

ANÁLISE ENERGÉTICA DA EFICIÊNCIA E DO PROCESSO DE SECAGEM DE UM SECADOR SOLAR

Antonio Gomes Nunes (UFERSA) - nunesag@ufersa.edu.br

João Victor Medeiros Rocha (Instituição - a informar) - - jonny.medeiros@hotmail.com

Maria Valéria Limeira da Costa Almeida (UFERSA) - leralimeira@gmail.com

Édson Fernandes Chaves Filho (UFERSA) - edson.fernandes.chaves.381@gmail.com

Leonardo Marques de Freitas (UFERSA) - leonardo.xoop@gmail.com

Adna Queiroz Sales (UFERSA) - queirozadna@gmail.com

João Victor Medeiros Rocha (UFERSA) - jonny.medeiros@hotmail.com

Resumo:

*Apresenta-se um secador solar de exposição indireta para determinar a eficiência térmica real e o desempenho do processo de secagem, testado na secagem de banana prata (*Musa spp.*). O desafio da construção do protótipo esteve em trazer inovações como uma placa absorvedora de energia no interior do coletor solar e um sistema de movimentação do ar de secagem (cooler), acionado por energia solar fotovoltaica. Estas peculiaridades permitiram projetar uma câmara de secagem com características de manter a temperatura do ar de secagem no interior da câmara sem grandes variações e controlar a umidade relativa do ar de secagem na maior parte dos testes entre 20 e 30%, uma vez que, quanto menor a umidade do ar na entrada da câmara de secagem, mais água será retirada do produto, com isto reduz o tempo de secagem. Com essas inovações, o processo de secagem se comportou como nos secadores tradicionais com média da eficiência mássica do processo de secagem em torno de 85%. Também foi desenvolvido um sistema de medição de temperatura e umidade relativa do ar usando Arduino, o que possibilitou a realização do balanço de energia do secador solar, resultando no cálculo do rendimento termodinâmico do secador solar e na obtenção de outras propriedades termodinâmicas do ar de secagem. Os resultados obtidos para o rendimento térmico do secador solar foram em torno de 20%, compatíveis com os descritos na literatura para sistemas de secagem equivalentes que usam apenas energia solar como fonte de energia.*

Palavras-chave: *Secador solar, Propriedades termodinâmicas, Eficiência térmica*

Área temática: *Conversão Térmica com coletores planos*

Subárea temática: *Sistemas de conversão térmica para aplicações industriais, agrícolas e outras*

ANÁLISE ENERGÉTICA DA EFICIÊNCIA E DO PROCESSO DE SECAGEM DE UM SECADOR SOLAR

Antonio Gomes Nunes – nunesag@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística

João Victor Medeiros Rocha - jonny.medeiros@hotmail.com

Maria Valéria Limeira da Costa Almeida - leralimeira@gmail.com

Leonardo Marques de Freitas - leonardo.xoop@gmail.com

Édson Fernandes Chaves Filho – edson.fernandes.chaves.381@gmail.com

Adna Queiroz Sales - queirozadna@gmail.com

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro de Engenharias

Resumo. *Apresenta-se um secador solar de exposição indireta para determinar a eficiência térmica real e o desempenho do processo de secagem, testado na secagem de banana prata (*Musa spp.*). O desafio da construção do protótipo esteve em trazer inovações como uma placa absorvedora de energia no interior do coletor solar e um sistema de movimentação do ar de secagem (cooler), acionado por energia solar fotovoltaica. Estas peculiaridades permitiram projetar uma câmara de secagem com características de manter a temperatura do ar de secagem no interior da câmara sem grandes variações e controlar a umidade relativa do ar de secagem na maior parte dos testes entre 20 e 30%, uma vez que, quanto menor a umidade do ar na entrada da câmara de secagem, mais água será retirada do produto, com isto reduz o tempo de secagem. Com essas inovações, o processo de secagem se comportou como nos secadores tradicionais com média da eficiência mássica do processo de secagem em torno de 85%. Também foi desenvolvido um sistema de medição de temperatura e umidade relativa do ar usando Arduino, o que possibilitou a realização do balanço de energia do secador solar, resultando no cálculo do rendimento termodinâmico do secador solar e na obtenção de outras propriedades termodinâmicas do ar de secagem. Os resultados obtidos para o rendimento térmico do secador solar foram em torno de 20%, compatíveis com os descritos na literatura para sistemas de secagem equivalentes que usam apenas energia solar como fonte de energia.*

