



MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA À TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM ALIMENTOS

Wantiê Teles Adorno¹, Glêndara Aparecida de Souza Martins², Warley Gramacho da Silva³

¹ Graduando em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Tocantins, (wantiê_adorno@hotmail.com)

² Mestre em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Lavras – UFLA, Professora Assistente na Universidade Federal do Tocantins - UFT

³ Mestre em Computação pela Universidade Federal Fluminense – UFF Palmas/TO – Brasil, Professor Assistente na Universidade Federal do Tocantins - UFT

Recebido em: 06/05/2013 – Aprovado em: 17/06/2013 – Publicado em: 01/07/2013

RESUMO

O presente trabalho objetivou realizar um levantamento de dados dos estudos realizados com transferência de massa em alimentos utilizando a modelagem matemática, tanto para a secagem de alimentos quanto para a adsorção, utilizando modelos fenomenológicos e empíricos, os modelos empíricos geralmente são obtidos a partir de simples correlações matemáticas dos dados experimentais não tendo significado físico já os fenomenológicos consideram as etapas elementares de transferência de massa. A modelagem matemática aplicada a transferência de massa em alimentos visa a melhoria no processamento, redução de perdas de massa e energia e um aumento da qualidade do produto final. A representação matemática do processo de transferência de massa de diversos produtos agrícolas vem, há algum tempo, sendo estudada e utilizada na tentativa de prever os fenômenos que acontecem durante este processo, em sistemas reais possibilitando avaliar formas de otimizar a operação.

PALAVRAS-CHAVE: modelos fenomenológicos, transferência de massa, modelos empíricos.

MODELLING MATHEMATICS APPLIED TO MASS TRANSFER IN FOOD

ABSTRACT

This study aimed to survey data from studies of mass transfer in foods using mathematical modeling, both for food drying as for adsorption, using empirical and phenomenological models. The empirical models are usually obtained from simple mathematical correlations of the experimental data does not have physical significance, since the phenomenological consider the elementary stages of mass transfer. The mathematical model applied to mass transfer in food processing aims at

improving, reducing losses of mass and energy and an increase in product quality. The mathematical representation of the process of mass transfer of various agricultural products has, for some time, been studied and used in an attempt to predict the phenomena that occur during this process, in real systems enabling evaluate ways to optimize the operation.

KEYWORDS: phenomenological models, mass transfer, empirical models

INTRODUÇÃO

A modelagem e simulação é uma importante ferramenta de análise disponível para projeto e operação de processos ou sistemas. Esta pode ser útil em qualquer uma das fases do ciclo de vida de um sistema da produção simulando processos como experimentos de sistemas ou fenômenos físicos, através de modelos matemáticos que representam características observadas em sistemas reais possibilitando avaliar formas de otimizar a operação (PAIVA, 2005).

A secagem de grãos e sementes, dentro da cadeia produtiva, é um processo de fundamental importância para o preparo do produto para armazenamento, exerce uma forte influencia na manutenção da qualidade e no tempo de estocagem, visto que a secagem representa cerca de 12% nos custo de energia total gasta na pós-colheita, ao deixar o produto com baixo teor de água a secagem diminui a sua atividade biológica (MATA et al., 2006).

A representação matemática do processo de transferência de massa de diversos produtos agrícolas vem, há algum tempo, sendo estudada e utilizada na tentativa de prever os fenômenos que acontecem durante este processo. A maioria dos modelos empregados para representar a transferência de massa dos produtos agrícolas foi desenvolvida negligenciando-se a contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação (BROOKER et al., 1992).

A utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de transferência de massa em alimentos é uma ferramenta cada vez mais explorada pelos pesquisadores, sendo de grande utilidade para o cálculo do desenvolvimento eficiente de cada análise, tendo em vista a melhoria no processamento, redução de perdas e aumento da qualidade do produto final (DANTAS et al., 2011).

Uma vez com o modelo do sistema, com o uso de programa computacional para simulação de tratamento, realizam-se testes experimentais para verificação dos dados que permitam a validação do modelo. Já com o modelo validado, e feito a obtenção de dados do processo em diversas condições de tratamento, podendo ser feito aperfeiçoamento no processo de secagem ou absorção, sem que seja necessário realizar experimentos em tais condições, possibilitando a economia de tempo, dinheiro, energia e pessoal (FERNANDES et al., 2010).

