

AValiação DA Eficiência DO COLETOR SOLAR PLANO ACOPLADO EM SECADOR HÍBRIDO

Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira – lizandra.agriamb@gmail.com

Juliana Lobo Paes – juliana.lobop@yahoo.com.br

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia

Camila Lucas Guimarães – camilalucas.rj@gmail.com

Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia

Resumo. O coletor solar é o principal componente de um secador solar, pois atua diretamente na captação de energia para o funcionamento do sistema de secagem. Atuando como fonte de energia primária, o coletor desempenha a função de absorver a radiação solar e convertê-la em energia térmica, que por sua vez é utilizada pelo secador. Para este tipo de aplicação, o coletor plano apresenta algumas vantagens, tais como absorver a energia diretamente do sol, não necessitar de dispositivos mecânicos para mantê-lo perpendicular aos raios solares e ser mais econômico comparativamente a outros tipos de coletores. Contudo, algumas variáveis importantes podem afetar o desempenho de um coletor solar na secagem de produtos, incluindo as características necessárias ao ar de entrada na câmara de secagem (temperatura), o fluxo de massa de ar e quantidade de energia demandados, além da sua eficiência instantânea. Objetivou-se neste estudo avaliar a eficiência do coletor solar de placa plana na composição de sistema híbrido para secagem de produtos agrícolas. O trabalho foi conduzido no outono, sendo utilizada a manga (*Mangifera indica* L.) como matéria prima na secagem, que totalizou 72 h com período de intermitência de 15 h. Durante o período de secagem, o coletor solar foi monitorado quanto à temperatura de entrada e saída, velocidade do ar de secagem e radiação global. Para as condições experimentais, obteve-se eficiência instantânea média de 25,9% e máxima de 58,6%. A curva de eficiência do coletor em função do tempo de secagem mostrou que os menores valores foram obtidos no início da manhã, enquanto os picos de eficiência ocorreram no meio do dia, horários de maior incidência de radiação.

Palavras-chave: Desempenho térmico, Eficiência instantânea, Energia solar

1. INTRODUÇÃO

Na cadeia produtiva do agronegócio, existe grande defasagem em relação à eficiência na produção entre as pequenas e grandes propriedades (Braga *et al.* 2015). Contudo, segundo dados da Secretaria Especial de Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário (SEAD, 2017), mais de 50% dos alimentos que compõem a cesta básica brasileira são provenientes de sistemas de agricultura familiar.

A agricultura familiar pode ser definida como um modelo de produção em que a tomada de decisões, gerência, trabalho e capital são controlados pela família (Guimarães, 2010). Nesse sistema a produção agrícola é realizada com poucos recursos financeiros devido ao baixo poder aquisitivo dos agricultores familiares (Braga *et al.* 2015). Portanto, para estimular o agronegócio brasileiro, é necessário não apenas reconhecer a importância da agricultura familiar para a produção agrícola do país, mas também desenvolver tecnologias de baixo custo e alta eficiência que possam refletir em incrementos no setor.

Devido às características de extensão territorial, posição geográfica, solo e condições climáticas, a produção agrícola brasileira tem se voltado à fruticultura (Barbosa, 2011). A agricultura familiar acompanha essa tendência, concentrando-se nos setores de olericultura e fruticultura (IBGE, 2012). Contudo, um dos maiores desafios para o setor é a elevada taxa de desperdício dos produtos agrícolas (SEBRAE, 2015). Em países em desenvolvimento tal desperdício alcança mais de 40%, ocorrendo principalmente nas etapas de pós-colheita e processamento (Spricigo, 2016). Neste sentido, é necessário aplicar soluções para redução dessas perdas para aproveitar o potencial dos produtos.

Tratando-se de redução de perdas e preservação da qualidade de produtos agrícolas, o controle do teor de água torna-se crucial. Uma alternativa amplamente utilizada para este propósito é a prática de secagem. A técnica pode ser brevemente definida como um processo de remoção de umidade devido à transferência simultânea de calor e massa. A secagem é uma prática usual de pós-colheita na qual ocorre a diminuição da quantidade de água no material ao ponto de reduzir a atividade biológica e as mudanças físico-químicas que ocorrem durante o armazenamento (Meneghetti *et al.* 2012; El-Sebaï e Shalaby, 2013; Barbosa de Lima *et al.* 2016). Celestino (2010) destaca, entre as principais vantagens do método, o aumento de vida útil do produto, a facilidade no transporte e comercialização e o alto valor nutritivo obtido, resultado da concentração de nutrientes após a perda de água.

Existem diversas técnicas de secagem de alimentos, desde a secagem natural que é a mais antiga e tradicional até técnicas mais sofisticadas como a liofilização (Guimarães, 2010). No entanto, independente da técnica a ser adotada é de grande interesse da indústria alimentícia e, principalmente, do consumidor que após a secagem de produtos sejam

mantidos não só a qualidade nutricional, mas também as características sensoriais de aparência, aroma e sabor. Neste sentido, torna-se extremamente importante a escolha de um método de secagem adequado (Marques, 2008).

Falcão Filho (2011) sugere que métodos convencionais, como a secagem mecânica, têm apresentado custos muito elevados devido à crise energética e o aumento dos preços dos combustíveis, exigindo assim, a busca de outras metodologias. Tendo essa necessidade em vista, vem sido propostas soluções utilizando energia solar, por se tratar de uma fonte energética livre, renovável e não poluente (Sreekumar, 2010). Sendo assim, essa alternativa constitui como uma opção vantajosa para viabilizar o desenvolvimento de projetos em várias áreas de interesse, como a secagem de frutas (Machado *et al.* 2011).