Palavras-Chave: *Secador solar, Propriedades termodinâmicas, Eficiência térmica*

1. INTRODUÇÃO

O homem tem usado o sol para secar culturas e grãos há centenas de anos. A secagem natural não envolve nenhum custo, mas existem algumas desvantagens como o tempo de secagem prolongado, durante o qual o material seco é exposto à contaminação e à intrusão de insetos e roedores, que deixam o material seco de baixa qualidade (Khalifa *et al.*, 2012). Com o surgimento de secadores solares, dimensionados adequadamente para a secagem de frutas, o tempo de secagem diminui e produtos com melhor qualidade e mais valor agregado são desenvolvidos.

No Brasil, embora ainda em quantidade quase insignificante, os processos de secagem são encontrados com maior frequência na indústria de laticínios e na secagem de grãos e sementes, sendo geralmente utilizados combustíveis fósseis, lenha e eletricidade como fonte de calor (Barbosa, 2011). Uma alternativa sustentável que utiliza de forma eficiente um recurso energético renovável é o desenvolvimento de secadores solares.

O presente trabalho apresenta secagem solar de exposição indireta operacionalizada por um sistema que trabalha em regime de circulação forçada do ar de secagem, uma vez que, apenas a energia solar térmica é insuficiente para promover a secagem da banana, fruto escolhido para o experimento. A utilização do secador solar de exposição indireta deve-se ao fato do produto não estar diretamente exposto à irradiação solar, o que minimiza a descoloração e a rachaduras na superfície do produto. Neste tipo de secador também é possível controlar melhor as propriedades termodinâmicas do ar, tais como: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar; através da utilização de uma câmara de secagem.

Como o fluido de trabalho utilizado nos processos de secagem solar é o ar aquecido, este sistema que avalia as propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade) é de suma importância para analisar a qualidade do equipamento, de tal modo que, sob determinadas condições operacionais, possamos proporcionar uma secagem uniforme do produto e reduzir o tempo do processo de secagem (Grilo, 2007). O uso do Arduino foi fundamental na obtenção de dados a partir da medição das propriedades, estes dados possibilitaram a realização do balanço de energia do secador solar, resultando no cálculo do rendimento termodinâmico do secador solar.

A secagem é uma operação de transferência de massa, por meio da qual ocorre a redução do teor de água do produto, mediante o fornecimento de energia, nesse sentido, a atividade microbiológica é estabilizada e as reações químicas e enzimática são reduzidas. Diante das vantagens apresentadas nesse processo termodinâmico, a banana prata (*Musa spp.*) foi escolhida por ser um produto altamente perecível e de grande importância econômica, assim essa prática pode possibilitar a disponibilidade do fruto durante todo o ano, além de reduzir seu peso e, conseqüentemente, os custos de transportes e de armazenamento, sem afetar sua qualidade nutricional.

Dessa forma, o objetivo do trabalho é apresentar resultados na secagem da banana, através de um secador solar com exposição indireta, de modo a mostrar a eficiência térmica do coletor solar, da câmara de secagem e do secador solar a partir de dados de temperatura, umidade relativa e da irradiação solar incidente, efetivamente medida, em cada equipamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O teste experimental foi realizado no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus Campina Grande, nos dias 25/02/2016 e 26/02/2016. O experimento teve início às 09:00 h e término às 16:00 h em ambos os dias, totalizando 14 horas de secagem. No período entre um dia e outro de experimento, as frutas foram depositadas em sacos plásticos hermeticamente fechados para evitar a reidratação.

