

# MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS EM PROCESSO DE SECAGEM

P.L. SILVA<sup>1</sup>, A. D. DAWISON<sup>2</sup>, L.C. ASSIS<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química

**RESUMO** – *Os modelos matemáticos são amplamente utilizados para avaliar as curvas de secagem tanto de grãos como de biomassa. O trabalho apresenta modelos matemáticos utilizados no processo de secagem aplicados na conservação de produtos agroindustriais, para obtenção de energia, ou seja, o intuito é retirar uma quantidade significativa de água, preservando as propriedades físicas, visando o processo de queima em caldeiras para obtenção de energia limpa. Vários estudos foram realizados com intuito de reduzir os dejetos agrícolas e custos operacionais de empresas responsáveis pelo beneficiamento destes produtos por meio do processo de secagem de produtos agrícolas.*

**Palavras-chave:** *Modelagem Matemática, Matéria Seca, Simulações Computacionais.*

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma preocupação significativa no beneficiamento, armazenamento, comercialização e reaproveitamento de resíduos dos produtos agroindustriais. O Brasil é um dos países que tem uma produção agroindustrial considerável, consequência da extensa área agriculturável. As secagens de produtos agrícolas consistem em diminuir o teor de umidade a um nível que permita condições adequadas de armazenagem para beneficiamento e comercialização. Também pode contribuir no reaproveitamento de resíduos em vários propósitos. Existem vários processos de secagem, que podem ser de forma natural ou artificial. Sendo que a secagem natural utiliza-se de radiação solar para aumentar o potencial de secagem do ar, como por exemplo café em terreiros, cacau em barcaças, secagem de milho e feijão em terreiros. Porém, existem algumas desvantagens nesta modalidade devido aos períodos sazonais. E como vantagem, propicia menor ocorrência de grãos trincados ou quebrados.

Técnicas modernas de secagem vêm sendo desenvolvidas para atender às crescentes necessidades dos produtores, com o objetivo de simplificar e reduzir os custos associados ao processo

produtivo.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é de apresentar os modelos matemáticos comumente utilizados no processo de secagem.

## **2. SECAGEM**

Segundo Pacheco (2003), secagem é operação de um sistema que extrai determinado volume de umidade de um produto, preservando ou apurando algumas características que determinam as peculiaridades como, aroma, sabor, forma, reação (resistência), tonalidade entre outras.

Pacheco (2003), ainda afirma que outra característica importante do processo de secagem é o do custo, sendo o principal insumo produtivo. Geralmente é a derradeira manipulação antes do empacotamento e estocagem do produto. A avaliação do tempo no processo de secagem contribui para redução de custos, como também permite a otimização de todo o processo de transformação. Pacheco (2003) cita que é muito importante fazer uma análise rigorosa das propriedades dos componentes do produto para que o processo de secagem seja eficaz e atinja um grau de qualidade de excelência exigida pelo mercado.

### **2.1. SECAGEM DE GRÃOS**

O Brasil possui uma grande área disponível para plantio, favorecendo o cultivo de grãos, esses utilizados em grande parte para alimentação de animais de corte de empresas do setor alimentício. Segundo Portella e Eichelberger (2001), o processo de secagem tem como objetivo a extração da umidade dos grãos, para que permita a estocagem dos mesmos em períodos maiores do que o normal. Portella e Eichelberger (2001) citam ainda que, a quantidade de umidade que permita o armazenamento, dependerá do tipo de grão. Inclui-se a isto a umidade relativa do ar, temperatura e os possíveis danos causados durante o manuseio. Harrington (1972) *apud* Portella e Eichelberger (2001), afirma que o percentual ideal para preservar grãos em ambientes abertos, varia de 10% a 13%. A partir de 14% a respiração dos grãos é ativa, permitindo a presença de fungos, afetando-os qualitativamente e quantitativamente. A partir do 18% o processo acarreta a podridão devido a fermentação e finalmente, acima dos 35% algumas espécies passam para o processo de germinação.