No setor agrícola, o uso de sistemas de energia solar para secagem de grãos, frutas e vegetais é viável, econômico e ideal para agricultores em muitos países em desenvolvimento (Falcão Filho, 2011; Mustayen *et al.* 2014). A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambiente. Este aproveitamento térmico pode ser realizado através do uso de coletores ou concentradores solares (Costa, 2010; Falcão Filho, 2011). O coletor solar é definido como um tipo específico de trocador de calor que transforma a energia da radiação solar em térmica, visando aquecimento do ar ambiente (Carvalho e Sionek, 2015).

A secagem pode ser realizada com o produto disposto diretamente no coletor (secagem direta) ou em câmara (secagem indireta). Para secagem com maior controle dos parâmetros higroscópicos como temperatura e umidade relativa, tendo em vista manter as propriedades físico-químicas das frutas, opta-se pelo método indireto (Barbosa, 2011). Além disso, a circulação de ar no processo de secagem pode acontecer de modo natural ou forçado. Enquanto na secagem natural o ar é movimentado apenas através do vento, na secagem forçada essa movimentação ocorre através de processos manuais ou mecânicos de ventilação (Barbosa de Lima *et al.* 2016). Segundo os autores, a secagem forçada permite o emprego de alta ou baixa temperatura, secagem combinada ou outras técnicas, sendo, portanto, mais abrangente a diferentes condições de secagem. Com relação à operação, o processo de secagem pode ser classificado em contínuo ou intermitente. Na operação contínua, o produto é constantemente exposto ao aquecimento até que a umidade atinja o teor desejado. Já na operação intermitente, o produtor é exposto a curtos intervalos de tempo entre a exposição ao calor (Barbosa de Lima *et al.* 2016). Estes intervalos podem dar um certo descanso ao produto embora isso possa refletir no tempo de secagem.

De modo geral, a técnica de secagem vem sendo estudada com foco na obtenção de produtos de melhor qualidade e menor custo, atendendo as necessidades de pequenos e médios produtores (Freitas Neto, 2015). O desenvolvimento de pesquisas com equipamentos de secagem que utilizem energia solar com eficiência e baixo custo se constitui como importante aliado na atualidade, como opção para esses produtores (Costa, 2010). Contudo, para que a energia solar na secagem seja economicamente viável, é necessário combinar a demanda energética e as características de radiação solar (Imre, 2015). Logo, avaliar o desempenho desse tipo de sistema e seus elementos torna-se importante para o aperfeiçoamento do método. Neste sentido, Silveira (2016) argumenta a importância e complexidade de se estudar o coletor solar, como o principal componente de um secador solar por desempenhar a função de fonte de energia primária. O mesmo autor cita que uma medida para avaliar o desempenho do coletor solar é a eficiência, parâmetro em foco no presente estudo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em unidade piloto para secagem de produtos agrícolas utilizando energia solar. A unidade foi localizada na área experimental do Departamento de Engenharia (DE) / Instituto de Tecnologia (IT) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica - RJ, cujas coordenadas geográficas são: 22° 45' 33" S e 43° 41' 51" W. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, apresentando temperatura média anual de 25,7 °C e precipitação média anual em torno de 1,213 mm (Genuncio, 2009). O período experimental foi de 9 a 12 de junho de 2015, período final do outono. A manga (*Mangifera indica L.*) variedade Palmer (Fig.1) foi adquirida no comércio local, selecionadas levando em consideração a uniformidade de maturação, sem doenças ou danos mecânicos, de forma a padronizar as amostras utilizadas no experimento.



Figura 1 - Manga (*Mangifera indica L.*) variedade Palmer

As frutas foram lavadas em água corrente, descascadas e cortadas de forma manual, através de cortes da polpa em tiras longitudinais. Tratando-se de frutas, a etapa de sanitização é fundamental para reduzir os riscos de ação de microrganismos patogênicos ou deteriorantes (Bachelli, 2010). Desta forma, as amostras foram sanitizadas segundo recomendação de Cornejo *et al.* (2003), com imersão em solução de hipoclorito de sódio (água sanitária) e água mineral na proporção 1:10 por cinco minutos. Posteriormente, as amostras foram escorridas e colocadas em três bandejas de

secagem de forma ordenada. As bandejas foram pesadas em balança semi analítica de precisão de 0,1g da marca Marte AD3300, identificadas e dispostas no interior da câmara de secagem, em ordem aleatória.

O secador solar foi constituído pelos componentes coletor solar, câmara de secagem e exaustor, conforme apresentado na Fig. 2.



Figura 2 - Vista de perfil do secador solar

Tendo em vista possibilitar um melhor aproveitamento da radiação solar incidente, o secador foi posicionado faceando o norte de Seropédica e o coletor disposto de maneira que formasse uma angulação de 32° com a horizontal. Segundo Moraes *et al.* (2004), é recomendado um acréscimo de 10° na latitude local para determinar a inclinação do coletor solar no período do inverno. Geralmente, isso ocorre para elevar a quantidade de radiação interceptada e diminuir a reflexão (Kalogirou, 2014).

O coletor solar plano foi composto por caixa metálica de alumínio no formato retangular com dimensões de 0,68 x 3,00 x 0,14 m (largura x comprimento x altura). Este dimensionamento foi determinado de acordo com recomendações de Bezerra (2001), segundo o qual para cada metro cúbico da câmara de secagem é necessária uma área de 8 m² de coletor solar, formando a proporção de 1m³:8m². O interior do coletor solar foi composto, em sequência, por material isolante (isopor) fixado nas laterais e no fundo da caixa, cantoneiras sanfonada e cobertura de vidro.