O secador desenvolvido foi utilizado na secagem da banana prata (*Musa spp.*), para o experimento as frutas foram adquiridas junto a produtores da região e cortadas longitudinalmente, além de terem suas extremidades retiradas, ficando com formato de semicilindro. A Fig. 1 mostra algumas bananas cortadas antes do experimento e a banana-passa, produto final obtido que teve seu controle de qualidade e degustação realizada nos laboratórios da UFCG.



Figura 1 - Bananas utilizadas antes e depois do experimento, respectivamente (Nunes, 2018).

O protótipo testado, mostrado na Fig. 2, um secador solar de exposição indireta com coletor solar, duas bandejas de secagem, base de apoio de uma chaminé, sistema de exaustão e câmara de secagem independente, sendo o ar de secagem movimentado através de convecção forçada acionada por um mini painel fotovoltaico.



Figura 2 - Vista panorâmica e de cima do protótipo do sistema de secagem solar (Nunes, 2018).

O equipamento mostrado, foi confeccionado em MDF ultra e fixado com velcro, por ser um material que permite o desmonte de alguns componentes removíveis. O equipamento possui coletor solar com dimensões de $1,235 \text{ m} \times 0,77 \text{ m} \times 0,185 \text{ m}$, com $0,175 \text{ m}^3$ de volume interno e área de incidência de 1 m^2 coberta com policarbonato alveolar, um material transparente utilizado para captação da luz solar que permite a obtenção do efeito estufa. Para garantir um grande volume de ar de secagem com as características termodinâmicas ensejadas na câmara, no interior do coletor está posicionada uma telha de fibrocimento pintada de preto fosco, a qual funciona como um capacitor térmico, e o dimensionamento da câmara foi feito para ser três vezes menor que o volume interno do coletor. A câmara possui volume interno $0,0588 \text{ m}^3$, além disso, possui duas bandejas onde são colocados os frutos a serem secos. No topo da câmara de secagem há uma chaminé que consiste em um dispositivo de exaustão onde é promovida a retirada forçada do ar de secagem, por meio de um cooler MUHUA FAN-TECH de 12 volts e 0,23 Ampère do tipo usado em computador, acionado por um mini painel fotovoltaico.

O secador solar também possui um sistema de aquisição de dados, o qual é constituído por uma placa de Arduino UNO, a qual está conectada a três sensores do tipo TH-11 instalados na entrada do coletor solar, na junção do coletor a câmara e outro na saída da câmara de secagem, como mostrado na Fig. 3. Através destes sensores é possível medir temperatura e umidade relativa instantaneamente e ler esses dados em um display de *Liquid Crystal Display* (LCD) presente ou em um cartão de memória onde os dados são gravados.

