do sistema é uma das ferramentas de grande importância para a área de engenharia de projetos e controle de processos (ARAGÃO, 2006).

No caso dos secadores de bandeja, a modelagem matemática do sistema seguida da simulação da secagem podem auxiliar tanto no projeto quanto no manejo da operação. Além disso, por meio da simulação, é possível desenvolver um sistema de controle do processo que permita reduzir gastos com a supervisão de operação, sendo possível simular diversas condições de secagem com um bom grau de precisão (MACHADO, 2009).

Uma vez de posse do modelo do sistema, com o uso de um programa computacional para simulação, realizam-se testes experimentais para tomada de dados que permitam a validação do modelo. Com o modelo validado, a simulação permite a obtenção de dados do processo para diversas condições de operação, desta forma pode-se minimizar gastos e aperfeiçoar o processo de secagem, sem que seja necessário conduzir experimentos em tais condições. Dispensar tais experimentos geraria economia de tempo, recursos financeiros, material, pessoal e energia (FERNANDES, 2010).

Deste modo, o propósito principal deste trabalho é a modelagem concomitante a simulação do processo de secagem em secador solar de radiação indireta sob convecção forçada (dimensionado e montado no Laboratório de Energia Alternativa e Fenômenos de Transporte (LEAFT) do departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, tendo como propósito principal o aproveitamento do excedente de matéria- prima regional, a redução das perdas pós-colheita do pedúnculo de caju e o conhecimento adequado para a aplicabilidade do sistema de secagem solar como rota de conservação dos alimentos. Buscou-se também, o aproveitamento de fontes de energia renováveis como a solar, que atende satisfatoriamente ao processo de secagem de produtos agroindustriais como pedúnculo de caju.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados pseudofrutos do cajueiro previamente selecionados de acordo com o grau de maturação, coloração da casca e ausência de danos físicos, após a lavagem e sanitização foram retiradas as castanhas, sendo o pedúnculo cortado em fatias de 1 cm de espessura, a determinação do teor de umidade foi realizado pelo método da estufa a 70°C até peso constante.

O equipamento utilizado para secagem foi um secador solar de radiação indireta sob convecção forçada, o

mesmo é constituído de um coletor solar, uma câmara de secagem com bandejas, um exaustor eólico e um soprador elétrico conforme FIGURA (1). O ar aquecido do coletor flui de baixo para cima passando no material a ser seco.

O modelo resultante possui variação no tempo e na altura (referente as bandejas na câmara), sendo formado por um sistema de equações diferenciais parciais referentes a duas fases (matriz sólido e fase gás), acrescido das equações constitutivas para cômputo do coeficiente de transferência de calor, cinética de secagem e taxa de encolhimento. Para a resolução numérica, optou-se por discretizar a variável espacial - método das linhas, sendo o sistema de equações diferenciais resultante integrado numericamente pelo pacote DASSL (Petzold, 1989). Os resultados da simulação são confrontados com dados experimentais obtidos em uma planta piloto referentes à umidade e a temperatura do ar de secagem.

O modelo desenvolvido para descrever a secagem do pedúnculo do caju no sistema citado baseou-se na abordagem proposta previamente por Ratti e Mujumdar (1997) para simular a secagem de cenouras, admitindo variação das condições do ar de secagem. O modelo matemático está basicamente fundamentado nos balanços de massa e energia tanto da fase gasosa quanto do sólido, admitindo o encolhimento do leito durante a secagem e considerando a temperatura do ar de entrada no secador como uma função da temperatura no coletor solar. As principais equações relacionadas aos balanços de massa e energia estão descritas abaixo.