## **2.2. SECAGEM DE BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Segundo Higman e Van der Burgt (2003) *apud* Fonseca (2009) na utilização de matéria orgânica (animal ou vegetal), também conhecida como biomassa para geração de energia, retiram-se os combustíveis de origem fóssil (petróleo, gás natural e carvão mineral), isto porque o processo de transformação requer milhares de anos. A biomassa tem sua origem da matéria orgânica e pode ser destinada à produção de energia elétrica, térmica e mecânica.

Segundo ANEEL (2008), as fontes de produção de biomassa podem ser obtidas dos setores urbanos e industriais (lixo); agrícola (cana-de-açúcar, soja, arroz, outros) e florestal (aproveitamento de madeira).

Segundo Lim et al (2012), a biomassa tornou-se uma das principais alternativas para solucionar os problemas no setor energético e ambiental, reduzindo em níveis consideráveis a dependência dos combustíveis de origem fóssil, grande emissor de gases poluentes.

O processo de obtenção de energia através da biomassa advém da queima de material orgânico acumulado. As vantagens de utilização da biomassa são de ser de fontes renováveis, custo baixo e reaproveitamento de resíduos e finalmente, baixos índices de emissão de poluentes, diferentes dos combustíveis de origem fóssil.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Buscou-se artigos na base Scielo, Instituições de Pesquisa (Embrapa) e Agências Reguladoras(ANEEL) , cujo o foco era aplicação de modelos matemáticos no processo de secagem dos mais variados tipos de grãos. Esta revisão procura responder uma pergunta sobre a eficiência dos modelos matemáticos aplicados no processo de secagem e quais os modelos mais frequentes nos processos experimentais buscados nas bases citadas anteriormente. Ainda, foi feita uma busca em livros que abordavam sobre processos de secagem natural e induzida por modelos matemáticos. Selecionou-se artigos que focavam exclusivamente os modelos matemáticos que utilizaram a modelagem matemática como ferramenta na secagem de grãos.



### **3.1. MODELAGEM MATEMÁTICA**

A modelagem matemática tem sido uma grande aliada para os estudos no desenvolvimento de processos agroindustriais. Castiglioni, et al. (2013), utilizaram o modelo de Page, para aplicar ajustes polinomiais de segunda ordem onde, os resultados acompanhariam às tendências de valores experimentais. Ainda, também foi estruturado um modelo estatístico de prognóstico dos resultados de umidade da massa fibrosa de mandioca.

### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Júnior e Corrêa (1999), utilizaram os modelos de: Thompson, Exponencial, Page e Difusão para o processo de secagem da camada fina de sementes de feijão. Vitorino (2009), utilizou os modelos: Dois termos, Exponencial de dois termos, Henderson e Pabis, para cinética de secagem de milho em camada delgada. Ferreira et al. (2012), utilizaram o modelo Verma no processo de secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado.

Complementando, já foram realizados inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem. Resende et al (2009) cita vários autores que utilizaram a modelagem matemática no processo de secagem.



## Modelos Matemáticos

A partir de consulta à literatura técnica especializada, selecionou-se 12 modelos aplicados ao processo de secagem de grãos para avaliar o desempenho daquele que melhor se adequa. A Tabela 1 apresenta os modelos.

Tabela 1: Modelos aplicados ao processo de secagem

Nome do Modelo	Equação
Newton	$RU = \exp(-k.t)$
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$
Page Modificado	$RU = \exp[-(k.t)^n]$
Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$
Henderson e Pabis modificado	$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-k_0.t) + c.\exp(-k_1.t)$
Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$
Dois termos	$RU = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$
Dois termos exponencial	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.at)$
Aproximação da difusão	$RU = a.\exp(-k_0.t) + (1-a).\exp(-k.b.t)$
Verna et al. (1985)	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k_1.t)$
Midilli et al.	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$
Wang e Sing	$RU = 1 + at + bt^2$

Sendo:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, n: constantes de secagem;

a, b, c: coeficientes dos modelos;

t: tempo de secagem.



