

SECAGEM SOLAR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

Matheus Prado (UFSJ) - matheus.p1707@gmail.com

André Filipe Coelho El Yark (UFSJ) - andreelyark@hotmail.com

Andrea Teixeira Charbel (UFSJ) - andreacharbel@gmail.com

Ayeska Michelly Ferreira de Oliveira (UFSJ) - ferreira.ayeska@gmail.com

Izabela Pires Couto (UFSJ) - piresizabela@outlook.com.br

João Paulo de Oliveira Leite (UFSJ) - leitejoaopaulodeoliveira@gmail.com

Resumo:

Este trabalho teve como objetivo analisar a cinética da secagem solar de resíduos orgânicos obtidos através do Restaurante Universitário da Universidade Federal de São João del-Rei. Para a obtenção das curvas características do processo de secagem os experimentos foram feitos em secador solar do tipo direto com convecção natural no mês de novembro. A temperatura ambiente média foi de 39,9° C e a radiação média, de 1097 W/m². Foram medidos também a velocidade e a temperatura do ar na entrada e saída do secador e o peso das amostras em intervalos regulares de tempo para a determinação da umidade em cada instante. A umidade inicial média do resíduo foi de 93,5% sendo reduzida a 10% num intervalo de 155 min. Foi identificado um período constante com taxa média de secagem de 0,14 (g/gss)/min que é reduzida para uma média de 0,05 (g/gss)/min no período decrescente. A temperatura na saída do secador atingiu um máximo de 89,6° C. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Page, Page Modificado e Henderson e concluiu-se que o modelo matemático de Page Modificado é o mais adequado, de acordo com os valores encontrados.

Palavras-chave: *Secagem Solar, Resíduos Sólidos Urbanos, Cinética de secagem.*

Área temática: *Conversão Térmica com coletores planos*

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

SECAGEM SOLAR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

André El Yark – andreelyark@hotmail.com

Ayeska Ferreira – ferreira.ayeska@gmail.com

Izabela Pires – piresizabela@outlook.com.br

João Paulo Leite – leitejoapaulodeoliveira@gmail.com

Matheus Prado Silva – matheus.p1707@gmail.com

Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC

Andrea Charbel – andreacharbel@ufsj.edu.br

Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos - DCTEF

Resumo: *Este trabalho teve como objetivo analisar a cinética da secagem solar de resíduos orgânicos obtidos através do Restaurante Universitário da Universidade Federal de São João del-Rei. Para a obtenção das curvas características do processo de secagem os experimentos foram feitos em secador solar do tipo direto com convecção natural no mês de novembro. A temperatura ambiente média foi de 39,9° C e a irradiação média, de 1097 W/m². Foram medidos também a velocidade e a temperatura do ar na entrada e saída do secador e o peso das amostras em intervalos regulares de tempo para a determinação da umidade em cada instante. A umidade inicial média do resíduo foi de 93,5% sendo reduzida a 10% num intervalo de 155 min. Foi identificado um período constante com taxa média de secagem de 0,14 (g/g_{ss})/min que é reduzida para uma média de 0,05 (g/g_{ss})/min no período decrescente. A temperatura na saída do secador atingiu um máximo de 89,6° C. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Page, Page Modificado e Henderson e concluiu-se que o modelo matemático de Page Modificado é o mais adequado, de acordo com os valores encontrados.*

Palavras-chave: *Secagem Solar, Resíduos Sólidos, Cinética de secagem.*

1. INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que um dos grandes desafios do mundo globalizado e moderno é conseguir conciliar o consumo com a sustentabilidade, principalmente em um cenário tecnológico, com uma sociedade consumista, pouco politizada e educada a respeito das práticas de cuidado com o ambiente e cidades. Nesse contexto, os resíduos sólidos urbanos, ou lixo, constituem um problema que deve ainda ser equacionado.

O lixo está diretamente associado ao modelo de desenvolvimento mundial, quanto mais se consome, mais lixo é produzido e é preciso direcionar esse lixo para algum lugar. Aterros sanitários e os lixões que, apesar de proibidos, ainda existem, são o destino de, basicamente, a maioria dos resíduos sólidos urbanos e os municípios devem lidar com problemas que se agravam devido ao crescente volume a ser depositado juntamente às questões ambientais e de higiene e saúde. Parte desses resíduos pode ser aproveitada através da reciclagem como também se tornar fonte de energia que, consequentemente, diminuiria o volume de lixo e supriria outras necessidades. O aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, desde que utilize rotas tecnológicas apropriadas é uma alternativa ambientalmente correta de tratamento desses resíduos e uma oportunidade de negócios (Silva, 2013).