Balanco de Massa na Fase Gasosa: Eq(1)

$$\left[\frac{\partial Y}{\partial t} \right]_{\Lambda} = \frac{n_w \cdot a_v \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_a \cdot \varepsilon} - \frac{1}{S \cdot L_0} \frac{\dot{m}}{\rho_a \cdot \varepsilon} \frac{\rho_s \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_{s,0} \cdot (1 - \varepsilon_0)} \frac{\partial Y}{\partial \Lambda}$$

Balanco de Massa no Sólido: Eq(2)

$$\left[\frac{\partial X}{\partial t} \right]_{\Lambda} = - \frac{n_w \cdot a_v}{\rho_s}$$

Balanco de Energia para Fase Gasosa: Eq(3)

$$\left[\frac{\partial T_g}{\partial t} \right]_{\Lambda} = \frac{-h_c \cdot a_v \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_a \cdot \varepsilon \cdot C_{p,ah}} (T_g - T_s) - \frac{1}{S \cdot L_0} \frac{\dot{m}}{\rho_a \cdot \varepsilon} \frac{\rho_s \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_{s,0} \cdot (1 - \varepsilon_0)} \frac{\partial T_g}{\partial \Lambda}$$

Balanco de Energia para o Sólido: Eq(4)

$$\left[\frac{\partial T_s}{\partial t} \right]_{\Lambda} = \frac{a_v}{\rho_s \cdot (1 + U) \cdot C_{p,sh}} \left[h_c \cdot (T_g - T_s) - n_w \cdot \Delta H_s \right]$$

Onde:

Λ - é a coordenada espacial usada para contabilizar o encolhimento, dada por: Eq(5)

$$dz = \frac{\rho_{s,0} (1 - \varepsilon_0)}{\rho_s (1 - \varepsilon)} d\Lambda$$

As condições iniciais para o modelo em questão foram formuladas, admitindo-se que:

i. inicialmente todo o sólido encontra-se com a mesma umidade (X_0) e na mesma temperatura (TS_0);

ii. a umidade do gás na alimentação, obtida experimentalmente, é conhecida (Y_0) e a umidade do gás dentro do secador é obtida pela umidade de saturação do ar na temperatura do sólido, enquanto a temperatura do gás na alimentação (T_{g_0}) é obtida experimentalmente a partir da temperatura do gás na saída do coletor. Vale lembrar que a temperatura do gás dentro do secador, no início do processo, é igual à temperatura inicial do sólido, como sendo: Eq(6)

$$\begin{cases} Y(t=0, \Lambda=0) = Y_{g_0} & Y(t=0, \Lambda \neq 0) = Y_{sat}(T_{so}) \\ T_g(t=0, \Lambda=0) = T_{g_0} & T_g(t=0, \Lambda \neq 0) = T_{so} \end{cases}$$

As condições de contorno relacionadas, apenas à umidade e à temperatura do gás foram relacionadas na seguinte forma: Eq(7)

$$\begin{cases} Y(t, \Lambda=0) = Y_{g_0} \\ T_g(t, \Lambda=0) = T_{g_0} \end{cases}$$

Demais equações constitutivas do modelo foram obtidas da literatura a partir de correlações com dados experimentais, sendo estas:

Calor específico do ar de secagem como função da temperatura do gás (Sablani et al, 2000): Eq(8)

$$C_{p_{ah}}(T) = \left(\frac{1}{28.951} \right) \cdot \left[28958 + 9390 \cdot \left(\frac{3012}{T} \right)^2 + 7580 \cdot \left(\frac{1484}{T} \right)^2 \right]$$

Calor específico do sólido como função da umidade do sólido (Aragão et al., 2006): Eq(9)

$$C_{p_s}(X) = \frac{1 \cdot 10^6}{\rho_s(U)} \left(0,601 \cdot \ln(U) + 3,329 \cdot e^{-0,097 \cdot X} \right)$$

Densidade do sólido como função da umidade do sólido (Aragão, 2007): Eq(10)

$$\rho_s(X) = 814,303 - 210,961 \cdot e^{-\frac{X}{0,943}}$$

Porosidade (Aragão, 2007): Eq(11)

$$\varepsilon(X) = 1 - \left(0,063 \cdot e^{\frac{X/X_0}{0,39}} \right)$$

O sistema de equações diferenciais parciais resultante dos balanços de massa e energia do processo (Eq. 1 a 4) foi resolvido utilizando-se o método das linhas, onde os termos diferenciais no espaço foram discretizados por diferenças finitas para trás, resultando num sistema de equações diferenciais ordinárias (EDOs) de primeira ordem na variável independente tempo e na base dos pontos de discretização.