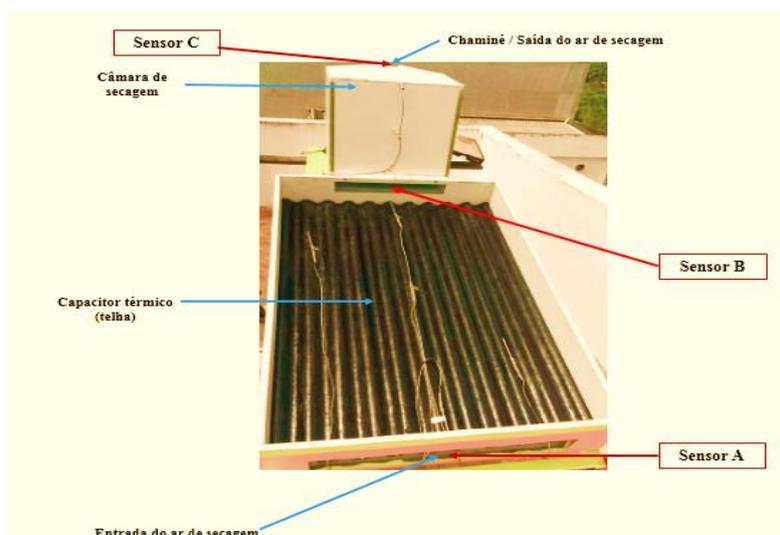


Figura 3 - Localização dos sensores A, B e C de temperatura e umidade relativa do ar de secagem (Nunes, 2018).

Com os dados obtidos pelo sistema de aquisição é possível calcular a eficiência de secagem que pode ser avaliada por duas vertentes: a eficiência térmica do secador solar e o desempenho do processo de secagem. A eficiência do secador solar está relacionada a dois parâmetros fundamentais: o rendimento térmico e a perda térmica do secador. A eficiência do processo de secagem pode ser avaliada também por dois parâmetros: as umidades relativas de entrada e saída do ar e as massas inicial e final da banana, em relação à massa inicial de água presente no produto. A seguir, faz-se uma abordagem de como determinar a eficiência do secado solar proposto e do processo de secagem (Barbosa, 2011).

3. ANÁLISE ENERGÉTICA DOS SISTEMAS E PROCESSOS DE SECAGEM

A partir dos dados da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem na entrada e na saída de cada componente é possível obter valores da eficiência térmica real usando as equações de continuidade (conservação da massa) e da primeira lei da termodinâmica nos volumes de controle do coletor e da câmara de secagem.

O rendimento térmico de um secador é definido, termodinamicamente, pela razão entre a potência entregue pelo sistema e a potência disponível ao mesmo. A equação para o cálculo do rendimento de um secador solar para um determinado período de tempo é dada pela Eq. (1).

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \times \bar{G}} \times 100 \quad (1)$$

Onde, η_t = Rendimento do secador solar [%]; P_u = Potência transferida ao fluido de trabalho [W], dada pela Eq. (2); A = Área de cobertura transparente [m²]; \bar{G} = Média de irradiação solar incidente [W/m²].

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Onde, \dot{m} = Vazão mássica do fluido de trabalho [kg/s]; c_p = Calor específico do fluido de trabalho [J/kgK]; ΔT = Diferença de temperatura [K].

A eficiência real para o volume de controle do coletor solar, esquematizado na Fig. 4, é calculada a partir da Eq. (3).

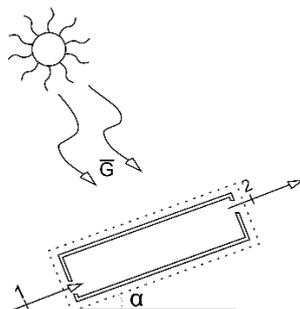


Figura 4 - Representação do volume de controle para coletor solar (Nunes, 2016).

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\dot{Q}_{solar}} \quad (3)$$

Com a variação solar dada pela Eq. (4).

$$\dot{Q}_{solar} = \int_t^{t+\Delta t} \bar{G} dt \quad (4)$$

Onde, \dot{Q}_{solar} é a variação solar, \bar{G} é o valor que representa a média da irradiação solar incidente sobre o coletor solar no intervalo de tempo entre o início do processo às $t_i = 9$ h e seu término diário que ocorre às $t_f = 16$ h.

Para a câmara de secagem, com a representação esquemática do volume de controle mostrada da Fig. 5, tem-se que o rendimento térmico da câmara de secagem é dado pela Eq. (5).