Os modelos matemáticos podem ser divididos em dois grupos principais: empíricos e fenomenológicos. Os modelos empíricos geralmente são obtidos a partir de simples correlações matemáticas dos dados experimentais (SINGH & KULSHRESTHA, 1987) e os seus parâmetros, normalmente, não possuem significado físico. Por sua vez, os modelos fenomenológicos consideram as etapas elementares de transferência de massa (COUTINHO et al., 2005) e os seus parâmetros, frequentemente, apresentam significado físico. Mais de 200 equações têm sido propostas para a modelagem dos dados de equilíbrio, diferindo em seu caráter empírico ou teórico e no número de parâmetros envolvidos (MORAES et al., 2005).

Este trabalho objetiva uma revisão bibliográfica acerca dos modelos matemáticos fenomenológicos e empíricos aplicados a processos de transferência de massa em alimentos.

MODELOS FENOMENOLÓGICOS

A modelagem fenomenológica é baseada nos princípios básicos de conservação de massa e energia. Para a construção de um processo iterativo de ajustes sucessivos tem-se várias etapas. A primeira delas é a definição do sistema a ser modelado, em seguida a escolha das variáveis dependentes fundamentais as quais descrevem o sistema, energia e massa. O terceiro passo é a escolha das variáveis de estado que permitem medir as variáveis dependentes fundamentais: temperatura, velocidade, concentração (RESENDE et al., 2010).

O desenvolvimento de modelos matemáticos para simular a transferência de massa com foco na secagem, por exemplo. Normalmente se baseia na lei de Fourier para conservação de energia e a lei de Fick para conservação de massa. Equações (1) e (2) (LUIZ, 2012).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(K_s \nabla T_s) \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(D \nabla X) \quad (2)$$

Em que:

K = Condutividade térmica;

T = Temperatura;

∇ = Gradiente;

D = coeficiente de difusão de massa.

Segundo FRACASSO (2011), os modelos fenomenológicos podem ser de parâmetros concentrados ou distribuídos e, geralmente, representam as principais tendências do processo, mesmo fora das condições experimentais.

O processo de hidratação de grãos está presente na caracterização da qualidade fisiológica do grão, na extração de algum constituinte de interesse, no cozimento, na redução ou eliminação de fatores antinutricionais existentes nos grãos e na melhora da digestibilidade (OMOTO et al., 2009).

OMOTO et. al., (2009) desenvolveram um modelo matemático transiente de parâmetros concentrados para estimar a concentração de água em grãos de ervilha durante sua hidratação, o qual foi obtido a partir de um balanço de massa, considerando-se volume constante e geometria esférica. Para todas as temperaturas estudadas, o modelo representou as principais tendências do processo de

hidratação com desvios inferiores a 5%. O parâmetro K_s (coeficiente efetivo de transferência de massa K_s (cm.min⁻¹)) apresentou um comportamento segundo a equação de Arrhenius frente à temperatura, $K_s = 182,8 \exp(-3521/T)$, enquanto ρA equação permaneceu praticamente constante, obtendo-se um valor médio de 0,53 g.mL⁻¹.

COUTINHO et al., (2005), em estudo sobre modelagem e validação do modelo de hidratação de grãos de soja, estudaram e desenvolveram um modelo fenomenológico de parâmetros concentrados que levou em conta o aumento do diâmetro ao longo do processo de hidratação, foi obtida experimentalmente esta variação do diâmetro e é independente da temperatura de hidratação. Os mesmos autores (COUTINHO et al., 2007) apresentaram um novo modelo fenomenológico de parâmetros concentrados para hidratação de grãos de soja, obtido a partir de um balanço de massa em regime transiente, com apenas dois parâmetros a serem ajustados a partir do ajuste do modelo aos pontos experimentais. O novo modelo proposto é adequado aos resultados, enquanto que o coeficiente de transferência de massa aparente depende da temperatura e apresenta variações significativas ao longo da hidratação.

HSU (1983a) propôs um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos, obtido a partir de um balanço de massa diferencial em um grão de soja, admitindo forma esférica de diâmetro constante, e representado por uma equação diferencial parcial resolvida numericamente, este mesmo autor (HSU 1983b), também estudou a influência da temperatura na difusão de água em grãos de soja, o modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos, revelou uma boa concordância com os dados experimentais da hidratação.