Para a resolução do problema foram admitidos um número de 20 pontos de discretização (no presente estudo, 20 pontos de discretização foram suficientes para descrever adequadamente o sistema, resultando num $\Delta z = 0,05$). Com o referido número de pontos o sistema de EDOs totalizou em 80 equações a serem resolvidas. A resolução do sistema de EDOs foi realizada através da implementação de um código computacional escrito na linguagem Fortran e utilizando-se o código DASSL (Petzold, 1989) como sub-rotina de integração numérica para a solução do problema. Vale destacar que as equações descritas conferem um caráter não linear ao sistema de EDOs, podendo apresentar um comportamento de rigidez numérica. Em razão disso, optou-se pelo uso do pacote de integração multi-passo DASSL (Petzold, 1989).

Para a determinação dos parâmetros desconhecidos do processo, a saber: cinética de secagem, isoterma de sorção (atividade de água) e calor de sorção, foi implementado um procedimento de estimação visando estabelecer uma regressão entre os dados experimentais do pedúnculo do caju, obtidos em uma unidade de bancada, com os respectivos modelos utilizados para inferência. O coeficiente de transferência de calor (hc), foi estimado diretamente como um parâmetro único utilizando parte do conjunto de dados experimentais, sendo os demais dados, utilizados para validar os experimentos.

O procedimento para estimação dos parâmetros desconhecidos do modelo matemático baseou-se na minimização da função objetivo do tipo mínimos quadrados (Eq. 12) usando método estocástico “Particle Swarm Optimization (PSO)”, também conhecido como método de enxame de partículas (Kennedy, 1995). A função objetivo considerada para minimização foi dada por: Eq(12)

$$FO = w_1 \cdot \sum_{i=1}^{n_{exp}} \left(U_i^{exp} - U_i^{cal} \right)^2 + w_2 \cdot \sum_{i=1}^{n_{exp}} \left(S_i^{exp} - T_{S_i}^{cal} \right)^2$$

Onde:

FO – função objetivo;

U – umidade do sólido, (b.s);

Ts – temperatura do sólido, (K);

W_1 e W_2 – pesos para ponderar os termos da função objetivo;

exp e cal – dados experimentais e calculados pelo modelo matemático;

n – número de dados.

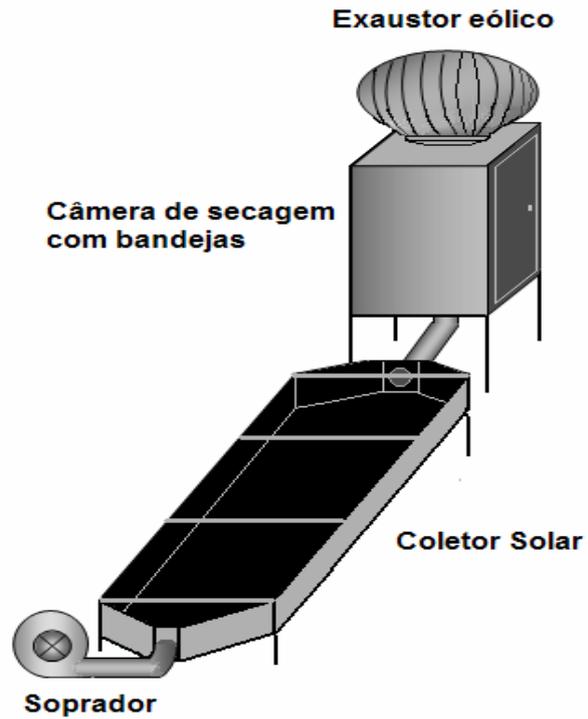
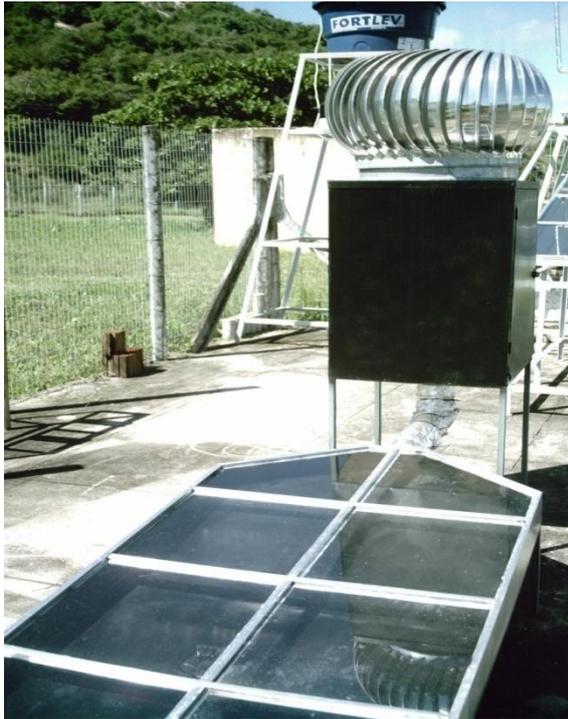