A passagem do ar ambiente pelo interior do coletor solar foi através da placa sanfonada de seção triangular nas dimensões de 0,10 x 0,08 m (base x altura). Os canais superiores da superfície absorvedora foram vedados a fim de evitar a passagem de ar ambiente. Assim, a entrada do fluxo de massa de ar se deu através da seção transversal do coletor formada por seis triângulos (Fig. 3). A saída da massa de ar ocorreu no local de acoplamento entre o coletor e a câmara de secagem. O acoplamento foi dado através de encaixe do coletor em uma área de corte retangular na parte inferior da câmara, garantindo-se a vedação de forma a evitar perdas no sistema. Para vedação da conexão utilizou-se silicone acético incolor.



Figura 3 – Cantoneiras sanfonadas em triângulo do coletor solar.

Utilizou-se cobertura de vidro transparente liso com espessura de 0,004 m fixado na caixa metálica com o uso de silicone. A cobertura transparente teve por função auxiliar no efeito estufa e diminuir perdas convectivas da superfície absorvedora, contendo a camada de ar entre a placa e a cobertura.

A câmara de secagem foi construída a partir de uma estufa de laboratório desativada nas dimensões de 0,765 x 0,640 x 0,797m (largura x comprimento x altura). No interior da câmara foram instaladas prateleiras de aço inoxidável, com crivos de um centímetro de forma a permitir a passagem do ar. Acoplado à câmara de secagem foi instalado um exaustor com a função de forçar a circulação de ar em seu interior e fazer a manutenção desse fluxo de massa de ar,

resultando na evaporação uniforme da umidade do produto de secagem. O exaustor, que foi acionado por energia elétrica, foi construído a partir de um depurador de ar reutilizado com potência equivalente a 152 W. Para proteção do equipamento contra agentes ambientais foi instalada uma chaminé tipo chapéu chinês com dimensões de 0,26 x 0,43 m (diâmetro x altura) feita a partir de uma tampa de leiteira de 60 L.

A secagem das amostras foi realizada em 4 dias seguidos, sendo o período no primeiro dia de 12:00 às 17:00 h, no segundo e terceiro dia de 08:00 às 17:00 h e no quarto dia de 08:00 às 12:00 h, totalizando 72 h. Durante o período noturno, como não há efeito do sol considerou-se como intermitência de 15 h entre 17:00 e 8:00 h.

Durante o processo, a velocidade média do ar de secagem na saída do exaustor da câmara de secagem foi mantida em $1,0 \text{ m s}^{-1}$. A velocidade do ar de secagem do presente trabalho foi utilizada por Mirzaee *et al.* (2010), que descreveram satisfatoriamente a curva de secagem de damasco através de modelo Logarítmico e Kant *et al.* (2016) para a secagem solar indireta de batatas. Para monitorar esse parâmetro utilizou-se o equipamento termo anemômetro digital, marca Minipa e modelo MDA II. A mensuração da temperatura na entrada do coletor (ar ambiente) e saída do coletor (ar de secagem) foi realizada por dois termopares conectados a um milivoltímetro com precisão de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Os dados de radiação solar referentes ao período em que foi realizada a secagem foram obtidos com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), provenientes da estação meteorológica automática de Ecologia Agrícola/RJ, localizada em Seropédica (Fig. 4).

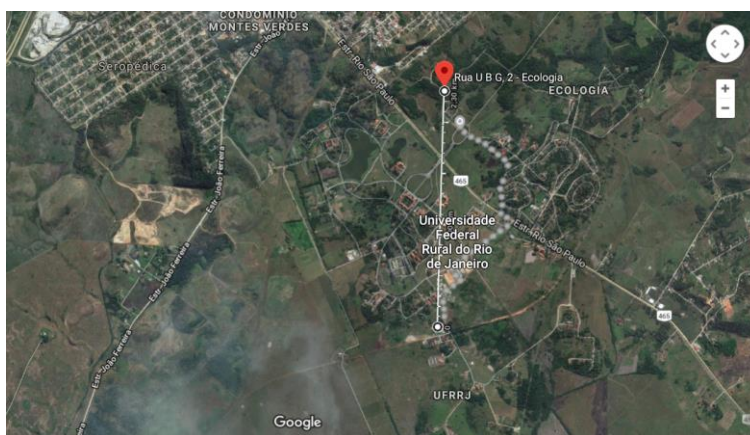


Figura 4 – Distância entre a estação meteorológica de Ecologia Agrícola (ponto vermelho) e o local do experimento (Fonte: Google Maps, 2018)

Observa-se na Fig. 4 que a estação meteorológica automática utilizada como referência para a coleta dos dados de radiação solar está localizada a cerca de 2,30 km da base experimental e, portanto, não foram considerados erros de extrapolação dos dados obtidos pela estação.

Após a coleta dos dados realizou-se a avaliação do desempenho do coletor solar seguindo a metodologia proposta por Silveira (2016). De acordo com o autor, o desempenho do coletor pode ser determinado pela eficiência definida pela Eq. 1 (Duffie e Beckman, 2013).

$$\eta = \frac{E_u}{E_i} \times 100 \quad (1)$$

onde η é a eficiência (%), E_u a energia útil fornecida pelo coletor solar ao longo do período de secagem (W m^{-2}) e E_i a energia solar incidente no coletor solar ao longo do período de secagem (W m^{-2}). A demanda energética do secador pode ser definida como a necessidade de aumento da entalpia do ar de secagem (Silveira, 2016) pelo ganho de energia útil calculada pela Eq. 2 (Kalogirou, 2014).