GOYAL et al., (2007) definem transferência de massa por secagem como sendo um fenômeno complexo, que requer representações para a predição do comportamento e otimização dos seus parâmetros. Neste contexto, os modelos matemáticos para camada fina têm sido empregados para estimar o tempo de secagem.

MACHADO et al., (2012) estudaram a secagem do pedúnculo de caju em secadores solar de radiação direta e indireta, desenvolvendo um modelo matemático para simular o fenômeno de transferência de massa, o modelo é formado por um sistema de equações diferenciais parciais referentes a duas fases (matriz sólida e fase gás) e integrado numericamente pelo método das linhas, o mesmo se mostrou adequado para descrever a análise. Seu modelo baseou-se na abordagem proposta previamente por RATT & MUJUMDAR (1997) onde simularam a secagem de cenouras, admitindo variações das condições do ar de secagem, fundamentando nos balanços de massa e de energia tanto na fase sólida quanto na fase gasosa considerando a temperatura do ar de entrada no secador como uma função da temperatura no coletor solar e admitindo o encolhimento do leite durante a secagem.

RESENDE et al., (2010), executaram experimentos com transferência de massa por secagem, com feijão adzuki (*Vigna angularis*), ajustando diferentes modelos matemáticos aos dados, objetivando selecionar o modelo de melhor representatividade para o fenômeno, dentre os modelos analisados (tabela 1) o modelo de Midilli e Henderson e Papis modificado apresentaram menor erro médio estimado para este experimento. CORRÊA et al., (2007) também observaram que estes modelos se aplicavam bem para a transferência de massa através da secagem do feijão vermelho apresentando baixos valores do erro médio estimado. RESENDE et al., (2010) utilizaram o modelo de Midilli para representar graficamente

as curvas de secagem, afirmando que o por ser mais simples e apresentar menor número de coeficientes comparando ao de Henderson e Papis Modificado.

SOUSA et al., (2011), fizeram estudos com diferentes modelos matemáticos para a descrição da transferência de massa através da secagem de polpa de oiti, visando obter o melhor método, tendo como critério de avaliação o coeficiente de determinação e o desvio quadrático médio, os modelos analisados foram o de Aproximação por Difusão, Henderson e Papis, Logarítmico, Midilli e Page (Tabela 1), dentre os modelos analisados os que melhor se ajustaram foram de Midilli e Page.

Para transferência de massa por desidratação de pimentão verde SILVA et al., (2008), testaram cinco modelos matemáticos, Page, Dois Termos, Henderson e Papis, Lewis e Verma (Tabela 1), dos modelos empregados, o de Verma e o de Page obtiveram um R² superior a 99,6%, tendo assim um maior grau de confiabilidade para essa matéria prima.

COUTINHO et al., (2005) avaliaram a hidratação de grãos de soja, e utilizaram modelos matemáticos empíricos e fenomenológico, fenomenológicos de parâmetros concentrados que contempla a variação do volume dos grãos de soja durante o processo, avaliando o modelo a partir de dados experimentais em várias temperaturas, concluindo que o modelo fenomenológico foi o que melhor representou a hidratação de grãos de soja em toda a faixa de temperatura explorada (10 a 49°C), sendo os modelos empíricos analisados Singh & Kulshrestha, Peleg, Sopade & Obekpa e Pan & Tangratanavalee, e os modelos fenomenológicos de Hsu.

RODRIGUES et al., (2012) fizeram uso de modelo matemático para determinar condições operacionais de um reator CSTR contínuo, o modelo empregado foi o de CAMPOS (2007) (equações 3 a 7), concluindo que o modelo proposto pode representar coerentemente o sistema do reator de bancada.

$$Ar \cdot \frac{dv}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 \quad (3)$$

$$Q_4 = c\sqrt{hr - ho} \quad (4)$$

$$\frac{dWa_1}{dt} = \frac{Q_1(Wa_1 - Wa) + Q_2(Wa_2 - Wa) + Q_3(Wa_3 - Wa)}{v} \quad (5)$$

$$\frac{dWb_1}{dt} = \frac{Q_1(Wb_1 - Wb) + Q_2(Wb_2 - Wb) + Q_3(Wb_3 - Wb)}{v} \quad (6)$$

$$Wa = [H'] \frac{Kw}{H'} - W_b \frac{Ka_1}{1 + \frac{Ka_1}{[H'] + [Ka_1 \cdot Ka_2 / H^2]}} \quad (7)$$