FIGURA 1 - Secador solar de radiação indireta sob convecção forçada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi utilizado um conjunto de experimentos para a estimação das equações constitutivas relacionadas à cinética de secagem solar, isoterma de sorção (atividade de água) e calor de sorção. As equações contendo os valores estimados estão apresentadas na Tabela 1.

Nas FIGURAS (2) e (3) estão apresentados de forma comparativa os resultados obtidos por simulação e experimentalmente, com ênfase para as curvas de umidade do sólido e temperatura do ar na saída do exaustor. Conforme pode ser observado nas Fig. (2) e (3), os dados simulados descrevem perfeitamente o comportamento experimental, com destaque para a umidade do sólido. O

comportamento da curva de secagem (Fig. 2) foi descrito com maior precisão e indicou que parte do processo ocorreu em período de taxa constante. No caso particular da temperatura do ar, observa-se nas FIGURAS.(2) e (3) que existe uma diferença entre os valores preditos pelo modelo e os dados experimentais (próximo de 8°C). Neste caso, as diferenças podem ser atribuídas ao coeficiente convectivo de transferência de calor, já que o mesmo foi considerado constante neste trabalho, podendo variar com as condições de escoamento, temperatura, viscosidade (dentre outras variáveis). Embora tais considerações não tenham sido admitidas no presente modelo, os resultados demonstraram um comportamento adequado para o perfil de temperatura do ar.

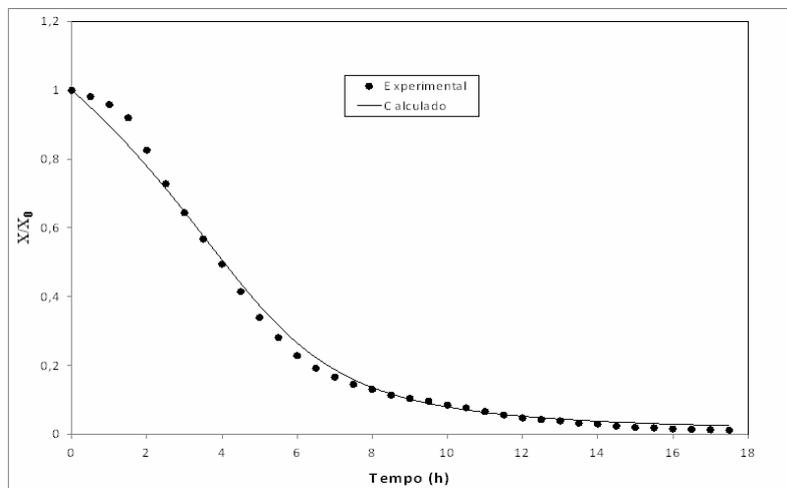


FIGURA 2 - Variação da umidade do sólido em função do tempo (1 cm de espessura e 3,0 m/s).

