

# ANÁLISE DA MODELAGEM CINÉTICA DA SECAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Cinthia Sany França Xavier <sup>1</sup>  
Fernando Fernandes Vieira <sup>2</sup>

## RESUMO

A utilização de adsorventes de baixo custo é reconhecida como um método eficaz e econômico para o tratamento de efluentes. Este trabalho teve como objetivo determinar e modelar as curvas de secagem do bagaço da cana-de-açúcar em estufa com recirculação de ar. Para avaliar o seu comportamento foi realizado o estudo da cinética de secagem onde o material foi disposto em bandejas de aço inox e submetido à secagem com temperaturas variando entre 60 e 80°C. Foram atingidas umidades finais de 0,07 e 0,032 (base seca), respectivamente, em um tempo de secagem de 24h. Posteriormente, para descrever a cinética de secagem, os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos frequentemente utilizados: Midilli, Newton, Logarítmico e Page. Baseado nos resultados encontrados, conclui-se que dentre os modelos ajustados aos dados experimentais, o modelo de Page foi o escolhido para representar o fenômeno de secagem para o material em estudo, de acordo com o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e teste F onde verificou-se que o modelo é estatisticamente significativo e preditivo.

**Palavras-chave:** Bagaço de cana-de-açúcar, Secagem, Cinética de secagem, Modelagem Matemática.

## INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, originária da Indonésia e Nova Guiné, é uma gramínea pertencente à família das Poáceas do gênero *Saccharum*. Compõe-se essencialmente de duas partes: uma subterrânea constituída pelos rizomas e pelas raízes e, outra, aérea, pelo colmo, folhas e flores. O colmo é constituído pelos gomos, nós e pelas gemas e seu tecido fundamental é chamado de parênquima que é onde se encontram as células com a principal função de armazenar o líquido açucarado da planta (CARVALHO, 2014).

Segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA, 2019), uma tonelada de cana-de-açúcar produz em média 280 kg de bagaço. No processamento da cana-de-açúcar, após a moagem, há a geração do bagaço onde parte é queimado para a geração de energia para a própria usina. No entanto, devido a sua composição (50% celulose, 27% hemicelulose e 23% lignina) o bagaço da cana-de-açúcar tem-se apresentado como um ótimo adsorvente de corante têxteis (CARVALHO, 2014).

---

<sup>1</sup> Mestrando do Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, [cinthiasany@gmail.com](mailto:cinthiasany@gmail.com);

<sup>2</sup> Professor orientador: Doutor, Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, [fernanvieira@gmail.com](mailto:fernanvieira@gmail.com).

A secagem de matérias biodegradáveis, diminui a disponibilidade de água, no material, para evitar as reações de decomposição, aumentando assim a estabilidade, reduzindo o volume e a massa do produto (ARAÚJO *et al.*, 2017). A diminuição da quantidade de água do material, por meio da secagem, reduz a atividade biológica. Todos os microrganismos e enzimas como também os mecanismos metabólicos necessitam de água para suas atividades. Essa redução na umidade, reduz a velocidade das reações químicas e, conseqüentemente o desenvolvimento de microrganismos, o que faz com que o produto dure mais tempo (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Segundo Carvalho (2018), a secagem de produtos agrícolas pode ser considerada como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem. Que consiste na remoção da água, em excesso, que está contida no interior do material por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido, de forma a manter a qualidade do produto durante o armazenamento

O tipo de secagem a ser utilizado depende, principalmente, do produto a ser desidratado, da sua constituição química, das características físicas finais desejadas para o produto, bem como das propriedades do ar de secagem, dos limites de temperatura e do meio de transferência de calor adotados em função da sensibilidade dos compostos químicos, de forma a se evitar a perda ou a degradação desses compostos (FIORENTIN *et al.*, 2010).

Para a obtenção das curvas de secagem é necessário que as amostras sejam retiradas em intervalos de tempo pré-determinados a fim de se determinar o teor de umidade do material, onde representa a quantidade de água por massa seca de material. As curvas de secagem analisam a retirada de umidade do produto com relação ao tempo, podendo assim caracterizar a operação.

As curvas de secagem variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores, visto que as características dos produtos (composição, estrutura e dimensão) e as condições de secagem são muito diversas. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas (BOTELHO *et al.*, 2018).