Embora não se trate de potencial com dimensão suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica do país no longo prazo, a geração de eletricidade a partir de resíduos sólidos urbanos é, sem dúvida, elemento importante de uma estratégia regional ou local e, portanto, não deve ser desconsiderada (EPE, 2008).

Segundo Vieira (2012), ao lado dos evidentes benefícios ambientais, sanitários e sociais que proporciona, o aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos já apresenta, hoje, alternativas tecnológicas maduras. Incineração e processamento biológico são, essencialmente, as duas formas adotadas para se produzir energia elétrica com a quase total eliminação da necessidade de aterros sanitários. Segundo Eggersmann (2015) a produção de combustíveis derivados de resíduos (CDR) é possível e a partir do enriquecimento com outros materiais pode-se obter compostos de elevado poder calorífico. Joselin e Krishnan (2016) afirmam que a energia da biomassa pode contribuir para o desenvolvimento social e econômico, sendo identificada como uma alternativa para a futura demanda de energia. Os autores, entendendo a necessidade de explorar e quantificar ambientalmente os prós e os contras desta fonte de energia apresentam uma revisão impulsionada pelo rápido desenvolvimento de técnicas de conversão de biomassa e aumento contínuo da geração de energia de biomassa.

Brand (2011) relata que a presença de umidade dificulta a queima e gera poluição ambiental devido ao aumento do volume de produtos de combustão e de material particulado. Assim, para o aproveitamento do potencial dos resíduos sólidos orgânicos pela queima ou combustão, a secagem é etapa primordial para a eficiência do processo uma vez que, quanto menor o teor de umidade, maior a energia que pode ser liberada pelo combustível.

O processo de secagem permite, ainda, devido à redução da concentração de água, diminuir e estabilizar as reações indesejáveis no produto orgânico. Tal fato leva à diminuição do odor, ao menor risco de contato com bactérias e à possibilidade de melhores disposição e destinação do lixo orgânico (Kamil e Sacilik, 2007).

Os secadores solares, basicamente, podem ser classificados em diretos, indiretos e mistos, cada um deles podendo operar em diversas condições como convecção natural ou forçada, com sistema de ventilação e/ou exaustão, controle de temperatura, etc. Singh *et al.* (2018) faz uma revisão e discute várias pesquisas realizadas nos últimos anos nesta área de secagem solar. De acordo com César (2020), no secador indireto o ar entra primeiramente em uma unidade coletora e absorvedora de irradiação solar, onde é aquecido para, posteriormente, entrar na câmara de secagem e, durante o escoamento, absorver a umidade do produto. Já o secador direto, é formado de um único conjunto que desempenha ambos os papéis. Assim, o ar, no mesmo local em que é aquecido pela irradiação solar, recebe a umidade retirada dos produtos. O secador misto é uma fusão dos dois tipos (Almeida *et al.* 2016).

Em algumas aplicações, a energia elétrica também está sendo usada em aquecedores auxiliares tanto para acelerar o processo de secagem como para garantir sua continuidade durante as horas sem brilho solar. Chandrasekar *et al.* (2018) utilizou uma unidade condensadora A/C, que é colocada ao ar livre, a fim de eliminar o uso de eletricidade nos secadores solares indiretos.

Shamiq *et al.* (2018) desenvolveu um secador composto por coletor solar, câmara de secagem contendo bandejas em diversas alturas e um soprador. Testes foram conduzidos para comparar as condições quando o ar é distribuído apenas através do fundo e quando é distribuído para cada bandeja separadamente. Foram avaliados a eficiência do secador, a taxa de secagem, o teor de umidade inicial e final de ervilhas, assim como a temperatura alcançada em cada bandeja nas duas condições. O autor verificou uma eficiência média de 20% e também que a temperatura do ar de secagem é o fator mais importante durante o processo, seguida pela velocidade e umidade do ar, no que diz respeito ao aumento da taxa de secagem.