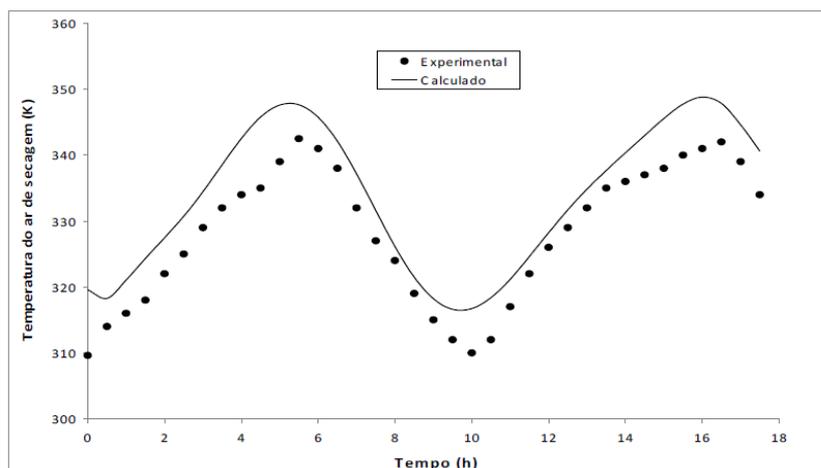


FIGURA 3 - Variação da temperatura do ar na saída do secador em função do tempo de secagem. (1 cm de espessura e 3,0 m/s).

TABELA 1. Equações Constitutivas Utilizadas.

Cinética de Secagem	
$n_w(t, X) = 0,056 \cdot (X)^{1,315} \cdot e^{-2,927 \times 10^{-4} \cdot t}$	Eq(13)
Isotermas de Sorção	
$a_v(X) = 10^{-4} \cdot e^{-1,699 \cdot (X / X_0)}$	Eq(14)
Calor de Sorção Eq(15)	
$\Delta H_s(X, T) = \Delta H_w 3,584 \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{10^{-4}} \cdot e^{-6,178 \cdot (X / X_0)}$	Eq(14)

CONCLUSÕES

O modelo matemático implementado para o secador solar de radiação indireta sob convecção forçada mostrou-se adequado para descrever a evolução da umidade do material e da temperatura do gás na saída do secador para as condições de estudos realizadas neste trabalho. O comportamento oscilante da temperatura do ar na saída (comportamento experimentalmente determinado), apesar de previsto qualitativamente com uma diferença média de temperatura de 8°C, não invalida a formulação e utilização do modelo para testes futuros.

NOMENCLATURA

a_v – Isoterma de Sorção
 C_{p_a} – Calor específico da umidade do ar, J/kg.K;
 C_{p_s} – Calor específico do sólido úmido, J/kg.K;
 ρ_s – Densidade do sólido (kg de massa seca/m³)
 ρ_a – Massa específica do ar (kg/m³);
 ε – Porosidade do leito;
 X – Umidade absoluta do sólido (b.s) (kg de água/kg de matéria seca);
 Y_g – Umidade absoluta do ar, kg de água/kg de ar seco;
 Y_{sat} – Umidade absoluta do ar no ponto de saturação, kg de água/kg de ar seco;

\dot{m} – Vazão mássica do ar de secagem (kg/s);
 h_c – Coeficiente convectivo de transferência de calor (W/m².°C);
 L_o – Espessura da amostra (m);
 S – Área da seção transversal da câmara de secagem (m²);
 ΔH_w – Calor latente de vaporização da água (J/kg.K);
 T_g – Temperatura do gás de secagem (°C ou °K);
 T_s – Temperatura do sólido (°C ou °K);
 t – Tempo (s);
 z – Variável espacial (m).

REFERÊNCIAS

- AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. **Thin-layer drying of red pepper**. Journal of Food Engineering 59, p. 99-104, 2006.
- ALMEIDA, C. A.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A.; SILVA, L. F. H. **Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola**. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 6, n.1, 2006.
- ARAGÃO, R. F.; ALSINA, O. I. S. Estudo experimental da secagem de fatias de caju em secador de bandejas. **Alimentos Ciencia e Ingeniería**. vol. 16 (3), 2007.