Os modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para estimar o tempo necessário para redução da umidade do produto sob diferentes condições de secagem de forma a auxiliar nas tomadas de decisão e contribuir na melhoria da eficiência do processo (CARVALHO *et al.*, 2018).

Segundo Fiorentin *et al.* (2012), adsorventes oriundos de resíduos agrícolas que possuam elevado teor de umidade requerem a remoção parcial ou total da umidade presente em

seus poros, nesse sentido, a passagem de ar forçado pela amostra, denominado se secagem convectiva forçada, pode acelerar o processo de secagem assegurando a qualidade e a estabilidade do produto e diminuindo a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que possam ocorrer durante o processo de armazenamento do material.

Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivos determinar as curvas e o tempo de secagem do bagaço da cana-de-açúcar nas temperaturas de 60 e 80°C e ajustar modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais obtidos na secagem do bagaço, definindo o melhor modelo ajustado.

## **METODOLOGIA**

As análises foram desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA) pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) localizado no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

### **Preparo do material**

O bagaço da cana-de-açúcar utilizado para estudo foi adquirido no comércio da cidade de Campina Grande – PB. A coleta do material foi realizada logo após a etapa de moagem da cana de forma que não ocorresse a degradação microbiológica das amostras do bagaço.

Inicialmente, a biomassa foi cortada, com auxílio de uma tesoura, em pedaços uniformes de aproximadamente 1cm de comprimento com o intuito de se ter um material homogêneo durante a secagem. Em seguida, a mesma foi lavada por três vezes em um recipiente contendo 4L de água para a retirada de possíveis impurezas e reservada para secagem.

### **Determinação da umidade inicial**

Para análise da umidade inicial do produto foram pesados 10g da biomassa em balança analítica marca Marconi, modelo AL500C na qual foram submetidas à secagem em balança de infravermelho, tal processo foi realizado em triplicata.

### **Estudo da cinética de secagem do adsorvente**

Para obtenção das constantes cinéticas de secagem foram utilizadas duas temperaturas distintas (60°C e 80°C) e uma massa inicial do bagaço da cana de açúcar de aproximadamente

400g. Foi utilizado uma estufa da marca Marconi modelo MA 035/3IN250 com circulação de ar forçada até que a biomassa atingisse peso constante. Durante as sete primeiras horas o material foi retirado da estufa em determinados intervalos de tempo, conforme Tabela 1, para realização de pesagem em balança analítica da marca Marconi, modelo AL500C com o objetivo de se determinar o teor de umidade em função do tempo, completas sete horas de experimento, atingiu-se massa constante.

Tabela 1 - Intervalo de tempo utilizado para pesagem do material durante a secagem

<b>Tempo</b>	<b>Pesagem</b>
Primeira hora	5 em 5 minutos
Segunda hora	10 em 10 minutos
Terceira hora	15 em 15 minutos
Quarta à sétima hora	30 em 30 minutos

Fonte: Dados da pesquisa (2019)

O procedimento foi realizado em triplicata para cada temperatura e em seguida o material foi moído em um moinho de facas modelo MA 048 Marconi Brasil, utilizando telas mesh 20 = 0,85mm e 32 = 0,5mm, em aço inox, com a finalidade de se obter um material com granulometria uniforme e em seguida, armazenado em potes plásticos e depositados em um recipiente de isopor para controle da umidade.

Com os dados de secagem, foi possível construir as curvas de secagem, obtida por meio da umidade em função do tempo. A razão de umidade foi obtida a partir da Equação 1:

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_i - U_e} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: RU é a razão de umidade do bagaço de cana-de-açúcar,  $U_t$  é o teor de água do produto no tempo,  $U_e$  é o teor de água do bagaço de cana-de-açúcar no equilíbrio e  $U_i$  é o teor de água inicial do produto.