Em que:

Q = vazões volumétricas;

V = volume do reator;

Ar = área transversal do reator;
 c = constante da válvula de saída,
 Wa e Wb = espécies invariantes de reação para o fluxo de saída;
 Kw = produto iônico da água;
 Ka_1 e Ka_2 = constantes de reação
 [H'] = Concentração de H+.

TABELA 1: Modelos matemáticos

$RU = 1 + a.t + b.t^2$	Wang e Singh (WANG & SING, 1978)
$RU = a.exp(-k.t) + (1 - a).exp(-k_1.t)$	Verna (VERMA et al., 1985)
$RU = exp((- a - (a^2 + 4.b.t)^{0.5}) / 2.b)$	Thompson (THOMPSON et al., 1968)
$RU = exp(-k.t^n)$	Page (PAGE, 1949)
$RU = exp(-k.t)$	Newton (LEWIS, 1921)
$RU = e.exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli (MIDILLI, 2002)
$RU = a.exp(-k.t) + c$	Logarítmico (YAGCIOGLU et al., 1999)
$RU = a.exp(-k.t)$	Henderson e Papis (HENDERSON & PAPIS, 1961)
$RU = a.exp(-k.t) + b.exp(-k_0.t) + c.exp(-k_1.t)$	Henderson & Papis Modificado (KARATHANOS, 1999)
$RU = a.exp(-k.t) + (1 - a).exp(-k.a.t)$	Exponencial de Dois Termos (SHARAF – ELDEE et al., 1980)
$RU = a.exp(-k_0.t) + b.exp(-k_1.t)$	Dois Termos (HENDERSON, 1974)
$RU = a.exp(-k.t) + (1 - a).exp(-k.b.t)$	Aproximação de Difusão (HENDERSON & PABIS (1961))

MODELOS EMPÍRICOS

São de fundamental importância os modelos matemáticos empregados no processo de transferência de massa, tendo visto que as informações geradas são de grande ajuda para o desenvolvimento de cada vez mais equipamentos e previsão do tempo de secagem (SILVA et al., 2009).

Segundo AZUARA et al., (1992), as equações utilizadas para descrever a cinética do processo são complexas e geralmente específicas para certas condições de processo e configurações geométricas, além de não predizerem o ponto de equilíbrio. Diante disso, a partir de um balanço de massa, os autores encontraram uma equação capaz de prever a cinética de desidratação osmótica e o ponto final do equilíbrio, sem a necessidade de se chegar ao equilíbrio, utilizando apenas um curto período de processo. O modelo pode ser usado para caracterizar a perda de

matéria ocorrida pela desidratação osmótica de diferentes tipos de alimentos, sem restrições de geometria, podendo ser aplicado na cinética de transferência de massa de mamão e maçãs desidratados osmoticamente, apresentando um ajuste satisfatório aos dados experimentais (equação 8).

FERRARI et al., (2005), utilizaram em seu estudo o modelo proposto por AZUARA et al., (1992) para difusão em um cubo, equação 8, em estado estacionário, objetivando estudar a influência das variáveis tipo de açúcar, concentração e temperatura da solução desidratante na transferência de massa durante a desidratação osmótica de cubos de melão, através da determinação dos coeficientes de difusão da água e dos solutos, obtendo resultados satisfatórios para o modelo empregado, apresentando um R² superior a 0,97, demonstrando assim que o modelo pode ser empregado para este alimento e esta análise.

$$PA = \frac{S_1 \cdot t (PA_\infty)}{1 + S_1 \cdot t} \quad (8)$$

Em que:

S = Constante relacionada à perda de água;

PA_∞ = Perda de água no equilíbrio (%);

T = Tempo.