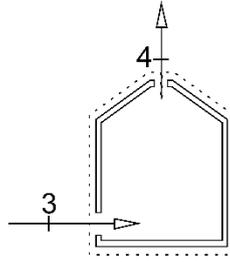


Figura 5 - Representação do volume de controle para câmara de secagem (Nunes, 2016).

$$\eta_{câmara} = \frac{\dot{m}_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3} \quad (5)$$

Onde:

\dot{E}_b = taxa de energia retirada da fruta durante o processo de secagem, dada pela Eq. (6):

$$\dot{E}_b = h_v \dot{m}_{água \text{ retirada da banana}} \quad (6)$$

Onde:

h_v = Entalpia da água saturada como vapor saturado na temperatura média de saída [kJ/kg]; $\dot{m}_{água \text{ da banana}}$ = Massa de água retirada do fruto no período de tempo [kg/s].

Para o sistema de secagem, Fig. 6, o rendimento do sistema ($\eta_{secador}$) é obtido pelo produto de cada parte do sistema, composto pelo coletor solar e pela câmara de secagem, Eq. (7).

$$\eta_{secador \text{ solar}} = \eta_{coletor} \times \eta_{câmara} \quad (7)$$

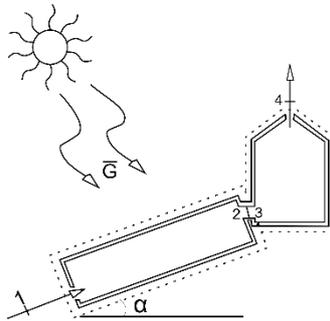


Figura 6 - Representação do volume de controle do secador solar (Nunes, 2016).

A eficiência do processo de secagem pode ser avaliada através das massas e umidades do ar no processo de secagem ou das massas do produto a ser seco. Neste trabalho apresenta-se a eficiência mássica, dada pela Eq. (8).

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{total \text{ de água}}} \quad (8)$$

Onde, η_p = Eficiência mássica do processo [%]; $m_{inicial}$ = Massa inicial do produto [kg]; m_{final} = Massa final do produto [kg]; $m_{total\ de\ água}$ = Massa total de água presente no produto a ser secado [kg].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o experimento a programação foi para leitura e amostragem dos dados do sistema de medição a cada minuto, com os dados gravados em forma de média numa amostragem de 10 min, mais detalhes (Nunes, 2016). Para os cálculos é de interesse as médias das 14 horas de experimento. Portanto, a Tab. 1 mostra as temperaturas do ar de secagem nas posições A, B e C, mostradas na Fig. 7 como 1, 2 e 3, juntamente com a variação das médias das temperaturas nas posições A e B, onde \bar{T}_{ent_col} é a temperatura média na entrada do coletor, \bar{T}_{sai_col} a temperatura média na saída do coletor, \bar{T}_{sai_cam} é a temperatura média na saída da câmara de secagem, $\overline{\Delta T}$ a variação média de temperatura entre a entrada e a saída do secador e \bar{V}_{ar} que é a velocidade do ar. Além dos dados de temperatura, o sistema de aquisição de dados mede as umidades relativas nas posições A, B e C, mostradas na Tab. 2, onde \bar{U}_{ent_col} é a umidade relativa do ar na entrada no coletor, \bar{U}_{sai_col} na saída do coletor e \bar{U}_{sai_cam} na saída da câmara de secagem.

Tabela 1 - Parâmetros das condições de secagem.

\bar{T}_{ent_col} (°C)	\bar{T}_{sai_col} (°C)	\bar{T}_{sai_cam} (°C)	$\overline{\Delta T}$ (°C)	\bar{V}_{ar} (m/s)
34,27	47,71	34,27	13,44	0,360

Tabela 2 - Parâmetros das condições de secagem.

\bar{U}_{ent_col} (%)	\bar{U}_{sai_col} (%)	\bar{U}_{sai_cam} (%)
45,2	22,12	31,4

A Tab. 3 apresenta os dados dos parâmetros de secagem do produto da bandeja 1 obtidos e calculados durante o experimento. Entre os dados apresentados há o teor de água em base seca definido pela massa de matéria seca obtida pelo método da estufa.