A taxa de secagem foi obtida por meio das respectivas derivadas das curvas de secagem. Numericamente, a taxa pode ser calculada pela diferença entre as umidades no intervalo considerado (PARK, 2014). A da Taxa de secagem é representada pela Equação 2:

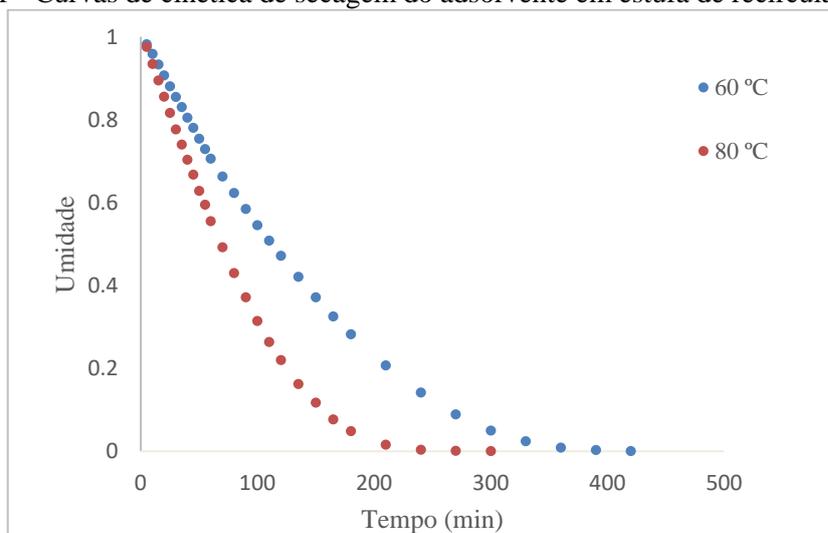
$$\text{Taxa} = \frac{dX(\text{b. s})}{dt} \cong \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (\text{Equação 2})$$

Para ajustar os dados experimentais foram utilizados os modelos matemáticos de Midilli, Newton, Logarítmico e Page. Os parâmetros dos modelos de secagem, foram obtidos por meio de regressão não-linear (Levenberg-Marquardt), com critério de convergência de  $10^{-6}$ . A estimativa dos parâmetros dos modelos cinéticos foi obtida por regressão não linear com o auxílio do *software* STATISTICA.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das curvas de cinética de secagem apresentou-se os teores de umidade adimensional em função do tempo dos experimentos de bagaço de cana-de-açúcar em estufa com recirculação de ar nas temperaturas de 60 e 80 °C, onde foram utilizadas as medidas de umidade em base seca obtidas para as amostras retiradas em diferentes intervalos de tempo, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Curvas de cinética de secagem do adsorvente em estufa de recirculação de ar



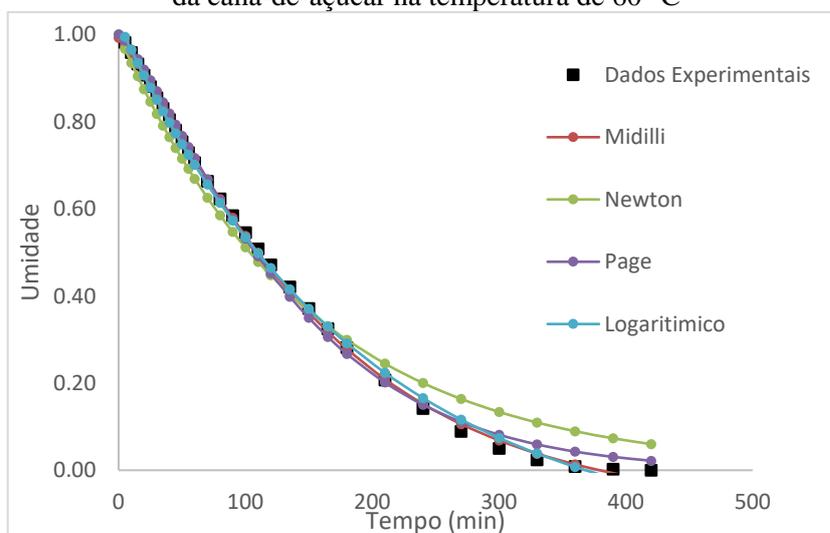
Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Foi possível observar que na temperatura de 80 °C houve um maior decaimento da umidade na fase inicial do processo, onde a média da umidade adimensional no tempo de 300 min para a temperatura de 60°C foi de 0,0501, enquanto que para temperatura de 80°C foi de 0,0002 comprovando assim que o processo de secagem ocorre de forma mais rápida no segundo caso.

A umidade em inicial do bagaço de cana-de-açúcar foi obtida em balança de infravermelho e concluiu-se que a água contida na matéria-prima representa cerca de 90,97% de sua massa total.