SCHMIDT et al., (2008), em sua pesquisa fizeram uso da modelagem matemática para representar a cinética de transferência de massa durante a salga em pressão atmosférica, fazendo uso do modelo proposto por AZUARA et al., (1992). O referido modelo foi desenvolvido para mostrar o processo osmótico e estimar a concentração de equilíbrio a partir do balanço de massa. Os autores observaram bons resultados de ajuste aos dados experimentais para processo à pressão atmosférica obtendo R² entre 0,946 e 0,967. Já para o processo à vácuo a correlação foi menos satisfatória quando comparada à anterior, obtendo R² entre 0,822 e 0,942, podendo esse fato ter ocorrido em virtude da menor quantidade de pontos experimentais para longos tempos de processamento.

Ao desenvolver um modelo de simulação para secagem de grãos em camada estacionária, THOMPSON et al., (1968) propuseram uma equação totalmente empírica, para descrever o processo (equação 9),. O modelo apresentado tem sido bastante utilizado para as simulações de secagem de milho.

$$t = A \cdot \ln(RU) + B \cdot [\ln(RU)]^2 \quad (9)$$

Em que:

A e B = são funções da temperatura do ar de secagem;

RU = razão de umidade do produto.

BROOKER et al., (1992) sugeriram que, durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos, no período de taxa de secagem decrescente, a mudança da umidade é proporcional à diferença instantânea entre os teores de umidade do material.

De acordo com BOTELHO et al., (2010), os modelos empíricos são geralmente mais simples e de fácil aplicação, uma vez que se fundamenta na análise de dados experimentais e dimensionais, bem como na análise estatística.

O modelo empírico de Peleg representado na equação 10 tem sido um dos mais utilizados por pesquisadores nos últimos anos para modelar o comportamento de alimentos e grãos durante a hidratação (COUTINHO et al., 2005).

$$U_t = U_0 + \frac{t}{(C_1 + C_2 t)} \quad (10)$$

Em que:

U_t = Umidade em base seca;

U_0 = Umidade inicial;

t = Tempo de hidratação

C_1 e C_2 = Constantes do modelo.

Os modelos empíricos, normalmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos (CORRÊA et al., 2007).

Os modelos de secagem em camada fina são calculados em função de variáveis que influenciam a taxa de secagem. A temperatura é uma variável sempre presente nos modelos que descrevem o processo de secagem (DUNG et al., 1980; BALA & WOODS, 1992). Uma outra variável normalmente associada aos parâmetros de secagem é o teor de umidade inicial do produto (WHITE et al., 1981; SOARES, 1986).

JUNIOR et al., (1999) testaram os modelos de Thompson, Exponencial e Page, verificaram que no modelo de Thompson houve tendência mais acentuada de dispersão para os valores calculados no período final do processo de secagem, principalmente para sementes com umidade maior que 0,596 (b.s). Para o modelo exponencial verificaram que este apresentava maiores desvios entre os valores experimentais e calculados para representação do processo de secagem de sementes de feijão em camada fina. A equação proposta por Page é a que melhor representa os dados experimentais, quando comparada com as equações de Thompson, Exponencial e de Difusão, utilizando-se oito termos da série.

GOWEN et al., (2007), definiram o modelo de Peleg como um dos modelos empíricos mais utilizados para descrição de incorporação de água em legumes.

BOTELHO et al., (2010), ao fazerem um estudo da hidratação do arroz parboilizado IRGA 242 utilizaram o modelo matemático de Peleg, obtendo resultados que demonstram o ajuste satisfatório aos dados experimentais, concluindo assim que a hidratação do arroz parboilizado IRGA 242 pode ser descrita pelo modelo de Peleg.

RESENDE & CORREIA (2007), encontraram bons resultados para a taxa de absorção de água do feijão, concluindo que a mesma aumenta com a elevação da temperatura de hidratação, o modelo de Peleg apresentou um nível de significância dos parâmetros de regressão a 1% de probabilidade pelo teste T elevados valores do coeficiente de determinação superiores a 99,8%,

recomendando assim o modelo de Peleg para a descrição da cinética do fenômeno, o coeficiente de difusão e de temperatura foram descritos pela expressão de Arrhenius, a qual apresentou uma energia de ativação de 6,748Kj mol⁻¹ para a difusão líquida nos grãos de feijão.