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \times c_p \times (T_f - T_i) \quad (2)$$

onde \dot{Q}_u é o ganho de energia útil do coletor (W), \dot{m} é a vazão mássica do ar (kg s^{-1}), c_p o calor específico do ar ($\text{J (kg }^\circ\text{C)}^{-1}$), T_f a temperatura de saída do coletor ($^\circ\text{C}$) e T_i a temperatura de entrada do coletor ($^\circ\text{C}$). Para o cálculo da vazão mássica do ar utilizou-se a Eq. 3 (Monteiro *et al.* 2010).

$$\dot{m} = A_s \times \rho_a \times v_a \quad (3)$$

onde A_s é a área da seção transversal do coletor (m^2), ρ_a a massa específica do ar úmido (kg m^{-3}) e v_a a velocidade do ar (m s^{-1}). A massa específica do ar úmido pode ser determinada em função da temperatura média (T_m) entre a entrada e saída do coletor solar, conforme demonstrada na Eq. 4 (Monteiro *et al.* 2010).

$$\rho_a = \frac{353,44}{T_m + 273,15} \quad (4)$$

Em determinado instante t , a eficiência instantânea do coletor solar pode ser descrita por Eq. 5 (Duffie e Beckman, 2013).

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_u}{A_c \times G_t} \times 100 \quad (5)$$

onde η_i é a eficiência instantânea do coletor (%) e G_t a radiação global na superfície inclinada ($W m^{-2}$).

Conforme o trabalho desenvolvido por Silveira (2016), para a avaliação da eficiência do coletor solar levaram-se em consideração que o isolamento do sistema não permite vazamento de ar, o ar que passa pelo coletor comporta-se como um gás ideal à pressão constante, a transmitância-absorbância entre o vidro e a placa absorvedora é desprezível e o valor de irradiância medido em uma superfície plana (estação meteorológica) é o mesmo para a superfície inclinada.

Para o cálculo da eficiência do coletor adotou-se o calor específico do ar de $1.006 J (kg \text{ } ^\circ C)^{-1}$, velocidade do ar de secagem de $1,0 m s^{-1}$ e área da seção transversal do coletor de $2,04 m^2$. Os gráficos foram plotados utilizando o programa computacional Sigmaplot versão 10.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se na Fig. 5 a curva da temperatura do ar na entrada e saída do coletor e a diferença de temperatura entre esses dois pontos em função do período de secagem solar da manga. Considerando 15 h de intermitência diária, entre as 17:00 e 08:00 h, os quatro dias de monitoramento da secagem corresponderam aos períodos de secagem de 0 – 5 h, 20 – 29 h, 44 – 53 h e 68 – 72 h, respectivamente. Vale ressaltar que no primeiro dia de experimento as medições ocorreram apenas no período da tarde, enquanto no último pela manhã.

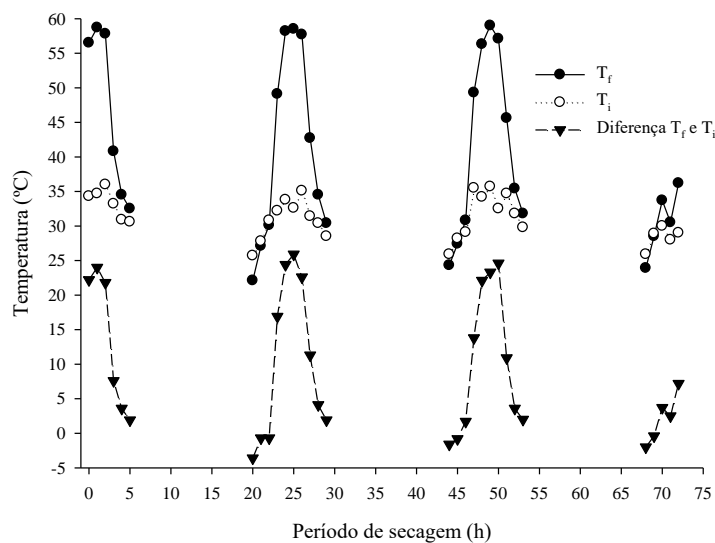


Figura 5 - Curva da Temperatura ($^\circ C$) do ar na entrada (T_i) e saída (T_f) do coletor e a diferença de temperatura entre os dois pontos.

De modo geral, no decorrer dos dias em que foi conduzido o experimento, observou-se aumento de temperatura entre a entrada e a saída do coletor, com exceção das primeiras horas de medição da manhã. Diariamente, as menores temperaturas foram encontradas nas primeiras duas horas (8:00 e 9:00 h), enquanto as temperaturas mais elevadas ocorreram no meio do dia (entre 12:00 e 14:00 h) (Fig. 5). A temperatura máxima obtida na saída do coletor foi de $59,0 \text{ } ^\circ C$, no terceiro dia de experimento às 13:00 h ou às 49 h do período de secagem. Nesse instante, pode-se observar um acréscimo de $23,3 \text{ } ^\circ C$, com relação à temperatura de entrada.

Assim como as maiores temperaturas detectadas na saída do coletor, os maiores acréscimos se concentraram no período de 12:00 às 14:00 h (Fig. 5). O maior incremento de temperatura foi equivalente a $25,9 \text{ } ^\circ C$, às 13:00 h do segundo dia de experimento ou às 25 h do período de secagem. Considerando todo o período, a variação média do incremento da temperatura entre a entrada e a saída do coletor foi de $9,48 \text{ } ^\circ C$. Esse incremento é superior ao encontrado por Shalaby e Bek (2014), que ao investigar a performance de um secador solar indireto observou um acréscimo de $7,5 \text{ } ^\circ C$ entre a temperatura do ar de secagem e a temperatura ambiente. Além disso, a variação térmica está de acordo com a relatada por Dina *et al.* (2015), que avaliaram a efetividade da secagem solar contínua para sementes de cacau

utilizando coletor solar de placa plana. Esses autores constataram aumento entre 9 e 12 °C da temperatura do ar no interior da câmara de secagem em relação a ambiente.