Tabela 3 - Valores obtidos no experimento realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, bandeja 1.

Horas		Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.s.)
25/02/16	09:00	29,6	9,4	2,1489
26/02/16	14:00	12,3	9,4	0,3085

De acordo com os valores apresentados na Tab. 3 e utilizando a Eq. (8) é possível obter a eficiência mássica igual a 85,64%. Para o cálculo do rendimento térmico do secador solar expresso em função da potência útil, da radiação solar, da área, da vazão e do calor específico do fluido, foi necessário calcular a média da velocidade do ar durante todo o experimento e definir o ar de secagem de acordo com suas propriedades. A velocidade do ar foi obtida através da medição da velocidade do ar que passa pelo *cooler* instalado na saída da câmara de secagem e através da seção da ventoinha, verificada por meio de um anemômetro digital portátil. E de acordo com a literatura, o ar de secagem possui massa específica igual a 1,2754 Kg/m³ e calor específico de valor 1,0048 kJ/kg.K. A vazão do ar de secagem medida na entrada e na saída do coletor solar é 0,01071 kg/s.

Substituindo os valores na equação da potência transferida ao fluido de trabalho, também conhecida como potência útil, resulta em uma potência transferida de 144,633 W. Como a área de incidência do coletor solar é de 1 m² e para os dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, entre 9 e 16 horas, a média de irradiação incidente calculada pela estação meteorológica instalada no LEMT/UFCG foi de aproximadamente 720 W/m², o rendimento térmico do equipamento apartir da Eq. (1) é 20,08%.

Para calcular o balanço de energia de energia em cada equipamento, inicialmente deve-se calcular a vazão do ar de secagem, a qual foi calculada anteriormente para obter a potência de transferida de trabalho ao fluido. Este valor de vazão mássica de ar refere-se a medida na entrada e na saída do coletor e na entrada da câmara de secagem, Eq. (9).

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = 0,01071 \frac{kg}{s} \quad (9)$$

O valor da vazão mássica para a saída da câmara de secagem é dado pela Eq. (10).

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{\text{água da retina da banana}} = 0,01071 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (10)$$

Com a Eq. (11) dada por,

$$\dot{m}_{\text{água retirada da banana}} = \frac{(0,6 \times 0,3 \text{ kg})}{(3600 \times 14)\text{s}} = 3,57 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (11)$$

O cálculo do rendimento térmico de cada equipamento é obtido através da entalpia, a qual é verificada por meio do software *Computer Aided Thermodynamic Tables* (CATT). O CATT, mostrado na Fig. 7, é um programa que recebe como dados de entrada a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem e apresenta como resultado valores de entalpia e demais propriedade termodinâmicas.

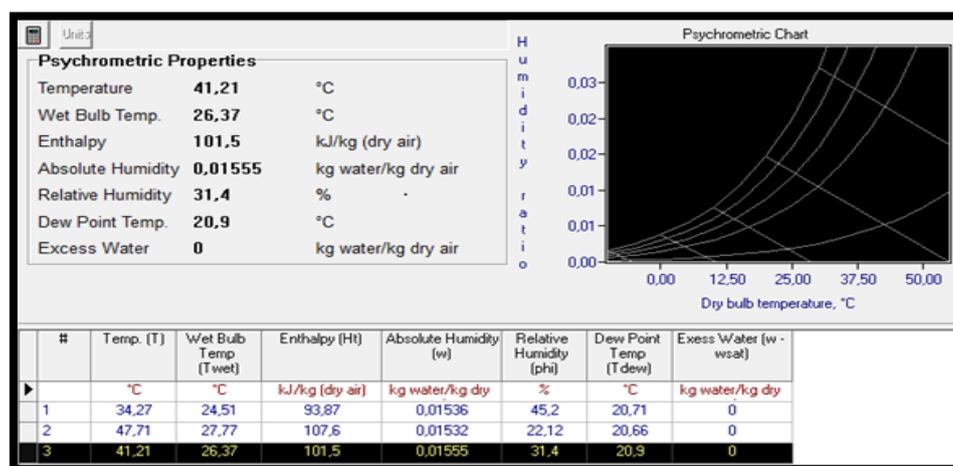


Figura7 - Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT (Nunes, 2016).