FRACISCO et al., (2007) estudaram as isotermas de sorção para sementes de feijoeiro dos cultivares Tibatã e Uma, determinaram a umidade e atividade de água utilizando diferentes modelos que correlacionam dados experimentais das isotermas de sorção em matérias biológicas, o modelos testados foram Peleg (equação 11), Bet (Brunauer, Emmet e Teller) (equação 12), GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer) (equação 13), Langmuir (equação 14), Halsey (equação 15), e Oswin (equação 16), com o estudo concluíram que os modelos de isotermas de sorção que apresentam melhor ajuste são os de Oswin e Peleg para sementes de feijoeiro, cultivares Tibatã e Uma.

$$X_{eq} = K_1 \cdot a_w^{n_1} + K_2 \cdot a_w^{n_2} \quad (11)$$

Em que:

X_{eq} = teor de água de equilíbrio (kg.kg-1);

A_w = atividade de água, adimensional;

K₁, K₂, n₁ e n₂ = constantes.

$$X_{eq} = \frac{(X_m \cdot C \cdot A_w) \cdot (1 - (n+1) \cdot A_w^n + n \cdot A_w^{n+1})}{(1 - A_w) \cdot (1 + (C-1) \cdot A_w - C \cdot A_w^{n+1})} \quad (12)$$

Em que:

X_{eq} = teor de água de equilíbrio (kg.kg-1);

X_m = teor de água na monocamada molecular (kg.kg-1);

A_w = atividade de água, adimensional;

C, n = constantes.

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot A_w}{(1 - K \cdot A_w) \cdot (1 - K \cdot A_w + C \cdot K \cdot A_w)} \quad (13)$$

Em que:

X_{eq} = teor de água de equilíbrio (kg.kg-1);

X_m = teor de água na monocamada molecular (kg.kg-1);

A_w = atividade de água, adimensional;

C, K = constantes de adsorção.

$$X_{eq} = \frac{XM \cdot C \cdot A_w}{1 + C \cdot A_w} \quad (14)$$

Em que:

A_w = atividade de água, adimensional;

X_{eq} = teor de água de equilíbrio (kg.kg-1);
 X_M = teor de água da monocamada (kgw/kgs);
 C = constante de sorção

$$A_w = \exp\left\{\frac{-A}{X_{eq}^B}\right\} \quad (15)$$

Em que:

X_{eq} = teor de água de equilíbrio (kg.kg-1);
 A_w = atividade de água, adimensional;
 A, B = constantes.

$$X_{eq} = A \cdot \left(\frac{A_w}{1 - A_w}\right)^B \quad (16)$$

Em que:

X_{eq} = teor de água de equilíbrio (kg.kg-1);
 A_w = atividade de água, adimensional;
 A, B = constantes

O modelo de GAB (equação 13) é amplamente utilizado para descrever o comportamento de isotermas de alimentos por diversos pesquisadores, KIRANOUDIS et al., (1997) ajustaram as isotermas de sorção de maçã, pêra, kiwi e banana ao referido modelo; UNADI et al., (1998), observaram que GAB foi a equação de sorção mais satisfatória para prever as isotermas de dessorção de tomate; KECHAOU & MAALEJ (1999) verificaram que GAB representou satisfatoriamente as isotermas de dessorção de banana para temperaturas de 35, 50 e 70°C e valores de atividade de água de 0 a 0,90.

TELIS et al., (2000) obtiveram bom ajuste para os dados experimentais de isotermas de casca e polpa de uva, para uma atividade de água entre 0,02 e 0,85 e temperatura de 20 a 70°C, pelo modelo de GAB.

RAO & RIZVI (1986), utilizando o modelo de GAB (equação 13) descreveram a sorção de água de quase todos os alimentos com atividade de água variando de 0 a 0,9, por ter uma base teórica fundamentada e apresentar três parâmetros, relativamente simples, que têm significado físico do processo, e por ser capaz de descrever algum efeito da temperatura no processo de sorção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem matemática vem com o intuito de minimizar perdas, uma vez que ajuda a obter resultados com a redução de custo e tempo. Quando voltada para a área de produção de alimentos a modelagem desempenha um papel muito importante na redução dos desperdícios de alimentos, pois permite a realização de análises sem que haja o gasto de produtos, apenas simulando através de modelos matemáticos situações as quais um determinado alimento pode ser submetido por meio de softwares que executam tais modelos.