Na Fig. 6 apresenta-se a curva da radiação solar global em função do período de secagem. A radiação solar global média obtidos no INMET durante o período de secagem foi de aproximadamente 361 W m⁻².

É possível notar que, assim como observado na curva da temperatura (Fig. 4), os horários do meio do dia apresentaram valores de radiação mais elevados (Fig. 6). A radiação global máxima, equivalente à 593,67 W m⁻², foi obtida na primeira medição do período de secagem, às 0 h ou 12:00 h do primeiro dia. A radiação mínima, por outro lado, foi equivalente à 73 W m⁻², obtida às 29 h de secagem ou 17:00 h do segundo dia de monitoramento.

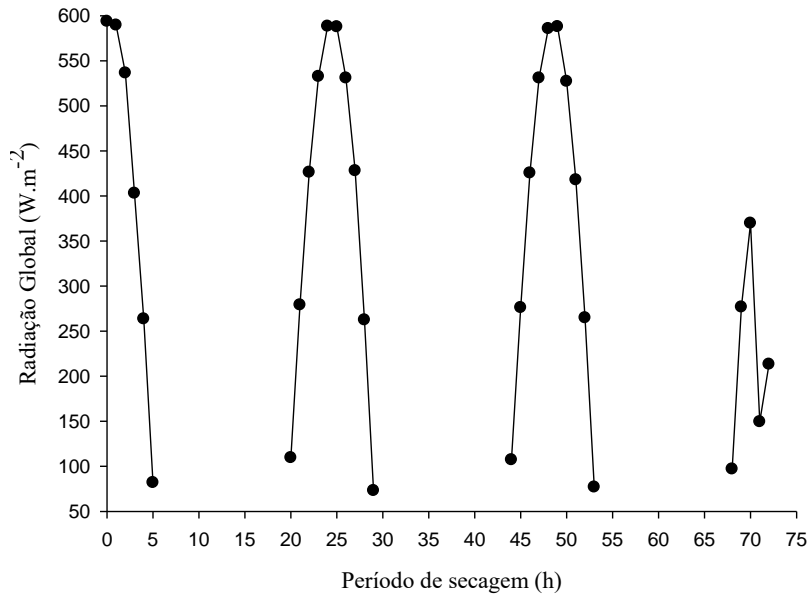


Figura 6 - Curva da radiação global (W m⁻²) para o período de secagem

Na Fig. 7, pode-se observar que diariamente valores crescentes de radiação de 8:00 às 13:00 h, enquanto o trecho decrescente de 13:00 às 17:00 h. Esse comportamento da radiação solar global (G_T) sobre a temperatura de saída do coletor (T_p) pode ser verificado na Fig. 6. Ainda é possível notar que na medida em que a radiação global aumenta e, em seguida, decresce no decorrer do período de secagem, a temperatura de saída do coletor acompanha o seu comportamento.

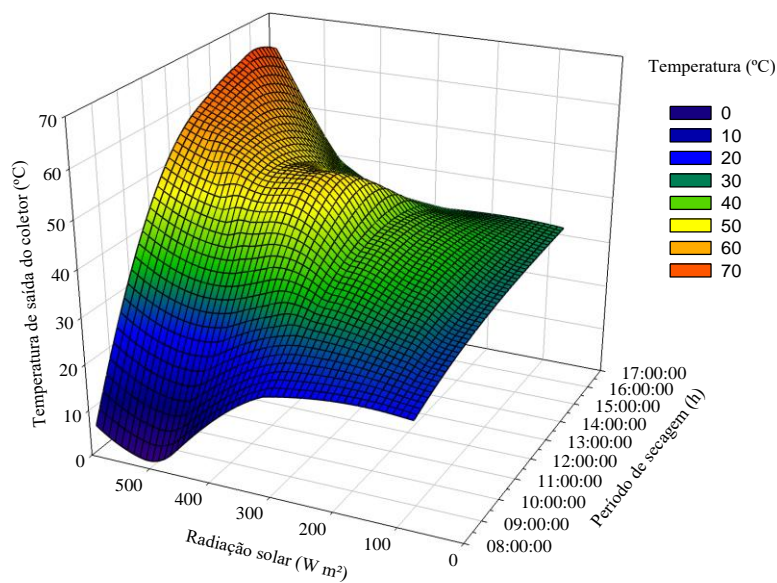


Figura 7 - Comportamento da Temperatura de saída do coletor (°C) e Radiação Global (W m⁻²) com o período de secagem

Realizando uma modelagem entre essas duas variáveis, Silveira (2016) observou que a relação entre a variação da radiação global e a variação da temperatura de secagem apresentou comportamento próximo à função linear. Sendo assim, optou-se no presente estudo por se fazer essa avaliação através de uma análise de regressão linear. Levou-se em consideração que o estudo do comportamento da temperatura de saída do coletor com relação à radiação global para uma dada vazão mássica é de grande relevância para o projeto de coletores solares para secagem, pois pode auxiliar na previsão estimada da temperatura de saída do coletor solar para dias em que os dados meteorológicos sejam conhecidos (Monteiro *et al.* 2010). Apresenta-se na Fig. 8 a regressão linear para a temperatura de saída do coletor (T_f) em função da radiação solar global (G_t) nos trechos crescente e decrescente.