Lati *et al.* (2017) estudou o efeito da secagem solar na qualidade das fatias secas de batata buscando oferecer uma alternativa prática aos meios convencionais que hoje utilizam a câmara fria. Os parâmetros estudados incluíram a mudança total de cor, açúcares redutores e pH. Os resultados dos testes de secagem, utilizando um sistema solar misto, levaram à escolha do tratamento sob temperatura controlada do ar de 50°C com fluxo de ar de 1 m/s. A essa temperatura, os parâmetros de qualidade medidos confirmaram que o produto final poderia preservar sua cor clara, reduzindo o açúcar e o pH.

A modelagem matemática de sistemas de secagem solar tem o objetivo principal de prever o tempo de secagem necessário para um determinado produto, tipo de secador e ambiente. Modelos de secagem teóricos considerando a difusão Fickiana e semi-empíricos, são frequentemente utilizados para ajuste dos dados experimentais. A modelagem computacional (por exemplo, dinâmica de fluidos computacional ou CFD), nos modos bidimensional e tridimensional, traz “insights” sobre problemas de secagem solar específicos da geometria, como padrões de fluxo de ar e distribuição de temperatura dentro da câmara de secagem. Tanto a modelagem matemática quanto a computacional foram recentemente utilizadas em inovações de secagem solar, como armazenamento térmico, uso de dessecantes durante a secagem e controle dinâmico de feedback do processo de secagem (Milczarek e Alleyne, 2017)

Nesse contexto de investigação do processo de secagem solar para diversos fins, o objetivo deste trabalho foi a secagem solar de resíduos sólidos orgânicos e verificar a viabilidade deste processo como uma forma de produção de insumo energético utilizável em vários setores, a partir de uma fonte energética sustentável. A adequação do secador do tipo direto foi considerada e o processo de secagem foi avaliado quanto à variação da taxa de secagem em relação ao tempo e à umidade do produto, permitindo verificar as características da umidade contida neste tipo de resíduo.

2. METODOLOGIA

2.1. Obtenção da amostra e determinação da umidade inicial

As amostras foram coletadas no Restaurante Universitário da Universidade de São João del-Rei - UFSJ, no Campus Santo Antônio, na cidade de São João del-Rei, MG. A amostragem foi feita após quartejamento de 10 litros de resíduos orgânicos que, em sua maioria, eram cascas de frutas e vegetais. O processo foi repetido até a obtenção de uma amostra final de 50g. O pré-processamento foi feito em liquidificador a fim de uniformizar e aumentar a área superficial de troca de calor, favorecendo o processo de secagem.

Para a determinação da umidade inicial, quatro amostras, de peso médio igual a 4,63g, foram levadas à estufa (Nova Ética, modelo EST.420.0102) por 24 horas, à temperatura de 105 °C, segundo as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (Lutz, 1985). Ao final do procedimento, foi possível obter as médias das massas seca (0,2995 g) e de água evaporada (4,326g), resultando na umidade média dos resíduos igual a 93,49%.

2.2. Secagem solar

Os experimentos foram realizados no mês de novembro na cidade de São João del-Rei, MG – Brasil (-21,13; -49,31). O secador utilizado, plano de exposição direta, possui as dimensões de (1m x1m x 0,2m) (Largura x Profundidade x Altura), com área de incidência solar de 1m² e volume interno de 0,2m³. O equipamento possui 6 aberturas de,

aproximadamente, 2 cm de diâmetro, 3 delas na lateral frontal, por onde o ar entra e outras 3 no lado oposto, que permite a saída do ar carregando a umidade retirada do produto.

Amostras em triplicata com peso médio de 13g foram colocadas no interior do secador sobre uma bandeja telada própria para sua disposição e submetidas à secagem por convecção natural. Nos primeiros trinta minutos as amostras foram pesadas a cada 5 min. Após este tempo o intervalo entre as pesagens foi de 10 minutos. Juntamente com as pesagens foram medidas as velocidades de entrada e saída do ar do secador, as temperaturas do ar na entrada e na saída, além da temperatura ambiente e da irradiação solar. As características de cada um dos instrumentos usados para a medição estão na Tab. 1.

Tabela 1: Características dos instrumentos de medição.