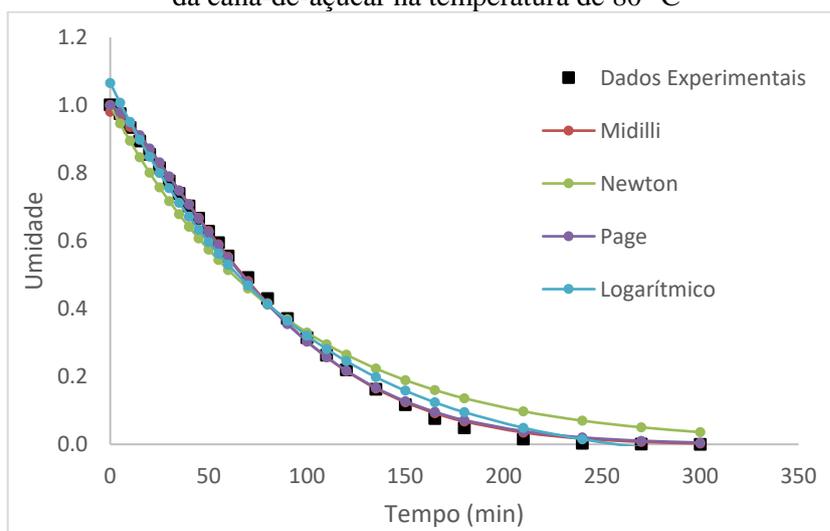
Os dados experimentais da cinética de secagem a 60 e 80 °C foram ajustados aos modelos empíricos de Midilli, Newton, Logarítmico e Page, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Figura 2 - Modelos de Midilli, Newton, Logarítmico e Page ajustado aos dados de secagem do bagaço da cana-de-açúcar na temperatura de 60 °C



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Figura 3 - Modelos de Midilli, Newton, Logarítmico e Page ajustado aos dados de secagem do bagaço da cana-de-açúcar na temperatura de 80 °C



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Na Tabela 2 encontram-se os parâmetros obtidos a partir dos resultados experimentais ajustados para cada um dos modelos utilizados.

Tabela 2 – Comparação dos parâmetros dos modelos de secagem do bagaço da cana-de-açúcar com os dados da média obtida nos experimentos realizados a 60 e 80°C

Temperatura	Modelo	a (adm)	k (min <sup>-1</sup> )	n (adm)	b (min <sup>-1</sup> )	c (adm)
60°C	Midilli	0,9922	0,0023	1,19	-1,467x10 <sup>-4</sup>	-
	Page	-	0,0019	1,2553	-	-
	Newton	-	0,0067	-	-	-
	Logarítmico	1,1971	0,0052	-	-	-0,1708
80°C	Midilli	0,9850	0,0021	1,3600	-7,279x10 <sup>-5</sup>	-
	Page	-	0,0024	1,3477	-	-
	Newton	-	0,0110	-	-	-
	Logarítmico	1,1755	0,0096	-	-	-0,1205

Fonte: Dados da pesquisa (2019)

A análise de variância dos modelos a partir do ajuste das equações matemáticas por regressão não linear aos dados de cinética de secagem do bagaço de cana-de-açúcar e o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) com nível significância de 5% podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3: Análise de variância e coeficiente de determinação dos modelos de Midilli, Page, Newton e Logarítmico para a secagem do bagaço da cana-de-açúcar em estufa de recirculação de ar à 60°C

	FONTE	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Teste F	R <sup>2</sup>
Midilli	Regressão	12,1429	4	3,0357	4395,95	0,9980
	Residual	0,0071	28	0,0002	-	
	Total	12,1500	32	-	-	
Page	Regressão	12,14052	2	6,070262	5764,75	0,9974
	Residual	0,00954	30	0,000318	-	
	Total	12,15007	32	-	-	
Newton	Regressão	12,0885	1	12,0885	1460,30	0,9833
	Residual	0,0615	31	0,0019	-	
	Total	12,1500	32	-	-	
Logarítmico	Regressão	12,1297	3	4,0432	1965,46	0,9945
	Residual	0,0203	29	0,0007	-	
	Total	12,1500	32	-	-	

Fonte: Dados da pesquisa (2019)

A partir da análise de variância dos modelos a partir do ajuste das equações matemáticas por regressão não linear aos dados de cinética de secagem do bagaço de cana-de-açúcar e o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) com nível significância de 5% verificou-se que todos os modelos analisados apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais, no entanto, os modelos Page e Midilli apresentaram melhores resultados segundo critérios

estatísticos  $R^2$  tanto para a temperatura de 60 °C quanto para a de 80 °C. No entanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) não constitui sozinho um bom critério para seleção de modelos não lineares portanto, de acordo com o teste F, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem do bagaço de cana-de-açúcar.