Analisando os dados obtidos no CATT, encontram-se as entalpias, apresentadas nas Eq. (12), (13) e (14).

$$h_1 = 93,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (12)$$

$$h_2 = h_3 = 107,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (13)$$

$$h_4 = 101,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (14)$$

Assim, substituindo os valores na equação do rendimento térmico do coletor solar que é resultado da aplicação da primeira lei da termodinâmica ao volume de controle, utilizando a Eq. (3) é igual a 20,42%. Como calculado o rendimento térmico do coletor solar, o rendimento da câmara de secagem também é obtido pela substituição dos valores na equação que é uma aplicação da primeira lei da termodinâmica ao volume de controle na Eq. (5), resultando em um rendimento de 95,03%.

O cálculo da taxa de energia retirada do fruto é expresso em função da entalpia da água saturada como vapor saturado na temperatura média de saída, utilizando a Eq. (6) é de $7,789973 \times 10^{-3}$ kJ/s. De acordo com (Moran e Shapiro, 2009), o valor da entalpia adotado é de 2.578,75 kJ/kg. Como os valores de rendimento para o coletor solar e para câmara de secagem já foram obtidos, é possível obter a eficiência térmica do secador solar pela multiplicação deste a partir da Eq. (7) igual a 19,40%.

Para este experimento percebe-se uma elevada média de irradiação que possui uma relação inversa com a umidade relativa do ar e tempo de secagem. A umidade relativa do ar de secagem na junção (saída do coletor solar/entrada da câmara de secagem), obtida com o sensor B, esteve entre 20 e 25%, o que é importante para o processo de secagem.

A elevada eficiência mássica, em torno de 86%, demonstra que usando a energia solar fotovoltaica é possível obter uma eficiência mássica do processo que usa eletricidade ou GLP como fonte de energia, o que juntamente com o tempo de secagem menor demonstra ser uma alternativa sustentável para os modelos de secadores mais comuns no mercado. O fato de ser uma boa alternativa, também é justificável pelo valor obtido para o rendimento térmico do sistema de secagem (19,60%) estar dentro da expectativa para este tipo de sistema de secagem.

Com os resultados apresentados, pode-se inferir a similaridade com os resultados apresentados na literatura: a secagem do abacaxi obteve valores médios de eficiência de 15%, 11% e 13% para três modos de operação, solar, híbrido e fóssil, respectivamente (Madhlopa e Ngwalo, 2007); a câmara de secagem de um secador solar com soprador de ar construído para a secagem de uva e damasco obteve sua eficiência calculada em 20% e 30%, respectivamente para cada fruto (Al-Juamily *et al.*, 2007); um secador solar de túnel apresentou eficiência média diária do processo de secagem de 44% quando funcionou com sistema de convecção forçada composto por três ventiladores alimentados por um módulo fotovoltaico e eficiência instantânea de 27% quando funcionou com convecção natural (Fudholi, 2010); as eficiências do coletor solar e do secador foram estimadas em torno de 28% e 13% para um secador solar usado na secagem do pimentão vermelho (Fudholi, 2014); e o cálculo da eficiência global de um secador para a secagem de peixe Camboja resultou em 12,37% (Hubackova *et al.*, 2014).

5. CONCLUSÕES

Em consonância com os objetivos definidos, pode-se concluir que o secador solar de frutas de exposição indireta com sistema de convecção forçada mostrou-se compatível com os resultados esperados. E assim pode ser classificado como um secador solar eficiente na produção de banana passa em razão de obter uma eficiência mássica média do processo de secagem elevada.