Instrumento	Marca e Modelo	Alcance	Precisão
Medidor de Irradiação Solar	Solar Power Meter SM206	0,1W/m ² à 3999W/m ²	±10W/m ²
Anemômetro	Benetech GM8903	0-30m/s	±3% ±0,1m/s
Termo Higrômetro Digital	Minipa MTH-1362W	-50°C à 1000°C	±0,1% ±1°C
Termopar	Tipo K	-50°C à 400°C	±0,75% ±2,5°C
Balança Digital	Shimadzu UX420H	0,02g à 420g	±0,01g

2.3 Modelagem da cinética de secagem

Com os dados medidos foi possível determinar as curvas características do processo: (umidade x tempo), (taxa de secagem x tempo) e (taxa de secagem x umidade). A umidade foi representada em termos de Razão de Umidade (RU). Usando o software Origin®, três modelos matemáticos semi-empíricos foram usados para ajuste dos dados experimentais, sendo eles: o modelo de Page, Eq.(1), Page modificado, Eq.(2) e Henderson, Eq.(3). A razão de umidade, expressa na Eq.(4), é a relação entre a umidade instantânea (X) e os valores da umidade de equilíbrio (X_{eq}) e umidade inicial (X_0) de cada amostra. A umidade de equilíbrio foi considerada como o valor de umidade que permaneceu constante em repetidas pesagens. O valor utilizado para análise foi a média da razão de umidade das três amostras, visto que o comportamento destas foi similar.

$$RU = e^{-kt} \quad (1)$$

$$RU = e^{-kt^n} \quad (2)$$

$$RU = Ae^{-kt} \quad (3)$$

$$RU = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os experimentos indicaram temperatura ambiente média de 38,86° C e níveis de irradiação média e máxima de 1097,37 W/m² e 1400 W/m², respectivamente.

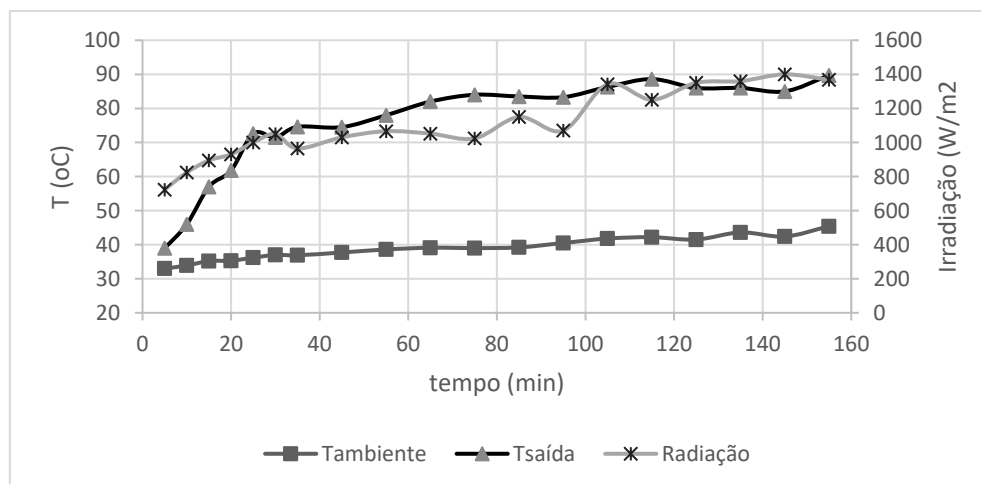


Figura 1 – Variação das temperaturas e irradiação ao longo do processo

A Fig. 1 mostra a variação da temperatura ambiente e na saída do secador ao longo do processo. A diferença alcançou o valor máximo de $46,4^{\circ}\text{C}$ aos 115 min do processo e, na média, o aumento da temperatura foi de 40°C . A temperatura máxima na saída do secador foi de $89,7^{\circ}\text{C}$ ao final do processo. Tais valores indicam a capacidade de aquecimento do ar de secagem pelo secador e sua adequação ao processo.

A Fig. 2 mostra uma alta taxa de secagem ($0,32\text{ g/min}$) logo no início do processo, reduzindo para $0,21\text{ g/min}$ aos 25 min, quando a temperatura indicada era de $72,60^{\circ}\text{C}$ e permanecendo na faixa de $0,14\text{ g/min}$ no período de 30 a 80 min, quando a média de temperatura era igual a $77,43^{\circ}\text{C}$. A partir deste ponto tem-se um período decrescente da taxa de secagem apesar da maior temperatura média do ar na saída do secador, igual a $86,05^{\circ}\text{C}$.