- ARAGÃO, R. F. **Secagem de fatias de caju (*Anacardium occidentale L.*) em secador de bandejas.** Tese de Doutorado em Engenharia de Processos Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, p.126, 2007.
- ARAGÃO, R.F.; Asina, O.L.S.; Guedes, A.M. **Estudo experimental da secagem de fatias de caju.** In: Alimentos Ciencia e Ingenieria, v.16(3), p. 302-307, (2007).
- ARAGÃO, R. F.; Alsina, O. I. S. **Softwarw interative para windows Secagem de caju.** XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Universidade Estadual de Maringá – Paraná, anais, 2006.
- FERNANDES, F.A.N.,Rodrigues, S., Law, C.L., Mujumdar, A.S. **Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review, Food Bioprocess Technol**, Paper Review, 2010.
- JAIRAJ, K.S., SINGH, S.P., SRIKANT, K. A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy*, 83:1698-1712, 2009.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle Swarm Optimization, in Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks**, pp. 1942–1948, 1995.
- FAO, Food And Agriculture Organization Of the United Nations.** Summary of Food and Agriculture Statistics. Disponível em <http://www.fao.org> , acessado em setembro de 2010.
- FERREIRA, A. G.; et al. **Technical feasibility assesment of a solar chimney for food drying.** Solar Energy. Vol. 82 p.44-52 (2008).
- FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**, João Pessoa. Editora Universitária - UFPB, p.229, 2004.
- MACHADO, A.V.; OLIVEIRA, E.L.; SANTOS, E.S.; OLIVEIRA, J.A. **Influência da espessura com o tempo de secagem em sistemas solar de radiação direta e indireta. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos (CBCTA)**, Belo Horizonte – MG, v.3, p. 44-51, 2008.
- MACHADO, A.V. Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistemas convencional e solar: modelagem e simulação do processo.** D.Sc. Thesis, PPGEQ, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2009.
- MACHADO, A.V.; OLIVERIRA, E. L.; SANTOS, E. S.; OLIVEIRA, J. A.; FREITAS, L. M. **Avaliação de um secador solar sob convecção forçada para a secagem do pedúnculo de caju.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentavel, Mossoro – RN, v.6, n° 1, p. 01-07, (2011).
- MACHADO, A.V.; OLIVERIRA, E. L.; SANTOS, E. S.; OLIVEIRA, J. A.; FREITAS, L. M. **Estudo da influência da espessura no tempo de secagem do pedúnculo de caju em secadores solar de radiação direta e indireta.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentavel, Mossoro – RN, v.7, n° 1, p. 256-263, (2012).
- MACHADO, A.V.; OLIVEIRA, E.L.; SANTOS, E.S.; OLIVEIRA, J.A. **Estudo cinético da secagem do pedúnculo de caju e um secador convencional.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró – RN, v.6, p. 44-51, (2011).
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering* v.29, p.75-97, 2007.
- PARK, K. J.; COLATO, A.; OLIVEIRA, R. A. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem.** Campinas, v. 1, 2007.
- PETZOLD, I. R. **Computing and mathematics research DASSL Code**, version 1989 division, Lawrence Livermore National Laboratory, L316, PO Box 808, Livermore, CA 94559, 1989.
- RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Solar drying of foods: Modeling and Numerical Simulation. *Solar Energy*, Elsevier Science Ltd, v. 60, n. 3, p. 151-157, 1997.
- SABLANI, S.; RAHMAN, S.; AL-HABSI, N. Moisture diffusivity in foods - an overview. In A. S. Mujumdar (Ed.), **Drying technology in agriculture and food sciences**, Enfield, science Publishers Inc., p. 35–50. (2000).
- SINÍCIO, R. **Simulação de secagem de milho em camadas espessas a baixas temperaturas.** Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa – MG, p.74, 2006.
- SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D.S. **Drying of foodstuffs.** In: Mujumdar, A.S. Handbook of industrial drying. 2.ed. New York: Marcel Dekker, v.1, p.589-626, 2006.
- Souza, M. C. M.; Rodrigues, T. H. S.; Rocha, M. V. P.; Gonçalves, L. R. B. **Cinética de secagem do caju.** In: I Simpósio Brasileiro de Pós-Colheita de Frutos Tropicais (SBPCFT), v.4, p. 52-57 João Pessoa-PB, (2005).
- Souza, I. G. M. **Obtenção de tomates secos utilizando um sistema de secagem solar construído com materiais alternativos.** 8° Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica; v.6, p. 135-139, Cusco, (2007).

SREEKUMAR, A.; et al; Performance of indirect solar cabinet dryer. **Energy conversion** and management. India, v.77, 2008.

TODAFRUTA (2010). Disponível em: <<http://www.todafruta.com.br>> Acesso em 16 mar. 2011.

Universidade Federal de Lavras – UFLA (Núcleo de Estudo).http://www.todafruta.com.br/todafruta/mostra_conteudo.asp?conteudo=1380 Acesso em 27/10/11. Data Edição: 21/01/2007.