REFERÊNCIAS

- AZUARA, E.; BERISTAIN, C.I.; GARCIA, H.S. Development of a Mathematical Model to Predict Kinetics of Osmotic Dehydration. **Journal of Food Science and Technology**, v. 29, p. 239-242, 1992.
- BALA, B.K.; WOODS, J.L. Thin layer drying models for malt. **Journal of Food Engineering, Barking**, v.16, n.1, p.239-249, 1992.
- BOTELHO, F. M; CORRÊA, P. C; GONELI, A. L. D; MARTINS, M. A; BAPTESTINI, F. M. Análise da Hidratação do Arroz na parboização. **Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas**, 30(3): 713 – 718, jul.-set. 2010.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. **Westport: The AVI Publishing Company**, 1992. 450p.
- CAMPOS, R.C.C. (2007). **Projeto e Construção de Planta Piloto de Neutralização de pH e Proposta de Metodologia para Incorporação de Informações Auxiliares na Identificação NARX Racional**. Dissertação de mestrado. UnilesteMG, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Coronel Fabriciano, 2007, 158 p.
- 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, Jaboticabal**, v.27, n.2, p.501-510, maio/ago. 2007.
- COUTINHO, M. R.; CONCEIÇÃO, W. A. S.; OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. Novo modelo de parâmetros concentrados aplicado à hidratação de grãos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, nº 3, Campinas, 2007.
- COUTINHO, M.R.; OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. Modelagem e Validação da Hidratação de Grãos se Soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 25(3): 603-610, jul.-set. 2005.
- DANTAS, L. A; MATA, M. E. R. M; DUARTE, M. E. M. Programa Computacional Dinâmico para Simulação de Secagem de Grãos e Sementes de Milho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande**, v.13, n.3, p.309-318, 2011.
- DUNG, N.V.; FOWLER, R.T.; BOWREY, R.G. Variables affecting the drying rate of paddy rice. **Food Technology in Australia, Sidney**, v.32, n.12, p.604-606, 1980.
- FERNANDES, F. A .N; Rodrigues, S; Law, C. L; Mujumdar, A. S. Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review, **Food Bioprocess Technol**, Paper Review, 2010.
- FERRARI, C. C; RODRIGUES, L. K; TONON, R. V; HUBINGER, M. D. Cinética de Transferência de Massa de Melão Desidratado Osmoticamente em Soluções de Sacarose e Maltose. **Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas**, 25(3): 564-570, jul.-set. 2005.
- FRACASSO, A. R. **Cinética de hidratação de soja: estudo comparativo entre**

soja transgênica e convencional. 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

FRANCISCO, F. G; USBERT, R; TONELI, J. T. C. L; Ajuste de isoterma de Sorção de Sementes de Cultivares de Feijoeiro. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 29, nº 1, p.35-39, 2007.

GOYAL, R. K; KINGSLEY, A. R. P; MANIKANTAN, M. R; ILAS, S. M. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v.79, n.1, p.176-180, 2007.

GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Modelling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L.) The effect of blanching pre-treatment on water intake and texture kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 810-819, 2007.

HENDERSON, S. M.; Pabis, S. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.6, n.3 p.169-174, 1961.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, p. 1167- 1168, 1974.

HSU, K. H. A diffusion model with a concentration-dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking. **Journal of Food Science**, v. 48, p. 618-622 e 645, 1983a.

HSU, K. H. Effect of temperature on water diffusion in soybean. **Journal of Food Science**, v. 48, p. 1364 e 1365, 1983b.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics **Journal of Food Engineering**, v. 39, n. 04, p. 337-44, 1999.

KECHAU, N; MAALEJ, M. Desorption Isotherms of imported Banana. **Drying Technology**. New York, v. 17, n. 6, p. 1201 – 1213, 1999.

KIRANOUDIS, C.T.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits. **Drying Technology**, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

LEWIS, W. K. The drying of solid materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 05, p. 427-433, 1921.

LUIZ, M. R; **Estudo Teórico e Experimental de Secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum*)**. João Pessoa, 2012. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

MACHADO, A. V; OLIVEIRA, E. L; OLIVEIRA, J. A; SOUZA, D. F. S; FREITAS, L. M. Modelagem e Simulação da Secagem Solar do Pendúculo de Caju. **Revista Verde (Mossoró – RN)**, v. 7, n. 3, p. 94-101, jul-set, 2012.