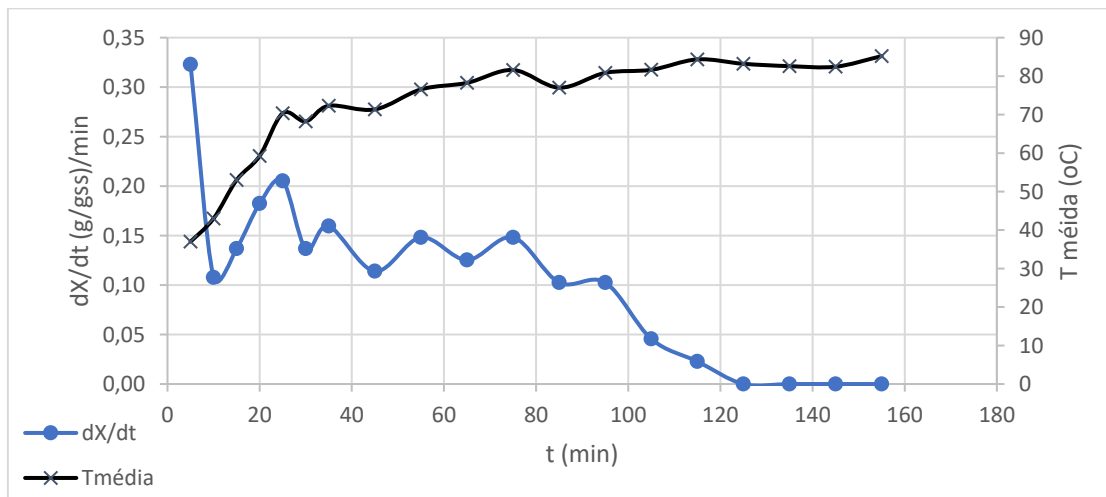


Figura 2 – Variação da taxa de secagem e temperatura média no interior do secador ao longo do tempo

A taxa de secagem indica a velocidade com a qual o produto perde umidade e está condicionada à matriz do produto, umidade relativa, temperatura e velocidade do ar. De acordo com a Fig. 2, a velocidade diminui com o passar do tempo mesmo com o aumento da radiação solar e da temperatura do ar de secagem.

A taxa de secagem também pode ser analisada a partir da sua variação com o teor de umidade do produto, que está representada na Fig. 3.

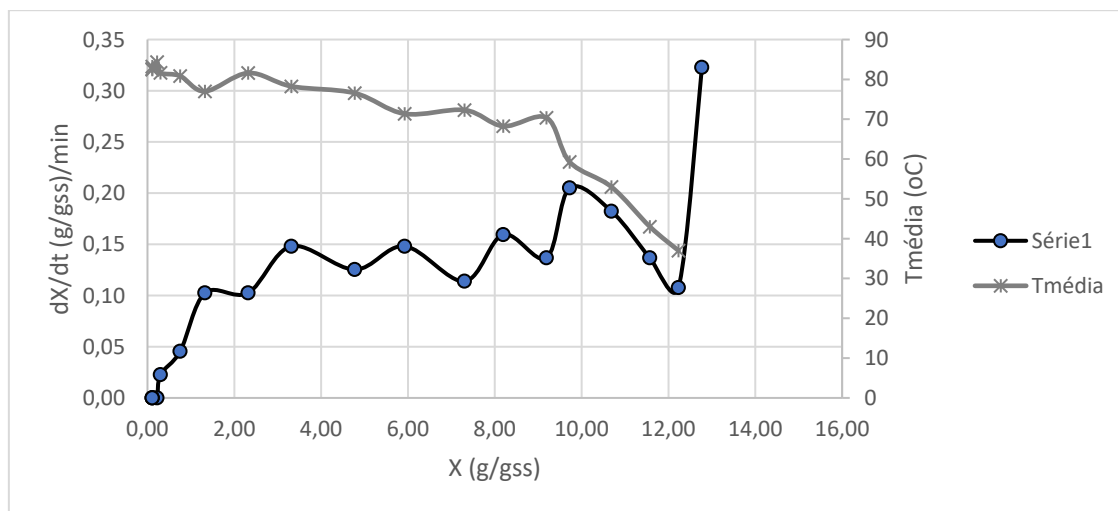


Figura 3: Análise(tendência) da cinética de secagem em relação ao tempo

A partir deste comportamento pode-se identificar a disposição da umidade no interior do produto quanto à sua pressão de vapor e forças intermoleculares. Até o valor da umidade igual a $10,0\text{ g/gss}$, tem-se um período instável, chamado período de indução ou ajuste. A partir daí pode ser identificado um período aproximadamente constante onde a taxa de secagem oscila em torno do valor médio de $0,14\text{ (g/gss)/min}$. Nesse período é eliminada a umidade não ligada, que apresenta baixa resistência à sua retirada, uma vez que tem pressão de vapor igual ou pouco menor que a da água existente no ar de secagem. A partir do valor de umidade igual a $3,32\text{ g/gss}$, dá-se início ao período decrescente, com taxa de secagem média de $0,05\text{ (g/gss)/min}$. O valor da umidade que corresponde ao ponto de inflexão entre período constante e período decrescente é conhecido como umidade crítica. Tal valor, no entanto, varia com as condições do processo. O