Para o cálculo da razão de umidade (RU) no processo de secagem em diferentes temperaturas, utiliza-se a expressão:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e}$$

U: teor de água do produto, decimal b.s.

U<sub>i</sub>: teor de água inicial do produto, decimal b.s.

U<sub>e</sub>: teor de água de equilíbrio do produto, b.s.

Baseou-se nas conclusões dos autores dos artigos que abordam a eficiência do modelo utilizado durante o procedimento. Vários autores destacaram a eficiência do modelo de Page. Verificou-se ainda que diversas teorias foram propostas para prever o comportamento grãos e produção de semente.

## 5. CONCLUSÃO

A modelagem matemática auxilia na tomada de decisões no setor agroindustrial, nos mais diversos processos de transformação que utilizam a secagem. O modelo de Page (Tabela 1) foi identificado como mais indicado pela pesquisa bibliográfica. Em trabalhos futuros pretende-se realizar a implementação computacional para os modelos descritos com dados da literatura.

## 6. REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.3, p.349-353, 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v3n3/1415-4366-rbeaa-03-03-0349.pdf>> Acesso: 02 nov 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL): Biomassa: fontes renováveis parte II. In: *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília, DF, 2008. cap. 4.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S.. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.9, p.987-994, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n9/a12v17n9.pdf>>. Acesso: 17 out 2017.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem Matemática para a Descrição do Processo de Secagem do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em Camadas Delgadas. *Engenharia Agrícola*, v.27, n.2, p.501-510, 2007. Disponível em:



---

<<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v27n2/a20v27n2.pdf>> .Acesso: 02 nov 2017.

DOYMAZ, I. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, London, v. 78, n. 4, p. 1291-1297, 2007a.

DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, v. 61, n. 3, p. 359-364, 2004.

DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*, v. 69, n. 2, p. 161-165, 2005a.

DOYMAZ, I. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, v. 69, n. 3, p. 275-279, 2005b.

DOYMAZ, I. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, v. 79, n. 1, p. 243-249, 2007b.

DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, v. 60, n. 2, p. 125-130, 2003.

FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, n.6, p.855-862, 2012. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/pab/v47n6/47n06a17.pdf>>. Acesso: 12 out 2017.

FOLETTI, L. F.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R.S.; PORTUGAL JR, U.L.; JAHN, S.L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. *Química Nova*. V. 28, n. 6, p. 1055-1060. 2005.

IEE-USP. Conceituando biomassa. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/conceituando-biomassa>> Acesso: 30 de outubro de 2017.

KIELING, A. G. Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNISINOS*. São Leopoldo, RS, 2009.

LIM, J. S.; MANAN, Z. A.; ALWI, S. R. W.; HASHIM, H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 16, p. 3084-3094. 2012.

MENEGHETTI, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C.; POHNDORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n.10, p.1115-1120, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v16n10/a12.pdf>> Acesso: 17 out 2017

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)1. *Revista Ciência Agronômica*, v44, n3, p.455-463, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rca/v44n3/a06v44n3.pdf>>. Acesso: 16 out 2017.

PACHECO, C. R. F. A Operação de um Processo de Secagem. *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 2003. Disponível em:



<[http://sites.poli.usp.br/d/pqi2530/alimentos/pacheco\\_sistemas\\_secagem.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pqi2530/alimentos/pacheco_sistemas_secagem.pdf)>. Acesso em: 02 de nov 2017.

PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. Secagem de grãos. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 192 p. 2001. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/820443/secagem-de-graos>>. Acesso em: 30 out 2017.

RESENDE, Osvaldo et al. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asagr/v31n2/v31n2a01.pdf>> Acesso: 02 de nov de 2017

YIN C.; ROSENDAHL L. A.; KÆR S. K. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, p. 725-754. 2008.