MATA, C. M. E. R. M.; Duarte, M. E. M.; Almeida, F. de A.C. Secagem de sementes. In: Francisco de Assis Cardoso Almeida; Maria Elita Martins Duarte; Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata. (Org.). **Tecnologia de armazenagem em**

sementes. 1ª ed. Campina Grande - Paraíba: Editado pela Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas - APPA, 2006, v. 1, p. 271-370.

MORAES, M. A; ROSA, G. S; PINTO, L. A. A. Estudos das Isotermas de Equilíbrio para Quitina: Determinação do Calor de Dessorção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2005, São Paulo. **Anais...**São Paulo: UNICAMP,2005.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. **A new model for single-layer drying. Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503–1513, 2002.

OMOTO, E.S.; ANDRADE, C.M.G.; JORGE, R.M.M.; COUTINHO, M.R.; PARAÍSO, P.R.; JORGE, L.M.M. Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 1, p. 12-18, 2009.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer**. 1949. Thesis Dissertation (M.Sc.) – Purdue University, Indiana.

PAIVA, A. F. O. **Geração Automática de Modelos de Simulação de uma Linha de Produção na Indústria Têxtil**. Dissertação de mestrado. Engenharia industrial, Universidade de Minho. Guimarães. 2005. 239p.

RAO, M. A; RIZVI, S. S. H; **Engineering Properties of Foods**. New York: Marcel Dekker, 1986. 398p.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Solar drying of foods: Modeling and Numerical Simulation. **Solar Energy**, Elsevier Science Ltd, v. 60, n. 3, p. 151-157, 1997.

RESENDE, O; FERREIRA, L. U; ALMEIDA, D. P. Modelagem Matemática Para Descrição da Cinética de Secagem do Feijão Adzuki. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.

RESENDE, O; CORRÊA, P. C. Modelagem Matemática do Processo de Hidratação de Sementes de Feijão. **Acta Sci. Agron**, Maringá, v. 29, n. 3, p. 373-378, 2007.

RODRIGUES, D. C. Q; NUNES, S. P; JUNIOR, E. F. C; COSTA, A. O. S. Modelagem Matemática Fenomenológica E Montagem Experimental de um Reator Cstr (*Constant Flow Stirred Tank Reactor*) Contínuo. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, n.14; p. 1 9 4 2 – 2012.

SCHMIDT, F. C; CARCIOFI, B. A. M; LAURINDO, J. B. Efeito da Impregnação a Vácuo na Transferência de Massa Durante o Processo de Salga de Cortes de Peito de Frango. **Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas**, 28(2): 366-372, abr.-jun. 2008.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, v. 23, p. 1261-1265, 1980.

SILVA, A. S. A; MELO, K. S; ALVES, N. M; FERNANDES, T. K. S; FARIAS, P. A. Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.129-136, 2009.

SILVA, A. S; ALMEIDA, F. A. C; SILVA, F. L. H; DANTAS, H. J; LIMA, E. E.

Desidratação e Efeito de Pré-Tratamentos no Extrato seco do Pimentão Verde. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.27-34, 2008.

SINGH, B. P. N.; KULSHRESTHA, S. P. Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 6, p. 1538-1544, 1987.

SOUSA, F.C; SOUSA, E. P; SILVA, L. M. M; MARTINS, J. J. A; GOMES, J. P; ROCHA, A. P. T. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti. **Revista Educação Agrícola Superior**, v.26, n.2, p.108-112, 2011.

TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS, R.J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v.343, n.1-2, p.49-56, 2000.

THOMPSON, T.L; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

UNADI, A; FULLER, R. J; MACMILLAN, R. H. Prediction of the equilibrium moisture content of tomatoes. **Food Australia**, v. 50, n.4,p. 200 – 203, 1998.

VERMA, L. R. *et al.* Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, v. 28, p. 296- 301, 1985.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATAY, F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON AGRICULTURAL MECHANIZATION AND ENERGY, **7th., 1999, Adana. Proceedings...** Adana: Cukurova University, 1999. p. 565-569.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, v. 11, p. 668-672.