período decrescente é mais lento devido à menor pressão de vapor da umidade que está sendo retirada, denominada umidade ligada. Ocorre, assim, um aumento na resistência do movimento da água do interior para a superfície do produto, cujo mecanismo de saída é, predominantemente, a difusão no interior do produto. A taxa de perda de umidade continua decrescendo até a umidade de equilíbrio ser atingida.

A Fig. 4 representa a variação da umidade da amostra ao longo do processo. O tempo médio para a redução da umidade dos resíduos, de 93,47% até 10% foi de 155 minutos. Assim, pode-se notar redução considerável na massa úmida no produto o que favorece sua aplicação como fonte de energia.

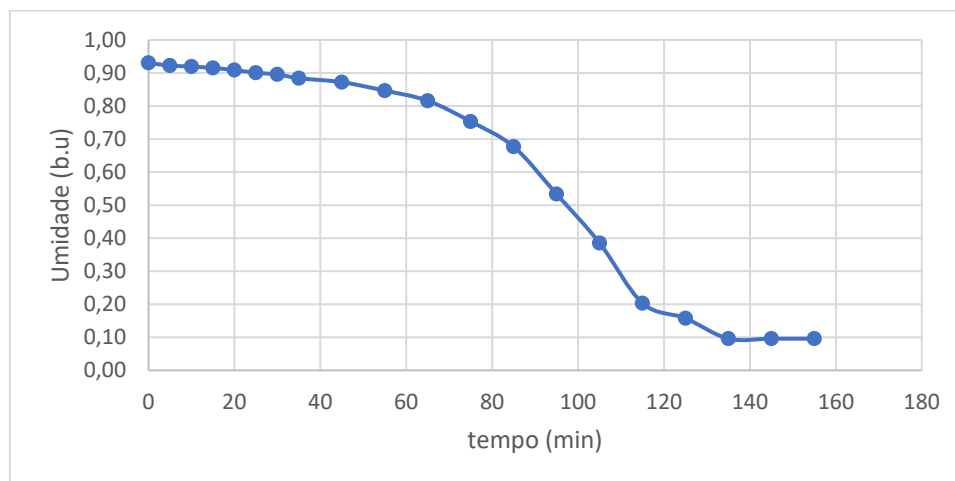


Figura 4: Umidade (bu) média em função do tempo

A fim de prever o tempo necessário de processo para atingir determinada umidade no produto, a modelagem matemática realizada com os dados obtidos, representada na Fig. 5, mostrou que, de acordo com o coeficiente de ajuste, r^2 (Tab. 2) os três modelos testados são adequados para descrever o processo, sendo o modelo de Page modificado o mais adequado de acordo com os valores encontrados de coeficiente de determinação (r^2) e o erro médio estimado (SE).

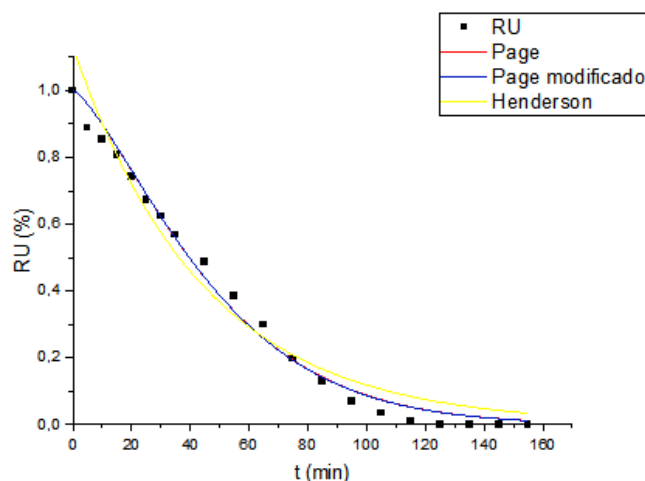


Figura 5: Modelos matemáticos ajustados a média dos valores experimentais

Tabela 2: Parâmetros ajustados dos modelos

Modelo	Parâmetros	r^2	SE
Page	$k=0,00471$ $n=1,35632$	0,99089	0,00122
Page modificado	$k=0,01926$ $n=1,3602$	0,9909	0,00122
Henderson	$k=0,02257$ $a=1,13058$	0,98806	0,00108