Segundo Neto et al. (2001), um modelo pode ser considerado estatisticamente significativo se  $F_{cal} > F_{tab}$  e preditivo se essa relação for superior a 10. Observa-se que a razão entre  $F_{cal}$  e o  $F_{tab}$  foi superior a 10 confirmando que estatisticamente para um nível de confiabilidade de 95% os modelos utilizados são estatisticamente significativos e preditivos para representar a secagem do bagaço da cana-de-açúcar em estufa de recirculação de ar e a porcentagem de variação explicada pelos modelos ( $R^2$ ) é considerada muito satisfatória, acima de 99,7%, para ambas as temperaturas.

Graebin (2014) estudou a secagem do bagaço de cana-de-açúcar em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 60, 70, 80, 90 e 100°C e verificou que o aumento no parâmetro temperatura promove uma diminuição no tempo de secagem. Os dados cinéticos experimentais de secagem do bagaço foram ajustados aos modelos matemáticos de Page, Newton e Placa Plana onde observou-se que para todas as temperaturas o modelo de Page obteve o melhor ajuste.

Goyalde et al. (2009) realizou a secagem da cana-de-açúcar nas temperaturas de 50 e 60°C e ajustou os dados experimentais aos modelos de Midilli, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page, onde o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem da cana-de-açúcar picada.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Na avaliação do potencial do bagaço da cana-de-açúcar como bioadsorvente para remoção do corante têxtil direto da marca Tupy® utilizando o processo de adsorção foi possível verificar que a secagem é fortemente influenciada pela temperatura e que a cinética de secagem é acelerada em temperaturas mais elevadas.

Foi possível ajustar os modelos cinéticos de secagem aos dados experimentais de secagem do bagaço de cana-de-açúcar, sendo o modelo de Page o que melhor representou o processo de secagem segundo critérios estatísticos Teste F, para as temperaturas de 60 e 80 °C, obtendo um coeficiente de determinação acima de 0,99.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C. da S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. do N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. *Brazilian Journal: Food Technology*. Campinas, p. 1-9. 28 jan. 2017.
- BOTELHO, F. M.; HAUTH, M. R.; HOSCHER, R. H.; BOTELHO, S. de C. C. **Modelagem matemática da contração volumétrica de grãos de soja durante o processo de secagem**. *Revista Engenharia na Agricultura* V.26, n.01, p.1-12, 2018
- CARVALHO, F. M. M. **Caracterização ultra estrutural e hidrólise enzimática de cana-de-açúcar e bagaço pré-tratados quimiomecanicamente**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.
- CARVALHO J. M. G.; BUENO, S. G. S.; OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O. **Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas da secagem do grão de girassol**. *Global Science and Technology*, Rio Verde, v.11, n.02, p.136-149, 2018
- FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D. de; PEREIRA, N. C.; MÓDENES, A. N. **Determinação da cinética e das isotermas de secagem do bagaço da laranja**. *Acta Scientiarum Technology*, v. 32, n. 2, p. 147-152, 2010.
- FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; LIMA, O. C. M.; MODENES, A. N. **Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos**. *Engevista*, v.14, n.1, p.22-33, 2012.
- GOYALDE, N. A.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P.; GONELI, A. L. D.; ARAÚJO, F. L. Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, n. 2, p.117-121, 2009.
- GRAEBIN, G. O. **Secagem do Bagaço de Cana-de-Açúcar e Estudo da sua Aplicação na Remoção de Metal Pesado**. Dissertação (Mestre em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Fevereiro de 2014.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Unicamp, 2001, 401p.
- OLIVEIRA, G. H. H. de; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R. de; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. *Braz. J. Food Technol*, Campinas, v. 18, n. 4, p.314-321, dez. 2015.
- PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de Processo Equipamentos de Secagem**. Campinas, Mar. 2007.
- ÚNICA. **União da Indústria de Cana de Açúcar. Conquistas do setor sucro-energético na matriz energética brasileira**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/faq/>> Acesso em: 24 de janeiro de 2019