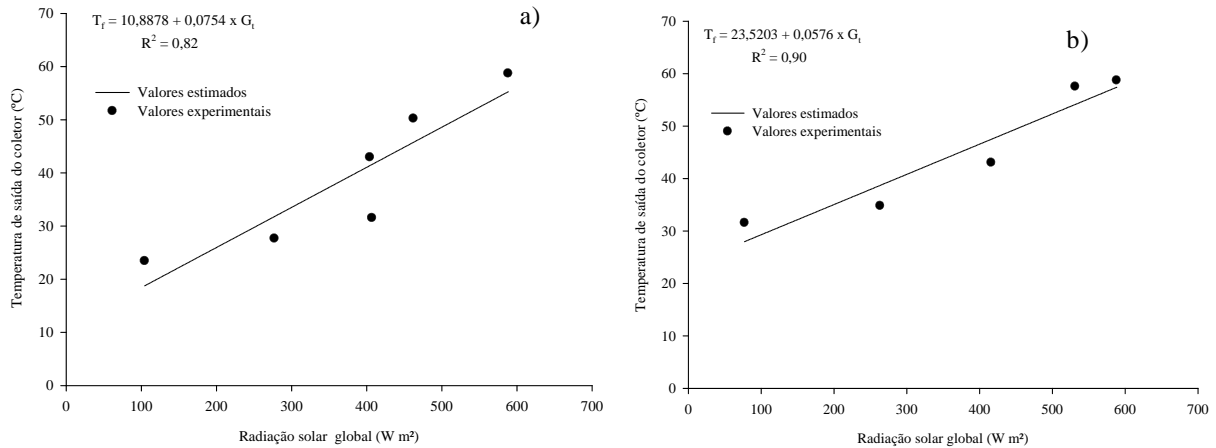


Figura 8 – Regressão para T_f em função G_t , a) trecho crescente e b) trecho decrescente de radiação.

Pelos resultados apresentados na Fig. 8, pode-se inferir que houve relação linear da temperatura de saída do coletor em função da radiação global, em conformidade com o comportamento ilustrado na Fig. 7. As equações exibidas na Fig. 8 podem ser utilizadas em futuras estimativas da temperatura de saída do coletor caso os dados de radiação global e vazão mássica sejam conhecidos. Isso significa que há a possibilidade de se ajustar as condições do ar de secagem previamente ao início do processo, sabendo-se as condições meteorológicas e a demanda do produto de secagem. Para ambos os trechos de radiação, crescente e decrescente, foi observado linearidade na relação entre T_f e G_t , com coeficientes de correlação (R^2) iguais a 0,82 e 0,90, respectivamente. Esses valores de coeficiente de correção foram próximos ao encontrado por Silveira (2016), sendo de 0,98 e 0,91 para o trecho crescente e decrescente, respectivamente. Contudo, pode ser observado que o autor fez a análise com um número maior de observações e, além disso, houve um curto período da secagem em que a relação não foi diretamente proporcional, tendo sido desconsiderado pelo autor.

Observa-se na Fig. 9, similaridade nas curvas de eficiência térmica instantânea do coletor em função do período de secagem para cada dia. De maneira geral, o comportamento da eficiência instantânea do coletor foi crescente até aproximadamente as 14:00 h, seguido de decréscimo até às 16:00 h e aumento até às 17:00 h.

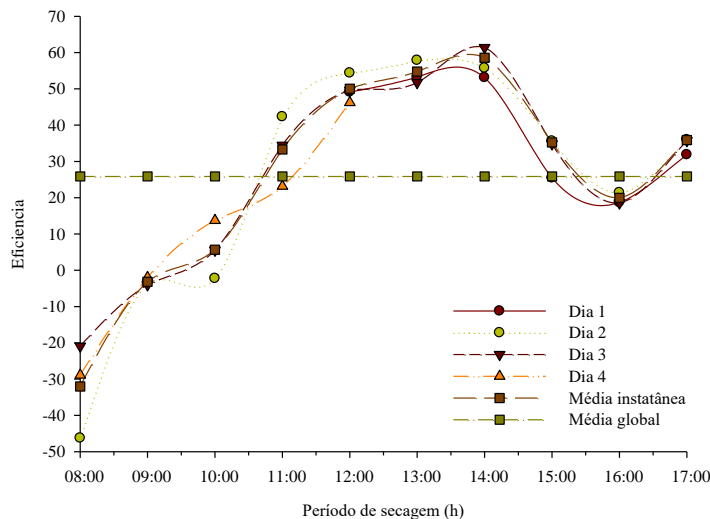


Figura 9 - Comportamento da eficiência do coletor solar em função do período de secagem

Verifica-se que, diariamente no início da manhã a eficiência negativa pode estar relacionado com a queda de temperatura no período noturno, de intermitência da secagem, e provável retenção do ar frio no coletor solar. Conforme verificado na Fig. 5, os valores mínimos de temperatura na saída do coletor foram observados nas primeiras horas da manhã e a tendência foi de elevação seguida de queda de temperatura próximo ao final da tarde. Hedge *et al.* (2015) avaliaram a eficiência para sistema de secagem solar de banana, comparando os resultados para a passagem do fluxo de ar entre a placa absorvedora e a cobertura do coletor (fluxo superior) e para a passagem do fluxo entre a placa absorvedora e uma camada de isolamento (fluxo inferior). Os autores encontraram comportamento semelhante ao observado na Fig. 8, em relação a menores valores no início da manhã, elevação seguida de queda da eficiência durante o dia e nova elevação ao entardecer. Ainda, esses autores explicam que a eficiência retorna a elevar no final da tarde, pois após a radiação decrescer, o calor que foi armazenado no isolamento durante o dia é recuperado, impulsionando a eficiência nesse período. Contudo, para o presente trabalho, seria recomendável a adição de uma fonte de aquecimento complementar para manter os níveis de eficiência do sistema elevados durante a noite, evitando-se a intermitência na secagem.