4. CONCLUSÕES

Conclui-se do estudo que o secador direto foi adequado para o processo de secagem solar uma vez que o aumento da temperatura, em relação à temperatura ambiente, foi em média de 40° C e tendo em vista que as temperaturas utilizadas normalmente em processos de secagem variam de 50° C a 90° C, aproximadamente. Foi possível a secagem dos resíduos, que tiveram sua umidade reduzida de 93,5% a 10% em 155 min através da energia solar que incidiu sobre o secador numa taxa média de 1097 W/m². O modelo de Page modificado foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, com coeficiente de correlação r² de 0,9909. A adequação do resíduo seco como insumo energético deve ser avaliada, ainda, através da determinação do seu poder calorífico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e ao Departamento de Ciências Térmicas e Fluidos (DCTEF) pela estrutura e equipamentos disponibilizados.

REFERÊNCIAS

- Almeida, I. B.; Lima, M. A. A.; Souza, L. G. M. Desenvolvimento de secador solar construído a partir de material reciclado, HOLOS, v. 4, n. 32, pp. 197-205, 2016.
- Lingayat, A., Chandramohan, V., & Raju, V. (2017). Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying. Energy Procedia, 109, 409-416.
- Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.). Journal of Food Engineering, 79(1), 23-30.
- César, L. E., Lilia, C. A., Octavio, G., Isaac, P. F., & Rogelio, B. O. (2020). Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (Solanum lycopersicum). Renewable Energy, 147, 845-855.
- P. Singh, V. Shrivastava, and A. Kumar, "Recent developments in greenhouse solar drying: A review," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 82, no. April 2017, pp. 3250–3262, 2018.
- M. Chandrasekar, T. Senthilkumar, B. Kumaragurubaran, and J. P. Fernandes, "Experimental investigation on a solar dryer integrated with condenser unit of split air conditioner (A/C) for enhancing drying rate," Renew. Energy, vol. 122, pp. 375–381, 2018.
- S. M. Shamiq, P. Sudhakar, and M. Cheralathan, "Experimental study of a solar dryer with different flow patterns of air in the drying chamber," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 402, p. 012014, 2018.
- M. Lati et al., "Effect of solar drying on the quality of potato," Int. J. Sci. Res. Eng. Technol. - IJSET, vol. 5, no. January, pp. 1–4, 2017.
- R. R. Milczarek and F. S. Alleyne, "Mathematical and Computational Modeling Simulation of Solar Drying Systems," in Solar Drying Technology, Green Energy and Technology, 2017, pp. 357–379.
- G. M. Joselin Herbert and A. Unni Krishnan, "Quantifying environmental performance of biomass energy," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 59, pp. 292–308, 2016.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos. 3 ed. São Paulo: IAL, 1985. v. 1.
- R. R. Milczarek and F. S. Alleyne, "Mathematical and Computational Modeling Simulation of Solar Drying Systems," in Solar Drying Technology, Green Energy and Technology, 2017, pp. 357–379.

Solar Drying of Organic Solid Residue From University Restaurant of the Federal University of São João del Rei

Abstract: This work aimed to analyze the kinetics of solar drying of organic waste obtained from the University Restaurant of the Federal University of São João del-Rei. In order to obtain the characteristic curves of the drying process, the experiments were carried out in a natural direct convection solar dryer in November. The average ambient temperature was 39.9° C and the average radiation 1097 W / m². The velocity and temperature of the inlet and outlet of the dryer and the weight of the samples at regular time intervals for moisture determination at each moment were also measured. The average initial moisture of the residue was 93.5% being reduced to 10% within 155 min. A constant period with an average drying rate of 0.14 (g / gss) / min was identified which is reduced to an average of 0.05 (g / gss) / min in the decreasing period. The temperature at the dryer outlet reached a maximum of 89.6 ° C. The experimental data were adjusted to Page, Modified Page and Henderson models and it was concluded that the Modified Page mathematical model is the most appropriate according to the values.

Key words: Solar Drying, Urban Solid Waste, Drying Kinetics.