Quando comparado com dados relatados da literatura, o secador solar mostrou-se compatível a partir do controle das propriedades do ar garantidas pelo tipo e dimensionamento do sistema de secagem. As propriedades termodinâmicas do ar e o balanço de energia de cada componente do secador solar, que resulta no cálculo do rendimento termodinâmico do secador solar foram possibilitadas pelo sistema de aquisição de dados, constituído por uma placa de Arduino UNO.

A partir da sua funcionalidade e qualidade testada, pode-se citar como sugestão para futuros trabalhos o desenvolvimento de um secador de exposição indireta em Mossoró, Rio Grande do Norte, para uma comparação com os dados gerados em Campina Grande, Paraíba. A ideia de um secador em outra localização ajuda a observar as influências meteorológicas e possibilita a secagem de uma fruta típica da nova região, promovendo assim desenvolvimento regional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, UFCG e à equipe do Laboratório de Mestrado em ensino de Física da UFRSA. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Al-Juamily, K.E.J., Khalifa A. J. N., Yassen T. A., 2007. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq, *Desalination*. vol. 209, n.3, pp.163–70.
- Barbosa, J. R.P., 2011. Estudo da viabilidade de uso de secadores solares fabricados com sucatas de luminárias, Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal.
- Fudholi, A. et al., 2010. Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable, Energy Reviews*, vol.14, pp.1- 30, 2010.
- Fudholi, A. *et al.*, 2014. Performance analysis of solar drying system for red chili, *Solar Energy*, vol.99, pp.47-54.
- Grilo, M.B., 2007. Fundamentos da energia solar: radiação solar e coletor solar plano conceitos básicos e aplicações. Campina Grande, PB: Editora da UFCG.
- Hubackova, A. et al., 2014. Development of solar drying model for selected cambodian fish species, *The Scientific World Journal*, vol.20, n.10, pp. 1- 10.
- Khalifa, A.J.N.; Al-Dabagh, A.M.; Al-MehemdI, W. M., 2012. An Experimental Study of Vegetable Solar Drying Systems with and without Auxiliary Heat. *Renewable Energy*, vol. 20, n.1, pp. 1-8.
- Madhlopa, A.; Ngwalo, G., 2007. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater, *Solar Energy*. v.81, n.4, pp.449–462.
- Moran, M.J.; Shapiro, H.N., 2009. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Nunes et al., 2018. Secador Solar usado na Secagem de Banana, Gramado - Rio Grande do Sul, VII CBENS VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Nunes, A.G., 2016. Desenvolvimento de um Secador Solar Multienergético para Secagem de Frutas. Tese de Doutorado UFCG, Campina Grande.

ENERGY ANALYSIS OF THE EFFICIENCY AND DRYING PROCESS OF A SOLAR DRYER

Abstract: An indirect exposure solar dryer is presented to determine the real thermal efficiency and performance of the drying process, tested on drying banana prata (*Musa spp.*). The challenge of building the prototype was to bring

innovations, such as an energy-absorbing plate inside the solar collector and a movement of a cooler powered by a solar energy. These peculiarities made it possible to design a drying chamber with characteristics of maintaining the drying air temperature inside the chamber without large variations and to control the relative humidity of the drying air in most tests between 20 and 30%, because as lower as the air humidity at the inlet of the drying chamber, more water will be removed from the product, reducing the drying time. With these innovations, the drying process behaved as in traditional dryers with average drying process mass efficiency around 85%. The temperature and relative humidity measurement system was developed using Arduino, which made it possible to perform the solar dryer energy balance, resulting in the calculation of the solar dryer thermodynamic performance and obtaining other drying air thermodynamic properties. The results for the thermal efficiency of the solar dryer were around 20%, compatible with those described in the literature for equivalent drying systems that use only solar energy as a power source.

Key words: *Solar Dryer, Thermodynamic Properties, Thermal Efficiency*