Estimando-se a eficiência média por hora para os quatro dias de secagem, obteve-se o valor máximo às 14:00 h e mínimo às 08:00 h, sendo estes 58,6 e -32,0%. A eficiência média global obtida foi de 25,9%, inferior ao encontrado por Hedge *et al.* (2015), o que pode ter sido acarretado pela eficiência negativa ocorrida diariamente no início do processo de secagem. Em adição, no trabalho realizado por esses autores, o início da coleta de dados foi às 9:00 h e eficiência máxima atingida de 50% às 16:00 h. No entanto, o valor médio obtido no presente trabalho foi próximo ao encontrado por Fudholi *et al.* (2015), que para a secagem solar de pimenta vermelha com fluxo de massa de ar de 0,07 kg s⁻¹ obtiveram 28% de eficiência do coletor solar, e por Lingayat *et al.* (2017), que ao avaliar a performance de um secador solar indireto para a secagem de banana estimaram a eficiência média do coletor em 31,50%, em condições de radiação solar média de 724 W m⁻². Potdukhe e Thombre (2008) observaram 34% de eficiência de coletor na secagem solar de pimentões e folhas de feno-grego. Vale ressaltar que em seu experimento os autores avaliaram a influência de óleo térmico na secagem solar indireta.

Embora os resultados obtidos estejam de acordo com aqueles encontrados na literatura, Kumar *et al.* (2016), que afirmou em seu trabalho que secadores híbridos solares são a melhor alternativa disponível para rápida secagem solar de produtos, indicou que a eficiência média do coletor desses tipos de secadores é 62,5%. Vale ressaltar que houve perda de energia útil no período inicial da manhã e, como consequência, a eficiência do coletor obtida nesses instantes foi negativa, reduzindo a eficiência média obtida. De acordo com Duffie e Beckman tais perdas ocorrem geralmente no início da manhã ou no entardecer, quando os níveis de radiação não são suficientes para superar as perdas térmicas do coletor para as redondezas e por isso os autores não recomendam que o coletor não seja utilizado nesses períodos.

4. CONCLUSÕES

Diante do exposto, conclui-se que o coletor solar foi eficiente na secagem do produto agrícola manga, com exceção das primeiras horas da manhã. Os valores máximos de eficiência ocorreram no meio do dia, quando a radiação global e a temperatura de saída foram mais elevadas.

Agradecimentos

As autoras expressam agradecem o apoio ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

- Anuário Brasileiro de Fruticultura, 2015. Editora Gazeta Santa Cruz LTDA, 104 p.
- Bachelli, M. L. B., 2010. Sanitização para alface minimamente processada em comparação ao hipoclorito de sódio, Tese de Mestrado, BAE, UNICAMP, Campinas.
- Barbosa, J. R. P., 2011. Estudo da Viabilidade de uso de secadores solares fabricados com sucatas de luminária, Tese de Mestrado, UFRN, Natal.
- Barbosa de Lima, A. G., Delgado, J.M.P.Q., Neto, S.R.F., Franco, C.M.R., 2016. Intermittent Drying: Fundamentals, Modeling and Applications, Springer International Publishing Switzerland.
- Belessiotis, V., Delyannis, E., 2010. Solar drying, Solar Energy, vol. 85, pp. 1665-1691.
- Bezerra, A. M., 2001. Aplicações térmicas da energia solar, Editora Universitária da UFPB, João Pessoa.
- Braga, B., Zatorre, N., Santos, G., Castro, P., 2015. Uma Visão da Agricultura Familiar no Município de Seropédica, Cadernos de Agroecologia, vol. 10, n. 1.
- Carvalho, F. R., Sionek, M. C., 2015. Análise da eficiência de um coletor solar plano, Trabalho de Conclusão de Curso, DAMEC, UTFPR, Curitiba.
- Celestino, S. M. C., 2010. Princípios de secagem de alimentos – Planaltina, Embrapa Cerrados, DF, 51 p.

- Cordeiro, M. H. M., Mizobutsi, G. P., Silva, N. M., Oliveira, M. B., Mota, W. F., Sobral, R. R. S., 2014. Conservação pós-colheita de manga var. Palmer com uso de 1-metilciclopropeno, *Magistra*, Cruz das Almas – BA, vol. 26, n. 2, pp. 103- 114.
- Cornejo, F. E. P., Nogueira, R. I., Wilberg, V. C., 2003. Secagem como método de conservação de frutas, *Embrapa Agroindústria de Alimentos*, Rio de Janeiro.
- Costa, J. B. S., 2010. Obtenção e caracterização de farinha de caju através do uso de um sistema de secagem solar de baixo custo, Tese de Mestrado, UFRN, Natal.
- Dina, S. F., Ambarita, H., Napitupulu, F. H., Kawai, H., 2015. Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 5, pp. 32-40.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- El-Sebaï, A. A., Shalaby, S. M., 2013. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint, *Energy Conversion and Management*, Elsevier, vol. 74, pp. 109-116.
- Falcão Filho, R. S., 2011. Produção de passas de talo de abacaxi pérola por processo osmo-solar, Tese de Mestrado, UFPB, João Pessoa.
- FAO, Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, 2009. *Perspectivas sobre a agricultura*.
- Freitas Neto, F. R., 2015. Estudo de um secador híbrido (solar-elétrico) para desidratação de frutas, Tese de Mestrado, Centro de Tecnologia, UFRN, Natal.
- Fudholi, A., Sopian, K., Bakhtyar, B., Gabbasa, M., Othman, M. Y., Ruslan, M. H., 2015. Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malasia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 51, pp. 1191-1204.
- Genuncio, G.C., 2009. Crescimento e produção do tomateiro em sistema de cultivo a campo, hidropônico e fertirrigado, sob diferentes doses de Nitrogênio e Potássio, Tese de Doutorado, IA, UFRRJ, Seropédica.
- GOOGLE EARTH-MAPAS. [Http://mapas.google.com](http://mapas.google.com). Consulta realizada em 18/01/2018.
- Guimarães, L. D. D., 2010. Agroecologia e educação agrícola: alternativa sustentável para agricultura familiar no município de Seropédica, Tese de Mestrado, IA, UFRRJ, Seropédica.
- Hedge, V. N., Hosur, V. S., Rathod, S. K., Harsoor, P. A., Narayana, K. B., 2015. Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana, *Energy, Sustainability and Society*, pp. 5-23.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012. *Produção Agrícola Municipal*.
- Imre, L., 2015. Solar Drying, *Handbook of industrial drying*, 4th ed., Boca Raton: CRC Press, chap 14, pp. 303-350.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, 2017. Seção de Armazenamento de Dados Meteorológicos (SADMET), Estação Meteorológica Automática de Ecologia Agrícola/RJ.
- Kalagirou, S. A., 2014. *Solar energy engineering: processes and systems*, 2nd ed., Oxford: Academic Press.
- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Kumarm A., Jain, A., 2016. Thermal energy storage based solar drying systems: A review, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 34, pp. 86-99.
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., Khatak, P., 2016. Progress in solar dryers for drying various commodities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 346-360.
- Lingayat, A., Chandramohan V.P., Raju, V.R.K., 2017. Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying, *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 409-416.
- Machado, A. V., Oliveira, E. L., Santos, E. S., Oliveira, J. A., Freitas, L. M., 2011. Avaliação de um secador solar sob convecção forçada para a secagem do pedúnculo de caju, *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, vol. 6, pp. 01-07.
- Marques, L. G., 2008. Liofilização de frutas tropicais, Tese de Doutorado, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, UFSCar, São Carlos.
- Meneghetti, V. L., Aosani, E., Rocha, J. C., Oliveira, M., Elias, M. C., Pohndorf, R. S., 2012. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 16, n. 10, pp.1115-1120.
- Mirzaee, E., Rafiee, S., Keyhani, A., 2010. Evaluation and Selection of Thin-layer Models for Drying Kinetics of Apricot (cv.NASIRY), Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran.
- Monteiro, I., Blanco, J., Miranda, T., Rojas, S., Celma, A. R., 2010. Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products, *Energy Conversion and Management*, Elsevier, vol. 51, n. 7, pp. 1510-1521.
- Moraes, S.O.; Negrini, A.C.A.; Precoppe, M.F.M.; Meira, M.L.R., 2004. *Secador Solar de Baixo Custo para Frutas e Hortalças*, São Paulo: ESALQ-USP, pp14.
- Mustayen, A., Mekhilef, S., Saidur, R., 2014. Performance study of different solar dryers: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 463-70.
- OCDE-FAO, Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2015. *Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024*.
- Potdukhe, P., Thombre, S., 2008. Development of a new type of solar dryer: its mathematical modelling and experimental evaluation, *International Journal of Energy Research*, vol. 32, pp. 765-82.
- Shalaby, S. M., Bek, M. A., 2014. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium, *Energy Conversion and Management*, vol. 83, pp. 1-8.

- SEAD, Secretaria Especial de Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário, 2017. Plano Safra da Agricultura Familiar 2017/2020.
- SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2015. Agronegócio – Fruticultura, Boletim de Inteligência Outubro/2015.
- SIGMAPLOT. For Windows, version 11.0, Systat software, 2008.
- Silveira, L. R., 2016. Modelagem de um secador solar de produtos agrícolas com sistema de armazenagem de energia térmica, Tese de Doutorado, ESALQ, USP, Piracicaba.
- Spricigo, P. C., 2016. Perdas Pós-Colheita de Frutas e Hortalças, Embrapa Instrumentação.
- Sreekumar, A., 2010. Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables, Energy Conversion and Management, vol. 51, pp. 2230-2238.

EFFICIENCY OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR COUPLED IN HYBRID DRYER FOR DRYING OF MANGO

Abstract. *The main component in a solar dryer is the solar collector, which captures energy directly from the sun to be used by the drying system. Working as a primary energy source, the collector performs the role of absorbing the solar radiation and converting it into thermal energy, which is used by the dryer. When regarding this type of application, the flat plate collector presents several advantages, such as, it absorbs energy directly from the sun, it does not need any mechanical devices to keep it upright to collect solar rays and it is cheaper compared to other types. However, some important variables can affect the performance of a solar collector in product drying, including the characteristics necessary for the inlet air of the drying chamber (temperature), air mass flow and the amount of energy required, besides its instantaneous efficiency. This study aimed to evaluate the efficiency of a flat plate solar collector in the composition of a hybrid system applied to drying of agricultural products. It was conducted in the autumn and mango (*Mangifera indica* L.) was used as the raw material for the drying, which totaled 72 h with 15 h intermittence periods. During the drying period, the solar collector was monitored according to the inlet and outlet temperature, drying air speed and global radiation. For the experimental conditions, an average instantaneous efficiency of 25.9% was obtained, achieving a maximum of 58.6%. The curve of the collector efficiency as a function of time showed that the minimal values were observed in the early morning while the efficiency peaks occurred in the middle of the day, during a period of higher solar radiation incidence.*

Key words: *Thermal performance, Instantaneous efficiency, Solar Energy.*